# Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'Electrotechnique

#### Mémoire

Présenté par

#### Mademoiselle ZEROUALI Zina

Pour l'obtention du diplôme de

## Magister

en Electrotechnique Option : Machines Electriques

#### Thème

## Etude de la tension de retour des matériaux diélectriques utilisés dans l'isolation électrique

Soutenu le 21 juin 2012

Jury:

Mr BENAMROUCHE	Nacereddine	Professeur, UMMTO	Président
Mme BITAM-MEGHERBI	Ferroudja	Maître de Conférences A, UMMTO	Rapporteur
Mr MUFIDZADA	Nahid	Professeur, UMMTO	Examinateur
Mr OTMANE CHERIF	Tahar	Maître de Conférences A, UMMTO	Examinateur

### Remerciements

C'est avec beaucoup de bonheur que je saisis cet évènement pour remercier vivement mon encadreur Madame Ferroudja BITAM-MEGHERBI, Maître de Conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour le formidable encadrement qu'elle m'a accordé tous le long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur Nacereddine BENAMROUCHE, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Président du Comité Scientifique du Département d'Electrotechnique et Directeur du Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique (LATAGE), pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Ma grande reconnaissance va également à Monsieur MUFID ZADA Nahid, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner ce travail.

Que Monsieur Tahar OTMANE CHERIF, Maître de Conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et Vice Doyen à la Pédagogie et des relations liées aux étudiants de la Faculté de Génie Electrique et d'Informatique, trouve ici mes sincères remerciements pour avoir accepté de prendre part au jury de soutenance.



### **SOMMAIRE**

Introduction générale	1
Chapitre I. Présentation générale des matériaux polymères	
I.1. Introduction	2
I.2. Différents types d'isolants utilisés en électrotechnique	2
I.2.1. Les isolants solides	2
I.2.1.1. Les isolants inorganiques	2
a. Les céramiques techniques	2
b. Verres	3
c. les micas et produit micacés	4
I.2.1.2. Les isolants organiques (polymères)	5
A. Isolants organiques naturels	5
B. Isolants organiques synthétique	6
B.1. Les polymères	6
B.1.1.Définition	6
B.1.2. La polymérisation.	7
B.1.3. Techniques de polymérisation.	8
B.1.4. Les caractéristiques des polymères	9
B.1.5. Classification des polymères	10
B.1.5.1. Origine des polymères	10
B.1.5.2. Origine du matériau	10
B.1.5.3. La géométrie de la macromolécule	11
B.1.5.4. Distribution spatiale des liaisons	11
B.1.5.5. Propriétés thermiques	13
1. Les thermoplastiques	13
1.1. Polymères thermoplastiques et leurs applications en isolation électrique	14
1.1.1. Le polychlorure de vinyle (PVC)	14
1.1.2. Polyéthylène (PE)	15
a. Etude des polyéthylènes PEBD, PEHD et le PRC	16
a.1. Polyéthylène basse densité (PEBD)	16
a.2. Polyéthylène haute densité (PEHD)	16
a.3. Le polyéthylène réticulé chimiquement PRC	17
1.1.3. Polypropylène (PP)	18

1.1.4. Polytétrafluoroéthylène (PTFE)	18
1.1.5. Le styrène acrylonitrile (SAN)	19
1.1.6. Polyamides (PA)	20
2. Les thermodurcissables	20
2.1. Exemple de polymères thermodurcissables et leurs applications en	isolation
électrique	21
2.1.1. Polyphénol	21
2.1.2. Les Polyépoxydes	21
3. Les élastomères	22
3.1. Exemple des polymères élastomère et leurs applications en	isolation
électrique	22
3.1.1. Polyisoprène	22
3.1.2. Elastomères silicones	23
B.1.6. Avantages de l'utilisation des polymères dans l'isolation des câbles à	courant
alternatif	24
I.2.1.3. les isolants composites	24
Chapitre II. Etude bibliographique de la tension de retour	
II.1. Introduction	25
II.2. Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode non destructive de diagnostic des isolations de la contractive de diagnostic des isolations de la contractive de diagnostic des isolations de la contractive de diagnostic de la contractive de diagnostic de la contractive de la contr	ode de la
tension de retour.	25
II.3. Description de la méthode RVM	26
II.3.1. Schéma de principe de la méthode RVM	26
II.3.2. Phénomènes physiques régissant les différentes étapes	28
II.4. Evaluation de l'état d'une isolation à partir de la méthode de RVM	29
II.5. Le spectre de polarisation.	29
II.5.1. Paramètres influençant sur le spectre de polarisation d'une isolation au pa	apier30
II.6. Evaluation du taux d'humidité dans le papier imprégné par la méthode RVM	31
II.7. Caractérisation du vieillissement du papier imprégné par la méthode RVM	35
II.8. Modèles théoriques de caractérisation de la tension de retour	36
II.9. Mesure automatique de la tension de retour	39
II.10. Paramètres influençant la mesure de la tension de retour RVM	40
II.10.1. Effet de la tension de charge	40
II.10.2. Effet des temps de charge et de décharge sur la tension de retour	41

II.11. Les limites de la méthode de mesure de la tension de retour	43
Chapitre III. Etude expérimentale	
III.1. Introduction	44
III.2. Présentation des matériaux objets de l'étude	44
III.2.1. Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	44
III.2.1.1. Le principe de production du monomère MAM	44
III.2.1.2. Préparation du Polyméthacrylate de méthyle	45
III.2.1.3. Propriétés du polyméthacrylate de méthyle	45
III.2.1.4. Utilisation de PMMA en électrotechnique	47
III.2.2. Polystyrène (PS)	47
III.2.2.1. Le principe de production du PS	47
III.2.2.2. Production du styrène	47
III.2.2.3. Synthèse du polystyrène	49
III.2.2.4. Les différents types de polystyrène	50
III.2.2.5. Propriétés du polystyrène	51
III.2.2.6. Utilisation du PS en électrotechnique	52
III.2.3. Polycarbonate (PC)	52
III.2.3.1 Synthèse du polycarbonate	53
III.2.3.2. Les propriétés du polycarbonate	53
III.2.3.3. Application en isolation électrique.	55
III.3. Etude expérimentale de la tension de retour de Polyméthacrylate de méthy	le (PMMA).
de polystyrène (PS), et de polycarbonate (PC)	56
III.3.1. Dispositif expérimental	56
III.3.2. Déroulement des essais	57
III.3.3. Résultats expérimentaux pour le PMMA	59
III.3.4. Résultats expérimentaux pour le PS	63
III.3.5. Résultats expérimentaux pour le PC	68
III.3.6. Discussion des résultats expérimentaux	72
III.3.7. Etude comparative des trois matériaux objets de notre étude	79
III.3.8. Interprétation physique des résultats	83
III.3.9. Conclusion.	85
Conclusion générale	87
Bibliographie	88



Les évolutions technologiques et industrielles de ces dernières décennies dans le génie électrique nécessitent l'amélioration des matériaux utilisés dans l'isolation électrique. C'est ainsi que les polymères, connus pour leur grande capacité d'isolation électrique, ont envahi le domaine de l'isolation électrique. En effet les matériaux polymères trouvent une large application : lignes de transport d'énergie électrique, condensateurs, alternateurs, câbles, moteurs électriques et systèmes électroniques. Ces nombreuses applications font appel aux propriétés isolantes des polymères dont la résistivité transversale est généralement très élevée [1]. Ces propriétés dépendent bien entendu de la structure chimique des macromolécules constituant le polymère, mais aussi de différents facteurs et, en particulier, des adjuvants ou des impuretés. Le succès et l'utilisation massive et intense des polymères s'accompagnent malheureusement de risques encourus suite à leur dégradation. Ces matériaux vieillissent, d'où la nécessité de faire un diagnostic de l'isolation in situ. Le but de ce travail est d'appliquer une méthode de diagnostic non destructive, dite Recovery Voltage Method (RVM), à trois diélectriques du type polymère (polyméthacrylate de méthyle, polystyrène et polycarbonate). Nous essayerons de trouver une corrélation entre les résultats obtenus avec cette méthode et les caractéristiques électriques des matériaux telles leur résistivités transversale et leur permittivités relatives. La méthode de diagnostic RVM nous permettra d'évaluer les phénomènes de polarisation et de relaxation dans les matériaux polymères objets de notre étude. C'est ainsi que le premier chapitre de notre travail sera consacré à la présentation générale des trois types de polymères existants (polymères naturels, organiques et synthétiques), les méthodes de polymérisation ainsi que les éventuelles applications dans le domaine de l'isolation électrique.

La méthode de mesure de la tension de retour (RVM) a été définie initialement comme méthode de diagnostic non destructive d'une isolation huile/papier pour transformateurs [2,3,4,5,6,7]. Elle a été ensuite appliquée dans l'étude de l'état d'une isolation de plusieurs types de câbles électriques [8]. Le deuxième chapitre est donc consacré à une étude bibliographique traçant l'état de l'art de la RVM.

Le troisième chapitre est réservé à l'étude expérimentale. Nous donnons dans cette partie les caractéristiques détaillées des polymères objets de nos essais. Nous y donnons également la procédure expérimentale ainsi que les résultats expérimentaux.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale où sont résumés nos principaux résultats. Nous y donnons également quelques perspectives ouvertes par ce travail.

#### I.1. Introduction

Un matériau diélectrique est un matériau plus ou moins isolant, polarisable, dans lequel des dipôles électrostatiques existent ou se forment sous l'effet d'un champ électrique. C'est un milieu qui ne peut pas conduire de courant électrique et à ce tire, on l'appelle parfois isolant électrique. Mais malgré l'impossibilité des milieux diélectriques de conduire le courant, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet les atomes qui constituent le matériau peuvent présenter des dipôles électrostatiques qui sont susceptibles d'interagir avec un champ électrique. Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation reliée à ce champ, au niveau microscopique, par une polarisabilité, et au niveau macroscopique, par la susceptibilité électrique.

Les matériaux diélectriques se différencient suivant la variation de leurs caractéristiques électriques, physiques et chimiques. Ce chapitre est consacré à l'étude des polymères organiques et des polymères synthétique utilisés dans l'isolation électrique. Ces derniers sont en effet largement utilisés dans l'industrie électrique en raison de leurs performances mécaniques, leur bonne tenue électrique, leur facilité de mise en œuvre et leur faible coût. Ils sont principalement utilisés dans l'isolation des bobines de transformateurs, des barres d'alternateurs, des câbles de transport d'énergie, dans la fabrication des condensateurs et dans l'enrobage des composants électriques.

#### I.2. Différents types d'isolants utilisés en électrotechnique

Les milieux isolants électriques regroupent les milieux solides, liquides et gazeux.

#### I.2.1. Les isolants solides

Les isolants solides trouvent des applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. On les regroupe en deux catégories principales selon leur nature organique ou inorganique.

#### I.2.1.1. Les isolants inorganiques

Les principaux isolants inorganiques regroupent :

#### a. Les céramiques techniques

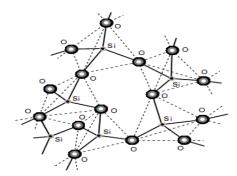
Elles sont actuellement utilisées pour les isolateurs à haute tension et correspondent à des formules voisines, soit de Al2O3, SiO2 (porcelaine traditionnelle), soit de Al2O3, 5SiO2 (stéatite) [9]. L'isolateur, après usinage de son ébauche cylindrique humide (type à capot et tige) ou sèche (type à long fût), est cuit dans un four à une température et pendant une durée convenable. Certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés. La céramique est très utilisée pour les matériels HTB des postes électriques.

Les objets en céramique possèdent généralement une grande résistance mécanique, une faible densité, une forte dureté et une résistance élevée à l'usure. Cependant, de petites imperfections, notamment de petites fissures dues à un frittage incomplet, dans la céramique peuvent rendre ces matériaux fragiles. Les céramiques gardent leur solidité même à des températures très élevées, résistent aux chocs thermiques et ont une forte résistance au vieillissement et aux agressions climatiques ou chimiques. Elles ont généralement une conductivité thermique faible. Elles sont opaques (céramiques cristallines) ou translucides (verres amorphes) [10]. Nous citons quelques exemples de matériaux céramiques :

- alumine (oxyde d'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): bonne tenue mécanique aux températures élevées,
   bonne conductivité thermique, grande résistivité électrique, grande dureté, bonne résistance
   à l'usure, inertie chimique.
- **cordiérite** (silicate alumineux ferro-magnésien) : bonne résistance aux chocs thermiques, bonne conductivité thermique.

#### **b.** Verres

Le verre, dans le langage courant, désigne un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent au rayonnement visible, souvent issu de sable siliceux. Le plus souvent, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO<sub>2</sub>) et de fondants (figure I.1).



**Figure I.1:** verre de silice : représentation schématique de la structure [11].

Les verres sont utilisés dans le domaine de l'électrotechnique et les principales applications sont l'isolement électrique de conducteurs ou d'éléments sous tension dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité. Beaucoup de types de verres sont utilisés dans l'isolation électrique et nous citons :

#### **▶** Le verre recuit

Le verre recuit a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension [9].

#### Le verre trempé

Il est obtenu par chauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression. Les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation. L'intérieur restant à une température supérieure à celle des couches extérieures, il ne peut se contracter librement, lors de son refroidissement. Il reste donc en extension et crée des contraintes de compression sur les couches superficielles. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C [9].

#### **Les fibres de verre**

Elles sont destinées au renforcement mécanique de pièces en résine directement au contact d'éléments conducteurs comme par exemple dans les isolateurs en matériaux composites de lignes ou de postes de transformation [12].

#### c. Les micas et produits micacés

Le mica est un minéral brillant formé de silicate d'aluminium et de potassium. Il présente une importance considérable pour l'industrie électrique, par suite des propriétés particulières qui s'attachent à ce matériau. Il est en effet doté d'une excellente tenue à la température, d'une rigidité diélectrique élevée et d'une inertie chimique remarquable. Le mica continue à être le matériau de choix et de base des systèmes d'isolation moyenne et haute tension. Les technologies d'emploi du mica n'ont pas cessé d'évoluer au cours des années, tant pour répondre à des demandes d'amélioration de performances que de rationalisation ou de réduction de coût, en profitant des possibilités nouvelles offertes par la mécanisation. Cette évolution a conduit à l'abandon progressif et aujourd'hui quasi total du mica utilisé sous forme de clivures au profit du papier de mica dont les usines de production se sont multipliées par le monde, se rapprochant le plus souvent des gisements de mica [13,14].

Industriellement, le mica est mis en pulpe dans de l'eau, puis transformé en papier mica à l'aide de machines identiques aux machines à papier classique. Les bobines de papier mica sont ensuite déroulées en continu, imprégnées de résines organiques ou silicones et si nécessaire contrecollées sur un support qui peut être un tissu en fibre de verre ou une feuille de polymère, puis enroulées de nouveau. Le papier de mica est utilisé comme :

- rubans pour isolation des barres de cuivre dans les moteurs et alternateurs à haute tension ;
- rubans pour protection anti-feu des câbles électriques dans les installations où les exigences de sécurité sont importantes (tunnels, bateaux, aéroports, hôpitaux, métro, etc.) ; la protection mica permet en effet aux installations de fonctionner plus longtemps en cas d'incendie ;
- applications industrielles diverses pour fours à induction et pièces isolantes.
- comme diélectrique dans certains condensateurs (figure I.2).

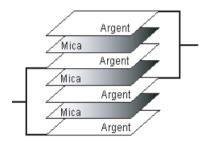


Figure I.2 : condensateur isolé au mica.

#### I.2.1.2. Les isolants organiques (polymères)

La catégorie des isolants organiques se subdivise entre matériaux naturels comme les caoutchoucs, paraffines et papier, et synthétiques (élastomères, polymères et composites).

