

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2017

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE AKLI MOHEND OULHADJ-BOUIRA**



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département : Génie Electrique

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**GUELLAL Massinissa**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : **Electrotechnique**

Option : **Réseaux électrique**

**Thème :**

**Etude de comportement du copolymère SAN/PMMA  
soumis aux décharges corona**

**Devant le jury composé de :**

GRICHE Issam	MCB	UAMOB	Président
KIRECHE Nora	MCB	UAMOB	Encadreur
BOUHDA Ali	MAA	UAMOB	Examineur
BERRAGUE Amin	MCB	UAMOB	Examineur

**Année Universitaire 2018/2019**

# *Remerciements*

*En premier lieu, nos vifs remerciements et profondes gratitude s'adressent au dieu le tout puissant qui nous a comblé des bienfaits de la science.*

*C'est pour moi un réel plaisir de remercier toutes les personnes qui nous ont inspiré, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, de leur collaboration, leur soutien et leur avis judicieux, de mener à bien ce travail.*

*Je voudrais exprimer mon remerciement ainsi que notre profonde gratitude à ma promotrice le docteur N. KIRECHE pour ses précieux conseils, son aide, ses orientations et sa disponibilité durant tout mon travail.*

*Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du jury qui ont fait l'honneur de juger notre travail.*

*En fin je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de notre projet.*

# **Sommaire**

# Sommaire

---

<b>Sommaire</b> .....	<b>I</b>
<b>Liste des Figure</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste des Tableaux</b> .....	<b>VII</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>

## *Chapitre I : Généralités sur les polymères et les décharges électriques*

I.1. Introduction .....	3
I.2. Les polymères .....	3
I.2.1. Définition d'un polymère.....	3
I.3. Classification des polymères.....	3
I.3.1. Classification selon l'origine .....	3
I.3.2. Classification des polymères selon leur structure .....	4
I.3.3. Classification suivant les propriétés .....	5
I.4. Polymérisation .....	6
I.4.1. La polymérisation par étape .....	7
I.4.2. La polymérisation en chaîne .....	7
I. 5. Techniques de polymérisation .....	8
I.5.1. Polymérisation en masse .....	8
I.5.2. Polymérisation en solution .....	8
I.5.3. Polymérisation en suspension .....	9
I.5.4. Polymérisation en émulsion .....	9
I.5.5. Polymérisation en phase gazeuse .....	9
I.6. Les décharges électriques .....	9
I.6.1. Décharges électrique dans les gaz .....	10
I.6.1.1. Mécanisme de décharge .....	10
I.6.1.2. Loi de Paschen .....	13
I.6.1.3. Facteurs d'influence .....	13
I.6.1.4. Effet couronne .....	14
I.6.2. Claquage dans les liquides .....	15
I.6.2.1. Le claquage par les bulles.....	16
I.6.2.2. Le claquage par les particules en suspension .....	16
I.6.2.1. Le claquage par streamer .....	16
I.6.3. Claquage dans les solides .....	16
I.6.3.1. Claquage thermique .....	17

## Sommaire

---

I.6.3.2. Claquage électromécanique .....	18
I.6.3.3. Claquage par streamer .....	19
I.6.3.4. Claquage par érosion .....	19
I.7. Conclusion .....	19

### *Chapitre II : Présentation du matériau étudié*

II.1. Introduction .....	20
II.2. Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) .....	20
II.2.1. Présentation de PMMA.....	20
II.2.2. Synthèse de PMMA.....	21
II.2.3. Propriétés.....	22
II.2.3.1. Propriétés physiques.....	22
II.2.3.2. Propriétés mécaniques.....	22
II.2.3.3. Propriétés électrique.....	22
II.2.3.4. Propriétés chimiques.....	23
II.2.3.5. Propriétés thermiques.....	23
II.2.3.6. Propriétés optiques.....	24
II.2.4. Relation entre la formule chimique et les propriétés de PMMA.....	24
II.2.5. Utilisation du PMMA.....	24
II.2.6. Les différents types de PMMA.....	25
II.3. Le Poly (Styrene-co-Acrylonitrile) (SAN) .....	26
II.3.1. Présentation du SAN .....	26
II.3.2. Structure du SAN.....	26
II.3.3. Synthèse de SAN.....	26
II.3.4. Propriétés du SAN .....	27
II.3.5. Les applications du styrène-acrylonitrile (SAN) .....	27
II.3.6. Caractéristiques du SAN .....	28
II.4. Matériaux composites .....	28
II.4.1. Définition .....	28
II.4.2. Classification des matériaux composites .....	29
II.4.2.1. Classement suivant la nature des constituants .....	29
II.4.2.2. Classement suivant la morphologie .....	30
II.4.3. Constituants des matériaux composites .....	31
II.4.3.1. Matrice .....	31

## Sommaire

---

II.4.3.2. Renfort .....	33
II.4.3.1. Fibres de verre .....	34
II.4.3.1. Fibres de carbone .....	35
II.4.4. Les matériaux composites structuraux .....	36
II.4.5. Avantages et inconvénients des matériaux composites .....	38
II.5. Conclusion .....	38

### *Chapitre III : Résultats expérimentaux et discussion*

III.1. But de l'étude .....	39
III.2. Conditions opératoires .....	39
III.3. Préparation des échantillons .....	39
III.4. Essai de vieillissement (Vieillissement électrique) .....	39
a. Transformateur d'essai .....	39
b. Système d'électrodes .....	40
III.5. Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier .....	41
III.5.1. Principe de fonctionnement .....	41
III.6. Analyse par spectroscopie d'impédance (RLC mètre) .....	42
III.7. Résultats expérimentaux .....	43
III.7.1. Spectres FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA non vieilli .....	43
a) 0% de SAN pour 100% de PMMA .....	44
b) 10% de SAN pour 90% de PMMA .....	45
c) 20% de SAN pour 80% de PMMA .....	45
d) 30% de SAN pour 70% de PMMA .....	46
e) Comparaison des spectres FTIR/ATR échantillons .....	46
III.7.2. Spectre FTIR/ATR du composite vieilli sous décharges électriques pendant 1 heure .....	47
a) 0% de SAN pour 100% de PMMA .....	47
b) 20% de SAN pour 80% de PMMA .....	48
c) 30% de SAN pour 70% de PMMA .....	48
d) 40% de SAN pour 60% de PMMA .....	49
e) Comparaison des spectres FTIR/ATR des différents échantillons vieillis électriquement .....	49
III.7.3. Résultats de mesure par spectroscopie diélectrique .....	50
III.7.3.1. Permittivité relative .....	50

## Sommaire

---

III.7.3.2. Facteur de pertes diélectriques .....	52
III.7.3.3. Facteur de dissipation ( $\text{tg}\delta$ ) .....	52
III.8. Interprétation des résultats .....	53
III.9. Conclusion .....	54
<b>Conclusion générale</b> .....	55
<b>Bibliographie</b> .....	56

# Liste des figures

*Liste des Figures :*

<b>Figure I.1.</b> Schéma d'une macromolécule.....	3
<b>Figure I.2.</b> Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire .....	4
<b>Figure I.3.</b> Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel, cas du carbone graphite .....	4
<b>Figure I.4.</b> Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel .....	5
<b>Figure I.5.</b> Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit p.d .....	13
<b>Figure I.6.</b> Différentes configurations de décharge couronne .....	15
<b>Figure II.1.</b> Polymérisation radicalaire du MAM .....	21
<b>Figure II.2.</b> Formule développée du PMMA .....	24
<b>Figure II.3.</b> Formule chimique du SAN .....	26
<b>Figure II.4.</b> Synthèse du styrène acrylonitrile .....	27
<b>Figure II.5.</b> Matériaux composites .....	29
<b>Figure II.6.</b> Classification des matériaux composites .....	31
<b>Figure II.7.</b> Les différents types des matrices .....	32
<b>Figure II.8.</b> Principaux matériaux de renfort .....	34
<b>Figure II.9.</b> Monocouche .....	36
<b>Figure II.10.</b> Composite stratifié .....	36
<b>Figure II.11.</b> Composite sandwich .....	37
<b>Figure III.1.</b> Equipement du laboratoire H.T .....	40
<b>Figure III.2.</b> Schéma dispositif expérimental .....	40
<b>Figure III.3.</b> Schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier .....	41
<b>Figure III.4.</b> Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	42

## Liste des figures

---

<b>Figure III.5.</b> Impédance-mètre Gw Instek LCR-817.....	43
<b>Figure III.6.</b> Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA (0g SAN / 1g PMMA) vierge ...	44
<b>Figure III.7.</b> Spectre FTIR/ATR de mélange SAN/PMMA vierge (0.1g SAN/ 0.9g PMMA) .....	45
<b>Figure III.8.</b> Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA vierge (0.2g SAN / 0.8g PMMA) .....	45
<b>Figure III.9.</b> Spectre FTIR/ATR de mélange SAN/PMMA vierge (0.3g SAN / 0.7g PMMA) .....	46
<b>Figure III.10.</b> Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA non vieilli pour différents pourcentages en SAN .....	46
<b>Figure III.11.</b> Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA vieilli électriquement (0g SAN / 1g PMMA) .....	47
<b>Figure III.12.</b> Spectre FTIR/ATR de mélange SAN/PMMA vieilli électriquement (0.2g SAN / 0.8g PMMA) .....	48
<b>Figure III.13.</b> Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA vieilli électriquement (0.3g SAN / 0.7g PMMA) .....	48
<b>Figure III.14.</b> Spectre FTIR/ATR de mélange SAN/PMMA vieilli électriquement (0.4g SAN / 0.6g PMMA) .....	49
<b>Figure III.15.</b> Spectre FTIR/ATR de mélange SAN et PMMA pour différents échantillons (0% SAN, 20% SAN, 30% SAN, 40%SAN).....	49
<b>Figure III.16.</b> Variation de la permittivité relative du SAN/PMMA vieilli sous décharge électrique en fonction de la fréquence et pour différents pourcentages en SAN .....	51
<b>Figure III.17.</b> Variation du facteur de pertes diélectriques du SAN/PMMA en fonction de la fréquence et pour différents taux de SAN .....	52
<b>Figure III.18.</b> La variation du facteur de dissipation du copolymère en fonction de la fréquence et pour différents pourcentages en SAN .....	53

# Liste des tableaux

*Liste des tableaux*

**Tableau I.1.** Techniques de polymérisation .....10

**Tableau II.1.** Propriétés électriques du PMMA .....23

**Tableau II.2.** Caractéristiques du SAN .....28

**Tableau II.3.** Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables .....33

**Tableau II.4.** Caractéristiques mécaniques des fibres de verre .....35

**Tableau II.5.** Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone .....35

**Tableau III.1.** Absorptions caractéristiques des groupements fonctionnels du composites ...47

# Introduction générale

## Introduction générale

Les polymères naturels ont été parmi les premiers matériaux utilisés par l'homme : bois et fibres végétales, cuir, tendons d'animaux, laine...etc. La notion de macromolécule n'est apparue que tardivement dans l'histoire de la chimie. Bien que présagée par Wilhelm Eduard Weber ou encore Henri Braconnot au début du XIX<sup>e</sup> siècle, de nombreux chercheurs ne voient là que des agrégats ou micelles. Il faut attendre les années 1920-1930 pour que l'idée de macromolécule soit acceptée, notamment grâce aux travaux d'Hermann Staudinger [1].

La réalisation de mélanges de polymères apparaît depuis quelques années comme un moyen d'accéder à des matériaux offrant des propriétés souvent inaccessibles par la synthèse directe d'homopolymères ou de copolymères. Depuis le début des années 1980, le nombre de mélanges de polymères commercialisés n'a cessé de croître, alors que pendant la même période, très peu de nouveaux polymères de base sont apparus. Cette croissance des mélanges repose essentiellement sur des raisons économiques. Dans son principe même, la mise au point de mélanges permet souvent de mieux approcher le rapport performance/coût nécessaire aux applications.

Les mélanges de polymères constituent actuellement un point fort de l'innovation et du développement dans le domaine des matériaux plastiques. La réalisation de mélanges à partir de polymères existants est moins coûteuse que la synthèse d'un polymère inconnu à partir d'un nouveau monomère. De plus, les procédés sont en général assez simples (extrusion, mélangeur interne, injection,...etc.), et les mélanges de polymères sont très intéressants car leurs propriétés dépendent des polymères parents, propriétés que l'on peut donc faire varier avec la composition du mélange. Il faut toutefois préciser que la réalisation de ces mélanges peut s'avérer complexe. En effet, peu de polymères sont totalement miscibles. Aujourd'hui, il existe des polymères partiellement miscibles qui peuvent fournir d'excellentes propriétés de mélanges, dues à une synergie particulière entre ces polymères [2].

L'objectif d'un matériau composite est de combiner deux ou plusieurs matériaux tout en créant une synergie entre ces différents matériaux afin qu'il en résulte un composite plus performant que chacune des composantes prises individuellement.

Le mélange polyméthacrylate de méthyle (PMMA)/Poly styrène-acrylonitrile (SAN) présente un intérêt tout à fait particulier car il présente des propriétés et des structures assez proche des deux polymères. Il est donc important de prendre au sérieux l'étude du

comportement de ces matériaux en présence de contraintes de vieillissement, particulièrement la contrainte électrique, afin de prévenir tout défaut pouvant se produire pour un matériel électrique durant son fonctionnement.

Ce manuscrit se répartit en deux parties : Une partie théorique et une partie expérimentale : Dans la partie théorique nous développerons deux chapitres ; le premier portera sur la présentation des polymères et des décharges électriques et le deuxième sera consacré à la présentation des mélanges polymériques.

La partie pratique et donc les résultats expérimentaux feront l'objet de la deuxième partie de ce travail. Elle porte sur l'élaboration du matériau composite et la préparation des échantillons, les techniques de mesure et d'analyse ainsi que les résultats obtenus et quelques interprétations.

# **Chapitre I**

## Généralités sur les polymères et les décharges électriques

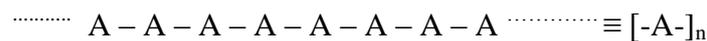
## I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux polymères qui occupent une grande place dans l'industrie. Nous donnerons quelques généralités concernant ces diélectriques avant de donner un aperçu sur les décharges électriques qui feront l'objet d'une partie de notre travail.

## I.2. Les polymères

### I.2.1. Définition d'un polymère

Un polymère est une substance composée de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules. Une macromolécule résulte de l'enchaînement par liaison covalente, d'unités constitutives (ou groupes d'atomes) appelées « mères » (provenant du grec « meros » qui signifie « partie ») [3].



**Figure I.1.** Schéma d'une macromolécule [1].

Les polymères peuvent être constitués d'un seul motif ou d'un seul monomère, on parle alors d'un homopolymère. Dans le cas où il y'a deux monomères différents on parle d'un copolymère [4].

## I.3. Classification des polymères

Les macromolécules peuvent être classées en différentes familles suivant leur structure chimique, leur mode d'élaboration ou leur propriété. La limite entre ces classifications est souvent arbitraire car les propriétés physicochimiques sont une conséquence directe de la structure chimique [5].

### I.3.1. Classification selon l'origine

Les polymères peuvent être classés comme suit :

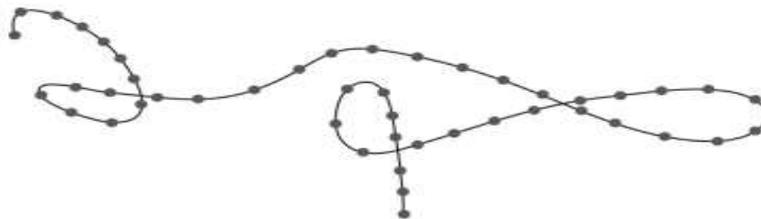
- les polymères naturels issus des règnes végétal ou animal. On peut mentionner, dans cette catégorie, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...), celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel... etc.

- les polymères artificiels obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés ; les esters cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose...) ont toujours connu une certaine importance économique.
- les polymères synthétiques, totalement issus du génie de l'Homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères, et leur variété est extrême [5].

### I.3.2. Classification des polymères selon leur structure (dimensionnalité)

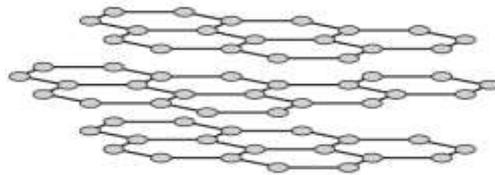
Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories :

- celle des polymères linéaires (ou monodimensionnels), pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élevé mais fini d'unités monomères ; de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles constituant chacun une unité monomère (figure I.2) ; un ensemble de chaînes polymères est constitué d'entités de longueur variable.



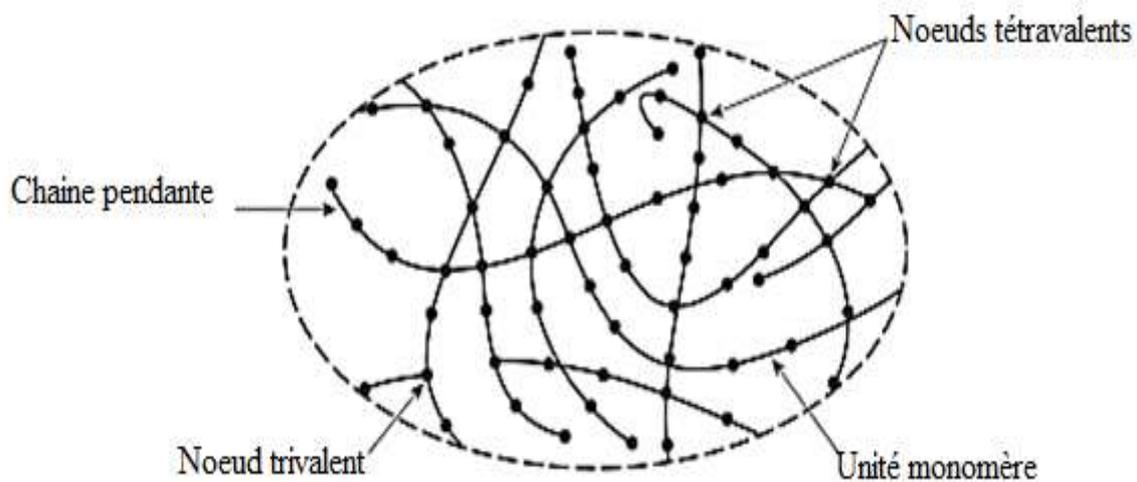
**Figure I.2.** Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire [5].

- celle des polymères bidimensionnels, dont certains peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...), qui constituent encore une curiosité de laboratoire dans le domaine des polymères synthétiques. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (figure I.3) ;



**Figure I.3.** Représentation schématisée d'un polymère bidimensionnel, cas du carbone graphite [5].

• celle des polymères tridimensionnels naturels (lignine...) résultant de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ; ils peuvent aussi être obtenus par la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule. Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système est représenté comme sur la figure I.4 [5].



**Figure I.4.** Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel [5].

### I.3.3. Classification suivant les propriétés

- polymères thermostables ;
- polymères résistants aux solvants, aux rayonnements..... ;
- polymères à propriétés mécaniques particulières ;
- polymères à propriétés électriques ou optiques particulières ;
- polymères fonctionnels appelés souvent « intelligents » (exemple : muscles artificiels à base de polymères).
- polymères biodégradable, biorésorbables (exemple : fil de suture en acide poly glycolique), biocompatibles...etc. [5]

## I.4. Polymérisation

Il existe de nombreuses substances macromoléculaires naturelles: les protéines fibreuses (des cheveux, des poils de laine, des plumes, des angles), les protéines corpusculaire telles que l'insuline, l'hémoglobine, l'ovalbumine, la cellulose substance de soutien et l'amidon substance de réserve des cellules végétales, le glycogène du foie, lignine du bois, le caoutchouc et la gutta percha, le diamant et le graphite, les silicates et l'alumina silicates parmi tant d'autre. Seul un petit nombre de ces composés macromoléculaires a pu être reproduit synthétiquement. En revanche, les chimistes organiciens ont créé d'innombrables macromolécules qui n'existent pas dans la nature, en vue d'application techniques dont certaines étaient au paravent l'apanage des macromolécules naturelles.

La synthèse chimique est un procédé fondamental permettant de préparer et / ou de fabriquer une entité chimique à partir d'autres unités chimiques plus petites et structurellement différentes. La synthèse de molécules plus complexes fait généralement intervenir plusieurs étapes réactionnelles. C'est le contraire de l'analyse qui cherche à isoler des substances pour voir ensuite de quoi elles sont faites [6].

On distingue deux types de réaction de polymérisation :

\*La polymérisation par étape pour laquelle la formation des macromolécules résulte de réaction par étapes, entre les fonctions chimiques réactives portées par les molécules monomères ou polymères. Chaque molécule peut croître par réaction avec n'importe quelle autre molécule (monomère, dimère, trimère, tétramère...etc.).

\*La polymérisation en chaîne où un centre actif initial unique (ion, radical ou complexe organométallique) provenant d'un initiateur permet la formation d'une chaîne de polymère. La chaîne polymère ne peut croître que par réaction d'un monomère avec la fonction chimique réactive située à l'extrémité de la chaîne en croissance.

Certains polymères tridimensionnels (thermodurcissables) font parfois intervenir successivement les deux types [3].

### I.4.1. La polymérisation par étape (polycondensation)

Les réactions de polycondensation sont des réactions par étapes : la macromolécule est construite suite aux réactions successives entre les groupements terminaux de molécules

monomères. La poursuite du processus jusqu'à l'obtention d'un polymère peut avoir lieu par ajouts progressifs d'autres molécules monomères ou par réaction entre d'oligomères. Une des particularités de la polycondensation est l'élimination, au cours de la réaction d'un tiers constituant. Il s'agit le plus souvent de molécules d'eau ou d'alcool.

Le nombre de groupes fonctionnels qui peuvent réagir pour donner le polycondensat est appelé fonctionnalité  $f$ . Il est bien évident qu'avec des composés monofonctionnels, on ne peut pas obtenir de polymères, on obtient un composé normal. Pour que cela soit possible il faut que les monomères aient une fonctionnalité égale ou supérieure à 2.

Lorsqu'un monomère ou un mélange de monomère possède une fonctionnalité moyenne égale à 2, on obtient des polymères linéaires thermoplastiques, fusibles et solubles dans les solvants organiques. Si la fonctionnalité moyenne est supérieure à 2, la polymérisation conduit à des structures d'abord ramifiées, puis réticulées, d'où la formation de réseaux tridimensionnels infinis. Chaque molécule de monomère de fonctionnalité supérieure à 2 génère un point de réticulation chimique reliant plusieurs chaînes de polymères entre elles [6].

## I.4.2. La polymérisation en chaîne

Une réaction en chaîne est une réaction au cours de laquelle une molécule de monomère  $M$  est additionnée sur un centre actif porté par la chaîne en cours de croissance. Si l'on appelle  $\dot{M}_n$  une chaîne comportant  $n$  unités constitutives et munie d'un centre actif, la polymérisation peut être schématisée par la réaction suivante :



Le point  $\bullet$  indique le site d'un électron non apparié (qui n'entre pas dans une liaison covalente) se trouvant sur la chaîne moléculaire et avec lequel une nouvelle muni de cet électron non apparié constitue le centre actif.

Les réactions en chaîne se font en 3 étapes :

- L'initiation ;
- La propagation (ou croissance) ;
- La terminaison ;

Selon la nature du centre actif qui provoque l'addition des unités constitutives (mères), on classe la polymérisation en chaîne dans l'un des groupes suivants :

- Polymérisation radicalaire ;
- Polymérisation ionique ;
- Polymérisation amorcée par des complexes de métaux de transition [3];

## **I.5. Techniques de polymérisation**

Quel que soit le type de polymérisation (polymérisation par étapes ou en chaînes) auquel elles se rattachent, les réactions de synthèse industrielle des polymères sont effectuées selon les techniques suivantes : polymérisation en masse, en solution, en suspension, en émulsion ou en phase gazeuse [3].

### **I.5.1. Polymérisation en masse**

La réaction chimique est effectuée à partir du monomère pur (ou de plusieurs monomères pour les réactions par étapes) auquel l'initiateur est ajouté directement. Il est donc soluble dans le monomère. Le polymère formé précipite ou non dans le milieu réactionnel, suivant la solubilité du polymère dans son propre monomère.

Le contrôle de la réaction est parfois délicat ; pour maîtriser le dégagement thermique dans le milieu réactionnel et le degré de polymérisation, on effectue la réaction en deux étapes : l'après polymérisation jusqu'à 30 à 40 % de la conversion, puis la polymérisation final dans un réacteur adapté au contrôle thermique de la réaction chimique [3].

### **I.5.2. Polymérisation en solution**

Comme son nom l'indique, la réaction se fait en présence d'un solvant du monomère, dont le rôle est de contrôler la température du milieu réactionnel et donc de maîtriser la réaction chimique. Cette méthode est utilisée pour la polymérisation de l'éthylène. Elle pose le problème du coût, de la toxicité et de l'élimination des déchets produits [3].

### **I.5.3. Polymérisation en suspension**

Elle est très utilisée pour les polymérisations radicalaires ; le monomère est insoluble et dispersé en gouttelettes par agitation mécanique dans un liquide (en général de l'eau) à la fois non solvant du monomère et polymère. Chaque gouttelette de la suspension peut être considérée comme un milieu indépendant qui est le siège de polymérisation en masse. L'initiateur de la réaction est soluble dans le monomère.

Compte tenu de cette dispersion, les échanges de chaleur entre le liquide et les parois du réacteur chimique sont bons tout au long de la polymérisation. En fin de réaction, le polymère est recueilli sous forme de « perles » qui sont lavées et séchées. Elles peuvent être utilisées directement comme poudre pour le moulage par exemple [3].

## **I.5.4. Polymérisation en émulsion**

Cette polymérisation est différente de la précédente ; elle se fait par l'intermédiaire de micelles (agrégats de molécules) et d'un agent émulsifiant, comme un savon [3].

## **I.5.5. Polymérisation en phase gazeuse**

Le monomère introduit en phase gazeuse sur un catalyseur solide finement divisé. Les particules de catalyseur sont en suspension dans le courant gazeux. Il se produit alors des réactions comme dans la polymérisation en masse.

Cette méthode utilisée pour le polypropylène et pour le polyéthylène de haute densité, a permis des réductions d'investissements intéressants [3].

## **I.6. Les décharges électriques**

Les phénomènes de décharge électrique, étudiés pourtant depuis près de deux siècles, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques. On pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et des mécanismes qui le constituent. Cependant de grandes avancées ont été faites ces dernières décennies dans l'amélioration des moyens de diagnostic des premiers instants de la décharge et donc dans l'étude des mécanismes d'initiation. Cela a permis d'accroître les connaissances sur le phénomène [7].

**Tableau I.1.** Techniques de polymérisation [3]

Techniques	Avantages	Inconvénients
En masse	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Simplicité.</li> <li>° Le polymère obtenu est pur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Difficulté d'évacuation des calories produites par la réaction.</li> </ul>
En solution	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Bonne maîtrise de la température de réaction.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Nécessite généralement l'élimination du solvant après la polymérisation.</li> <li>° Réaction assez lente.</li> <li>° Méthode peut adaptée à l'obtention de de masses moléculaires élevées.</li> </ul>
En suspension	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Bonne maîtrise de la température de réaction.</li> <li>° Généralement la réaction a lieu en milieu aqueux, ce qui évite l'emploi d'un solvant organique coûteux.</li> <li>° le polymère est produit sous forme de granulés faciles à isoler.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Réaction assez lente.</li> <li>° Méthode peut adaptée à l'obtention de de masses moléculaires élevées.</li> <li>° Le polymère obtenu contient des traces d'agent émulsifiant et du diluant (eau) dont il est difficile de le débarrasser.</li> </ul>
En émulsion	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Réaction rapide.</li> <li>° Masses moléculaires élevées.</li> <li>° Bonne maîtrise de la température de réaction.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Le polymère est difficile à séparer du savon</li> </ul>
En phase gazeuse	<ul style="list-style-type: none"> <li>° Baisse des coûts.</li> </ul>	/

## I.6.1. Décharge électrique dans les gaz

### I.6.1.1. Mécanisme de décharge

#### a. Réactions primaires

Comme les électrons sont les premiers à emmagasiner l'énergie du champ électrique, les réactions primaires sont les collisions inélastiques entre les électrons et les neutres à l'état fondamental. Parmi les nombreuses possibilités des réactions, on distingue :

✓ Ionisation



✓ Ionisation dissociative



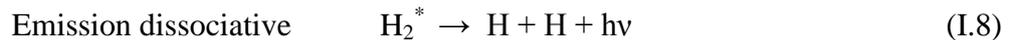
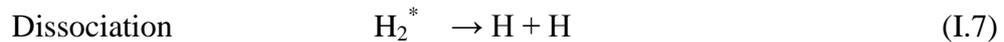
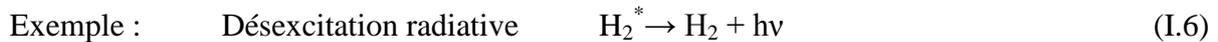
✓ Excitation



✓ Attachement dissociatif



Ces collisions inélastiques peuvent être éventuellement suivies de dissociation et/ou d'émission d'un photon.



Toutes ces collisions inélastiques primaires ont un seuil en énergie, les électrons doivent avoir une énergie supérieure à ce seuil pour donner lieu à la réaction.

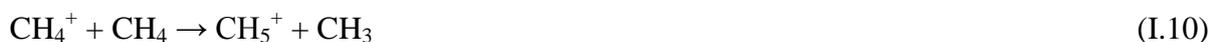
Après la collision, l'électron perd l'énergie seuil. Pour entretenir la décharge électrique, ces pertes d'énergie sont compensées par l'action du champ électrique qui transfère en permanence de l'énergie aux électrons [8].

## b. Réactions secondaires

Les réactions secondaires sont plus diversifiées et ont une échelle de temps plus longue que les réactions électroniques primaires. Elles comprennent toutes les réactions entre une espèce instable issue plus ou moins directement d'une réaction primaire et le gaz. On en donne ci-dessous quelques exemples [8] :

✓ Réaction Ion – molécule

Exemple :



# Chapitre I : Généralités sur les polymères et les décharges électriques

---



✓ Réaction Radical – molécule

Exemple :



✓ Détachement collisionne associatif

Exemple :



✓ Recombinaison dissociative

Exemple :



✓ Détachement par impact électronique

Exemple :



✓ Réactions entre les radicaux

Exemple :



✓ Collision super-élastique

Exemple :



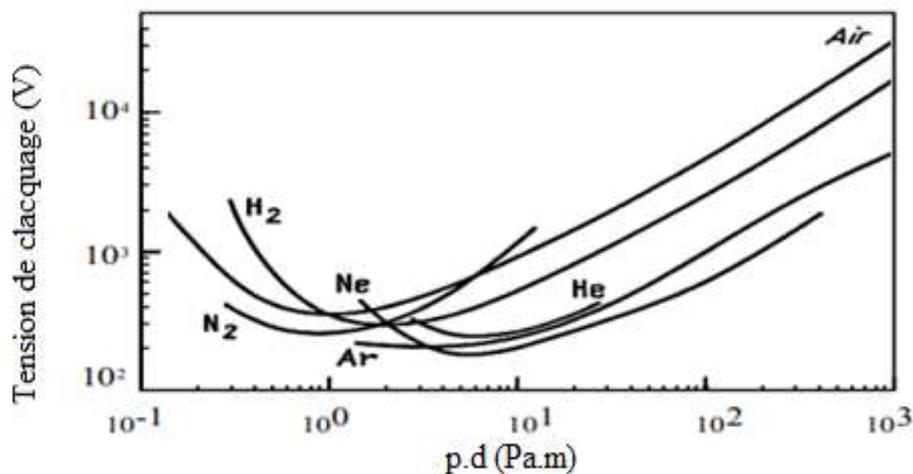
✓ Excitation d'un radical

Exemple :



## I.6.1.2. Loi de Paschen

La tension d'alimentation minimale pour déclencher la décharge est appelée tension de claquage. Il existe une relation qui lie la valeur de cette tension de claquage à la pression du gaz et de la distance inter-électrode : la loi de Paschen. Cette loi est habituellement représentée par la courbe caractéristique  $U_c = f(p.d)$  (figure I.7), où  $p$  est la pression et  $d$  la distance inter électrode, et dépend de la nature du gaz introduit.



**Figure I.5.** Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit  $p.d$  [9].

Nous pouvons constater que pour un gaz à pression atmosphérique, les courbes passent par un minimum pour une distance inter-électrode d'environ 10  $\mu\text{m}$  ( $p.d = 0,5$  à 5 environ). Cela signifie que, pour la production de décharges à pression atmosphérique dans des conditions d'utilisation usuelles ( $d \geq 1$  mm), la tension de claquage est une fonction croissante de la distance inter-électrode [9].

## I.6.1.3. Facteurs d'influence

Les constantes intervenantes dans la loi de Paschen dépendent principalement :

- ✓ de la forme des électrodes (distribution du champ, facteur de Schweiger) ;
- ✓ des conditions atmosphériques (correction de pression de température et d'humidité) ;
- ✓ de la nature de la tension appliquée (continue, fréquence de la tension alternative, temps de montée et de descente des impulsions) ;

- ✓ de la polarité de la tension et de la polarisation de l'intervalle (pour les intervalles dissymétriques).