#### A. Isolants organiques naturels

Les papiers et les cartons restent des matériaux de choix pour l'isolation des transformateurs haute tension et moyenne tension. Le choix de l'imprégnant est important étant donné que c'est de lui que dépendent les caractéristiques de l'isolation au papier. Pour imprégner les papiers isolants, les huiles végétales, la paraffine, les huiles de résine ont cédé rapidement la place aux huiles minérales irremplaçables en haute tension. A partir de 1930, en moyenne tension, les polychlorobiphényles (PCB), qui se distinguent par leur bonne tenue au feu et leur permittivité relative élevée, ont remplacé partiellement les huiles minérales dans les transformateurs et les condensateurs. De même, l'huile de ricin reste appréciée dans le domaine des condensateurs utilisés pour le stockage de l'énergie électrique. Dans les câbles, les huiles minérales, mais aussi les

dodécylbenzènes et des matières stabilisées à base de polybutylènes sont largement utilisés [14]. La figure I.3 présente un condensateur isolé au papier.

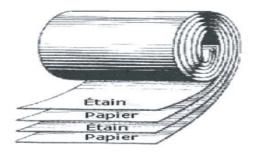


Figure I.3 : condensateur isolé au papier.

#### B. Isolants organiques synthétiques

Les isolants organiques synthétiques utilisés en électrotechnique sont les isolants en polymère, élastomère et composite.

#### **B.1.** Les polymères

#### **B.1.1.** Définition

Un polymère est un matériau composé de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules. Dans ces macromolécules, un motif, le monomère est répété un grand nombre de fois [15]. Un matériau polymère résulte de la polymérisation de la molécule organique de petite taille. Le degré de polymérisation n correspond au nombre de fois que le monomère est répété. La longueur caractéristique d'une chaîne est d'environ un micron.

Un polymère peut être naturel comme les polysaccharides ou artificiel, obtenu par modification chimique d'un polymère naturel (exemples : acétate de cellulose, méthylcellulose, galalithe). Le polymère peut également être synthétique, préparé par polymérisation de molécules monomères, comme le polystyrène ou le polyisoprène synthétique.

On distingue deux grandes catégories de réactions chimiques permettant la préparation des polymères :

- la polymérisation en chaîne ou polyaddition qui permet de produire, par exemple, le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène.
- la polymérisation par étapes ou polycondensation qui permet de fabriquer le polyéthylène téréphtalate (PET).

Il existe des polymères souples tel le polyéthylène (PE) tout comme des polymères rigides tels le polyparaphénylène (PpP).

Le squelette du polymère est stabilisé par des liaisons chimiques covalentes et il ne se dissout donc pas en solution. La cohésion entre macromolécules est assurée par des liaisons physiques Van der Waals ou hydrogènes, lesquelles se rompent sous l'effet d'un chauffage.

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques. Citons notamment :

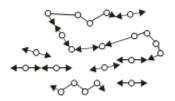
- les polymères thermoplastiques qui deviennent malléables quand ils sont chauffés, ce qui permet leur mise en œuvre ;
- les polymères thermodurcissables qui durcissent de façon irréversible sous l'action de la chaleur et/ou par ajout d'un additif ;
- les élastomères, qui sont déformables de manière réversible.

#### **B.1.2.** La polymérisation

La création de polymères peut résulter soit de la modification chimique de systèmes macromoléculaires existants, soit de la transformation de molécules simples en macromolécules. Cette dernière transformation est désignée par polymérisation et peut faire appel à des processus simples de la chimie organique ou bien à des réactions en chaîne dont les exigences et le traitement cinétique sont différents. Il en résulte deux catégories de polymérisation [16]:

#### > Les polymérisations par étapes

Elles sont également appelées polycondensations car l'eau est souvent produite lors de la réaction de polymérisation des polymères [17,18]. La polymérisation par étapes est schématisée sur la figure I.4.



**Figure I.4:** Polymérisation par étapes [18].

#### **Les polymérisations en chaîne**

Elles sont appelées aussi polyadditions. Une réaction de polymérisation en chaîne, est une réaction conduisant à la formation de polymères par additions successives de monomères sur une extrémité active de la chaîne macromoléculaire [19]. L'assemblage des monomères se fait sans formation de produit de réaction. La formation de polyéthylène est un exemple typique de la polymérisation en chaîne (figure I.5) [17,18].



Figure I.5: Polymérisation par chaîne [18].

#### **B.1.3.** Techniques de polymérisation

Les réactions de synthèse industrielle des polymères sont effectuées selon quatre techniques :

#### > Polymérisation en masse

La polymérisation en masse est la technique la plus simple, puisqu'elle met seulement en jeu le monomère et un amorceur soluble dans le monomère. Généralement, la réaction ne peut avoir lieu que sous des pressions et températures élevées et le polymère obtenu présente une pureté élevée [10,17].

#### Polymérisation en suspension

Dans ce cas, le polymère est insoluble dans un milieu dispersant tel que l'eau et l'amorceur n'est soluble que dans le polymère. Chaque gouttelette de la suspension peut être considérée comme un système isolé de polymérisation en masse. A la fin de la réaction, le polymère se trouve sous forme de perles si le polymère et le monomère sont solubles l'un dans l'autre, ou sous forme de granulés, s'ils ne le sont pas [10,17].

#### Polymérisation en solution

Dans une polymérisation en solution, le système réactif est constitué du monomère, d'un amorceur soluble dans le monomère et d'un solvant également miscible au monomère. Ce procédé permet d'opérer à des températures plus basses et d'extraire plus efficacement la chaleur de

réaction. Comparée à la polymérisation en masse, la polymérisation en solution nécessite une opération supplémentaire : la séparation du polymère et du solvant. Par ailleurs, les impuretés du solvant sont susceptibles de polluer le polymère [10,17].

#### Polymérisation en émulsion

Elle est caractérisée par le fait que les substances en présence pour la réaction forment deux phases non miscibles. Le polymère se forme soit dans l'une des phases, soit à la surface de séparation des phases [17].

#### **B.1.4.** Les caractéristiques des polymères

#### > Rigidité diélectrique

On trouve généralement pour les polymères des valeurs de rigidité diélectrique comprises entre : 150 kV/cm et 500 kV/cm. Cette rigidité est influencée par plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- la structure du polymère;
- le temps d'exposition à la haute tension ;
- la présence de bulles d'air.

#### Propriétés électriques superficielles

La résistance à la décharge électrique superficielle est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le matériau, et en le carbonisant, le rendre conducteur. La résistance superficielle est fortement influencée par l'humidité.

#### Résistivité transversale

Elle caractérise le pouvoir isolant du matériau. Pour la majorité des polymères la valeur de la résistivité transversale est supérieure à  $10^{12}\Omega$ .cm à la température ambiante.

#### Propriétés de protection physique et chimique

Ces propriétés englobent des caractéristiques diverses : imperméabilité aux liquides et aux gaz, résistance chimique aux solvants et résistance aux rayons ultraviolets.

#### **B.1.5.** Classification des polymères

Cette classification peut se faire en se basant sur l'origine du matériau, sa structure chimique, la géométrie de la molécule et le type de polymérisation utilisé.

#### B.1.5.1. Origine du matériau

- Polymères naturels tels que : le bois, le coton, le cuir et la laine.
- Polymères synthétiques : appelés aussi résines synthétiques, du fait des similarités observées entre leur structure et celle de la résine naturelle.
- Polymères artificiels : qui résultent de la transformation chimique des polymères naturels.

#### B.1.5.2. La structure chimique et la fonctionnalité des motifs

Suivant que le motif principal du polymère comprenne un ou plusieurs types de monomère, on distingue :

#### > Les homopolymères

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité et parmi lesquels nous pouvons citer le polyéthylène [23]. Il existe trois types d'homopolymères [18] :

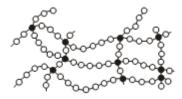
#### Les homopolymères linéaires



#### Les homopolymères branchés



#### Les homopolymères étoilés



#### > Les copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères [23].

Pour la suite du paragraphe, A et B seront deux unités différentes du copolymère. Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons [32] :

#### B.1.5. 3. La géométrie de la macromolécule

La géométrie de la macromolécule peut être caractérisée par l'ordre atomique et la distribution des liaisons.

#### > L'ordre atomique

On distingue selon cette caractéristique plusieurs types :

- Polymère amorphe : où les atomes sont désordonnés le long de la chaîne du polymère.
- Polymère cristallin : suite à certaines conditions tel le refroidissement lent après fusion, les polymères peuvent posséder une structure semi ordonnée et donner lieu à une cristallisation partielle.

#### **B.1.5.4.** Distribution spatiale des liaisons

Dans ce cas on parle de polymères linéaires, ramifiés ou tridimensionnels.

- Polymères linéaires: ils peuvent être des homopolymères ou des copolymères. Chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre élevé mais fini d'unités monomères. De tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être schématisée par un trait continu divisé en intervalles représentant chacun une unité monomère (figure I.6). Un ensemble de chaînes polymères est constitué d'entités de longueur variable, propriété désignée par le terme de polymolécularité.

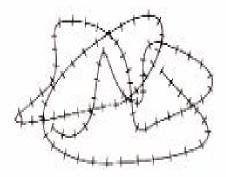
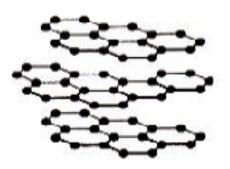


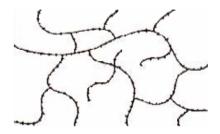
Figure I.6: Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire.

- **Polymères ramifiés :** Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (figure I.7).



**Figure I.7**: Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel : le carbone graphite.

- Polymères tridimensionnels : Ils résultent de la polymérisation de monomères dont la valence est supérieure à deux ou encore de 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 d'un objet 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 peut être représenté sur la figure I.8.



**Figure I. 8 :** Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel.

#### **B.1.5.5.** Propriétés thermiques

On peut classer les polymères en deux types, en fonction de leur réaction à la chaleur : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

#### 1. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des matériaux qui se ramollissent avec la température. Au dessus de la température de transition vitreuse, ils se comportent comme des matériaux viscoélastiques. La température de ramollissement dépend de la nature chimique du polymère ainsi que de son mode de fabrication. Les thermoplastiques fondent lorsqu'on les chauffe et c'est le cas du polyéthylène, du polypropylène, des polyamides ainsi que de certains polyesters. En revanche, l'avantage est que dans l'état fondu, on peut les mouler dans la forme que l'on veut. Le moulage est en effet un procédé industriel employé pour fabriquer des objets à la pièce, en discontinu. Ce procédé est bien connu également pour les métaux, mais les températures de fusion des polymères sont bien plus basses, de l'ordre de 80°C à 300°C. Un autre procédé répandu de mise en forme est l'extrusion qui consiste à faire passer la matière chaude dans une vis qui l'entraîne dans une filière dont le profil permet de produire des fils, des films, des plaques, des tubes et des enrobages de câbles [15,20]. Une représentation schématique d'une macromolécule de polymère thermoplastique est donnée sur la figure I.9.





Figure I.9: Représentations schématique des macromolécules d'un thermoplastique [21].

#### 1.1. Polymères thermoplastiques et leurs applications en isolation électrique

#### 1.1.1. Le polychlorure de vinyle (PVC)

Le polychlorure de vinyle ou chlorure de polyvinyle est un polymère thermoplastique de grande consommation, amorphe ou faiblement cristallin, connu généralement sous le sigle PVC (polyvinyl chloride). On trouve principalement trois types de PVC : le PVC rigide, souple et les films de PVC plastifiés.

#### • Formule moléculaire

Le PVC a pour formule chimique –(CH<sub>2</sub>–CHCl)<sub>n</sub> (figure I.10). Il est obtenu par polymérisation radicalaire du monomère chlorure de vinyle CH<sub>2</sub>=CHCl [25].

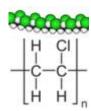


Figure I.10: Polychlorure de vinyle.

#### • Synthèse :

La synthèse du polychlorure de vinyle se fait selon le schéma de la figure I.11.

Monomère chlorure de vinyle

Polymère polychlorure de vinyle

Figure I.11 : synthèse du polychlorure de vinyle.

#### • Application en isolation électrique

Le PVC est utilisé comme gainage et isolant des câbles transportant l'énergie électrique [17,25].

#### 1.1.2. Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène ou polyéthène (sigle PE) est un des polymères les plus simples et les moins chers. C'est un plastique inerte qui appartient à la famille des polyoléfines. Il est formé par la polymérisation de l'éthylène  $C_2H_4$ . La molécule de polyéthylène se présente sous la forme d'une chaîne d'atomes de carbone dont les valences libres sont occupées par des atomes d'hydrogène (figures I.12 et I.13).

Le polyéthylène possède une haute rigidité diélectrique et une bonne résistance au cheminement des décharges superficielles. La rigidité diélectrique en champ alternatif peut être augmentée par des additifs aromatiques qui améliorent également la résistance aux décharges partielles. Sa permittivité est indépendante de la fréquence jusque dans les hyperfréquences et il en est de même du facteur de pertes diélectriques car la molécule est non polaire. La variation de la permittivité relative et du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température résulte uniquement du changement de densité. Le polyéthylène est assez inerte chimiquement, mais il brûle.

#### • Formule moléculaire

Figure I.12: le Polyéthylène.

#### • Synthèse:



Figure I.13: synthèse du polyéthylène.

#### a. Etude des polyéthylènes PEBD, PEHD et le PRC

Le polyéthylène basse densité (PEBD) et haute densité (PEHD) sont des polymères thermoplastiques tandis que les polyéthylènes réticulés chimiquement (PRC) sont des élastomères.

#### a.1. Polyéthylène basse densité (PEBD)

#### > Fabrication

Le polyéthylène basse densité est réalisé suivant un procédé à haute pression. L'éthylène est injecté en continu dans le réacteur par l'intermédiaire d'hyper compresseurs. La pression de polymérisation se situe entre 1000 et 5000 bars et la température entre 150 et 400 °C. Les catalyseurs de réaction utilisés sont du type peroxyde ou oxygène pur [22,24].

#### Propriétés électriques

Les PEBD sont des substances non polaires, caractérisées par une permittivité relative et un facteur de dissipation diélectrique faibles. Ils ont une rigidité diélectrique élevée (figure I.14). En conséquence, les PEBD sont largement employés en câblerie en tant qu'isolants d'une part en basse et haute fréquence, et d'autre part en basse, moyenne et haute tension.

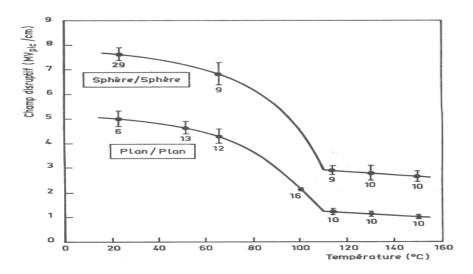


Figure I.14: Rigidité diélectrique d'un PEBD, à 60 Hz en fonction de la température [14].

#### a.2. Polyéthylène haute densité (PEHD)

#### > Fabrication

Le polyéthylène haute densité est obtenu selon un processus de synthèse basse pression. Les conditions de polymérisation sont les suivantes :

- Température entre 50 et 180 °C;
- Pression entre 30 et 40 bars [24].

#### Propriétés électriques

- La rigidité diélectrique intrinsèque du PEHD est très bonne ;
- Le polyéthylène haute densité présente d'excellentes propriétés électriques quelles que soient sa masse molaire et sa cristallinité. Ces propriétés, rassemblées dans le tableau I.1, en font un matériau de choix en isolation électrique.