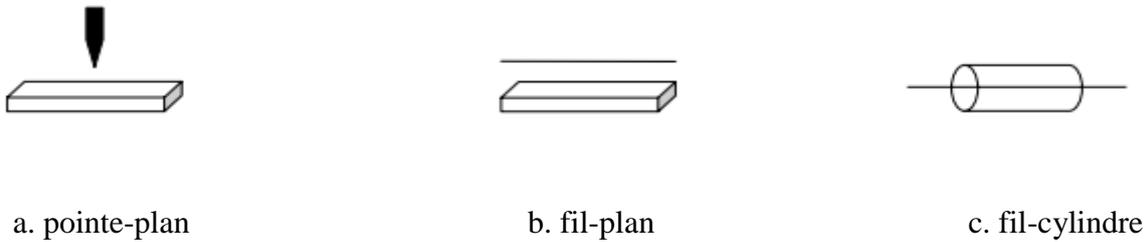
Par ailleurs, on constate que les conditions dans lesquelles se déroule le test de claquage influencent également le résultat. Les paramètres qui jouent un rôle sont :

- ✓ Le conditionnement. Lorsqu'on répète à plusieurs reprises une expérience de claquage, on constate souvent que la tension nécessaire pour provoquer la rupture diélectrique augmente au fur et à mesure des essais. On l'explique par le fait que les premières décharges « nettoient » les électrodes, c'est-à-dire détruisent les poussières ou les impuretés qui se trouvaient initialement à la surface.
- ✓ La vitesse d'accroissement de la tension. L'expérience montre que la tension à laquelle le claquage survient est d'autant plus élevée que sa vitesse d'accroissement est plus grande. Cela peut s'expliquer par le temps de relaxation de la charge d'espace qui se forme entre les électrodes.
- ✓ La cadence de répétition des essais. L'expérience montre également que la tension à laquelle le claquage survient est plus basse lorsque les essais sont répétés à une cadence plus rapide. La raison en est qu'après un premier claquage, des ions subsistent dans l'intervalle inter électrode pendant un certain temps, favorisant le claquage suivant [8].

## I.6.1.4. Effet couronne

### a. Définition

On appelle "décharges couronne" l'ensemble des phénomènes de décharge autonome qui précède le claquage. Les décharges couronne apparaissent surtout à pression élevée (>20mmHg) dans un champ électrique non-uniforme. Prenons l'exemple d'un conducteur filiforme placé suivant l'axe d'un cylindre relié à la masse. Si l'on applique un potentiel élevé au conducteur central, le champ électrique est maximal à la surface du conducteur. Il décroît ensuite très rapidement avec la distance radiale. Lorsque le champ appliqué à la surface du conducteur dépasse une valeur de seuil, l'ionisation apparaît au voisinage immédiat du conducteur. Dans l'obscurité, la décharge partielle autour du conducteur est visible à l'œil nu sous forme de couronnes lumineuses. C'est la raison pour laquelle le phénomène est appelé "effet couronne" [10].



**Figure I.6.** Différentes configurations de décharge couronne [11].

### b. Propriété électrique

La tension nécessaire pour démarrer un effet couronne peut être calculée avec la loi de Peek (1929), formulée à partir de données empiriques. Des articles subséquents fournissent des formules plus précises [12].

Le courant entraîné par une décharge couronne peut se déterminer en intégrant la densité de courant à la surface du conducteur.

La puissance dissipée est le produit de ce courant et de la tension entre les deux électrodes.

### c. Applications des décharges couronne

Les décharges couronne ont de nombreuses applications commerciales et industrielles :

- Production d'ozone
- Filtrage de particules contenues dans l'air (système d'air climatisé)
- Destruction de particules organiques contenues dans l'atmosphère : pesticide, solvant...
- Traitement de surface de certains polymères
- Photocopieur, Imprimante laser
- Laser à azote
- Séparation électrostatique (de matières conductrices et non-conductrices)
- Refroidissement de certains composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud) [12].

### I.6.2. Claquage dans les liquides

Il existe principalement 3 théories pour expliquer le mécanisme de claquage dans les liquides.

## **I.6.2.1. Le claquage par les bulles**

Divers mécanismes peuvent conduire à la formation de bulles dans un liquide isolant soumis à un champ électrique élevé. Le claquage serait alors initié au niveau des bulles. La formation de bulles peut s'expliquer par :

1. l'apparition de poches de gaz se formant au voisinage des électrodes ;
2. la répulsion électrostatique de charges présentes dans le liquide ;
3. la dissociation des molécules du liquide avec libération de sous-produits gazeux sous l'effet du bombardement par des électrons ou des ions ;
4. vaporisation due à des décharges locales (impuretés, aspérité des électrodes...). Il se crée alors des colonnes de bulles dans lesquelles se produit finalement le claquage [8].

## **I.6.2.2. Le claquage par les particules en suspension**

Les particules en suspension peuvent constituer des ponts entre les électrodes, sous l'effet de forces électrostatiques ; ou induire des mini-décharges par un effet de concentration des lignes de champ électrique au voisinage de la particule. L'importance des particules en suspension dans le liquide a été reconnue depuis longtemps : on observe en particulier que, sous l'effet d'un champ électrique intense, les particules (qu'elles soient isolantes ou conductrices) se regroupent et forment une colonne sur l'une des électrodes, réduisant d'autant.

Dans l'espace inter-électrode, l'effet en est généralement assez désastreux en ce qui concerne la tension disruptive qui chute fortement.

## **I.6.2.3. Le claquage par streamer**

Comme dans les gaz, les électrons suffisamment accélérés peuvent ioniser des molécules sur leur passage et déclencher une avalanche [8].

## **I.6.3. Claquage dans les solides**

Différentes théories ont été imaginées pour expliquer le claquage diélectrique dans les solides.

## I.6.3.1. Claquage thermique

Lorsqu'un courant traverse un matériau isolant, la conductivité augmente avec la température. Par suite la température s'élève, le courant augmente à son tour et ainsi de suite. Si la chaleur accumulée ne s'évacue pas suffisamment vite, le processus peut conduire à un emballement thermique, c'est ce qu'on appelle le claquage thermique.

Le champ électrique de claquage qui permet d'amener la température  $T$  d'un matériau jusqu'à sa valeur critique  $T_{mc}$  se calcule en résolvant l'équation fondamentale traduisant le bilan énergétique (équation 1) :

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(K \text{ grad } T) = \sigma G^2 \quad (\text{I. 19})$$

Avec :

$C_v$ : Chaleur spécifique

$K$ : Conductivité thermique

$\sigma$ : Conductivité électrique

$G$ : champ électrique appliqué

$t$ : temps d'application du champ électrique.

Les termes  $\sigma G^2$  et  $C_v \frac{\partial T}{\partial t}$  représentent respectivement l'apport d'énergie d'origine électrique et l'élévation de la température de l'échantillon en fonction du temps. La dissipation thermique de l'échantillon se traduit par le terme  $\text{div}(K \text{ grad } T)$ . On suppose qu'il n'y a pas d'accumulation de charges c'est à dire  $\text{div}(\rho G) = 0$ . La résolution de cette équation donne la température en fonction du temps de chaque point l'échantillon. Dans le cas d'un échantillon de grande surface, la tension critique de claquage est donnée par la relation suivante [13]:

$$V_{0c} \approx \left( \frac{8K_0 k T_0^2}{\sigma_0 W} \right)^{0.5} \exp\left(\frac{W}{2kT_0}\right) \quad (\text{I. 20})$$

Avec :  $W \gg kT$  et  $T_{mc} > T_0$

Où :

$W$ : énergie d'activation

k: constante de Boltzmann

$\sigma_0$  : Constante

$T_0$ : Température ambiante

$K_0$ : Conductivité thermique.

## I.6.3.2. Claquage électromécanique

Stark et Garton ont introduit l'hypothèse d'un claquage électromécanique dans le polyéthylène. La pression qui s'exerce sur le diélectrique lorsque les électrodes sont fixes, ou force de compression de Maxwell est de la forme :

$$P = \frac{1}{2} \epsilon E_{\max}^2 \quad (\text{I. 21})$$

Où:

$\epsilon$ : Permittivité du diélectrique

$E_{\max}$ : Valeur maximale du champ appliqué.

L'application d'une tension  $V$  pour un échantillon d'épaisseur  $d_0$  provoque l'apparition de forces de compression sur le matériau dues à l'attraction mutuelle des deux électrodes. Cette contrainte mécanique provoque une diminution de l'épaisseur ( $d < d_0$ ). A l'équilibre, la compression d'origine électrique est compensée par la force plastique. La valeur critique de l'épaisseur est donnée par l'expression:

$$d_c = d_0 e^{-0.5} \quad (\text{I. 22})$$

Le champ réel de claquage est :

$$G_c = \frac{V}{d_c} = \left( \frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{1/2} \quad (\text{I. 23})$$

Où:

$Y$ : module de Young du matériau

$\epsilon_r$ : Permittivité relative du diélectrique

$\epsilon_0$ : Permittivité du vide.

Le champ apparent expérimental vaut  $V/d_0$ , soit:

$$G_{\text{app}} = \frac{V}{d_0} = \frac{G_c d_c}{d_0} = 0.606 \left( \frac{Y}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I. 24})$$

$$G_{\text{app}} = 0.606 G_c \quad (\text{I. 25})$$

Cette relation n'est valable que dans la zone élastique (zone de réversibilité) du matériau et d'une manière générale, le claquage se produit dans la zone plastique (zone de non réversibilité). Pour cela, on tient compte non seulement du module d'Young mais aussi du seuil de plasticité du matériau [13].

### **I.6.3.3. Claquage par érosion**

Ce mécanisme de claquage intervient à long terme : il est dû à l'agrandissement progressif des cavités dans lesquelles se produisent des décharges partielles, au cours d'une mise en œuvre normale de l'isolant [8].

## **I.7. Conclusion**

La première partie de ce chapitre présente un survol sur les polymères et les différents mécanismes de leur production.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique portant sur le phénomène des décharges électriques à travers laquelle nous avons exposé les différents mécanismes de la décharge électrique et le phénomène de claquage.

# **Chapitre II**

Présentation du matériau  
étudié

## II.1. Introduction

Parmi les isolants les plus utilisés de nos jours, les matériaux composites. L'accent est mis sur la nature des matériaux qui composent ce copolymère. Dans notre travail, nous avons opté pour le mélange de deux polymères très connus dans le domaine de l'électrotechnique : le PMMA et le SAN. C'est ainsi que nous avons pensé à donner quelques généralités sur ces deux matériaux dans ce chapitre avant d'entamer une étude bibliographique sur les matériaux composites à la fin de cette partie de travail.

## II.2. Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA)

### II.2.1. Présentation du PMMA

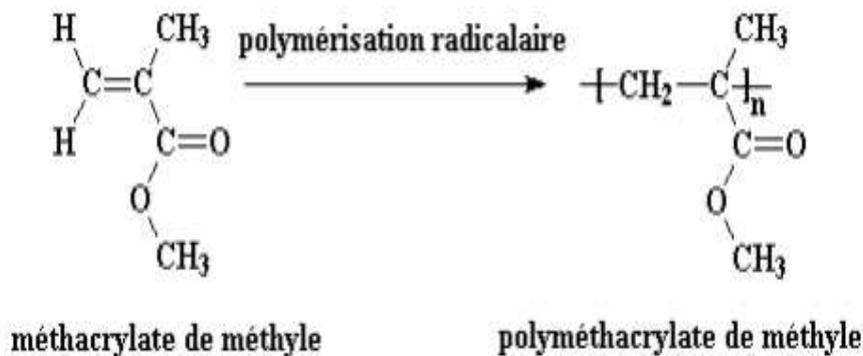
Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), est issu de la polymérisation du méthacrylate de méthyle (MMA) [14,15]. L'acide méthacrylique, dérivé de l'acide acrylique découvert en 1843, a été formulé en 1865. Les chimistes allemands Fittig et Paul ont découvert en 1877 le procédé de polymérisation qui transforme le méthacrylate de méthyle en polyméthacrylate de méthyle. En 1933, le chimiste allemand Otto Röhm a breveté la marque Plexiglas et lancé la première production commerciale. Simultanément, ICI lança le PMMA sous forme de feuilles coulées. Au cours de la Seconde Guerre mondiale, le verre acrylique a été utilisé pour les périscopes de sous-marins, des pare-brise, des auvents, et tourelles pour les avions.

La polymérisation du PMMA se fait selon trois procédés classiques : par coulée, en suspension et en masse. La polymérisation par coulée permet d'obtenir des plaques de forte épaisseur, à parfait état de surface, entre deux plaques de verre. Les deux autres procédés, suspension et masse, permettent d'obtenir des granulés et des plaques extrudées. Le PMMA est un plastique essentiellement amorphe, son monomère, sans adjonction d'inhibiteurs, est très instable. L'action de la chaleur, de l'oxygène, des rayons UV ou l'addition d'un peroxyde suffisent pour provoquer la polymérisation. Cette propriété est ainsi utilisée pour la coulée de plaques, entre autres [15].

Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) appelé Plexiglas par la compagnie chimique RÖHN and HAAS est un polymère thermoplastique. Il est obtenu par polymérisation radicalaire. La cohésion est assurée par des enchevêtrements de chaînes ainsi que des liaisons faibles de types hydrogène et VAN DER WAALS [16].

### II.2.2. Synthèse de PMMA

Le méthacrylate de méthyle (MAM) se polymérise par polymérisation radicalaire en chaîne (Figure II.1) ou par une polymérisation anionique.



**Figure II.1.** Polymérisation radicalaire du MAM [14].

Il se polymérise à l'aide de radicaux qui amorcent une polymérisation radicalaire en chaîne. Également possible, la polymérisation anionique, à l'aide d'amorceurs nucléophiles de types carbanions.

La polymérisation anionique doit se faire en milieu anhydre ; en effet, dans ce type de réaction, il n'y a pas d'étapes de terminaison, la chaîne en construction continue à absorber des monomères jusqu'à épuisement du stock. C'est seulement à ce moment-là que l'on peut précipiter le PMMA en lui fournissant un proton (à l'aide d'un acide par exemple), ou y ajouter un monomère différent, dans le but de former des copolymères à blocs (de type AAABBB).

Le milieu anhydre sert donc à éviter que les chaînes de PMMA ne se terminent trop tôt à cause d'un proton, ce qui ferait baisser leur degré de polymérisation (nombre de monomères présents dans la chaîne). C'est aussi pour cette raison que la réaction se fait sous atmosphère inerte (argon, azote).

Le solvant et l'amorceur utilisés définiront la tacticité du polymère et donc ses propriétés physiques.

Il existe trois principaux procédés de polymérisation :

- par coulée entre deux plaques de verre
- en suspension

- en masse

Les deux derniers procédés sont principalement utilisés pour la production de plaques extrudées et la fabrication de granules.

Le PMMA peut être moulé par compression, injection, coulée, soufflage et extrusion. Les feuilles et plaques de PMMA sont facilement thermoformées. Le PMMA peut être également soudé par ultrasons et se métallise facilement [15].

### **II.2.3. Propriétés**

#### **II.2.3.1. Propriétés physiques**

Le PMMA est connu pour ses propriétés optiques exceptionnelles. Ce polymère amorphe est d'une transparence remarquable (92% de transmission lumineuse) dans le visible, 380 à 780 nm, son indice de réfraction est de 1,491 (pour  $\lambda = 587,6$  nm hélium) ce qui en fait un matériau très utilisé dans le domaine optique. La température de ramollissement du PMMA est de 130 à 140 °C.

Le PMMA est hygroscopique et dans des conditions extrêmes, l'eau absorbée agira comme un plastifiant et modifiera les propriétés du matériau [14].

#### **II.2.3.2. Propriétés mécaniques**

Le PMMA est un polymère amorphe dont la température de transition vitreuse est de 110 - 135 °C. A température ambiante, il est dur, rigide, cassant avec un faible allongement.

Le thermoformage n'est possible que si le module de Yong est suffisamment faible pour permettre une déformation aisée sous efforts modérés. Au-dessus de la température de transition vitreuse, le module d'un polymère amorphe chute considérablement et demeure pratiquement constant [14].

#### **II.2.3.3. Propriétés électrique**

La température de transition vitreuse ( $T_g$ ) du PMMA pur est de 85.5 °C [17].

Les caractéristiques électriques du PMMA sont données par le tableau II.1.

**Tableau II.1.** Propriétés électriques du PMMA [17]

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

#### II.2.3.4. Propriétés chimiques

1. Le PMMA est insipide et sans odeur et reconnu pour ses qualités alimentaires.
2. Jusqu'à 60 °C, le PMMA résiste assez bien aux acides organiques et minéraux dilués ainsi qu'aux solutions alcalines diluées mais il est attaqué par les produits courants comme : l'acétone, l'alcool, le pétrole, le phénol, le carburant d'avion, le méthanol à 30, ....etc.
3. Le PMMA peut être exposé à l'extérieur sans problème.
4. Les résistances aux intempéries sont très bonnes [16].

#### II.2.3.5. Propriétés thermiques

1. Le PMMA est combustible et brûle lentement sans fumée excessive.
2. La température maximale d'utilisation est faible, inférieure à 80 °C.
3. La température de fusion est de 110 à 240 °C.
4. La température de transition vitreuse est 110 à 135 °C.
5. La température de résistance continue est de 85 °C.
6. La conductivité thermique : 0,19 W/m.K [T].
7. Le coefficient de dilatation thermique :  $0,7 - 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  [16].

### II.2.3.6. Propriétés optiques

1. L'angle de réflexion totale sur une surface intérieure est de 41 à 42 °C, ce qui permet la réalisation de «conducteurs» de lumière, fibres optiques.
2. Son indice de réfraction (pour  $\lambda = 587,7$  nm hélium) est de 1,491 ce qui en fait un matériau adapté à la fabrication optique.
3. La transparence : 92 % de lumière transmise pour une épaisseur de 3 mm [16].

### II.2.4. Relation entre la formule chimique et les propriétés du PMMA

Le PMMA est un thermoplaste amorphe et transparent clair doué de toute une série de propriétés caractéristiques. C'est un matériau inodore aux dimensions stables et à grande dureté de surface, ce qui garantit une excellente résistance à l'abrasion. Vu ses remarquables propriétés optiques, le verre acrylique est un "Ersatz" idéal du verre silicate et il sera utilisé de préférence dans les cas des colorations transparentes ou opaques, un poids peu élevé, des possibilités illimités de façonnage dont une grande résistance à la rupture sont exigées.

Le PMMA résiste très bien aux intempéries et aux UV, mais n'entre pas en ligne de compte comme matériau de coussinet [14]. Sa formule chimique est donnée par la figure II.2.

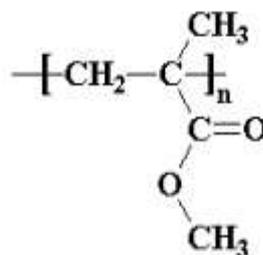


Figure II.2. Formule développée du PMMA

### II.2.5. Utilisation du PMMA

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

Les applications industrielles : Cadres, hublots et capots de machines à laver, chaînes Hi-Fi, 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, escaliers, mobiliers hospitaliers, couveuses.

Le sanitaire : Baignoires, bacs à douche, lavabos (pièces thermoformées et colorées).

Le bâtiment concernant tout particulièrement

1. Les parties transparentes des immeubles modernes (garde-corps de balcon, pare-soleil, brise vent).
2. L'éclairage : dômes, coupes, voûtes, survitrage.
3. La réalisation de toitures, vérandas, parois de locaux industriels, pour lesquels on utilise le PMMA extrudé.

Les loisirs : Articles de publicité : enseignes, présentoirs, affiches ...etc.

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 épiscopopes . .

L'électrotechnique : Pour des applications telles que les condensateurs, enrobage de composants, supports divers.

La médecine : Le PMMA a une bonne compatibilité avec le tissu humain :

1. Chirurgies cosmétiques pour réduire de manière permanente des rides.
2. Objectifs intraoculaires de rechange dans l'œil : verre de contact, lentilles.

L'aéronautique : Il est utilisé dans les verrières, les hublots ainsi que les capots d'avions [16].

### **II.2.6. Les différents types de PMMA**

Le PMMA existe sous 2 formes principales qui sont fonction du mode de fabrication : coulé ou extrudé.

1. Plaques acryliques coulées (PMMA GS ou CN) : Le PMMA coulé, grâce à une excellente tenue aux rayons U.V., garde indéfiniment ses propriétés mécaniques et de transparence. Le PMMA incolore a une transmission lumineuse supérieure à celle du verre et égale à celle du cristal. Les plaques coulées ne s'opacifient pas et gardent leur aspect initial. Le PMMA coulé est disponible dans une grande variété d'épaisseurs.

2. Plaques acryliques extrudés (PMMA XT) : Les plaques extrudées sont produites à partir de polyméthacrylate de méthyle. Elles sont extrudées et calandrées, ce qui leur confère une tolérance d'épaisseur excellente et constante [15].

### II.3. Le poly (Styrene-co-Acrylonitrile) (SAN)

#### II.3.1. Présentation du SAN

Le styrène-acrylonitrile (SAN) est issu du styrène et de l'acrylonitrile (AN). Ce matériau thermoplastique semi-technique fait partie de la famille des styréniques, comme le polystyrène homopolymère (PS « cristal »), le « PS-choc » ou copolymère « bloc » styrène-butadiène (SB). Il est très rigide et plus dur que le PS. La première production du SAN date des années 1950. Les principaux producteurs sont Styron, Styrolution et Polimeri Europe [2].

#### II.3.2. Structure du SAN

La formule moléculaire du SAN suit le schéma de la figure II-3

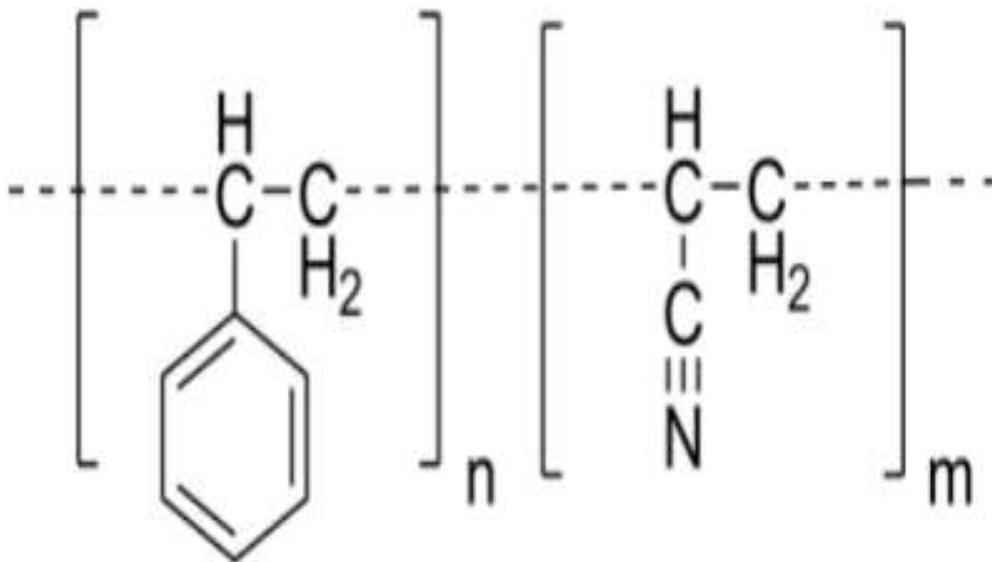


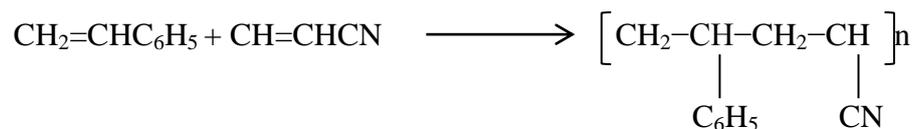
Figure II.3. Formule chimique du SAN [2].

#### II.3.3. Synthèse du SAN

Le Styrène acrylonitrile (SAN) est un polymère préparé à partir des monomères de styrène et d'acrylonitrile. Ce polymère peut être produit par la polymérisation en émulsion, en masse ou en solution. Le styrène acrylonitrile contient généralement entre 20 et 30 % d'acrylonitrile.

La teneur d'acrylonitrile dans la composition du SAN influence ses propriétés finales telles la résistance à la traction, l'élongation, la température ainsi que la chaleur de déformation. Ces propriétés augmentent avec l'augmentation de la quantité d'acrylonitrile dans le copolymère. Le SAN est un matériau linéaire, amorphe avec une bonne résistance thermique, supérieure à celle du polystyrène pur. Le SAN est un polymère transparent mais qui peut avoir une couleur jaune à mesure que le contenu en acrylonitrile augmente [2].

La synthèse du copolymère de styrène acrylonitrile suit le schéma de la figure II.4.



**Figure II.4.** synthèse du styrène acrylonitrile [2].

#### II.3.4. Propriétés du (SAN)

Parmi les principales propriétés du styrène-acrylonitrile (SAN), on trouve :

- une haute transparence
- une bonne tenue chimique et thermique.
- une rigidité et une dureté de surface élevées et une bonne résistance aux rayures.

Le SAN est une matière transparente très semblable au polystyrène (PS) mais qui présente des caractéristiques complémentaire de résistance aux rayures qui le rend adapté aux présentoirs des points de vente et aux articles cosmétiques.

Le SAN est également disponible dans différentes variantes de teinte bleue et des grades stables aux UV sont également disponibles, puisque le SAN standard n'est pas approprié pour un usage à l'extérieur [2].

#### II.3.5. Les applications du styrène-acrylonitrile (SAN)

Les applications typiques du SAN sont les suivantes :

- pièces de réfrigérateurs
- séparateurs d'étagères
- protections de lampes
- conditionnements de produits cosmétiques
- ustensiles de cuisine [2].

### II.3.6. Caractéristiques du SAN

Les principales caractéristiques du SAN sont regroupées dans le tableau II.2.

**Tableau II.2.** Caractéristiques du SAN [16].

		SAN
Permittivité relative $\epsilon_r$	50 ou 60 Hz	3
	1 KHz	3
	1 MHz	2.4 à 2.6
Angle de pertes $\text{tg}\delta$	50 ou 60 Hz	$1.10^{-4}$ à $5.10^{-4}$
	1 KHz	0.01
	1 MHz	$4.10^{-4}$ à $1.10^{-3}$
Rigidité diélectrique		25 à 34 kV/mm
Résistivité transversale		$10^{16}$ $\Omega$ .cm
Température de fusion		220 à 270 °C
Température de transition vitreuse $\text{tg}$		110 °C
Température de ramollissement		110 °C
Absorption d'eau %		0.25

## II.4. Matériaux composites

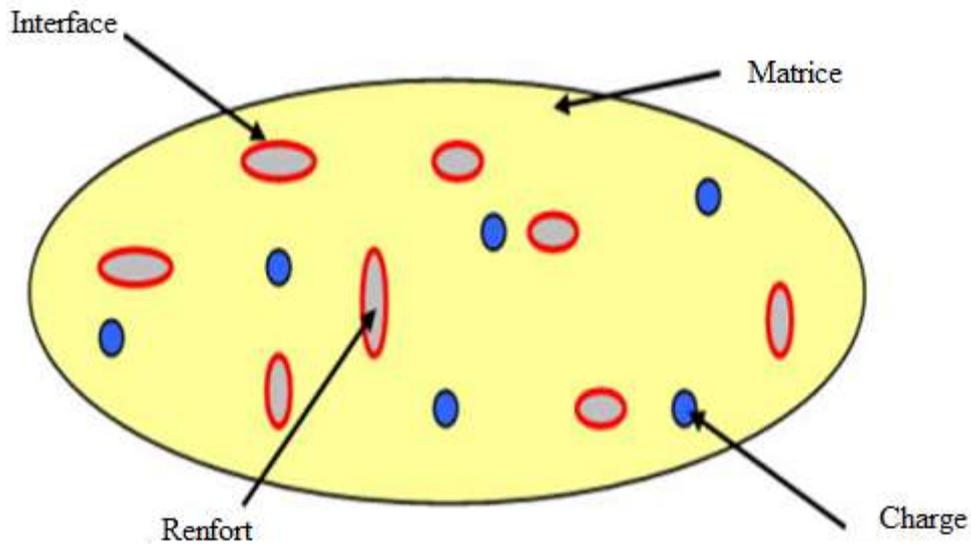
### II.4.1. Définition

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, avec assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice.

La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de

production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite.

La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons [18].



**Figure II.5.** matériaux composites [19]

## II.4.2. Classification des matériaux composites

La classification des composites peut être effectuée selon la forme des composants ou suivant leurs natures [20,21].

### II.4.2.1. Classement suivant la nature des constituants

➤ Composites à matrice organique : (résine, charges) avec :

- Fibres minérales : verre, carbone...etc.
- Fibres organiques : Kevlar, polyamides...etc.
- Fibres métalliques : bore, aluminium...etc.

➤ Composites à matrice métallique : (alliages légers et ultra-légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC) ;
- Des fibres métalliques : bore ;
- Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BSiC).

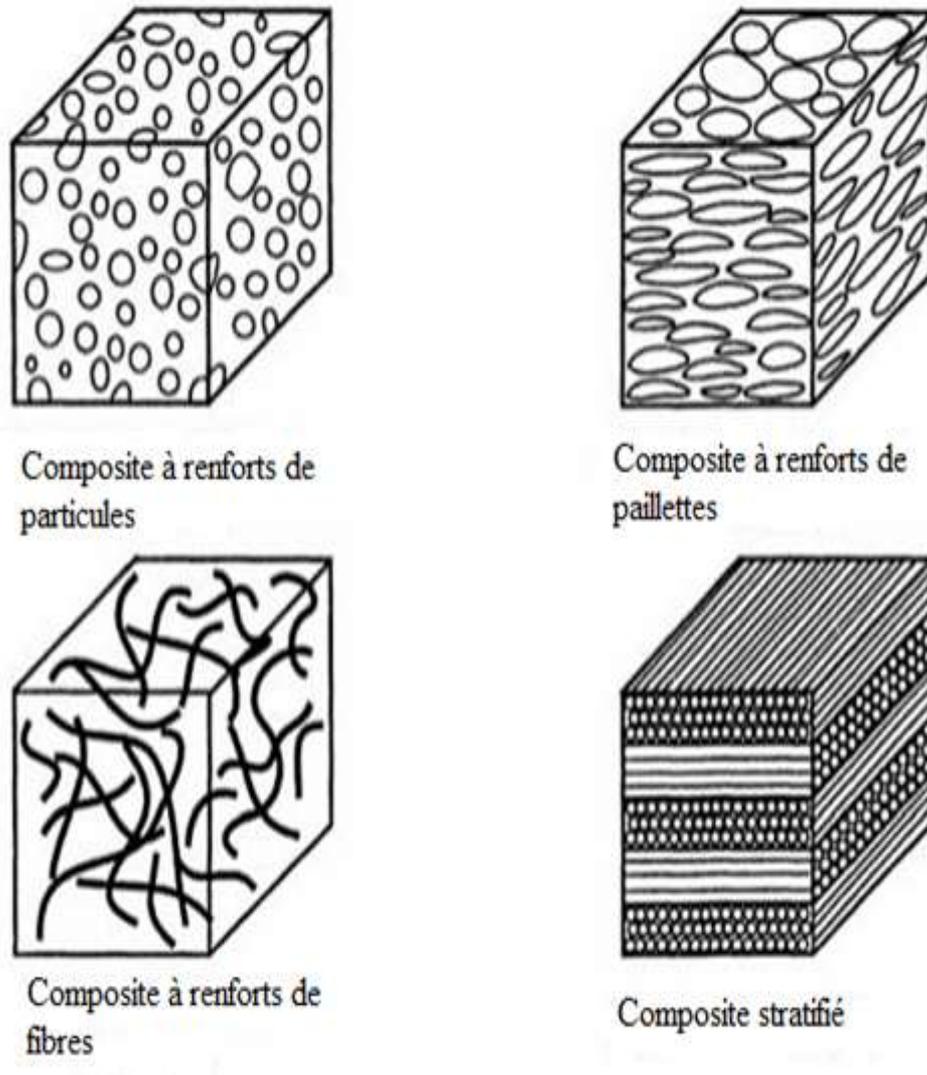
➤ Composites à matrice minérale (céramique), avec :

- Des fibres métalliques : bore ;
- Des particules métalliques : cermets ;
- Des particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires.

#### **II.4.2.2. Classement suivant la morphologie**

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories comme suit (Fig.II.6) :

- Composites à renforts de particules : Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.
- Composites à renforts de paillettes : Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.
- Composites à renforts de fibres : Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).
- Composites stratifiés : Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.



**Figure.II.6.** Classification des matériaux composites [21].

### II.4.3. Constituants des matériaux composites

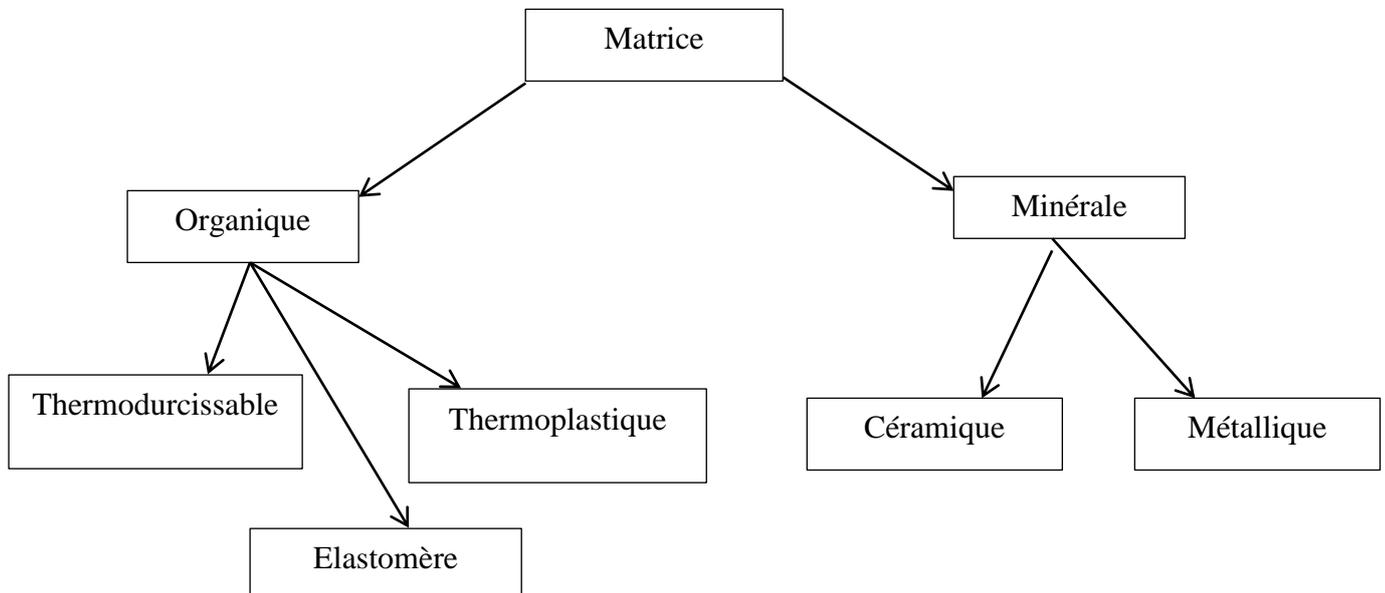
Un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux de natures différentes (matrice, renfort).