Tableau I.1: Propriétés électriques du PEHD [18].

Propriété	Normes (*)	Valeur	
Résistivité transversale	CEI 93	$> 10^{16} \Omega \cdot cm$	
Résistivité superficielle	CEI 93	10 <sup>14</sup> Ω	
Rigidité diélectrique	CEI 243	$\approx 150 \text{ kV/mm}$	
Permittivité relative	CEI 250	2,3 - 2,5	
Tangente de l'angle de perte à 10 <sup>6</sup> Hz	CEI 250	≈ 10 <sup>-4</sup>	
Indice de résistance au courant de cheminement.	CEI 112	CTI 600	

(\*) CEI : Commission Électrotechnique Internationale.

#### a.3. Le polyéthylène réticulé chimiquement PRC

A partir du polyéthylène, on peut obtenir par réticulation chimique un PRC. Le procédé le plus utilisé consiste à incorporer du peroxyde de dicumyle à une teneur de 2 % dans le polyéthylène, avant ou pendant l'extrusion, puis à soumettre le mélange à une température supérieure à 150°C, sous une pression de vapeur d'eau ou d'azote [14].

#### Principe de la réticulation

La réticulation est la modification de la structure moléculaire du polymère. Elle consiste à lier les chaînes de molécule par des liaisons radiales (pontage des chaînes moléculaires) et à les transformer en un réseau tridimensionnel qui permet d'éviter le glissement de toutes les chaînes moléculaires les unes par rapport aux autres [27].

#### Propriétés électriques

Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celle du PEBD. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE, ces arborescences étant des chemins de PE calciné qui se forment au sein de l'isolant sous l'effet

d'un champ électrique. Elles sont, en général, initiées par une impureté, une fissure, une bulle, ou une aspérité à l'intérieur de l'isolant. Elles sont des causes importantes de claquage des câbles (vieillissement) [16]. Le PRC est un matériau moins rigide que le PE pour une température basse, et le champ maximal admissible avec le PRC est de 8 kV/mm.

#### **1.1.3. Polypropylène (PP)** [17]

La molécule de polypropylène est une molécule d'éthylène dans laquelle on aurait remplacé un atome hydrogène par un groupement méthyle -CH<sub>3</sub>. Le polypropylène (ou polypropène) isotactique, de sigle PP (ou PPi) et de formule chimique (-CH2=CH (CH<sub>3</sub>)-)<sub>n</sub>, est un polymère thermoplastique semi-cristallin de grande consommation. Le polypropylène isotactique est une polyoléfine résultant de la polymérisation des monomères propylènes [(CH<sub>2</sub>=CH-CH<sub>3</sub>)], seule la molécule isotactique donne un matériau intéressant pour les applications.

La permittivité relative  $\varepsilon_r$  du polypropylène est une constante en fonction de la fréquence, jusqu'à  $10^9$  Hz. La rigidité diélectrique des feuilles minces atteint 300 kV/mm. La synthèse du polypropylène suit le schéma de la figure I.16.

**Figure I.16 :** synthèse du polypropylène.

En raison du cumul de bonnes propriétés électriques et mécaniques, le polypropylène en combinaison avec le papier est largement utilisé dans les condensateurs de puissance servant à compenser la composante réactive du courant [17].

#### 1.1.4. Polytétrafluoroéthylène (PTFE)

Le polytétrafluoroéthylène (sigle PTFE), est un fluoropolymère issu du tétrafluoroéthylène. Si l'on remplace les 4 atomes d'hydrogène de la molécule d'éthylène par 4 atomes de fluor, on obtient le tetrafluoroéthylène, dont la polymérisation donne le polytétrafluoroéthylène connu sous le nom de téflon.

La permittivité du PTFE ne varie pas en fonction de la fréquence quand cette dernière est inférieure à 10<sup>10</sup> Hz. Les pertes diélectriques, de l'ordre de 10<sup>-4</sup> à 10<sup>6</sup> Hz n'atteignent que 5.10<sup>-4</sup> à 10<sup>9</sup> Hz, ce qui est pratiquement faible. La résistivité du PTFE est élevée et peu affectée par la présence d'humidité. Par contre, la dégradation sous l'effet de décharges limite le champ électrique admissible. Le PTFE est couramment utilisé dans les connecteurs à haute fréquence. Chargé de fibres de verre, on peut en faire des isolateurs de suspension sur lesquels la neige ne s'accumule pas. Le PTFE est un polymère indiqué pour une large utilisation dans les conditions thermiques extrêmes [17].

#### 1.1.5. Le styrène acrylonitrile (SAN)

Le styrène acrylonitrile est un copolymère préparé à partir des monomères de styrène et d'acrylonitrile. Le polymère peut être produit par la polymérisation en émulsion, en masse ou bien en solution. Le styrène acrylonitrile contient généralement entre 20 et 30 % d'acrylonitrile. La teneur en acrylonitrile du polymère 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 copolymère de SAN est un matériau linéaire, amorphe avec une bonne résistante 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 [28]. La formule moléculaire du SAN suit le schéma de la figure I.17.

Figure I.17: Formule moléculaire du copolymère acrylonitrile [29].

La synthèse du copolymère de styrène acrylonitrile suit le schéma de la figure I.18.

Figure I.18: synthèse du copolymère de styrène acrylonitrile [30].

#### 1.1.6. Polyamides (PA)

Un polyamide est un polymère contenant des fonctions amides -C(=O)-NH- résultant d'une réaction de polycondensation entre les fonctions acide carboxylique et amine (-NH2). La formule moléculaire du PA suit le schéma de la figure I.19.

Figure I.19: polyamide.

#### 2. Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des polymères qui réticulent avec la température. Ces matériaux sont donc de plus en plus fragiles mécaniquement lors d'une augmentation de température. Les thermodurcissables ne sont pas recyclables et leur mise en œuvre automatisée est plus complexe par contre, ils peuvent servir de matériaux structuraux. La macromolécule d'un thermodurcissable est représentée sur la figure I.20.

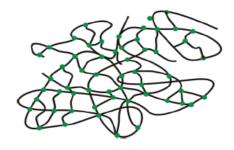


Figure I.20 : Représentation schématique de la macromolécule d'un thermodurcissable.

#### 2.1. Exemple de polymères thermodurcissables et leurs applications en isolation électrique

#### 2.1.1. Polyphénol

On peut considérer les phénols comme des dérivés de l'eau, dans laquelle l'un des atomes H est remplacé par un groupement aryle. Les polyphénols sont créés par réaction d'un mélange de phénol avec le formaldéhyde. Dans le cas particulier où l'on utilise du phénol pur, on obtient le plus ancien et le plus connu des polyphénols qui est la bakélite dont la structure est représentée sur la figure I.21.

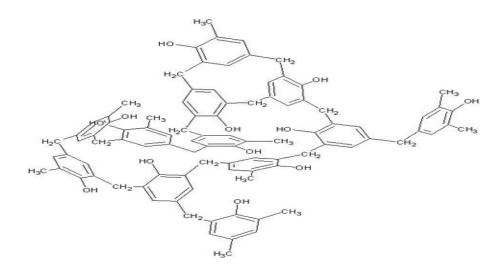


Figure I.21 : Structure moléculaire de la bakélite.

La bakélite possède une résistance au courant superficiel médiocre et un caractère hygroscopique assez marqué qui rend son emploi en atmosphère humide problématique.

Les polyphénols servent à la confection de corps de bobinages, de circuits imprimés de qualité courante et de pièces d'isolation pour relais électromécaniques. En haute tension, leur résistance à l'huile et aux sollicitations mécaniques en font des matériaux de choix pour les pièces isolantes des disjoncteurs et des transformateurs de puissance [17].

#### 2.1.2. Les Polyépoxydes

Les résines polyépoxydes sont formées de molécules linéaires terminées par des groupes époxydes. Entre ces groupes, obtenus le plus souvent au moyen d'épichlorhydrine, on peut intercaler d'autres groupements provenant de divers dérivés de phénols, par exemple le dihydroxydiphenylpropane. Ainsi, les atomes hydrogènes des groupes hydroxyles se combinent au chlore de l'épichlorhydrine, formant de l'acide chlorhydrique neutralisé par le milieu basique ou

l'on provoque la réaction. La molécule de la résine polyépoxyde se présente alors sous la forme donnée sur la figure I.22.

Figure I.22: Molécule de la résine polyépoxydes [17].

Les polyépoxydes sont utilisés dans l'isolation des encoches des grosses machines et certaines pièces de disjoncteurs [17].

#### 3. Les élastomères

Les élastomères sont des polymères à caractère amorphe ou cristallin présentant des propriétés remarquables en élasticité. Ils sont thermoplastiques et deviennent thermodurcissables par vulcanisation. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation, du soufre, du carbone et différents agents chimiques.

#### 3.1. Exemple des polymères élastomère et leurs applications en isolation électrique

#### 3.1.1. Polyisoprène

Le Polyisoprène est obtenu par la vulcanisation du caoutchouc naturel ou synthétique. La vulcanisation est produite par le soufre qui établit des liaisons entre chaînes voisines en faisant éclater les doubles liaisons selon le schéma de la figure I.23.

Figure I.23 : Polyisoprène.

La résistivité électrique du polyisoprène est élevée, mais il résiste mal aux courants superficiels. La présence du soufre le rend légèrement polaire. La température maximum admissible en permanence n'est que de 60°C. Il vieillit relativement mal et ne résiste ni à l'ozone ni à certaines

huiles minérales. Les sels, les bases, l'acide sulfurique concentré et les acides organiques, à l'exception de l'acide nitrique n'attaquent pas le polyisoprène. Coûteux pour ses performances, le polyisoprène est progressivement remplacé par d'autres caoutchoucs synthétiques tels que les EPR (Ethylène-Propylène-Rubber) [17].

Le copolymère obtenu par la réaction de molécules d'éthylène et de propylène en concentrations molaires égales est connu sous le sigle EPR (Ethylène-Propylène-Rubber). Sa formule moléculaire est donnée sur la figure I.24.

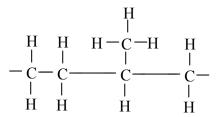


Figure I.24 : Molécule du copolymère EPR.

Ces élastomères sont largement utilisés pour la fabrication d'accessoires injectés, utilisés dans le domaine de la haute tension.

#### 3.1.2. Elastomères silicones

Les élastomères silicones sont déjà largement utilisés dans l'isolation électrique extérieure grâce à la bonne tenue aux contraintes climatiques. Ils commencent aujourd'hui à être utilisés dans l'isolation volumique pour des applications haute tension. Les silicones (ou polyorganosiloxanes) ont une structure chimique basée sur une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène tel que c'est représenté sur la figure I.25. C'est par la présence de silicium et par l'existence de la liaison Si-O que les silicones se distinguent des autres polymères organiques. Les isolants à base de silicone actuels sont généralement obtenus à partir d'un moule dans lequel la matière est injectée à une température élevée.

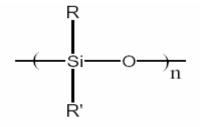


Figure I.25: La liaison Si-O [31].

Une nouvelle méthode consiste à déposer sur un plateau tournant la résine silicone directement de la machine à extrusion (semblable à l'enroulement d'un fil sur une bobine). Ce nouveau procédé présente un certain nombre d'avantages. Notamment pour les lignes électriques de haute tension, la forme en spirale et les propriétés hydrofuges du matériau empêchent l'accumulation de dépôts de poussière et d'eau. Par ailleurs en matière de sécurité, l'élastomère silicone s'avère plus fiable puisqu'en cas de claquage, il n'explose pas et n'envoie pas de projectiles contrairement à la porcelaine ou au verre. Cette technologie peut également développer différents recouvrements isolants, qu'ils soient arrondis ou creux, destinés aux équipements électriques de haute tension.

## B.1.6. Avantages de l'utilisation des polymères dans l'isolation des câbles à courant alternatif

Par rapport au câbles à base de papier imprégné d'huile minérale ou d'un produit de synthèse, l'isolation extrudée à base de polyoléfines (PE, PRC) présente des caractéristiques qui se sont traduites par des avantages techniques et économiques dont on peut retenir les points suivants [14]:

- la suppression du problème de la migration des matières d'imprégnation ;
- une température de fonctionnement et une température admissible après un court-circuit plus élevées en moyenne tension ;
- la facilité de pose des câbles et de montage des accessoires qui complète l'avantage procuré par leur légèreté ;
- l'élimination des problèmes de maintenance.

#### I.2.1.3. Les isolants composites

Les matériaux composites ou plastiques renforcés sont composés d'un mélange de résine thermodurcissable (comme le polyéther ou l'époxy) et d'un renforcement à base de fibres de verre, fibres de carbone, tissu ou autre matière. Cette association donne au produit des caractéristiques particulières de résistance mécanique. Les matériaux composites sont utilisés dans la confection des chaines d'isolateurs pour la haute tension.



#### II.1. Introduction

Ces dernières années, la mesure de la tension de retour est érigée comme méthode non destructive de caractérisation de l'isolation des systèmes électriques [33]. Le phénomène qui régit la tension de retour est appelé "effet mémoire" et correspond à la tendance qu'a une capacité à se recharger après avoir été déchargée [34]. La méthode de mesure de la tension de retour élaborée pour caractériser le papier imprégné dans les transformateurs à l'huile minérale est considérée comme une nouvelle technologie exceptionnelle qui permet de donner le diagnostic de l'état isolant du papier imprégné. C'est une grande avancée, en raison du fait que, jusqu'à présent, il n'y a pas d'autre méthode pour contrôler l'état isolant du papier, sans l'extraire de l'intérieur du transformateur. Le diagnostic d'une isolation consiste à donner la pente initiale, le maximum de la tension de retour et temps pendant lequel ce maximum est atteint suite à la mesure complète du spectre de polarisation [35]. La méthode de la tension de retour est a approuvée et appliquée pour l'isolation huile/papier des transformateurs ainsi que dans l'isolation des câbles XLPE et certaines isolations au PVC [2,8,36].

## II.2. Méthode non destructive de diagnostic des isolations au papier imprégné : Méthode de la tension de retour

La méthode de la tension de retour dite méthode RVM (Recovery Voltage Method) est une méthode mettant en évidence les processus de polarisation dans une isolation électrique. C'est une méthode destinée à donner des informations concernant le taux d'humidité contenu dans l'isolation d'un transformateur. Elle a été mise au point dans les années 70 [3,37] à l'Université Technique de Budapest (Hongrie) pour évaluer les caractéristiques d'une isolation mais elle a été vite abandonnée. Depuis les années 90, un regain d'intérêt pour cette méthode se fit sentir, cela dans le but d'évaluer la qualité de séchage de l'isolation des transformateurs, à l'issue de leur fabrication ou d'une éventuelle réparation [4,38]. Le nouvel intérêt pour cette méthode a lieu également en vue de son application à d'autre types d'isolants tels ceux utilisés dans les câbles de transport d'énergie [37,56].

La méthode RVM permet également de mesurer les impacts éventuels du transport ou du stockage des transformateurs avant et après apport d'huile dans la cuve [5,38,47]. Cette méthode peut être considérée comme une méthode complémentaire à celle de l'analyse des gaz dissous faisant appel à la chromatographie. Elle fournit des données sur l'état général de l'isolement tout en offrant des possibilités d'appréciation du vieillissement diélectrique d'une isolation au papier imprégné [4].

#### II.3. Description de la méthode RVM

La méthode RVM [4,5,6,7,38,39,40] est basée sur la détermination de la tension résiduelle suite à l'application d'une tension continue, en chargeant et déchargeant l'isolation. Cette méthode constitue un moyen d'obtenir des informations sur l'état du papier des systèmes isolants à papier huilé sans nécessiter des prélèvements d'échantillons de papier. Dans le cas des transformateurs, cette méthode peut être utilisée in situ, par exemple lors des essais de réception destinés à vérifier le bon déroulement du transport et des procédures de montage du matériel. L'appareil utilisé à cet effet est dénommé "Recovery Voltage Meter".