#### II.4.3.1. Matrice

La matrice est la phase continue dont les fonctions sont [22] :

- De réaliser la liaison entre les renforts de manière à répartir les sollicitations et ainsi de prévenir les ruptures catastrophiques.
- D'assurer la protection de ces renforts vis-à-vis des agents agressifs.
- De donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques.

Les matrices utilisées dans les matériaux composites se divisent en deux grandes familles : les matrices organiques et les matrices inorganiques (minérales). La Figure.II.7 présente les différents types de matrice.



**Figure.II.7.** Les différents types des matrices [22]

Les matrices les plus employées sont les matrices thermodurcissables et thermoplastiques.

a) Matrices thermoplastiques

Les matrices ou les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux [23].

Avantages	Inconvénients
-Mise en œuvre rapide -Possibilité de transformation -Meilleure ténacité	-Une faible tenue en température -Peu de résistance aux solvants

b) Matrices thermodurcissables

Ces résines possèdent la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à l'état solide [24] ; elles durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation » ou « cycle de réticulation ».

Les résines thermodurcissables principalement utilisées dans la fabrication des matériaux composites sont :

- Résine polyester : présente un bon accrochage sur les fibres, un prix bas, mais un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.
- Résine phénolique : ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de tenue au feu.
- Résine polyamide : d'un emploi relativement difficile et cher, elle a l'avantage de garder des bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de -100 à +260°C).

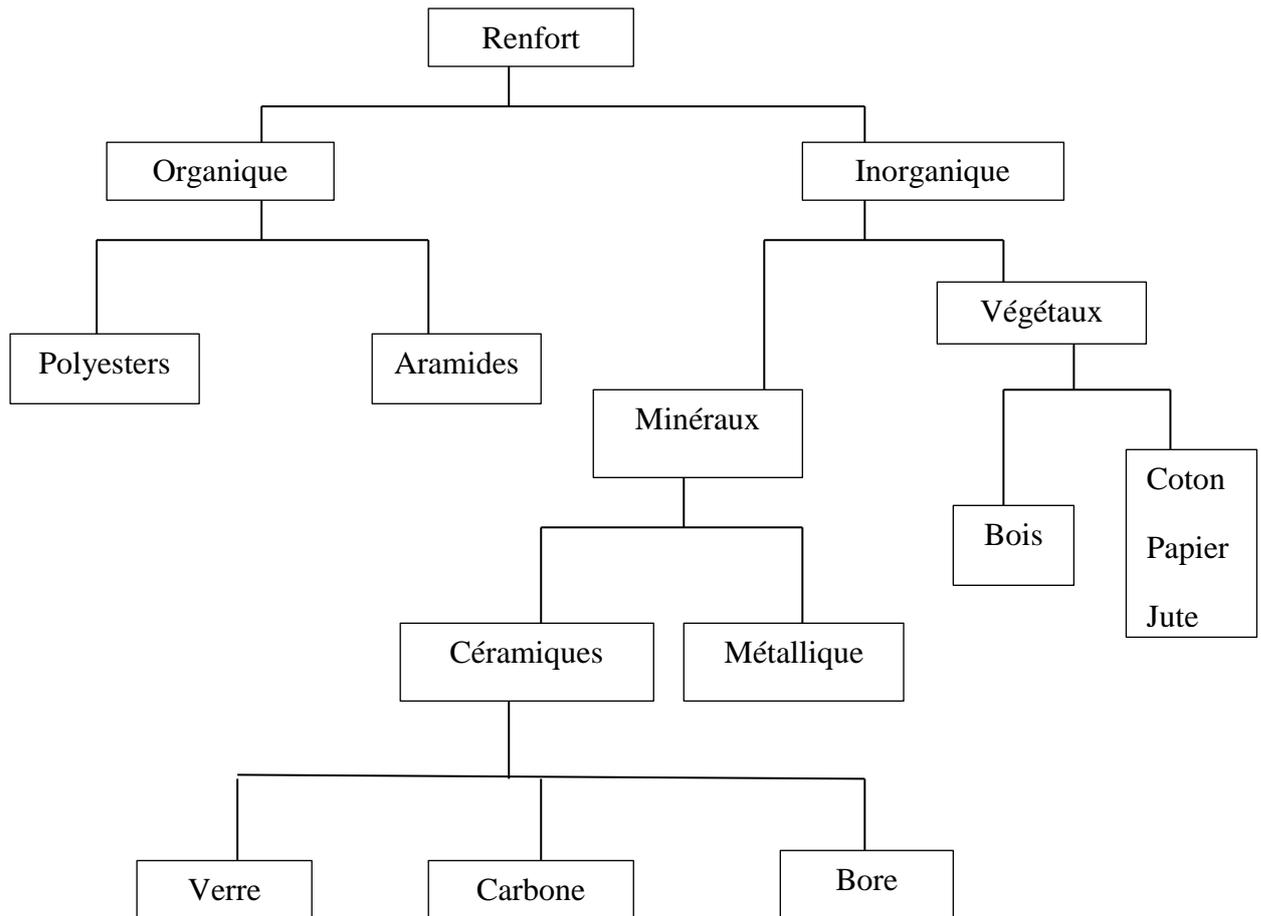
La proportion de chaque produit entrant dans la composition du système de résine dépend des conditions de mise en œuvre à obtenir et des propriétés recherchées [24].

**Tableau.II.3.** Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [25].

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes	Polyamides
Caractéristiques Mécanique	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
Pouvoir adhésif	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon
Température Maximum d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Durée de polymérisation	Courte	Courte	Longue	Moyenne
Mise en œuvre	Très facile	Difficile	Facile	Difficile

#### II.4.3.2. Renfort

Les renforts peuvent être d'origine minérale (verre, bore, céramique...) ou organique (carbone ou aramide). Les fibres les plus employées sont les fibres de verre.



**Figure II.8.** Principaux matériaux de renfort [26].

#### II.4.3.2.1. Fibres de verre

Elles sont en général fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de silice associée à divers oxyde (alumine, alcalins, alcalinoterreux). On distingue différents types de fibre :

- Verre E: le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques.
- Verre D: il est destiné aux applications de construction ou électronique, en raison de ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre.
- Verre C: il est très résistant chimiquement et est principalement utilisé pour les applications anticorrosion.
- Verre R ou S: il est destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs aux autres fibres de verre.

Les fibres de verre sont fragiles et sensibles à l'abrasion. Pour cette raison, elles sont revêtues d'une résine ou ensimage qui a pour fonction de protéger les fibres mais qui favorise également l'adhésion de la matrice.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci-dessus sont résumées dans le Tableau II.4.

**Tableau II.4.** Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [27]

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4,0	5,3	5,3

#### II.4.3.2.2. Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont pour la plupart obtenues à partir d'une fibre précurseur de type polyacrylonitrile (PAN). Ces fibres subissent une étape d'oxydation pour faire réticuler le PAN et le rendre ainsi moins « fusible » en vue des traitements thermiques ultérieurs.

Elles sont ensuite soumises à une seconde étape, qui peut être une carbonisation à 1500°C ou à une graphitisation à 3000°C. Pendant cette étape, les fibres sont maintenues sous tension afin de conserver l'orientation de la structure moléculaire.

Dans le premier cas, on obtient des fibres haute résistances ou HR, et dans le deuxième cas, on obtient des fibres haut module ou HM (Tableau II.5). Il existe également des fibres de module intermédiaire, appelée intermédiaire modulus ou IM. Elles peuvent ensuite passer dans un électrolyte ou subir une oxydation pour créer des groupements polaires, destinés à favoriser l'enzymage. Il existe différents traitements de surface pour les fibres de carbone.

**Tableau II.5.** Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone [28]

Caractéristique	Fibres HR	Fibres HM	Fibres IM
Résistance en traction (MPa)	3400-4500	2000-2500	4800
Module en traction (GPa)	230-250	390-450	296
Allongement à la rupture (%)	1.4-1.8	0.5-0.6	2
Résistance en compression (MPa)	2200-2800	1300-1700	/

Les fibres de carbone continues sont disponibles sous diverses formes de mèches de 3000 à 24000 filaments, de fibres coupées, de rubans ou bien encore de tissus, qu'ils soient unidirectionnels ou multidirectionnels. Elles présentent des caractéristiques spécifiques élevées comme leur haut module en traction. Elles ont également un coefficient de dilatation

très faible, une conductivité thermique élevée. En revanche, certains inconvénients demeurent comme leur résistance limitée aux chocs et une faible résistance à l'abrasion.

#### II.4.4. Les matériaux composites structuraux

Les matériaux composites structuraux sont classés en trois catégories :

- les monocouches
- les stratifiés
- les sandwichs

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. La forme du renfort caractérise les différents types de monocouches. Le renfort peut être à fibres longues : ce sont les plis unidirectionnels (noté parfois UD), courtes ou à fibres tissées [29].

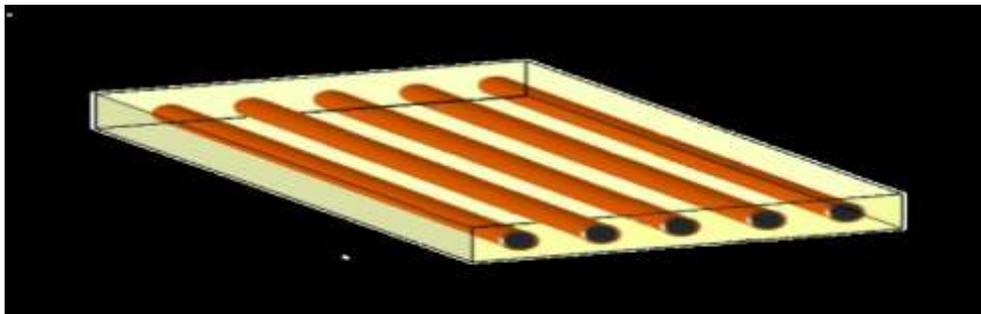


Figure. II.9. Monocouche [29].

Les stratifiés sont constitués d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié [3].

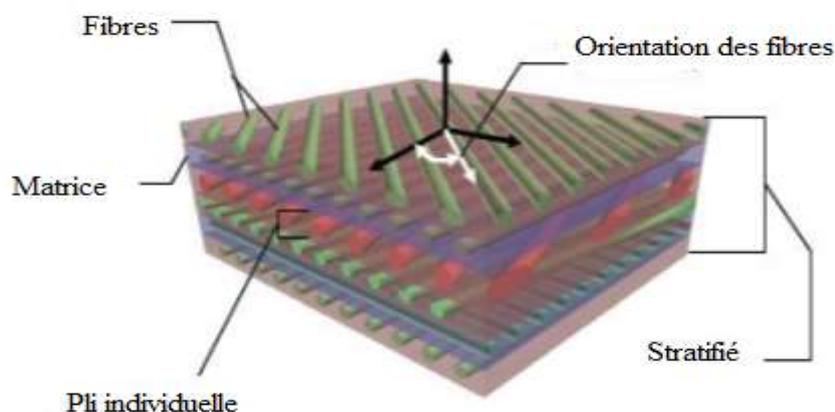


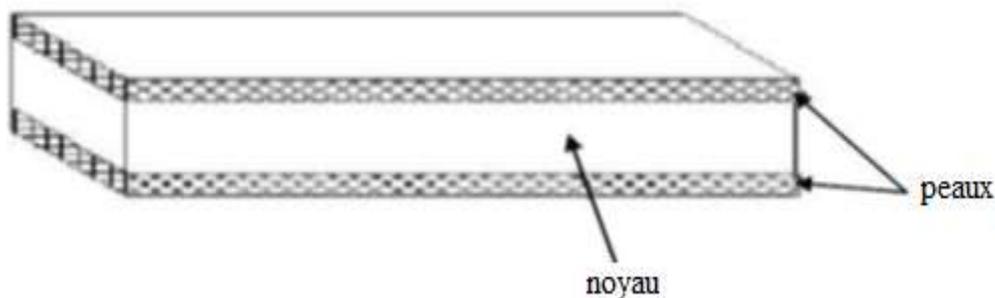
Figure. II.10. Composite stratifié [31].

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'obtenir des propriétés mécaniques spécifiques.

Les stratifiés peuvent être de trois types :

- 1) Equilibrés : le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction  $+ \theta$  que de couches orientées suivant la direction  $- \theta$
- 2) symétriques : les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen
- 3) orthogonaux : le stratifié comporte autant de couches à  $0^\circ$  que de couches à  $90^\circ$

Les sandwichs sont des matériaux possédant deux peaux de grande rigidité et de faible épaisseur et renfermant un cœur de forte épaisseur et de faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique [29].



**Figure II.11.** Composite sandwich [32].

#### ✓ Le noyau

Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être utilisés comme noyau. Ces matériaux sont divisés en trois classes :

- ✚ Matériaux solides à faible densité : balsa et d'autres types de bois.
- ✚ Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire : nid d'abeilles.
- ✚ Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée : feuilles ondulées.

#### ✓ La peau

Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane...etc. Le choix des matériaux utilisés comme peau est important du point de vue de l'environnement de travail [32].

**II.4.5. Avantages et inconvénients des matériaux composites****✓ Avantage**

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit [33].

**✓ Inconvénients**

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte [34].

**II.5. Conclusion**

Dans cette partie de travail, nous avons présenté les matériaux qui rentrent dans la composition de notre composite.

Avant de donner une description générale des matériaux composites ainsi que leurs structures.

# **Chapitre III**

## **Résultats expérimentaux et discussion**

### III.1. But de l'étude

Le but principal de cette étude est de mettre en évidence l'effet du dopage avec du styrène acrylonitrile (SAN), sur le comportement du polyméthacrylate de méthyle (PMMA) soumis aux décharges électrique. Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus en appliquant une tension de 12 kV.

### III.2. Conditions opératoires

Une masse de 0g de SAN et 1g de PMMA, une masse de 0,1g de SAN et 0,9g de PMMA, une masse de 0,2g de SAN et 0,8g de PMMA et une masse de 0,3g de SAN et 0,7g de PMMA ont été dissoutes dans de l'acétone à température ambiante, pour obtenir quatre échantillons d'une épaisseur d'environ 1.5mm.

### III.3. Préparation des échantillons

Dans cette étude, nous avons utilisé deux matériaux essentiels : le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et le Styrène-acrylonitrile (SAN) que nous avons mélangé afin de réaliser un composite SAN/PMMA. Pour se faire, nous avons dissout des morceaux de PMMA avec des morceaux de SAN dans de l'acétone.

### III.4. Essai de vieillissement (Vieillessement électrique)

Les essais sont effectués au niveau du laboratoire de haute tension de l'université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou. Le laboratoire est muni d'une source de tension à fréquence industrielle 50Hz (figure III.1), le dispositif est composé d'un transformateur et d'un système d'électrode, le tout est placé dans une cage de faraday. Le schéma descriptif est donné par la figure III.2.

#### a) Transformateur d'essai

Nous avons utilisé un transformateur d'essai ayant les caractéristiques suivantes :

$$U= 100 \text{ kV}$$

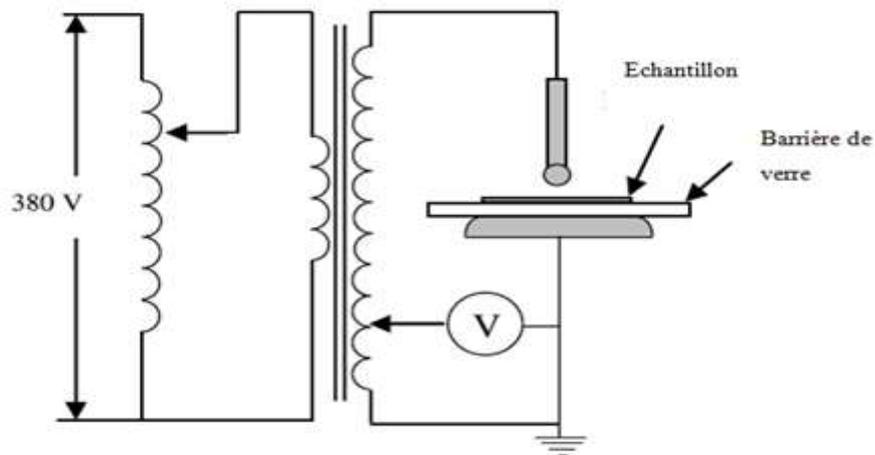
$$f= 50 \text{ Hz}$$

$$P = 10 \text{ kVA}$$

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



**Figure. III.1.** Equipement du laboratoire H.T.



**Figure. III.2.** Schéma dispositif expérimental

### b) Système d'électrodes

Le système d'électrodes utilisé est le système sphère-plan. La sphère est de 0.6 cm de diamètre.

Pour réaliser notre essai de vieillissement électrique, nous avons placé nos échantillons entre les deux électrodes (électrode sphérique et électrode plane) avec un intervalle d'air séparant l'électrode sphérique de la surface de l'échantillon égale à 3 mm. L'électrode sphérique est liée à la haute tension avec une tension d'alimentation de 12 kV.

### III.5. Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

La Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformé Infra Reed spectroscopie) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau [35].

#### III.5.1. Principe de fonctionnement

Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistre une diminution de l'intensité réfléchié ou transmise. Le domaine infrarouge entre  $4000\text{cm}^{-1}$  et  $500\text{ cm}^{-1}$  ( $2.5\text{-}25\text{ }\mu\text{m}$ ) correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules.

La figure III.3 nous donne le schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier. Le faisceau infrarouge provenant de la source A est dirigé vers l'interféromètre de Michelson qui va moduler chaque longueur d'onde du faisceau à une fréquence différente. Dans l'interféromètre le faisceau lumineux arrive sur la séparatrice. La moitié du faisceau est alors dirigée sur le miroir fixe, le reste passe à travers la séparatrice et il est dirigé sur le miroir mobile. Quand les deux faisceaux se recombinent, des interférences destructives ou constructives apparaissent en fonction de la position du miroir mobile. Le faisceau modulé est alors réfléchi des deux miroirs vers l'échantillon, où des absorptions interviennent. Le faisceau arrive ensuite sur le détecteur pour être transformé en signal électrique [36].

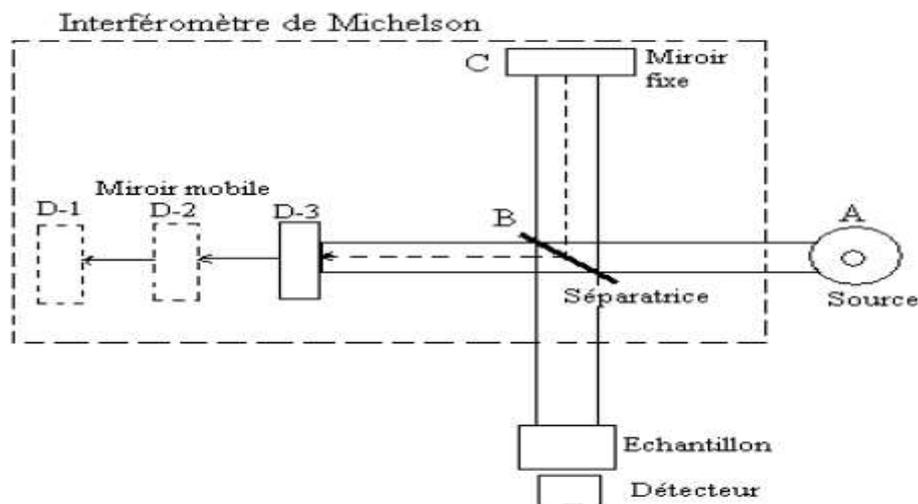


Figure. III.3. Schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier [37].

Dans notre cas, nous avons utilisé un spectromètre de type Agilent Cary 640 FTIR figure (III.4).



**Figure.III.4.** Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).

### III.6. Analyse par spectroscopie d'impédance (RLC mètre)

La spectroscopie diélectrique est basée sur la mesure de deux propriétés fondamentales du matériau, qui sont sa conductivité et sa capacité, en fonction du temps et de la fréquence. L'application la plus répandue dans le domaine de l'isolation électrique est la détermination du facteur de pertes diélectriques. Cette technique permet également de révéler les processus de relaxation des dipôles, des molécules et des macromolécules au sein de nombreux types de matériaux diélectriques (céramiques, polymères, liquides...etc.) et de fournir des informations sur leur structure. Cette technique non destructrice peut être appliquée directement à des systèmes d'isolation [38]. La fréquence de la tension alternative appliquée est typiquement entre quelques kHz à quelques dizaines de MHz [39].

Dans notre cas les propriétés diélectriques des échantillons de copolymère sont mesurés et étudiées à l'aide d'un impédance-mètre (type GW Instek-LCR 817) donné par la figure III.5. Les valeurs de mesure sont prises pour des fréquences allant de 0.5 kHz à 10 kHz avec un pas de 0.5 kHz.



**Figure III.5.** Impédance-mètre Gw Instek LCR-817.

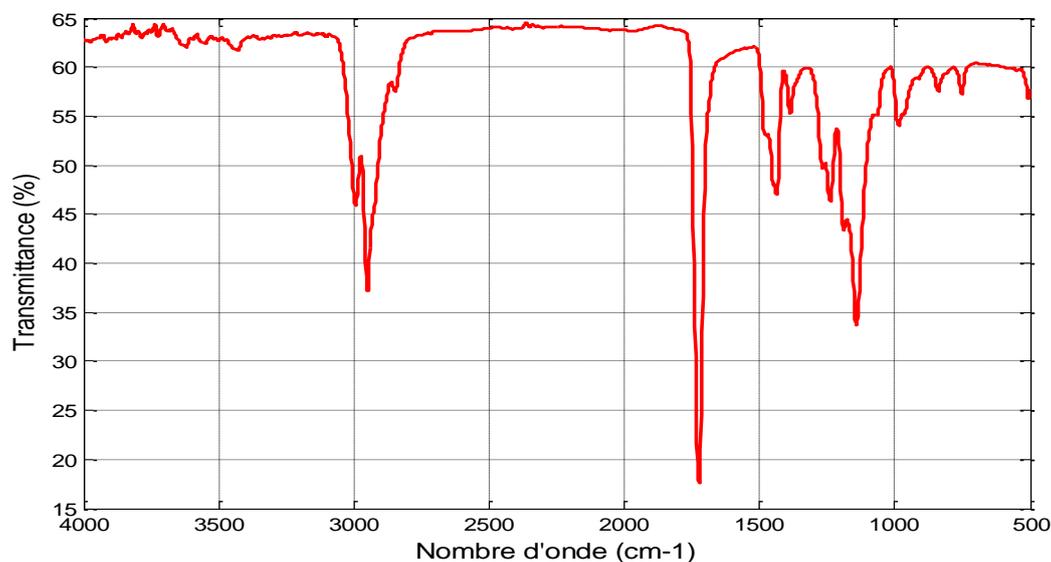
### **III.7. Résultats expérimentaux**

L'étude de la spectroscopie FTIR est primordiale pour la confirmation de la structure des échantillons étudiés.

#### **III.7.1. Spectres FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA non vieilli**

Les figures III.6, III.7, III.8 et III.9 représentent les spectres FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA pour différents pourcentages en SAN.

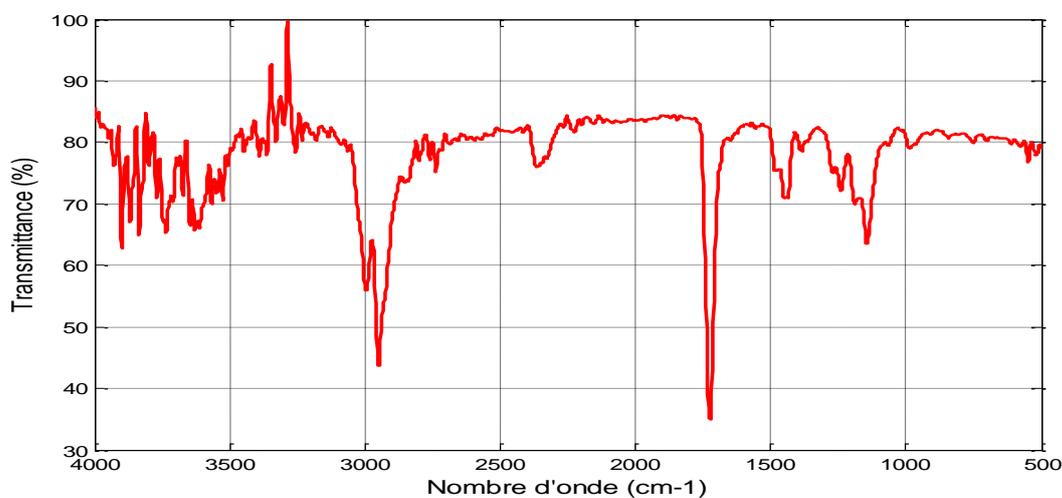
## a) 0% de SAN pour 100% de PMMA



**Figure III.6.** Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA (0g SAN / 1g PMMA) vierge.

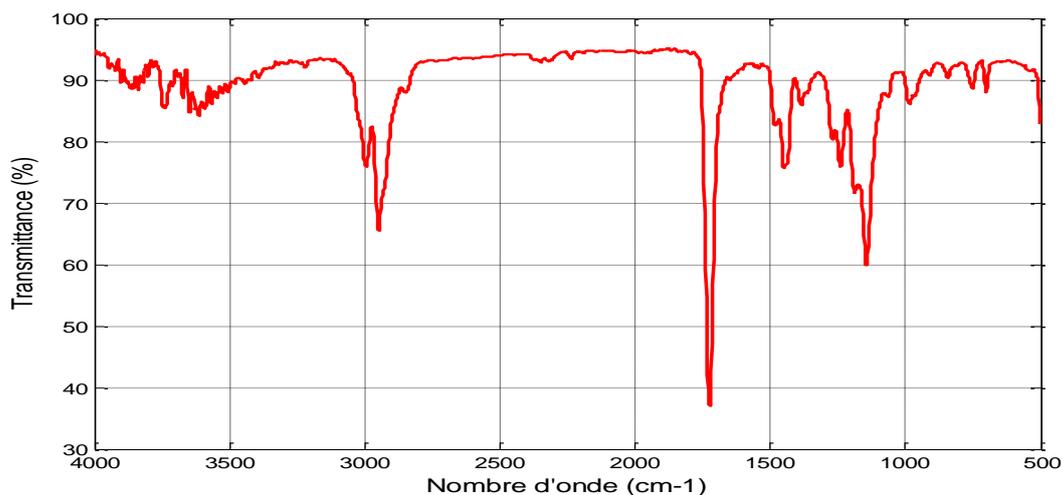
La figure III.6 montre que la transmittance du spectre du copolymère vierge (0g SAN/ 1g PMMA) est aux alentours de 62.5%

- Le pic appartenant à la bande allant de  $2880\text{ cm}^{-1}$  à  $3100\text{ cm}^{-1}$  correspond aux groupements asymétriques d'élongation C-H dans le  $\text{CH}_3$  et le  $\text{CH}_2$ .
- La bande caractéristique [ $1660\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$ ] est attribuée aux vibrations de déformation d'élongation du groupe C=O.
- Le pic apparentait à la bande allant de  $1446\text{ cm}^{-1}$  à  $1473\text{ cm}^{-1}$  correspond au groupement symétrique de déformation de  $\text{CH}_2$ .
- La bande caractéristique [ $1000\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ ] correspond aux groupements C=O.

**b) 10% de SAN pour 90% de PMMA****Figure III.7.** Spectre FTIR/ATR de mélange SAN/PMMA vierge (0.1g SAN/0.9g PMMA)

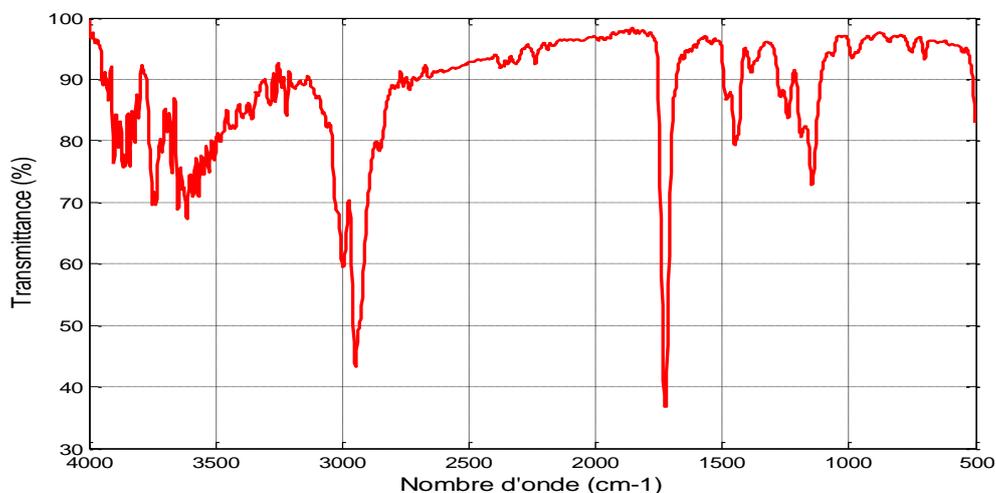
La figure ci-dessus montre que la transmittance du spectre du mélange avec un taux de 0.1g de SAN et 0.9g de PMMA est aux alentours de 85%

- Les pics appartenant à la bande allant de  $3200\text{ cm}^{-1}$  à  $4000\text{ cm}^{-1}$  correspondent au groupement hydroxyle OH.

**c) 20% de SAN pour 80% de PMMA****Figure III.8.** Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA vierge (0.2g SAN / 0.8g PMMA)

La transmittance du spectre du mélange représentée par la figure III.8, est aux alentours de 95%.

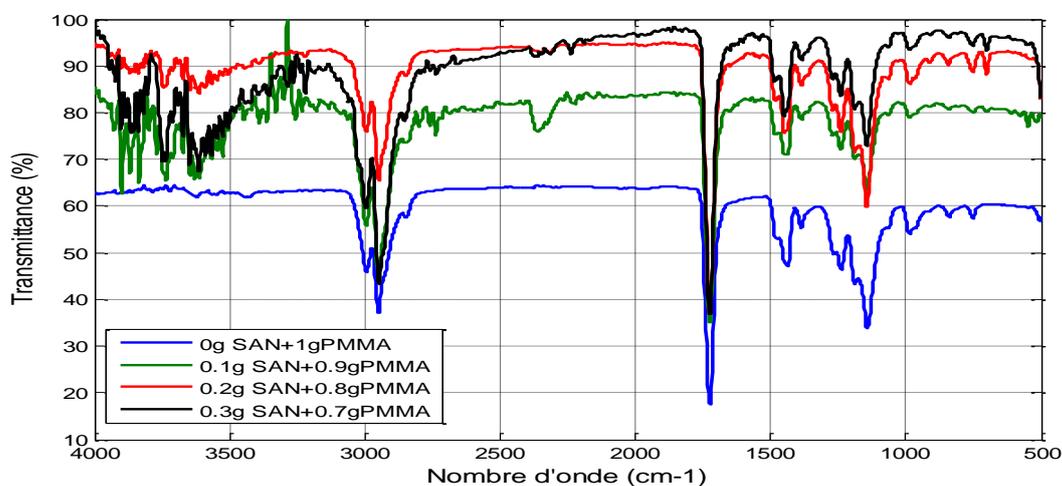
## d) 30% de SAN pour 70% de PMMA



**Figure III.9.** Spectre FTIR/ATR de mélange SAN/PMMA vierge (0.3g SAN / 0.7g PMMA)

Le dernier pourcentage en SAN étudié est 0.3g pour 0.7g de PMMA, les résultats sont donnés par la figure III.9. On remarque que la transmittance est aux alentours de 98%.

## c) Comparaison des spectres FTIR/ATR des échantillons



**Figure III.10.** Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA non vieilli pour différents pourcentages en SAN

Pour mettre en évidence l'effet du pourcentage en SAN sur les propriétés chimiques du mélange SAN/PMMA, nous avons tracé les spectres de tous les échantillons sur une même figure (figure.III.10) afin de comparer ces derniers. On remarque que le spectre FTIR/ATR présente la même allure pour l'ensemble des échantillons analysés.

Les bandes significatives et leurs longueurs d'ondes correspondantes sont indiquées par le tableau III.1.