#### II.3.1. Schéma de principe de la méthode RVM

Bognar et al. [4], Csépes et al. [38] ainsi que beaucoup d'autres auteurs [41-48] ayant travaillé sur la tension de retour ont adopté la méthode schématisée sur la figure II.1.

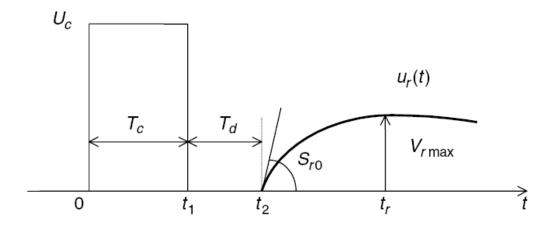


Figure II.1: Représentation schématique de la méthode RVM [38,41,42,56].

Le circuit qui régit l'étude de la tension de retour est donné par la figure II.2.

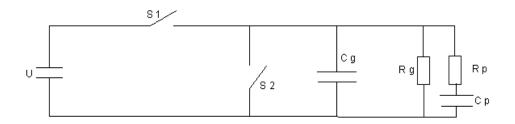


Figure II.2 : circuit général de mesure de la tension de retour [6].

Dans le schéma ci-dessus :

Cg: représente la capacité géométrique;

Rg: représente la résistance d'isolation;

Cp : est la capacité de polarisation ;

Rp : est la résistance de polarisation ;

U : est la tension délivrée par une source de tension continue.

Les éléments Cg, Rg, Cp et Rp représentent une modélisation de l'isolant objet de l'étude de la tension de retour.

La mesure de la tension de retour se résume dans les phases suivantes :

## 1<sup>ère</sup> phase :

On ferme l'interrupteur  $S_1$  pendant un temps dit temps de charge  $t_c$ , figure II.3. L'objet d'essai se charge sous la tension  $U_C$ .

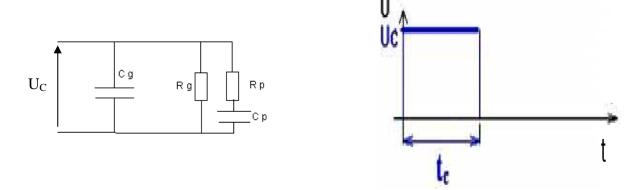


Figure II.3 : Charge de l'isolant objet de l'essai.

### 2<sup>ème</sup> phase:

 $S_1$  est ouvert,  $S_2$  est fermé pendant un temps dit temps de décharge  $t_d$ . Le temps de décharge  $t_d$  est généralement pris comme la moitié du temps de charge  $t_c$ .

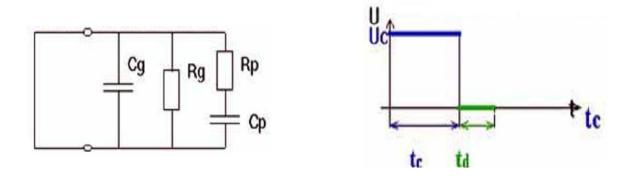


Figure II.4 : Décharge de l'isolant objet de l'essai.

## 3<sup>ème</sup> phase:

On supprime le court-circuit et on mesure la tension de retour.

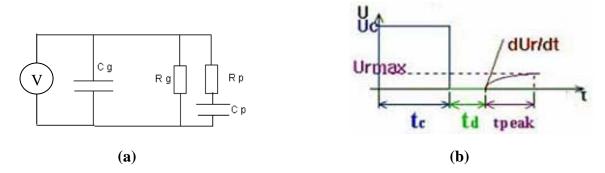


Figure II.5 : Mesure de la tension de retour.

Dans le diagramme (b) de la figure II.5

 $\bigcup_{max}$ : représente la tension de retour maximale ;

 $\frac{dUr}{dt}$  : est la pente initiale ;

 $t_{\mbox{\tiny peak}}$   $\;$  : Temps correspondant à la tension maximale.

#### II.3.2. Phénomènes physiques régissant les différentes étapes

## 1<sup>ère</sup> étape

Pendant l'étape de charge, les molécules constituant l'isolant se polarisent et s'alignent dans la direction du champ appliqué.

# 2<sup>ème</sup> étape

Pendant la décharge, les molécules de l'isolant se dépolarisent partiellement.

# 3<sup>ème</sup> étape

Lors de la mesure de la tension de retour, les charges liées par la polarisation tourneront pour se libérer; elles se transforment donc en charges libres. Une tension réapparaît alors entre les électrodes du diélectrique. Cette tension est appelée tension de retour.

#### II.4. Evaluation de l'état d'une isolation à partir de la méthode RVM

L'état d'une isolation est évalué à partir des paramètres précédents. Un système avec une grande teneur en humidité a relativement une réponse rapide à la polarisation ce qui correspond à une grande valeur de  $V_{max}$  et une petite constante de temps. Par contre un système avec une faible teneur en humidité a une polarisation lente. Ce qui signifie une constante de temps importante et une petite valeur de  $V_{max}$ .

#### **II.5.** Le spectre de polarisation [2, 43]

Par référence à la figure II.1, la méthode RVM est utilisée pour tracer le spectre de polarisation déterminé à partir des valeurs maximales correspondant à plusieurs essais avec des temps de charge différents. Dans chaque essai, la tension de retour maximale est prélevée.

On définit donc le spectre de polarisation comme étant le graphe représentant les variations des tensions de retour maximales en fonction du temps de charge. Le maximum du spectre de polarisation sera atteint après un temps suffisamment élevé. Cette méthode de caractérisation d'une isolation électrique a souvent été appliquée en pratique pendant les années récentes, en vue d'identifier la teneur en humidité dans les systèmes d'isolation pouvant être affectés par l'humidité. Cependant l'interprétation des résultats est en général très difficile à effectuer.

Le spectre de polarisation de la méthode de diagnostic RVM (Recovery Voltage Measurement) peut se diviser en deux catégories : standard et non standard.

- Le spectre standard a uniquement un maximum global, ce qui fournit raisonnablement l'évaluation précise de la teneur en humidité contenue dans l'isolation huile-papier.
- Le spectre non standard avec des maxima multiples, est plus compliqué et pourrait donner beaucoup d'informations pour l'interprétation des résultats des diverses expériences.

# II.5.1. Paramètres influençant sur le spectre de polarisation d'une isolation au papier

La méthode RVM utilise le spectre de polarisation pour estimer le vieillissement du papier intimement lié à la quantité d'humidité contenue dans l'isolation. Le taud d'humidité est évalué à partir du tracé du spectre de polarisation. Le spectre de polarisation pour un transformateur dont l'isolation est en bon état doit avoir un seul maximum de tension. Le temps au bout duquel ce maximum est atteint est appelé temps max principal [50].

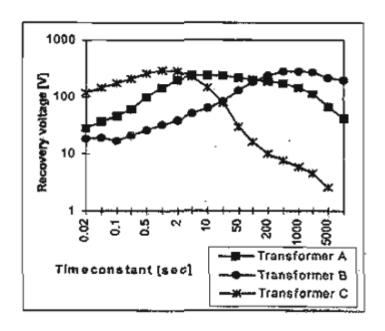
La localisation de ces maxima de tension peut être influencée par plusieurs paramètres :

#### 1. Le taux d'humidité de l'isolation

Une augmentation du taux d'humidité entraine une petite constante de temps dominante.

# 2. Le vieillissement du papier

Le vieillissement du papier conduit à une petite constante de temps dominante. La figure II.6 nous donne le spectre de polarisation pour trois transformateurs dont la durée du service varie entre 40 et 70 ans.



**Figure II.6 :** Spectre de polarisation pour trois transformateurs [44].

Le transformateur A (70 kVA), en service pendant 70 années;

Le transformateur **B** (16 kVA), en service pendant 40 années ;

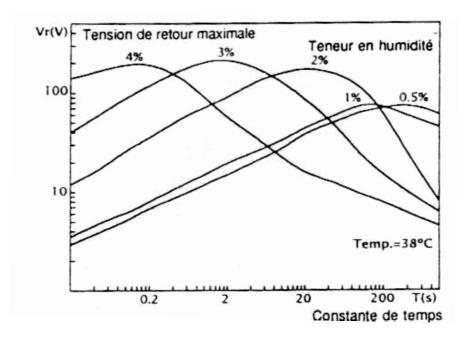
Le transformateur C (200 kVA), en service pendant 60 années.

# 3. Température de l'isolation :

Une température élevée pendant la phase de mesure de la tension de retour conduit à une petite constante de temps.

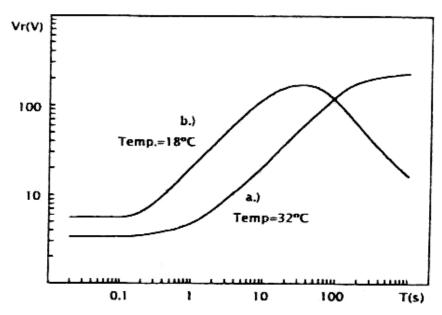
#### II.6. Evaluation du taux d'humidité dans le papier imprégné par la méthode RVM

Le spectre de polarisation, représentant les tensions de retour maximales en fonction du temps de charge, a été déterminé pour des taux d'humidité de 0.5, 1, 2, 3 et 4% [38]. Ce spectre est représenté sur la figure II.7 et serait lié aux mécanismes de polarisation interfaciale. Ces mécanismes comprennent un déplacement d'ions, rendu possible par une contamination par l'humidité associée à la présence de produits de décomposition.



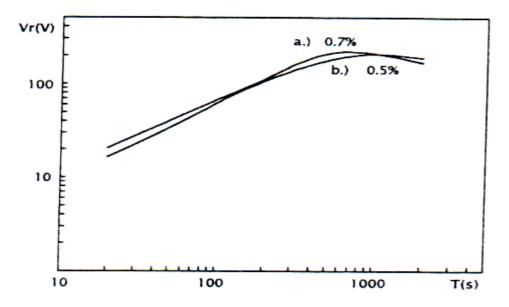
**Figure II.7 :** Spectre de polarisation pour un papier huilé [38].

La figure II.8 représente deux spectres établis avec la RVM pour deux transformateurs neufs. La courbe "a" représente une constante de temps supérieure à 1000 secondes à laquelle correspond un taux d'humidité d'environ 0.5% à une température d'essai de 32°C. La courbe "b", quant à elle, donne une constante de temps comprise entre 30 et 40 secondes, pour une température d'essai de 18°C. Cette constante de temps est aussi appelée constante dominante et correspond au maximum du spectre de polarisation.



**Figure II.8:** Spectre de polarisation pour deux transformateurs neufs [38].

Wolny [51] a étudié l'influence de la température sur la constante dominante d'une isolation au papier imprégné. Selon l'auteur, cette constante diminue pour les températures allant jusqu'à 45°C. Au-delà de cette température, la constante dominante augmente. Ceci est dû à la diminution de l'humidité du papier puisque l'eau migre du papier vers l'huile. La méthode de diagnostic RVM est également applicable pour les transformateurs à très haute tension. En effet ces transformateurs sont souvent livrés sans l'huile isolante et remplis d'azote sec. Ce conditionnement est souvent destiné à éviter la pénétration d'humidité. Les traversées haute tension sont également montées sur le site d'installation d'un transformateur et c'est pendant toutes ces manœuvres qu'une pénétration d'humidité peut survenir. La figure II.9 représente deux spectres établis grâce à la méthode de diagnostic RVM. La courbe "a" a été obtenue après le transport, le remplissage d'huile et le montage du matériel. La teneur en humidité est de 0.7%, cette teneur est légèrement supérieure à la valeur de référence (0.5%). Le séchage sur site permet de rétablir la teneur en humidité recommandée. La courbe "b" représente le spectre obtenu après séchage ; ce spectre correspond à un taux d'humidité de 0.5%.



**Figure II.9:** Spectre de polarisation pour un transformateur [38].

- (a) Spectre obtenu après transport, remplissage d'huile et montage du matériel.
- (b) Spectre obtenu après séchage sur site.

La méthode de diagnostic RVM a également été appliquée en vue de détecter les signes de détérioration des vieux transformateurs. D'après la figure II.10, le premier essai a été effectué en 1980 tandis que le deuxième a été effectué dix ans plus tard.

- Dans le premier essai, effectué à une température de 15°C, la constante de temps dominante est de 1000 secondes.
- Dans le deuxième essai, effectué à la température de 26°C, la constante de temps dominante est de 200 secondes. Il est à noter que le segment initial de la deuxième courbe est situé au dessus de la section initiale de la première courbe. Cela signifie qu'une nouvelle polarisation de charges d'espace est intervenue, parallèlement à une augmentation de la teneur en humidité. Ce phénomène n'est pas dû uniquement à une distribution hétérogène de l'humidité mais aussi à la formation de produits de vieillissement autres que l'eau.

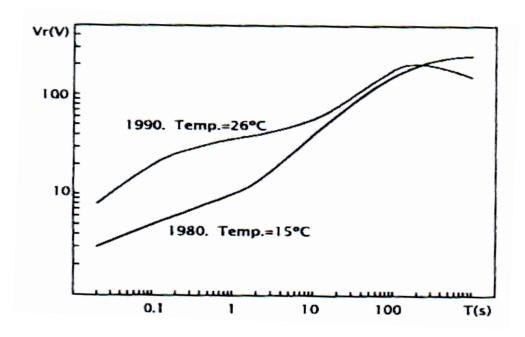
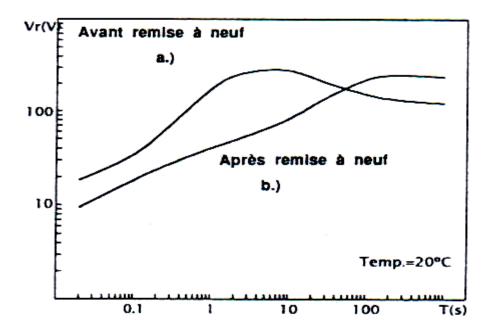


Figure II.10: Spectre de polarisation pour un transformateur (essais en 1980 et 1990) [38].

Sur la figure II.11 sont représentés les spectres de polarisation d'un transformateur pour lesquels les essais ont été effectués avant et après la régénération du complexe huile-papier.



**Figure II.11:** Spectre de polarisation pour un transformateur [38].

La courbe "a" correspond à un taux d'humidité d'environ 3.4% alors que la courbe "b" correspond à un taux de 1.7% [38].

#### II.7. Caractérisation du vieillissement du papier imprégné par la méthode RVM [56]

Urbani et al [6] ont étudié la tension de retour en vue d'évaluer le vieillissement d'une isolation au papier imprégné. Partant du fait connu depuis fort longtemps que l'humidité affecte fortement le vieillissement d'une isolation au papier imprégné, les auteurs ont étudié la tension de retour de deux isolations ayant différentes teneurs en eau. Leur but était de donner une explication qualitative au lien existant entre la teneur en eau d'une isolation et la tension de retour. Ces auteurs considèrent deux échantillons A et B dont les teneurs en eau sont  $X_A$ % et  $X_B$ % avec  $X_A$  supérieure à  $X_B$  et  $t_d = \frac{t_C}{2}$ . La constante de temps de polarisation est modélisée par la relation  $\tau_P = R_P C_P$ . Dans cette relation,  $R_P$  est la résistance de l'isolation et  $C_P$  est sa capacité géométrique. Selon les auteurs, une teneur en eau élevée mène vers une charge et une décharge très rapides de la capacité. Une comparaison qualitative est représentée sur le tableau II.1.

- Pour l'isolant A : Une teneur en eau élevée mène vers une charge et une décharge de la capacité plus rapidement. La constante de temps de polarisation  $\tau_{PA}$  est faible. La tension de retour n'apparaîtrait qu'aux temps de charge très courts (ie :  $t_d$  petits).
- Pour l'isolant B : La teneur en eau est inférieure à celle de l'échantillon A. La polarisation dans ce cas est plus lente et la constante de temps de polarisation  $\tau_{PB}$  est élevée. La tension de retour n'apparaîtrait qu'aux temps de charge assez longs.

**Tableau II.1:** Comparaison qualitative des isolants A et B [6].

Système isolant	A		В	
Taux d'humidité	X <sub>A</sub> (%)	$\rangle\rangle$	X <sub>B</sub> (%)	
Résistance de polarisation	$R_{PA}$	<b>{</b> {	$R_{PB}$	
Constante de temps de polarisation	$ au_{\mathrm{PA}}$	<b>\</b> \	$ au_{ ext{PB}}$	

#### II.8. Modèles théoriques de caractérisation de la tension de retour

La polarisation est un phénomène qui varie avec le champ électrique appliqué dans le domaine du temps. Celle-ci contient deux phases : la phase rapide qui suit l'application d'un champ électrique de façon pratiquement instantanée et la phase lente qui ne suit pas le champ électrique E(t) en raison d'un phénomène d'inertie. L'équation II.1 exprime la phase lente et rapide de la polarisation en fonction du temps.

$$P(t) = \underbrace{\varepsilon_0 \chi_c E(t)}_{polarisati \ on \ rapide} + \underbrace{\Delta P(t)}_{polarisati \ on \ lente}$$
 (II.1)

Dans l'expression ci-dessus  $\chi_c$  correspond au phénomène rapide de polarisation moléculaire et c'est un coefficient sans unité.

Le passage d'un matériau isolant de l'état non polarisé à l'état polarisé intervient à travers un certain retard à l'établissement de la polarisation suite à l'inertie de l'orientation des dipôles dans le sens du champ appliqué. Afin d'analyser la réponse diélectrique dans le domaine temporel, la fonction de réponse diélectrique f(t) a été définie et caractérise la réponse du matériau à une excitation électrique arbitraire.

D'après Jonsher [49], pour pouvoir établir la dépendance temporelle de la polarisation totale, il est nécessaire d'admettre que la réponse globale à une excitation électrique quelconque E(t) est la somme des réponses individuelles à des excitations bien définies (principe de superposition).

Debye dans son modèle classique a étudié la polarisation lente dans un diélectrique. Il a représenté ce dernier par un circuit équivalent contenant une résistance et une capacité montées en série. Les différents processus de polarisation dans le diélectrique sont représentés par des constantes de temps de relaxation  $\tau_i$ . Par conséquent la fonction de réponse du diélectrique soumis à un champ électrique est donnée par l'équation II.2.

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{k_i}{\tau_i} \exp(-t/\tau_i)$$
 (II.2)

Le modèle généralisé de Debye est représenté par le circuit de la figure II.12.

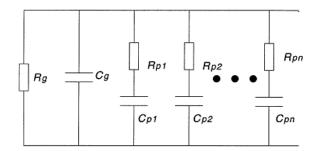
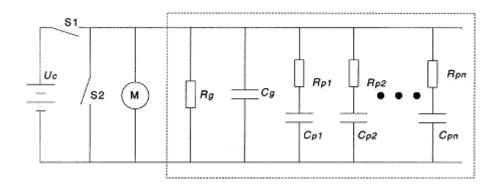


Figure II.12 : Modèle généralisé de Debye (ED) [55,52].

Birlasekaran et Xingzh [55] ont utilisé le modèle généralisé de Debye et ont appliqué la méthode RVM par simulation numérique selon le schéma de la figure II.13. Les paramètres variables dans cette simulation ont été pris des essais expérimentaux de la méthode RVM appliquée à des transformateurs et des câbles haute tension.



**Figure II.13**: Mesure de la tension de retour du circuit généralisé de Debye [55].

Les capacités sont supposées initialement déchargées. L'interrupteur S1 est fermé est l'interrupteur S2 est ouvert, le circuit est mis sous tension continue  $U_C$  pendant un temps de charge  $t_d$ . L'ensemble des capacités  $C_{pi}$  se charge par la tension  $U_c$ , la tension  $U_{cPi}$  aux bornes de chaque capacité de polarisation  $C_{Pi}$  est donnée par l'équation II.3 :

$$U_{cPi}(t_c) = U_c \left( 1 - \exp\left(\frac{-t_c}{R_{Pi}C_{Pi}}\right) \right)$$
 (II.3)

L'interrupteur S2 est fermé est l'interrupteur S1 est ouvert, l'essai en objet est court-cuité pendant un temps de décharge  $t_d$ . Les capacités  $C_{p_i}$  se déchargent à travers les résistances  $R_{p_i}$ . La tension  $U_{Cpi}$  mesurée aux bornes de chaque capacité  $C_{pi}$  est donnée par l'équation II.4 :

$$U_{cPi}(t_c, t_d) = U_c \left( 1 - \exp\left(\frac{-t_c}{R_{Pi}C_{Pi}}\right) \right) \exp\left(\frac{-t_d}{R_{Pi}C_{Pi}}\right)$$
(II.4)

Pour  $t_c/t_d = 2$ , le maximum de la tension  $U_{cPi}$  se produit à  $t_c = R_{Pi}C_{Pi} \ln 3$ .

Dès que le court-circuit est ouvert (par l'ouverture de l'interrupteur S2, et S1 est toujours ouvert), une tension est mesurée, cette tension est la tension de retour qui est due aux charges restantes dans tous les condensateurs du circuit ( $C_g$  et  $C_{pn}$ ).

Le rapport entre la tension de retour  $u_r$  et la tension  $U_{cPi}$  à travers les capacités  $C_{pn}$  est calculé à partir du schéma équivalent en utilisant la transformé de Laplace, ce rapport est donné par l'équation II.5

$$\frac{u_{r}(s)}{U_{cPi}} = \frac{R_{g}C_{Pi} s \prod_{j=1...n}^{j\neq i} (R_{Pj}C_{Pj}s+1)}{(R_{g}C_{g}s+1) \prod_{i=1}^{n} (R_{Pj}C_{Pj}s+1) + \sum_{i=1}^{n} R_{g}C_{Pi}s \prod_{j=1}^{j\neq i} (R_{Pj}C_{Pj}s+1)} = k_{i} \frac{s \prod_{j=1...n}^{j\neq i} (s-z_{j})}{\prod_{j=1...n+1} (s-p_{j})}$$
(II.5)

La tension de retour totale  $u_r(t,t_c,t_d)$  est la somme des charges restantes dans chaque capacité de polarisation. La transformée inverse de Laplace de l'équation II.4 nous donne l'équation mathématique de la tension de retour :

$$u_r(t, t_c, t_d) = \sum_{i=1}^{b} U_{cPi} \sum_{i=1}^{n+1} k_{ij} \exp(t \cdot p_j)$$
 (II.6)

Où:

$$k_{ij} = k_i \frac{\prod_{y=1...n}^{y \neq i} \left(s - z_y\right)}{\frac{d}{ds} \sum_{y=1...n+1} \left(s - p_y\right)} \mid s = p_i$$
(II.7)

Les processus physiques responsables de la formation de la tension de retour dans l'isolation au papier imprégné seraient influencés par la géométrie de l'échantillon. Ces processus ne pouvant pas être décrits par un simple circuit RC parallèle [5], Kuang et al. [53] ont proposé un modèle qui pourrait prendre en compte les phénomènes physiques liés à la tension de retour. Ce modèle est représenté sur la figure II.14.

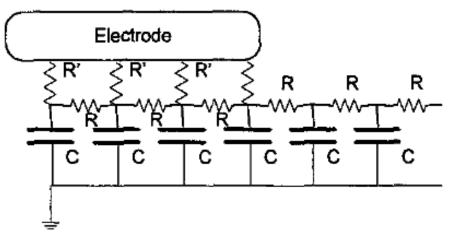


Figure II.14: Modélisation du papier imprégné [53].

Les résistances et les condensateurs se trouvant sous l'électrode sont ceux qui interviennent le plus dans l'évaluation par calcul de la tension de retour. Selon ces auteurs, la tension de retour déterminée par un calcul basé sur leur modèle concorde assez bien avec les mesures expérimentales.

# II.9. Mesure automatique de la tension de retour

Osvath et al. [54] décrivent la méthode utilisée pour la mesure automatique de la tension de retour sur des transformateurs réels en utilisant un Recovery Voltage Meter (figure II.15). La tension de charge est de 2 kV et le temps de décharge est pris égal à la moitié du temps de charge lequel peut varier de 10 à 1000 secondes. Dans les essais réalisés avec un tel appareil, les bornes haute tension du transformateur sont reliées entre elles puis soumises à une tension de 2 kV. Les bornes basse tension et la culasse sont également connectées entre elles puis mises la terre. Le schéma du montage d'essai est représenté par la figure II.16.



**Figure II.15:** Recovery Voltage Meter de type 5461 [8].

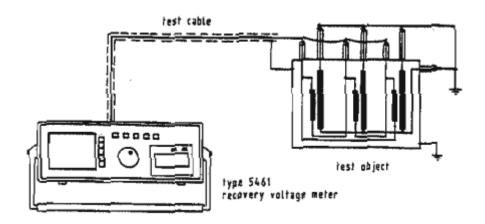


Figure II.16: Branchement d'un transformateur à un Recovery Voltage Meter 5461[5].

#### II.10. Paramètres influençant la mesure de la tension de retour RVM

L'évaluation de la tension de retour est influencée essentiellement pars trois paramètres : la valeur de la tension de charge continue  $U_C$  appliquée à l'échantillon d'essai, le temps de charge  $t_c$  et le temps de décharge  $t_d$ . Birlasekaran et al [55] ont procédé à une série d'essais pour étudier l'influence de la tension de charge ainsi que les temps de charge et de décharge sur la tension de retour.

#### II.10.1. Effet de la tension de charge

Une série de mesures ont été effectuées sur deux systèmes d'isolation utilisés dans les équipements électriques.

- SYSTEME 1 : est une station de générateur-transformateur de secours : 30 MVA.
- SYSEME 2 : est une station génératrice 300 MVA (un générateur 300MVA, transformateur de tension 16/230kV). Trois essais ont été réalisés sur chaque système.
- Pendant le premier essai l'isolation a été mise sous tension continue  $U_C = 50 \text{ V}$ ;
- Le deuxième essai a été réalisé sous une tension continue  $U_C = 100V$ ;
- Le troisième essai a été effectué sous une tension continue  $U_C = 150V$ .

Les trois essais ont été réalisés avec des temps de charge de 100 s et des temps de décharge de 50 s. Les résultats de variations de la tension de retour  $U_r$  en fonction du temps pour le transformateur du système 2 sont représentés sur la figure II.17.

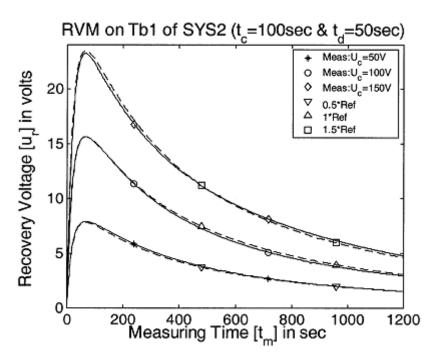
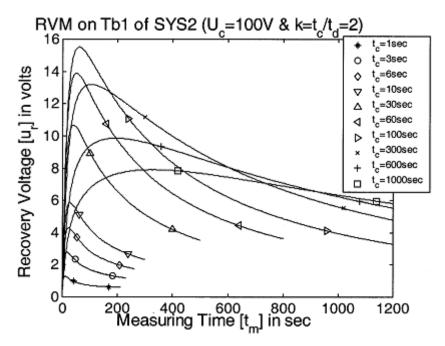


Figure II.17 : Variations de la tension de retour pour différentes tensions de charge [55].

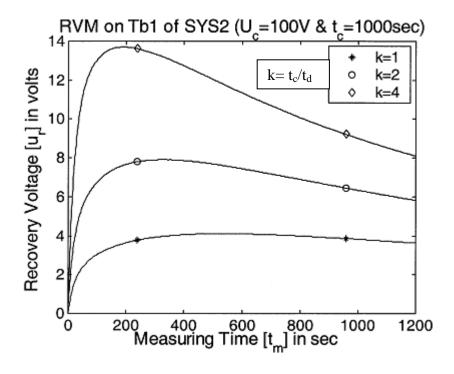
Cette figure montre que le maximum augmente avec le niveau de tension. En effet, il vaut 7.9 V pour une tension de charge de 50 V. Les maxima sont de d'une valeur de 15.6 V et 23 V pour des tensions de charge respectives de 100 V et 150 V. Le temps correspondant au trois maxima est le même et vaut 66 s environ.

#### II.10.2. Effet des temps de charge et de décharge sur la tension de retour

Une étude en fonction des temps de charge et de décharge a été réalisée. Dans un premier temps le rapport du temps de charge au temps de décharge a été maintenu constant et égal à 2. La figure II.18 montre les variations de la tension de retour pour plusieurs temps da charge. Dans un second temps, l'étude a été réalisée pour un temps de charge de 1000 s et plusieurs temps de décharge. La figure II.19 donne les variations de la tension de retour pour trois temps de décharge.



**Figure II.18 :** Variation de la tension de retour pour un rapport temps de charge/temps de décharge égal à 2 [55].



**Figure II.19 :** Variation de la tension de retour pour trois rapports temps de charge/temps de décharge [55].

Dans le cas de la figure II.18, le maximum de la tension de retour augmente avec le temps de charge. La figure II.19 montre que le maximum de la tension de retour diminue quand le temps de décharge augmente. Cependant, le temps correspondant aux différents maxima ne semble pas être affecté par le temps de décharge.

#### II.11. Les limites de la méthode de mesure de la tension de retour

La méthode de la mesure de la tension de retour RVM présente certaines limites. En effet jusqu'à présent aucune norme ne définit l'ordre de la tension de charge à appliquer ou bien le temps de charge et de décharge de l'échantillon. La tension de retour est liée aux phénomènes de polarisation et de relaxation dans un diélectrique, par conséquent la température est un paramètre important qu'il faut prendre en considération pendant les essais. L'effet de la température se manifeste sous forme d'une agitation thermique. Cette dernière affecte l'évolution de la tension de retour et la valeur de ses maxima. L'appareil industriel dit "Recovery Voltage Meter" a été largement critiqué par certains chercheurs s'intéressant aux phénomènes de polarisation et de dépolarisation des diélectriques. Parmi ces chercheurs, nous citons Krivada et al [7] qui rapportent que le Recovery Voltage Meter présente beaucoup d'insuffisances. Les sondes qui permettent d'appliquer la tension garderaient une certaine charge qui induirait une dispersion des résultats expérimentaux lors de la mesure de la tension de retour. D'après eux l'appareil mesurant la tension de retour avec des détails de charge et de décharge prédéterminés, présente quelque insuffisance générant aussi une dispersion des résultats expérimentaux.



#### **III.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous faisons une étude expérimentale concernant la tension de retour de trois matériaux de structure chimique différente. Les matériaux objets de notre étude sont le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA), le polystyrène (PS) et le polycarbonate (PC). Nous donnons d'abord dans ce chapitre une description détaillée de ces matériaux en donnant les informations relatives à leurs propriétés physiques et chimiques. Nous présentons ensuite le dispositif et la procédure expérimentale. Nous donnerons enfin nos divers résultats ainsi que leur interprétation.