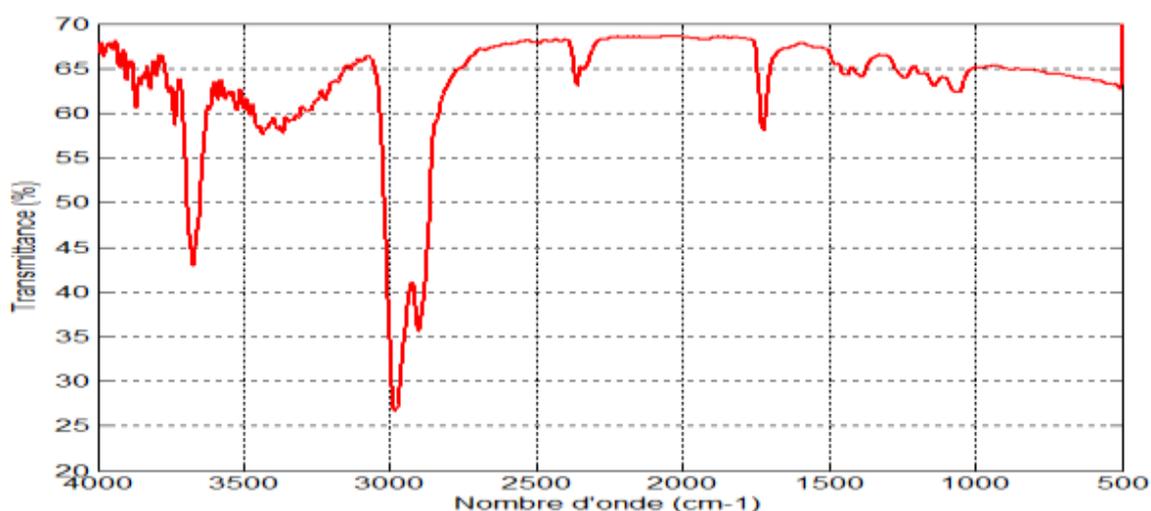
**Tableau.III.1.** Absorptions caractéristiques des groupements fonctionnels du composites.

Fréquence de vibration (cm-1)	Vibration caractéristique (bande)
4000 à 3200	O-H
3200 à 2800	C-H
2500 à 2000	CO <sub>2</sub>
1500 à 2000	C=C
1500 à 900	C-C

### III.7.2. Spectre FTIR/ATR du composite vieilli sous décharges électriques pendant 1 heure

Afin de suivre l'effet du dopage sur les propriétés du composite SAN/PMMA soumis aux décharges couronne, nous avons tracé les spectres FTIR/ATR de notre matériau soumis au vieillissement électrique en faisant varier le taux de SAN ajouté au mélange SAN/PMMA, soit 0g , 0.2g , 0.3g et 0.4g de SAN pour 1g , 0.9g , 0.7g et 0.6g de PMMA respectivement. Les résultats sont indiqués sur les figures III.11, III.12, III.13 et III.14.

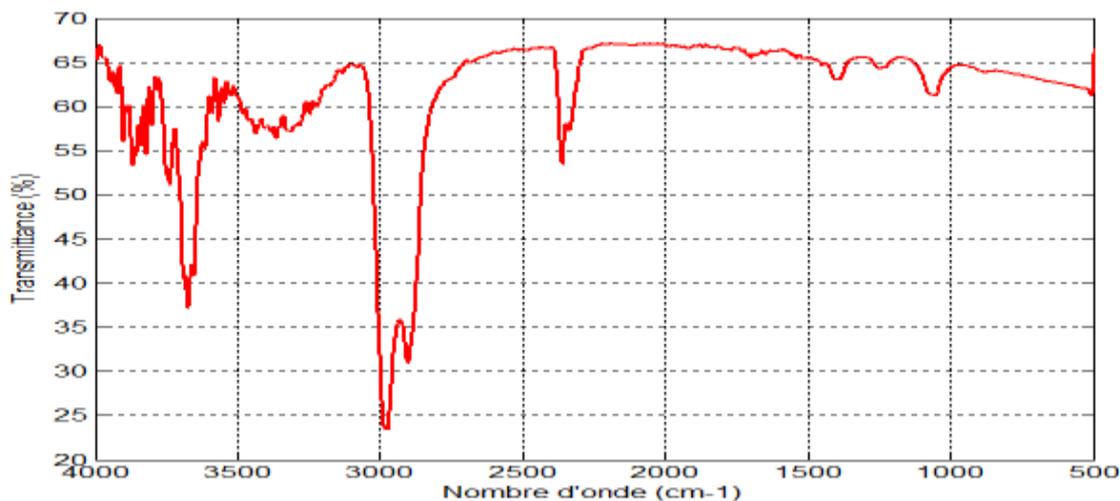
#### a) 0% de SAN pour 100% de PMMA



**Figure III.11.** Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA vieilli électriquement (0g SAN / 1g PMMA)

La figure III.11 montre que la transmittance du spectre du mélange (0g SAN + 1g PMMA) est aux alentours de 68%

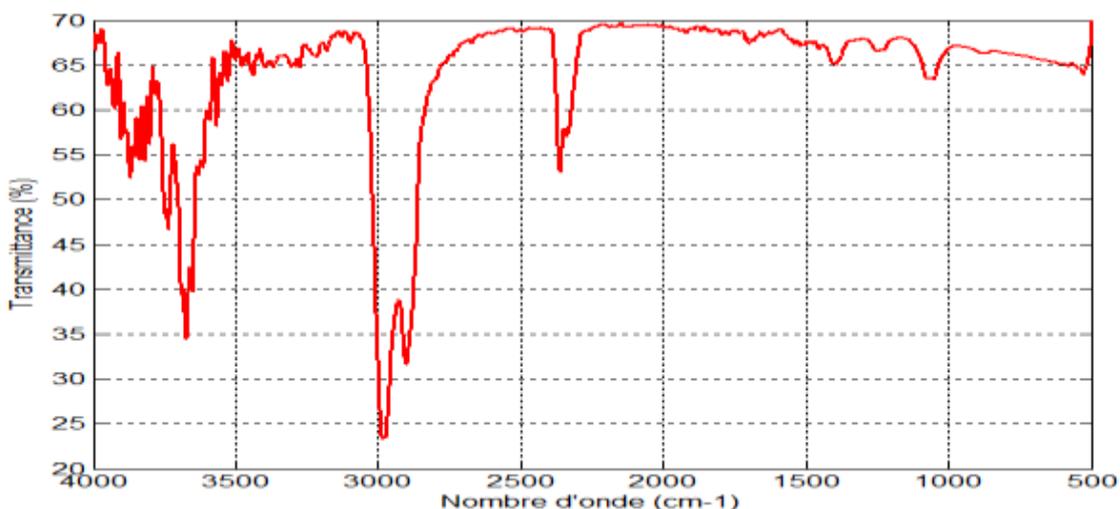
## b) 20% de SAN pour 80% de PMMA



**Figure III.12.** Spectre FTIR/ATR de mélange SAN/PMMA vieilli électriquement (0.2g SAN / 0.8g PMMA)

La transmittance du spectre du mélange à 20% de SAN est des alentours de 67% (figure III.12)

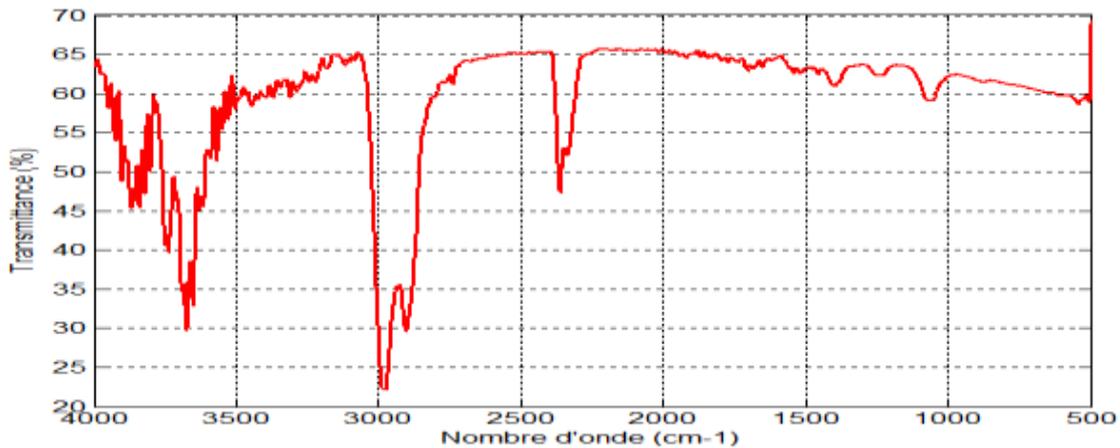
## c) 30% de SAN pour 70% de PMMA



**Figure III.13.** Spectre FTIR/ATR du mélange SAN/PMMA vieilli électriquement (0.3g SAN / 0.7g PMMA)

Le spectre du composite SAN/PMMA avec un pourcentage de 30% de SAN pour 70% de PMMA est caractérisé par une transmittance qui tourne aux alentours de 67.5% comme le montre la figure III.13.

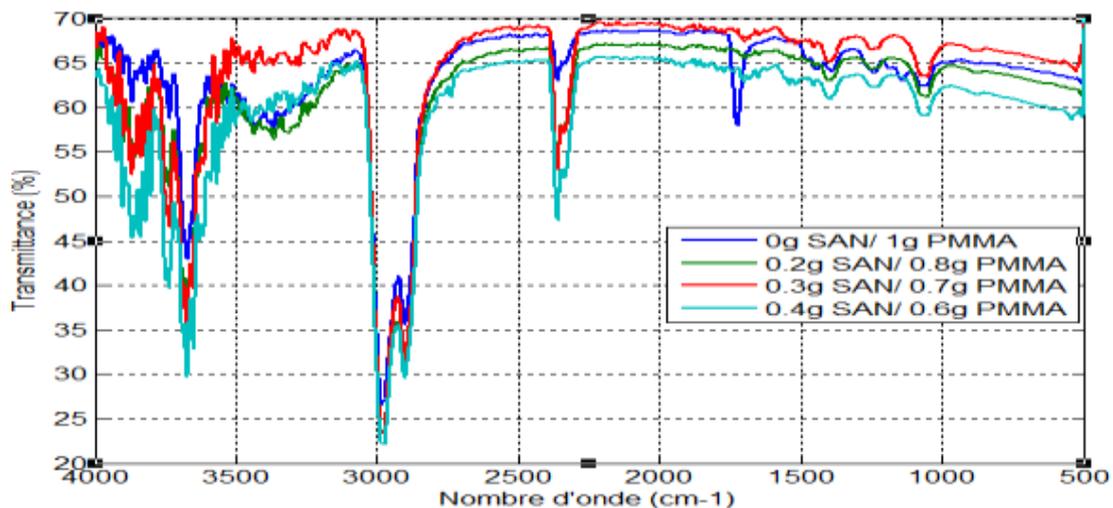
## d) 40% de SAN pour 60% de PMMA



**Figure III.14.** Spectre FTIR/ATR de mélange SAN/PMMA vieilli électriquement  
(0.4g SAN / 0.6g PMMA)

La transmittance de l'échantillon contenant 0.4g de SAN et 0.6g de PMMA soit un pourcentage de 40% en SAN, est donnée par la figure III.14. On remarque que cette transmittance est de 65%.

## e) Comparaison des spectres FTIR/ATR des différents échantillons vieillis électriquement



**Figure III.15.** Spectre FTIR/ATR de mélange SAN et PMMA pour différents échantillons  
(0% SAN, 20% SAN, 30% SAN, 40% SAN)

La figure III.15 nous donne les spectres des différents échantillons de SAN/PMMA vieillis électriquement sous 12 kV pour différents pourcentage en SAN. Ils présentent tous une même allure.

Les pics appartenant à la bande allant de  $2000\text{ cm}^{-1}$  à  $2500\text{ cm}^{-1}$  sont dus à l'absorption du dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ . Le groupement hydroxyle OH est observé entre  $4000\text{ cm}^{-1}$  et  $3200\text{ cm}^{-1}$ .

En comparant les spectres de la figure III.10 avec ceux de la figure III.15, le vieillissement électrique a induit une diminution du taux de transmittance. Le copolymère est donc devenu opaque après son exposition aux décharges électriques.

### III.7.3. Résultats de mesure par spectroscopie diélectrique

Les propriétés diélectriques des échantillons de SAN/PMMA sont étudiées en utilisant un LCR-mètre de type Gw Instek LCR-817. Dans notre étude, le facteur de dissipation, la permittivité relative et l'indice de pertes diélectriques ont été mesurés à basse tension (1.5 kV) avec une fréquence allant de 0.5 à 10 kHz.

#### III.7.3.1. Permittivité relative

La permittivité écrite sous sa forme complexe est donnée par :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_r - j\varepsilon'' \quad (\text{III. 1})$$

La valeur de la permittivité relative est donnée par l'équation III.2.

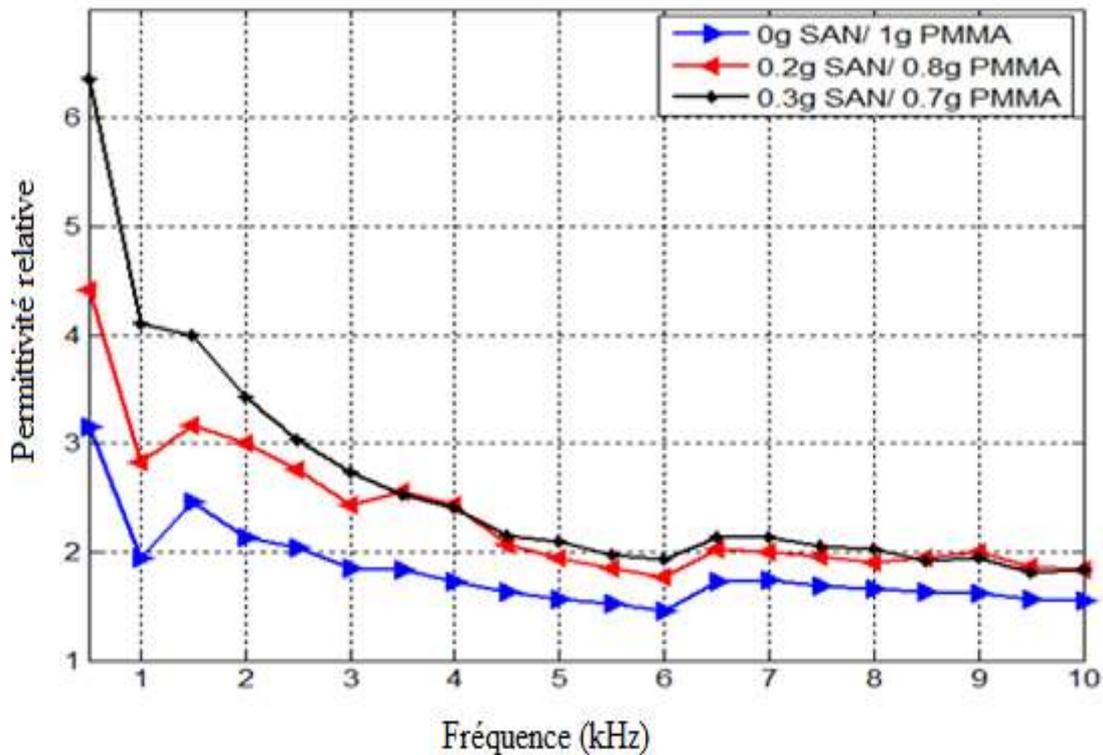
$$\varepsilon_r = \frac{e \cdot c}{s \cdot \varepsilon_0} \quad (\text{III. 2})$$

e : épaisseur de l'échantillon [m]

c : capacité entre les deux électrodes [F]

s : surface de l'échantillon [ $\text{m}^2$ ]

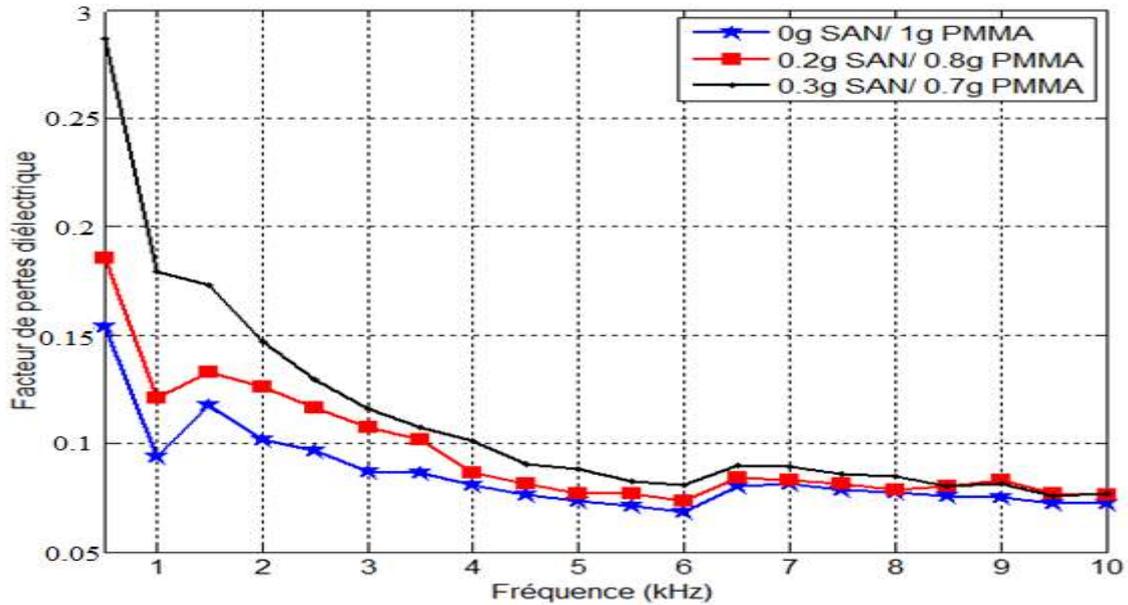
$\varepsilon_0$  : permittivité du vide [F/m]



**Figure.III.16.** Variation de la permittivité relative du SAN/PMMA vieilli sous décharge électrique en fonction de la fréquence et pour différents pourcentages en SAN

La figure III.16 montre l'influence de la fréquence sur la valeur de la permittivité relative du mélange SAN/PMMA. On remarque que l'augmentation de la fréquence induit la diminution de la constante diélectrique et les courbes ont les mêmes allures pour tous les échantillons. En effet, pour l'échantillon (0g SAN/ 1g PMMA), la valeur de la permittivité relative est plus significative pour les basses fréquences, par exemple elle passe de 0.0315 à 500Hz. Pour les hautes fréquences, 9.5kHz et 10kHz par exemple, elle passe de 0.0156 à 0.0155 soit une différence de 0.0001 seulement. Cette diminution peut être expliquée par le réarrangement de la structure moléculaire et le phénomène de réticulation

### III.7.3.2. Facteur de pertes diélectriques



**Figure.III.17.** Variation du facteur de pertes diélectriques du SAN/PMMA

en fonction de la fréquence et pour différents taux de SAN

La partie imaginaire  $\varepsilon''$  de l'équation III.3 représente le facteur de pertes diélectriques. Sa valeur est donnée par :

$$\varepsilon'' = \varepsilon_r \cdot \text{tg}\delta \quad (\text{III.3})$$

$\text{tg}\delta$  : étant le facteur de dissipation diélectrique.