#### III.2. Présentation des matériaux objets de l'étude

Les polymères étudiés dans ce chapitre sont des matériaux amorphes obtenus par la polymérisation des monomères vinyliques. C'est le groupe de macromolécules le plus important puisque plus de 85 % des polymères et 95 % des thermoplastiques sont des polymères vinyliques [12]. La polymérisation de ces matériaux est obtenue par le processus de polymérisation radicalaire dans laquelle le centre actif est un radical.

#### III.2.1. Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)

Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), appelé Plexiglas par la compagnie chimique Rohm and Haas, est un polymère thermoplastique. Le PMMA est obtenu par polymérisation radicalaire. La cohésion est assurée par des enchevêtrements de chaînes ainsi que des liaisons faibles de type hydrogène et Van der Waals. Le PMMA est un matériau très répandu qui présente une excellente transparence et qui a fait l'objet de nombreuses études, ce qui en fait un polymère modèle [15].

#### III.2.1.1. Le principe de production du monomère MAM

Nous donnons dans ce qui suit le principe de fabrication des monomères constituant le PMMA et dénommés MAM. Le produit de départ est une cyanhydrine (obtenue à partir du propanone et d'acide cyanhydrique). Cette cyanhydrine est convertie (réaction 1, figure III.1) par l'acide sulfurique en méthacrylamide. Ensuite l'action du méthanol en excès, en milieu acide sulfurique, sur la méthacrylamide fournit alors le méthacrylate de méthyle MAM (réaction 2, figure III.2).

Figure III.1: Réaction 1

$$H_2C=C$$
 $CONH_2$ 
 $COOCH_3$ 
 $COOCH_$ 

Figure III.2: Réaction 2

# III.2.1.2. Préparation du Polyméthacrylate de méthyle

Le PMMA est un polymère vinylique, fabriqué par polymérisation radicalaire à partir du monomère méthacrylate de méthyle (MAM), comme le montre la figure III.3.

**Figure III.3 :** Préparation du polyméthacrylate de méthyle.

# III.2.1.3. Propriétés du polyméthacrylate de méthyle

#### A. Propriétés thermiques

- Température d'utilisation en continu : 85°C;
- Température de déformation sous charge de 1,85N/mm<sup>2</sup> : 105°C;
- Température de transition vitreuse : de 110 à 135°C ;
- Conductivité thermique : 0.18 W/°C;
- Point de fusion : 210°C.

#### B. Propriétés chimiques

Le PMMA est sans odeur et inchangé par :

- Les solutions de la plupart des produits chimiques, acides organiques et minéraux dilués.

- Les solutions alcalines diluées.

# Le PMMA est attaqué par :

- L'acétone, l'alcool éthylique.
- Le chlore liquide, le phénol.
- L'ammoniaque.
- L'eau oxygénée à plus de 40%, l'essence térébenthine, les hydrocarbures et le méthanol à 3%.

Si dans la structure du PMMA les groupes de méthyle (CH<sub>3</sub>) attachés aux atomes de carbone sont remplacés par les atomes simples d'hydrogène, on obtient l'acrylate de polyméthyle, un matériel caoutchouteux mou blanc.

# C. Propriétés physiques du PMMA

Le PMMA possède les propriétés physiques suivantes :

- Il est léger et sa densité est de 1,19 g/cm<sup>3</sup>, environ la moitié de celle du verre ;
- Il ne se brise pas car il est doté d'une grande résistivité aux chocs ;
- L'angle de réflexion de lumière est de 41° à 42°, ce qui permet la réalisation de fibre optique ;

# D. Propriétés mécaniques du PMMA

- Le polyméthacrylate de méthyle est rigide à température ambiante. Il est dur et cassant (rupture au choc de 0,2 à 0,3 J/cm) avec un faible allongement à la rupture en traction de 4 à 10%.
- Son module d'élasticité en traction est de 314 daN/mm<sup>2</sup>;
- Le PMMA se raye et se polit facilement et entaille sensiblement. Les entretiens répétés peuvent altérer la qualité de surface.
- Sa contrainte de rupture à la flexion est de 9 à 12 daN/mm<sup>2</sup>;
- Le PMMA présente une excellente usinabilité. Il accepte les traitements mécaniques à froid et à chaud ;
- Le PMMA présente une grande résistance au vieillissement.

#### E. Propriétés électriques du PMMA

Les principales propriétés électriques du PMMA sont résumées ci-dessous.

- Rigidité diélectrique de 15 à 20 kV/mm;
- Résistance superficielle  $10^{15}$  à  $10^{16} \Omega$ ;
- Résistance transversale  $10^{15}$  à  $10^{16}$   $\Omega$ .cm;
- Facteur de pertes diélectriques : Il est de l'ordre 10<sup>-2</sup> pour une fréquence allant de 50 Hz ;
- Permittivité relative pour une fréquence de 50 Hz : 3.3.

# III.2.1.4. Utilisation de PMMA en électrotechnique

La principale utilisation du méthacrylate de méthyle est la production de matière plastique acrylique en polyméthacrylate de méthyle. Le méthacrylate de méthyle est aussi utilisé pour la production du co-polymère du méthacrylate de méthyle-butadiène-styrène (MBS. Ce dernier est utilisé comme modificateur du polychlorure de vinyle (PVC), largement utilisé dans les câbles souterrains de transport de l'énergie électrique.

#### III.2.2. Polystyrène (PS)

## III.2.2.1. Le principe de production du PS

Le polystyrène est un thermoplastique dur et bon marché. La molécule de styrène est découverte en 1839. La première synthèse de polystyrène a été effectuée en 1930. Sa molécule se présente comme une molécule d'éthylène, dans laquelle un atome hydrogène est remplacé par un anneau benzénique comme représenté sur la figure III.4. Le polystyrène est un polymère linéaire et amorphe. La polymérisation en masse du styrène liquide de température ambiante, donne le polystyrène possédant de meilleures propriétés électriques. C'est un matériau solide à 20°C, pâteux à 120°C et fond entre 150°C et 170°C [17, 18,59, 60].

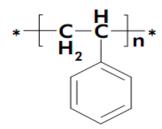


Figure III.4: Représentation de la molécule de styrène [18].

# III.2.2.2. Production du styrène

La molécule de styrène est obtenue par différents processus chimiques. Nous donnons dans ce qui suit les deux méthodes les plus utilisées pour l'élaboration du styrène.

#### Méthode I

Le produit de départ est un alcool éthylique (figure III.5) qui, une fois combiné avec du chlorure d'hydrogène, produit le chlorure éthylique et l'eau. La réaction entre le chlorure éthylique et le benzène forme l'éthylbenzène. Ce dernier est soumis à la vapeur surchauffée dans un tube de nickel pour produire le styrène.

Figure III.5: Schéma de production du styrène (méthode I) [58].

## Méthode II

Le produit de départ est un gaz d'éthylène soumis à du benzène sous pression (figure III.6). La chaleur combinée avec un catalyseur de chlorure en aluminium produit de l'éthylbenzène. Ce dernier est soumis à la chaleur, à la pression et à la vapeur pour produire du styrène. Si l'éthylbenzène n'est pas fondu pour obtenir le styrène directement, comme dans la Méthode II, le benzène éthylique peut être chloré pour former le benzène de chlorethyl qui est alors introduit dans un tube de nickel. Ce processus améliore le rendement et donne moins de fragilité au polymère final.

$$2 \begin{bmatrix} C_{2}H_{4} \end{bmatrix} + \underbrace{ \begin{array}{c} pressure \\ heat \& \\ aluminum \\ chloride \\ \end{array} }_{benzene} \underbrace{ \begin{array}{c} CH_{2}-CH_{3} \\ heat, pressure \\ \& steam \\ \end{array} }_{beat, pressure \\ \& steam \\ \end{array} }_{heat, pressure \\ \& steam \\ hydrogen \\ styrene \\ \end{array}$$

Figure III.6: Schéma de production du styrène (méthode II) [58].

benzene

# III.2.2.3. Synthèse du polystyrène

benzene

Pour lancer la polymérisation du styrène, ce dernier est placé en contact avec l'acide sulfurique dans une solution d'acide acétique. Le produit obtenu est le methyldistyrene qui se présente sous forme liquide (figue III.7). Le chauffage de ce dernier mène à la production d'un solide glacé désigné sous le nom du metastyrene. Le chauffage additionnel casse alors le groupe méthylique et le vrai polystyrène est produit.

2 CH= CH<sub>2</sub>

$$+ \text{ CH}_{3}\text{COOH} \xrightarrow{H_{2}SO_{4}} \text{ CH= CH- CHCH}_{3}$$

$$-\text{methyldistyrene}$$

$$CH- CH_{2}$$

$$-\text{methyldistyrene}$$

$$CH- CH_{2} - CH- CH_{2}- CH- CH_{$$

**Figure III.7:** synthèse du polystyrène [58].

Le polystyrène est un matériau peu cher, rigide, de faible densité, transparent et facile à mettre en œuvre. Cependant, à température ambiante, il est fragile et casse à une très faible déformation. Il ne convient donc pas pour des applications où une bonne résistance à l'impact est nécessaire.

#### III.2.2.4. Les différents types de polystyrène

Dans la pratique, on peut distinguer trois différents types de polystyrène :

- Le polymère transparent et fragile appelé polystyrène cristal (GPPS);
- Le polystyrène blanc, pas brillant mais relativement flexible, modifié au caoutchouc, appelé polystyrène à impact (**IPS** ou **HIPS**).
- Le polystyrène expansé ou mousse de polystyrène (PSE).

## A. polystyrène cristal (GPPS)

Le GPPS est un matériel transparent et dur. Il est décrit le plus souvent comme le polystyrène de grade général (GP) mais on utilise aussi des appellations telles que polystyrène standard, polystyrène normal, polystyrène clair ou encore homopolymère styrène. Le polymère amorphe GPPS possède une bonne stabilité dimensionnelle et des caractéristiques importantes en isolation électrique [58,60, 61].

## B. Polystyrène à impact (HIPS)

Le polystyrène à impact est aussi connu comme PS résistant ou comme PS-caoutchouc modifié ; la norme ISO 2897-2 le définit comme polystyrène à impact résistant (IPS). Le polystyrène HIPS a plusieurs utilités et applications car, d'une part, il peut être transformé très facilement et, d'autre part, il possède un rendement élevé avec un faible coût. Le HIPS est principalement utilisé pour fabriquer des mélanges de résine industrielle avec de l'oxyde de polyphénylène pour l'industrie automobile et pour la fabrication des isolants de réfrigération [60,61].

#### C. Polystyrène extensible (PSE)

Le polystyrène expansé est produit par la polymérisation en suspension du styrène en y ajoutant des gonflants. Les billes de polymère générées sont ensuite passées au tamis dans différentes tailles granulométriques. Il est possible d'utiliser différents revêtements en fonction de l'utilisation finale. Dans leur forme finale, les mousses PSE contiennent environ 95 % d'air. Les propriétés les plus importantes des mousses PSE sont leur excellente isolation thermique et leur bonne absorption des chocs [61].

#### III.2.2.5. Propriétés du polystyrène

# A. Caractéristiques spécifiques

Les principales caractéristiques du polystyrène sont rassemblées dans ce qui suit.

- Bonne tenue aux chocs.
- Excellent isolant électrique.
- Perméabilité aux gaz.
- Légèreté.
- Facilité de collage.
- Bonne stabilité dimensionnelle, sans contrainte interne.
- Résistance aux acides dilués et aux bases.

#### B. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du PS se résument en :

- Bonne résistance aux chocs aux basses températures jusqu'à 40°C.
- La présence de butadiène dans le PS choc limite la propagation des fissures.

# C. Propriétés électriques

Le polystyrène possède de bonnes propriétés électriques.

- Le PS est un polymère non polaire donc un excellent isolant dans une large gamme de fréquences.
- Le PS possède une résistivité volumique importante qui le rend très électrostatique.
- Le PS possède de faibles valeurs du facteur de pertes diélectriques.
- La permittivité relative du PS est de l'ordre de 2.6 sur une large gamme de fréquences.

#### D. Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques du PS sont rassemblées dans les points suivants :

- Bonne tenue au froid jusqu'à 40°C.
- Température d'utilisation en continu : 70°C.
- Température de transition vitreuse : 90 à 100°C.
- Température de fusion : de l'ordre de 145°C.
- Température de décomposition : de l'ordre de 320°C.

#### E. Propriétés chimiques

Le PS résiste bien aux acides dilués, aux solutions salines aqueuses et aux bases. Cependant, il possède les propriétés chimiques néfastes données ci-dessous :

- Il est attaqué par les acides oxydants ou nitriques.
- Il se fissure sous l'action d'agents chimiques tels que : acétone, isopropanol, benzène, toluène, chloroforme, chlorure de méthylène, trichloréthylène, tétrachlorure de carbone et essences.
- Le PS gonfle et se dissout dans de nombreux milieux organiques.
- Le PS résiste mal aux rayons ultra-violets de la lumière.

#### F. Résistance à la flamme

Le PS brûle et produit des fumées noires très denses. Il dégage du CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O.

# III.2.2.6. Utilisation du PS en électrotechnique

Ce matériau à multiples applications est notamment utilisé sous forme expansée pour l'isolation. Le polystyrène est utilisé aussi dans les condensateurs à film à base de matériaux synthétiques.

#### III.2.3. Polycarbonate (PC)

Le polycarbonate est un polymère thermoplastique largement utilisé dans de nombreux domaines d'application, du fait de ses diverses propriétés telles que sa transparence, sa stabilité thermique et sa résistance à l'impact. Il existe deux types de polycarbonate (PC) : les aliphatiques et les aromatiques. Ces derniers sont les plus communs et sont dérivés du bisphénol A [62,63].

#### • Formule moléculaire

La formule moléculaire du PC est donnée ci-dessous.

Figure III.8 : Représentation de la molécule de polycarbonate

#### III.2.3.1 Synthèse du polycarbonate

Le polycarbonate est obtenu par synthèse du bisphénol A et du phosgène. Deux méthodes sont possibles pour fabriquer le PC.

## A. La polycondensation

C'est la méthode la plus répandue et 95% des polycarbonates sont produits par cette chimie de polymérisation selon le schéma de la figure III.9. Une solution aqueuse de bisphénol A et de soude réagit avec du phosgène. L'usage du phosgène doit être contrôlé pour limiter le coût de la production du PC.

HO 
$$\longrightarrow$$
 OH + 2 NaOH + CI-C-CI  $\longrightarrow$  PC + 2 NaCI + 2 H<sub>2</sub>O Soude Phosgène Bisphénol A

**Figure III.9 :** Schéma de synthèse du PC par polycondensation du Bisphénol A avec le phosgène [63].

#### **B.** La transesterification

C'est une méthode qui fait intervenir le bisphénol A avec du carbonate de diphényle, en présence d'un catalyseur et à chaud (150°C à 350°C). La méthode est donnée sur le schéma de la figure III.10.

**Figure III.10** : Schéma de synthèse du PC par transesterification avec du carbonate de diphényle [63].

#### III.2.3.2. Les propriétés du polycarbonate

# A. Les propriétés électriques

La permittivité relative du PC reste quasi inchangée entre – 20°C et + 140°C, c'est-à-dire dans tout l'intervalle des températures d'utilisation des polycarbonates. Cependant, la permittivité relative baisse légèrement lorsque la fréquence augmente.

La résistivité transversale, déterminée suivant la norme CEI 93 ou VDE 0303, section 3, est fonction de la température ; les polycarbonates sont d'excellents isolants dans tout l'intervalle de température dont relèvent les applications pratiques.

La résistance superficielle, déterminée suivant la norme CEI 93 ou VDE 0303, section 3, atteint plus de  $1015 \Omega$  et est tout aussi élevée que la résistance d'isolement. Elle est également fonction du taux d'humidité des polycarbonates et des conditions ambiantes.

Les propriétés diélectriques des polycarbonates sont résumées dans le tableau III.1.

**Tableau III.1 :** Propriétés thermiques et physico-chimiques (valeurs moyennes) des polycarbonates [63].

Propriété	Unité	sans fibres de verre	Polycarbonate +30 % de fibres courtes	+20 % de fibres longues	Norme <u>(1)</u>	
Rigidité diélectrique à sec (2)	kV/mm	30	30	30	CEI 243 DIN VDE 0303/section 2	
Résistance superficielle à sec	Ω	10 <sup>15</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	CEI 93 DIN VDE 0303/section 3	
Résistivité transversale à sec	Ω·cm	10 <sup>18</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup>	CEI 93 DIN VDE 0303/section 3	
Permittivité relative à sec (3)  — à 50 Hz		3,0 3,0 2,9	3,3 3,3 3,3	3,2 3,2 3,2	CEI 250 DIN VDE 0303/section 4	
Facteur de dissipation diélectrique (tan δ) (3)  — à 50 Hz  — à 1 kHz  — à 1 MHz		9 × 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-2</sup>	9×10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-3</sup> 9×10 <sup>-3</sup>	9 × 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-3</sup> 9 × 10 <sup>-3</sup>	CEI 250 DIN VDE 0303/section 4	
Indice de résistance au cheminement :  — méthode A  — méthode B  Effet de corrosion électrolytique	(3) (3)	100 M (4) 275 A 1	100 M <u>(4)</u> 175 A 1	100 M (4) 175 }	CEI 112 DIN VDE 0303/section 1 CEI 426 DIN VDE 0303/section 6	
(1) CEI: Commission Électrotechnique Internationale DIN: Deutsches Institut für Normung VDE: Verband Deutscher Electrotechniker Pour les normes équivalentes AFNOR et ISO, se reporter, dans ce traité, à l'article Plastiques. Essais normalisés. Essais électriques [AM 3 530]. (2) Mésurée sous 50 Hz et 0,5 kV/s dans de l'huile de transformateur sur des éprouvettes de 1 mm d'épaisseur. (3) Classification par tranches. (4) C'est-à-dire mesure effectuée dans la solution B à 0,1 ± 0,02 % en masse de chlorure d'ammonium + 0,5 ± 0,02 % en masse de suifonate alkylnaphtalène de sodium dans de l'ésu distillée ou désionisée.						

#### B. Propriétés thermiques

Le polycarbonate présente trois transitions thermiques :

- la transition α associée à des mouvements de longue ampleur des molécules.
- la transition  $\beta$  à environ 60°C qui est due à la présence de contraintes résiduelles dans l'échantillon ;
- la transition  $\gamma$  associée aux mouvements internes de motifs PC, se situant vers 100°.

La température de transition vitreuse  $T_{\rm g}$  , se trouve dans le domaine de températures : 140 à 150°C.

#### B. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du PC sont fonction de la structure moléculaire, de la masse molaire, des groupes terminaux, des méthodes de fabrication et du vieillissement physique. La contrainte et l'allongement à la rupture sont de l'ordre de 50 à 70 MPa et de 85 à 100% respectivement [64, 65].

# III.2.3.3. Application en isolation électrique

L'importance du polycarbonate en électrotechnique est croissante. Il résiste extrêmement bien au choc et supporte des températures relativement élevées pouvant atteindre 120°C. Ses propriétés électriques sont moyennes. Les rubans de polycarbonate thermorétractable sont fréquemment utilisés pour isoler les bobinages. Des feuilles très minces, jusqu'à 2 microns, d'épaisseur constante et se prêtant bien à la métallisation par l'aluminium peuvent être obtenues, d'où l'intérêt du polycarbonate pour les condensateurs de dimensions réduites. Il est même utilisé dans les disjoncteurs, relais et pièces de relais et dans l'éclairage [17,64].

# III.3. Etude expérimentale de la tension de retour du Polyméthacrylate de méthyle (PMMA), du polystyrène (PS), et du polycarbonate (PC)

Dans notre étude expérimentale, notre intérêt s'est porté sur l'évolution temporelle de la tension de retour pour plusieurs échantillons de PMMA, de PS et de PC.

# III.3.1. Dispositif expérimental

Le schéma synoptique du dispositif expérimental est donné sur la figure III.11.

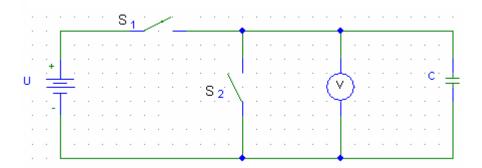


Figure III.11. Schéma synoptique du dispositif expérimental.

Le dispositif expérimental réel est donné sur la figure III.12 et comprend :

- Une source de tension continue variable ;
- Un condensateur constitué de deux électrodes planes circulaires en acier inoxydable et dont le diélectrique est l'échantillon à étudier. Les échantillons ont une épaisseur de 0.5 mm.
- Inverseur K pour établir et enlever le court-circuit aux bornes de l'échantillon.
- Un multimètre électronique qui nous permet de mesurer la tension de retour.

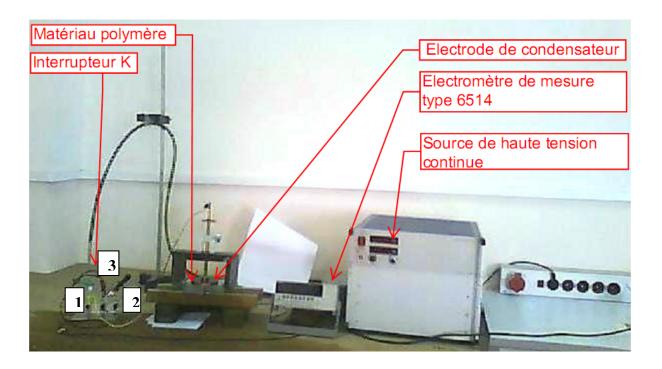


Figure III.12. Schéma du dispositif expérimental réel.

#### III.3.2. Déroulement des essais

La mesure de la tension de retour s'effectue en trois étapes :

# Première étape

On ferme l'interrupteur sur la position 2 pendant le temps de charge t<sub>c</sub>. Le condensateur se charge à travers la source de tension continue.

# > Deuxième étape

On met l'interrupteur sur la position 1 pendant le temps de décharge  $t_d$ . Le condensateur se retrouve alors en court-circuit et se décharge.

#### > Troisième étape

C'est la mesure de la tension de retour. Après le temps de décharge  $t_d$ , on ouvre le courtcircuit puis on relève les valeurs des tensions de retour à l'aide d'un multimètre de grande impédance d'entrée, branché pendant le court-circuit sur la position 3. Les relevés sont programmés et se font automatiquement avec le multimètre représenté sut la figure III.13. Le multimètre utilisé est de type 6514 de marque KEITHLEY, caractérisé par une impédance d'entré de 1  $T\Omega$ . Pendant

les essais l'appareil est programmé pour mesurer la valeur de la tension de retour toutes les cinq secondes. Le nombre de points relevés est de 240.

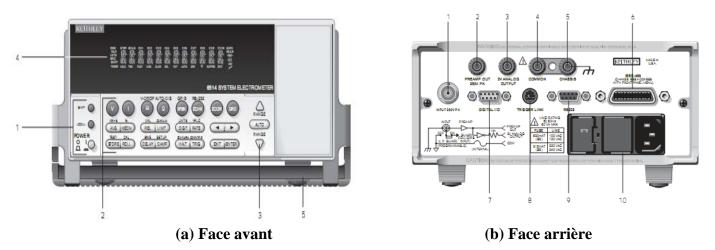


Figure III.13 : Electromètre de mesure, type 6514.

# Figure (a)

- 1. Clefs et commutateur électrique spéciaux (SHIFT, LOCAL, POWER);
- 2. Touches de fonction et d'opération (V, I, Ω, Q, XFBK, ZCHK, ZCOR, GRD) ;
- 3. Clefs de gamme ;
- 4. Annonciateurs d'affichage;
- 5. Poignée.

# Figure (b)

- 1. Entrée;
- 2. PREAMP OUT;
- 3. Sortie analogique 2V;
- 4. Commun;
- 5. Châssis;
- 6. IEEE-488;
- 7. Digital I/O;
- 8. TRIGGER LINK;
- 9. RS-232;
- 10. Module d'alimentation.

La tension de retour des trois matériaux (PMMA, PS et PC) a été étudiée en fonction des paramètres suivants :

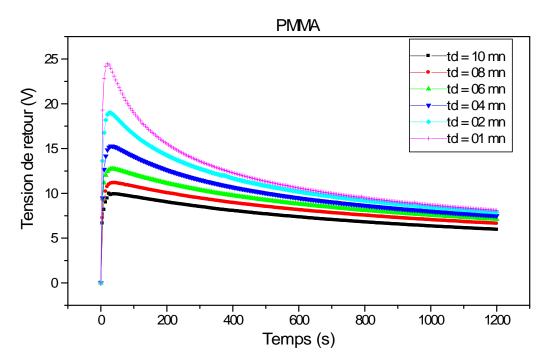
- Temps de charge du condensateur t<sub>c</sub> : 20 mn et 40 mn.
- Temps de décharge t<sub>d</sub>: 10 mn, 08 mn, 06 mn, 04 mn, 02 mn, 01mn.
- Tension de charge U<sub>C</sub>: 10 kV, 12 kV, 14kV, 16 kV.

Pour tous les échantillons, nous fixons un niveau de tension et un temps de charge puis nous déterminons la tension de retour pour les temps de court-circuit cités ci-dessus.

# III.3.3. Résultats expérimentaux pour le PMMA

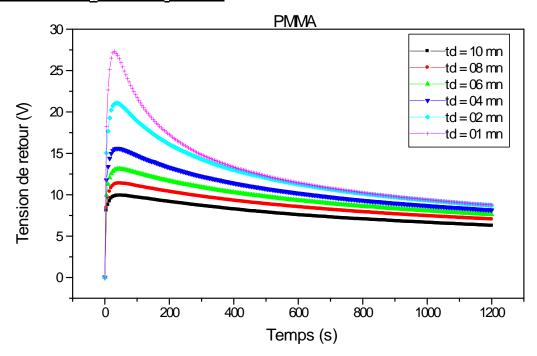
Les résultats expérimentaux concernant l'évolution temporelle de la tension de retour du PMMA sont donnés sur les figures III.14 à III.21.

# III.3.3.1. PMMA : $U_C = 10kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$



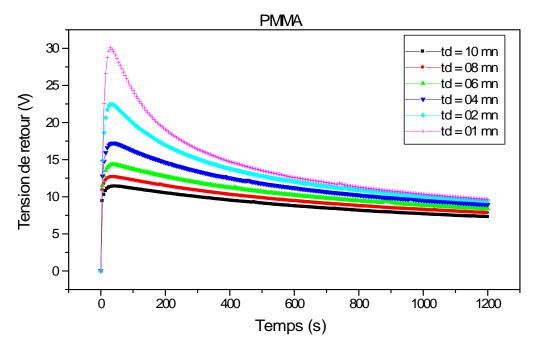
**Figure III.14**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA pour une tension de charge de 10 kV, un temps de charge de 20mn et différents temps de décharge.

# III.3.3.2. PMMA : $U_C = 12kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$



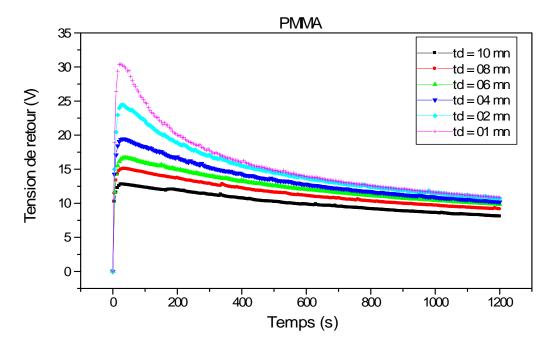
**Figure III.15**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA pour une tension de charge de 12 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

# <u>III.3.3.3. PMMA : $U_C = 14kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$ </u>



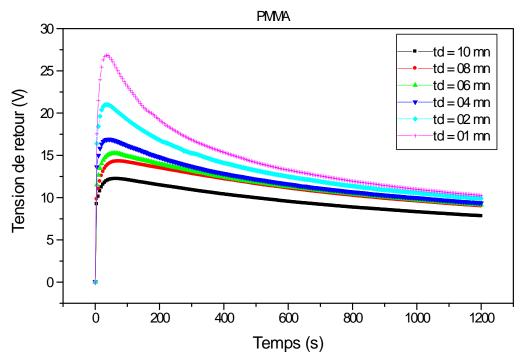
**Figure III.16**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

# <u>III.3.3.4. PMMA : $U_C = 16kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$ </u>



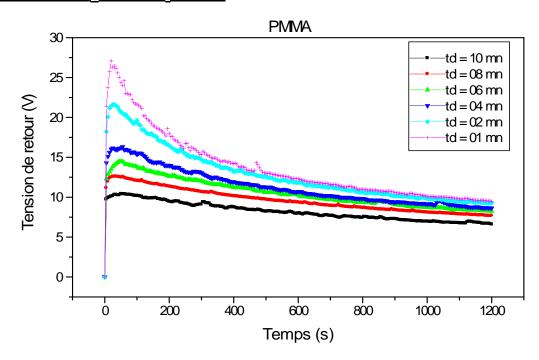
**Figure III.17**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA pour une tension de charge de 16 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

# <u>III.3.4.5. PMMA : $U_C = 10kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>



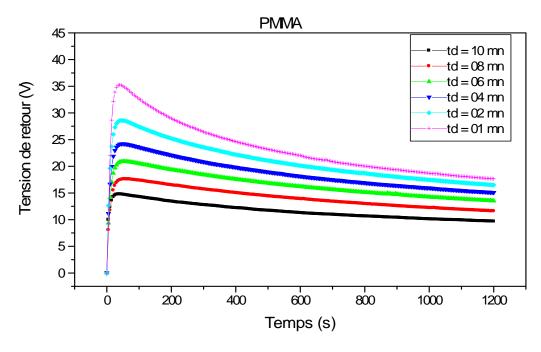
**Figure III.18**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA pour une tension de charge de 10kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

# <u>III.3.3.6. PMMA : $U_C = 12kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>



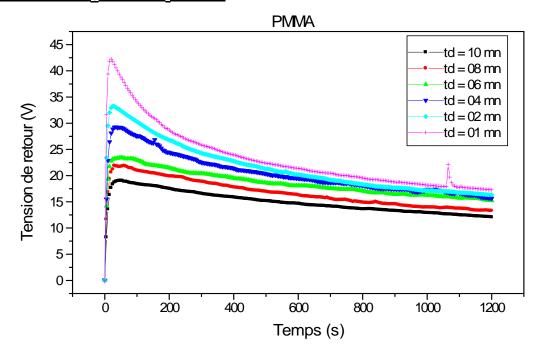
**Figure III.19**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA pour une tension de charge de 12 kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

# <u>III.3.3.7. PMMA : $U_C = 14kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>



**Figure III.20**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

# III.3.3.8. PMMA : $U_C = 16kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$

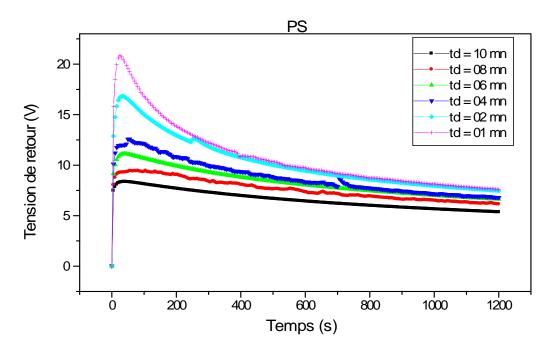


**Figure III.21**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA pour une tension de charge de 16 kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

# III.3.4. Résultats expérimentaux pour le PS

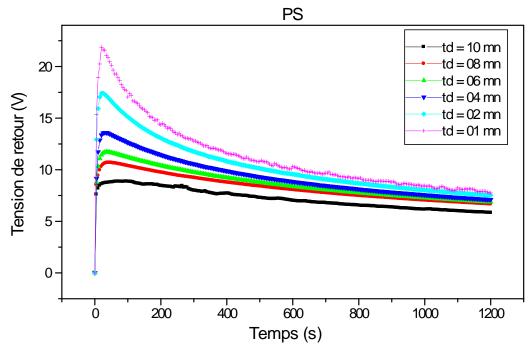
Les résultats expérimentaux concernant l'évolution temporelle de la tension de retour du PS sont donnés sur les figures III.22 à III.29.