$\varepsilon_r$  : Permittivité relative

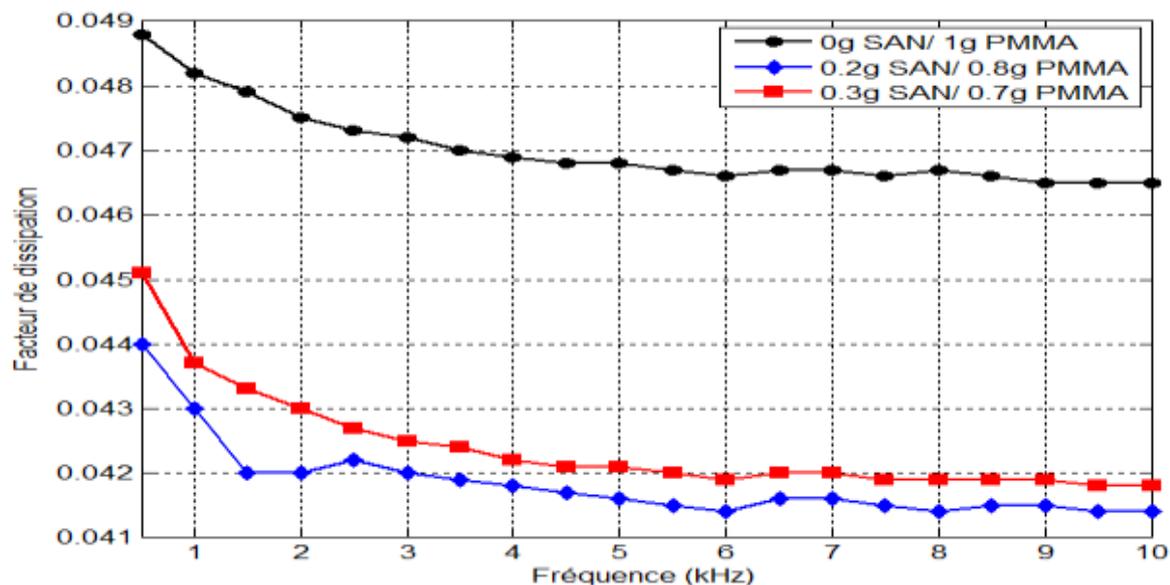
La figure III.17 représente la variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence, ce dernier diminue avec l'augmentation de la fréquence.

Entre 0.5 kHz et 5 kHz la pente de la courbe est très importante. Au contraire, à partir de 5kHz la valeur de cette pente est très faible.

### III.7.3.3. Facteur de dissipation ( $\text{tg}\delta$ )

Les valeurs de  $\text{tg}\delta$  sont relevées directement sur le LCR mètre.

La figure III.18 représente la variation du facteur de dissipation en fonction de la fréquence.



**Figure.II.18.** La variation du facteur de dissipation du copolymère vieilli sous 12kV en fonction de la fréquence et pour différents pourcentages en SAN

La figure III.18 représente la variation du facteur de dissipation en fonction de la fréquence.

Nous constatons que  $tg\delta$  diminue avec l'augmentation de la fréquence, les courbes ont la même allure. Cette diminution est plus importante pour les faibles fréquences contrairement aux fréquences élevées.

Entre 0.5 kHz et 5 kHz la pente de la courbe est très importante par rapport à celle correspondant aux hautes fréquences.

Nous remarquons aussi que le facteur de dissipation diminue avec l'augmentation du taux de SAN.

La position de la courbe de l'échantillon (0.3g SAN + 0.7g PMMA) par rapport à celle de l'échantillon (0.2g SAN + 0.8g PMMA) et dû à la différence d'épaisseur de deux échantillons.

### III.8. Interprétation des résultats

Lors de notre étude, nous avons enregistré un changement des propriétés physico-chimiques du copolymère SAN/PMMA avec le changement du taux de SAN contenu dans le mélange. Ce comportement a été observé lors des analyses FTIR où on a remarqué une variation dans le taux de transmittance des différents spectres. En effet, le taux de

transmittance des spectres diminue avec l'augmentation du pourcentage en SAN dans le copolymère SAN/PMMA.

La figure III.15 montre bien que la transmittance des échantillons vieillis électriquement diminue de 68% pour l'échantillon (0% SAN) à 65% pour l'échantillon (40% SAN) en passant par 66% pour l'échantillon (20% SAN). La valeur plus importante de la transmittance de l'échantillon (30% SAN) est à la différence de l'épaisseur de cet échantillon.

La diminution de la transmittance avec l'augmentation du taux de SAN contenu dans le mélange SAN/PMMA peut être interprétée par la pénétration des molécules de SAN dans le PMMA qui forme la matrice dans ce cas, et donc apparition de nouvelle liaison  $N\equiv C$  qui est justifiée par l'apparition de nouveaux pics dans la bande allant de  $4000$  à  $3200\text{ cm}^{-1}$ , et la disparition d'autres telle que la double liaison  $C=C$  auxquelles correspond le pic entre  $2000$  et  $1500\text{ cm}^{-1}$ .

L'étude des propriétés diélectriques a montré que ces dernières diminuent toutes avec l'augmentation de la fréquence ; que ce soit pour la permittivité relative, le facteur de dissipation ou le facteur de pertes diélectriques. Cette diminution est plus importante pour les faibles fréquences. En effet, pour les faibles fréquences le libre parcours des porteurs de charges augmente suite au gonflement du matériau et le nombre de chocs augmente aussi, ce qui induit un phénomène de relaxation et donc une faible diminution des propriétés diélectriques.

### III.9. Conclusion

Le but de ce chapitre était d'exposer les différents obtenus lors de notre étude ainsi que leur interprétation.

Nous avons mené une étude sur l'effet du taux de SAN ajouté au mélange SAN+PMMA sur les propriétés du copolymère SAN/PMMA. Les résultats ont montré que ces dernières sont influencé toutes par le pourcentage en SAN contenu dans le mélange SAN/PMMA.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Notre étude est expérimentale, elle a porté sur l'effet du vieillissement électrique sur les propriétés du copolymère SAN/PMMA traité par décharges électriques. Comme décharge électrique, nous avons choisi la décharge corona.

Nos échantillons ont été vieilli pendant une heure sous 12 kV. Notre but était de suivre le comportement du copolymère avec la variation du pourcentage en SAN ajouté au mélange (PMMA + SAN). Pour se faire, nous avons étudié quatre mélanges qui ont fait l'objet de quatre échantillons différents que nous avons réalisé en mélangeant du SAN avec du PMMA dissouts dans de l'acétone : 0g de SAN + 1g de PMMA, 0.2g de SAN + 0.8g de PMMA , 0.3g de SAN + 0.7g de PMMA et 0.4g de SAN + 0.6g de PMMA, soit une concentration en SAN de 0 %, 20 %, 30 % et 40 %. La surface des échantillons obtenus été vieilli sous décharges corona puis analysé par spectroscopie infrarouge. Les résultats ont montré que les propriétés chimiques du matériau évoluent avec l'évolution du taux de SAN ajouté au PMMA.

Pour finaliser, notre souhait était de réaliser des échantillons en augmentant le pourcentage en SAN, que nous allons soumettre à d'autres contraintes de vieillissement en plus de la contrainte électrique afin d'évaluer les propriétés du composite lors des applications pratiques, mais le temps et le matériel nécessaires pour finaliser ce travail étaient limités.

Cette étude peut être poursuivie à des temps de vieillissement plus importants afin de déduire la durée de vie du polymère.

Comme perspective, ce travail peut être complété par des analyses physico-chimiques : MEB, FTIR, impédance mètre afin de donner une interprétation au mécanisme de dégradation.

# Bibliographie

## BIBLIOGRAPHIE

---

### *Bibliographie*

- [1].Bouزيد. L ; "Modélisation moléculaire des copolymères PMMA/SAN" ; Mémoire Magister en physique; Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2012.
- [2].Bedjaoui. K ; "Préparation et caractérisation du mélange Polycarbonate/Polystyrene-co-Acrylontrile (PC/SAN) Effet du comptabilisant sur ses propriétés" ; Mémoire de Magister en génie des polymères ; Université Ferhat Abbas setif-1, 2015.
- [3].Combette. P, Ernoult. I ; "Physique des polymères, «Organisation des cellules du bois» provenant du livre «Des matériaux» Presses internationales polytechniques, Canada, Edition 2000".
- [4]. Serge. E, Laurent. D, "Introduction à la physique des polymères" ; 2<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris, 2002, 2012 ISBN 978-2-10-058167-2.
- [5]. Fontanille. M, Gnanou. G, "Chimie et physico-chimie des polymères" ; 3<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris, 2002, 2005, 2010, 2013 ISBN 978-2-10-058915-9.
- [6].Guemaz. N ; "Préparation et étude de la stabilité thermique des polyuréthanes" ; Mémoire de Magister en Génie des Polymères ; Université Ferhat Abbas Setif 2012.
- [7].Chicouche Hamina. B ; "Etude de la dégradation du polyéthylène soumis à une décharge couronne" ; Mémoire de Master en génie électrique.
- [8].Benyoucef. D; "Techniques de la Haute Tension Cours 4eme année Ingénieur & 1ere année Master" ; Université Hassiba Benbouali de Chlef 2013.
- [9].Belhiteche. E; " Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux Décharges électriques de surface" ; Thèse de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ; 2012.
- [10]. YA LL B.SC.A ; "mémoire présenté à l'université du Québec à cfflcoutimi, contribution à l'étude de l'influence des décharges de couronne sur la perte de volume d'une aspérité de glace portée à un potentiel élevé" ; 1993.
- [11]. Alyen. A ; "Etude expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gazes" ; Thèse de doctorat ; Université de Toulouse III Paul Sabatier ; 2009.
- [12]. F.W. Peek, Dielectric phenomena high in voltage engineering, MC Graw Hill, 1929.
- [13].Tilmatine, A.Flazi, S.Modeles, K.Ramdani & Dascalescu ; "Séparation électrostatique complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels" ; Journal of electrostatic, 61(1), 21-30 ; 2004.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [14].Benabid-Zouai. F ; "Etude des mélanges PVDF/PMMA et de leurs nanocomposites PVDF/PMMA/Maghnite en vue d'application comme revêtement"; Thèse de doctorat ; Université de Ferhat ABBAS Setif -1 ; 2015.
- [15].Jalali. H ; "Etude par résonance paramagnétique électronique (RPE) de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) irradié par des photons gamma issus de cobalt 60" ; Mémoire de Master en physique ; Université de Monastir 2013.
- [16].Moudoud. M, "Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants" ; Thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou ; 2010.
- [17].Azzi. N ; "Effet du vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du polyméthacrylate de méthyle" ; Mémoire magister en électrotechnique; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2017.
- [18]. Kaouche. N ; "Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites"; Mémoire Magister en physique ; Université de Ferhat ABBAS Setif 2016.
- [19]. Boudenne. A ; " Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo-physiques de matériaux composite à matrice polymère " ; Université PARISXII ; 2003.
- [20]. Rokbi. M ; " Comportement à la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre " ; thèse Magister ; M'sila ; 2001.
- [21]. Prombut. P ; "caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels " ; Thèse doctorat, Toulouse ; 2007.
- [22]. Bouzit. F ; " élaboration et caractérisation mécanique, en statique et en fatigue, des panneaux sandwichs à base de renforts naturels " ; Thèse Magister, Boumerdes ; 2015.
- [23] Barrau. J.J ; " Structures en matériaux composites " ; Éditions Techniques de l'Ingénieur, bm5080 ; 2004.
- [24] Rigal. J.C, Negrier. A ; " Présentation des matériaux composites " ; Éditions Techniques de l'Ingénieur, a7790 ; 2013.
- [25] Perrot. Y ; " Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites " ; Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud ; 2006.
- [26]. Bey. K ; "Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en flexion 3 points statique"; Mémoire de Master en Génie mécanique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [27]. Renard. J, " Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère ", Lavoisier ; 2005.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [28]. Berthelot. J-M ; " Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures " ; 4<sup>ième</sup> édition, Lavoisier ; 2005.
- [29]. Kriker, A ; "Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers en forcés par ces fibres en climat chaud et sec" ; 2005.
- [30]. <http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm>.
- [31].Bensaid. S, "Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes" ; Université de Nantes, 2006.
- [32].Gupta. N; " Characteration of syntactic foams and their sandwich composites: modeling and experimental approaches" the Graduate Faculty of the of the Louisiana state University and Agricultural and Mechanical college; 2003.
- [33]. Haddadi .M ; "étude numérique avec comparaison expérimental des propriétés thermoplastique des matériaux composites à matrice polymère " ; Université Al Hadj Lakhdar, Batna ; 2011.
- [34]. Khaldoune. A ; "Effet des paramètres d'élaboration sur le comportement mécanique d'un bio-composites" ; Mémoire de Master en Génie Mécanique ; 2016.
- [35]. Ben Romdhane. H ; "Les Méthodes De Synthèse Macromoléculaire " ; Faculté des Sciences de Tunis Département de Chimie.
- [36].Paqueton. H et Ruste. J; "Microscopie électronique à balayage- Principe et équipement"; Technique de l'ingénieur P865V2
- [37]. Kireche. N ; "Etude de l'interaction décharge électrique/surface d'un solide isolant" ; thèses de doctorat en sciences en électrotechnique ; Université Akli Mohend Oulhadj 2019.
- [38]. M. T. Do ; "Propriétés diélectriques des gels isolants : application aux composants d'électronique de puissance"; thèse de doctorat ; université Joseph Fourier ; mars 2008.
- [39].Tamra. A ; "Spectroscopie diélectrique Hyperfréquences de cellules individualisées sous électrolocations"; thèse de doctorat ; université de Toulouse; mars 2017.

## Résumé

Dans ce travail expérimental, nous avons traité l'effet du taux de dopage en SAN sur les propriétés du copolymère SAN/PMMA vieilli sous décharges électriques. Des échantillons de copolymère avec différents pourcentages en SAN ont été soumis à la contrainte électrique sous 12kV. La surface de ces échantillons ont été ensuite analysé en utilisant la technique d'analyse FTIR/ATR et ses propriétés (permittivité relative, facteur de dissipation et facteur de pertes diélectriques) ont été mesuré à l'aide d'une impédance-mètre.

Les résultats ont montré que les performances du diélectrique changent avec le changement du taux de SAN que nous avons mélangé au PMMA.

## Abstract

In this experimental work, we have studied the effect of the SAN doping rate on the properties of the aged SAN / PMMA copolymer under electric discharges. Copolymer samples with different SAN percentages were subjected to electrical stress at 12kV. The surface of these samples was then analyzed using the FTIR / ATR analysis technique and its properties (relative permittivity, dissipation factor and dielectric loss factor) were measured using an impedance-put.

The results showed that the dielectric performance changes with the change in the rate of SAN that we mixed with PMMA.

### ملخص:

في هذا العمل التجريبي، عالجتنا تأثير معدل تعاطي المنشطات في SAN على خصائص كوبوليمر SAN / PMMA الذي يمر تحت التفريغ الكهربائي. تعرضت عينات البوليمر ذات النسب المختلفة من SAN إلى إجهاد كهربائي تحت 12kV. ثم تم تحليل مساحة هذه العينات باستخدام تقنية تحليل FTIR / ATR وتم قياس خواصه (السماحية النسبية، عامل تبديد وعامل الخسارة العازلة) باستخدام وضع المعاوقة. أظهرت النتائج أن أداء التغييرات العازلة مع التغيير في معدل SAN التي نمزجها مع PMMA.