### <u>III.3.4.1. PS : $U_C = 10kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$ </u>



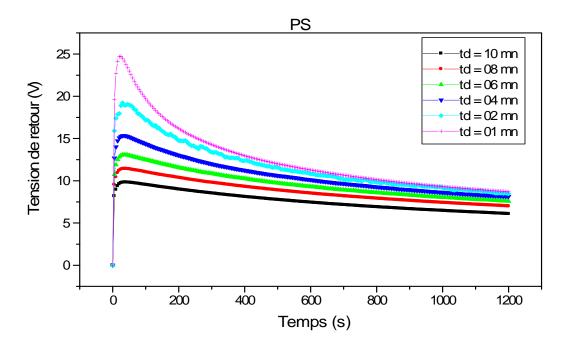
**Figure III.22**: Evolution temporelle de la tension de retour du PS pour une tension de charge de 10 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.4.2. PS : $U_C = 12kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$ </u>



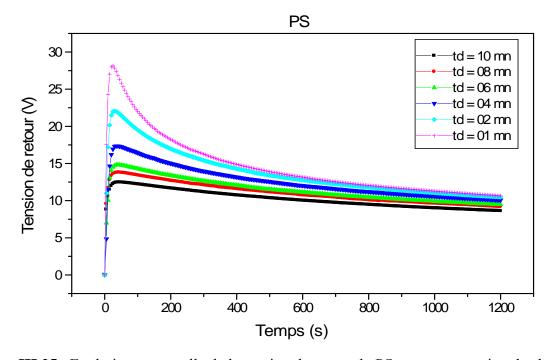
**Figure III.23**: Evolution temporelle de la tension de retour du PS pour une tension de charge de 12 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.4.3. PS : $U_C = 14kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$ </u>



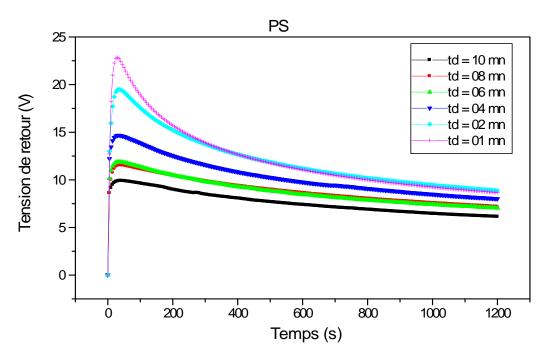
**Figure III.24**: Evolution temporelle de la tension de retour du PS pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.4.4. PS : $U_C = 16kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$ </u>



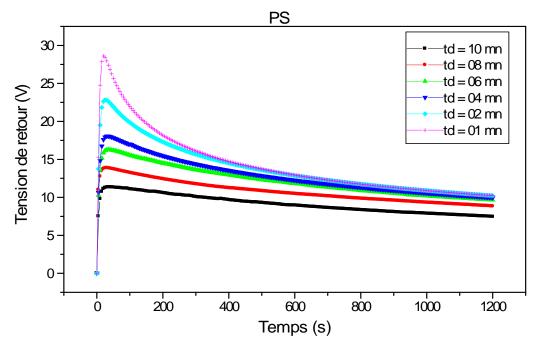
**Figure III.25** : Evolution temporelle de la tension de retour du PS pour une tension de charge de 16 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.4.5. PS : $U_C = 10kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>



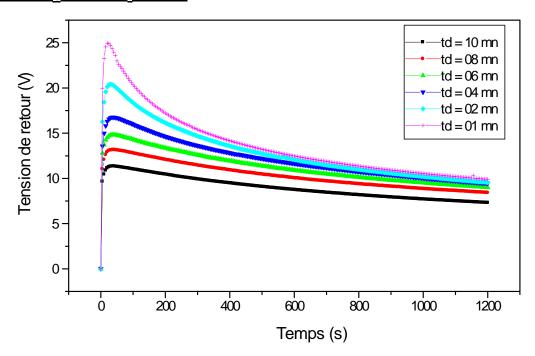
**Figure III. 26**: Evolution temporelle de la tension de retour de PS pour une tension de charge de 10 kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.4.6. PS : $U_C = 12kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>



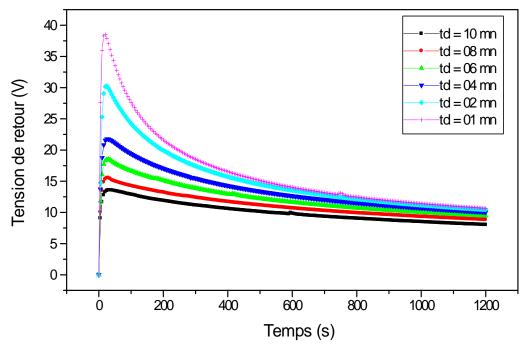
**Figure III.27**: Evolution temporelle de la tension de retour du PS pour une tension de charge de 12 kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.4.7. PS : $U_C = 14kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>



**Figure III.28.**: Evolution temporelle de la tension de retour du PS pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.4.8. PS : $U_C = 16kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>

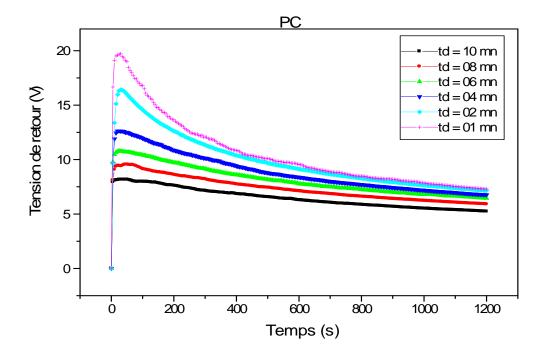


**Figure III.29**: Evolution temporelle de la tension de retour du PS pour une tension de charge de 16 kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

### III.3.5. Résultats expérimentaux pour le PC

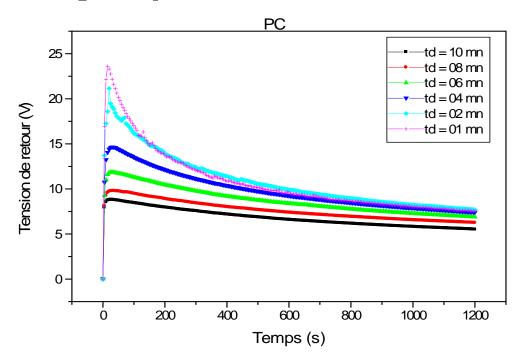
Les résultats expérimentaux concernant l'évolution temporelle de la tension de retour du PC sont donnés sur les figures III.30 à III.37.

### <u>III.3.5.1. PC : $U_C = 10kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$ </u>



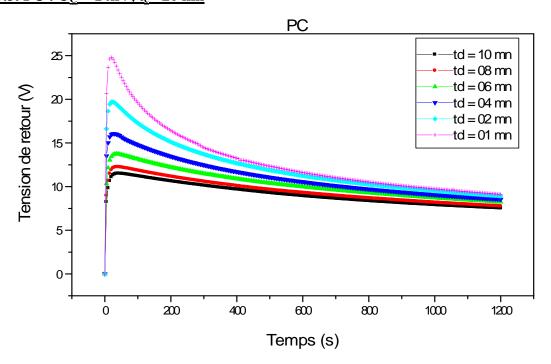
**Figure III.30**: Evolution temporelle de la tension de retour du PC pour une tension de charge de 10 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

### III.3.5.2. PC : $U_C = 12kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$



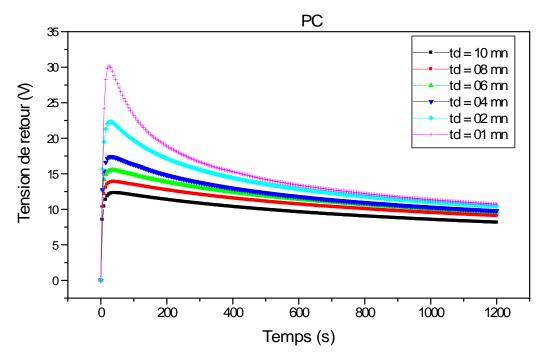
**Figure III.31**: Evolution temporelle de la tension de retour du PC pour une tension de charge de 12 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

#### III.3.5.3. PC : $U_C = 14kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$



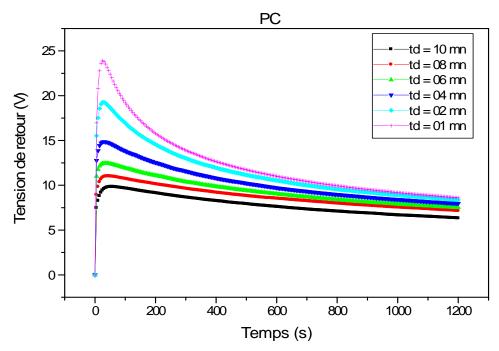
**Figure III.32**: Evolution temporelle de la tension de retour du PC pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.5.4. PC : $U_C = 16kV$ , $t_c = 20 \text{ mn}$ </u>



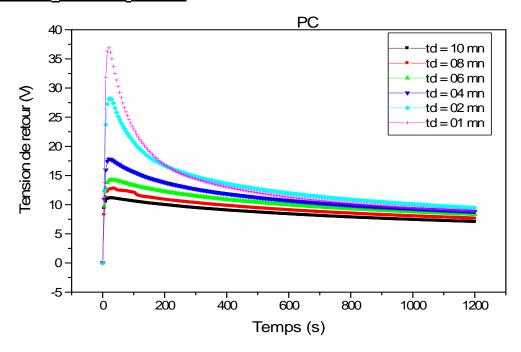
**Figure III. 33**: Evolution temporelle de la tension de retour du PC pour une tension de charge de 16kV, un temps de charge de 20 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.5.5. PC : $U_C = 10kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>



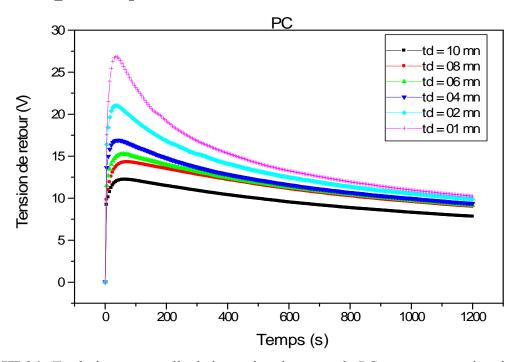
**Figure III.34**: Evolution temporelle de la tension de retour du PC pour une tension de charge de 10kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

### III.3.5.6. PC : $U_C = 12kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$



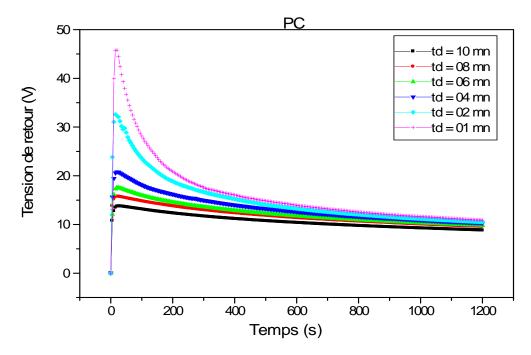
**Figure III.35** : Evolution temporelle de la tension de retour du PC pour une tension de charge de 12kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharges.

### III.3.5.7. PC : $U_C = 14kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$



**Figure III.36** : Evolution temporelle de la tension de retour du PC pour une tension de charge de 14kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

### <u>III.3.5.8. PC : $U_C = 16kV$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ </u>



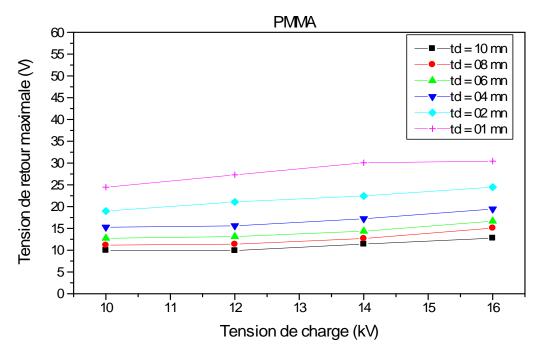
**Figure III.37** : Evolution temporelle de la tension de retour du PC pour une tension de charge de 16 kV, un temps de charge de 40 mn et différents temps de décharge.

### III.3.6. Discussion des résultats expérimentaux

Les courbes des figures III.14 à III.37 représentent l'évolution temporelle de la tension de retour des trois matériaux diélectriques étudiés. La tension de retour recueillie aux bornes de chaque échantillon augmente, passe par un maximum puis diminue.

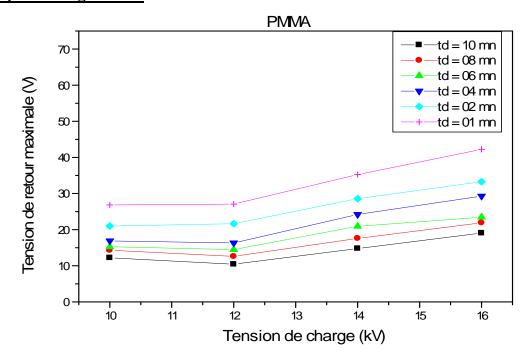
Pour tracer l'évolution des maxima de la tension de retour en fonction de la tension appliquée aux diélectriques, nous avons utilisé les maxima des tensions mesurées pour chaque temps de décharge. Pour chaque type de diélectrique, les courbes des maxima de la tension de retour en fonction de la tension sont représentées par les figures III.38 jusqu'à III. 43.

## III.3.6.1. PMMA: Tension de retour maximale pour des tensions de charge U=10kV, 12kV, 14kV et 16kV. Temps de charge: 20mn



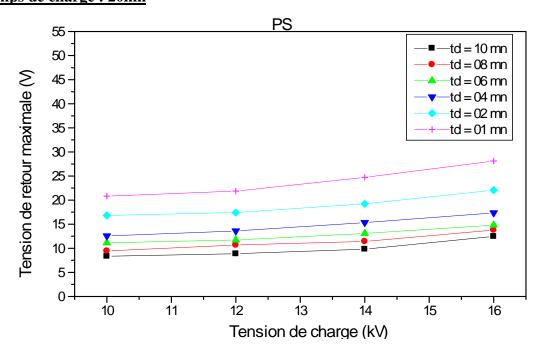
**Figure III.38**: Variation des maxima de la tension de retour du PMMA en fonction de la tension de charge pour un temps de charge de 20mn.

### III.3.6.2. PMMA: Tension de retour maximale pour des tensions de charge U=10kV, 12kV, 14kV et 16kV. Temps de charge: 40mn



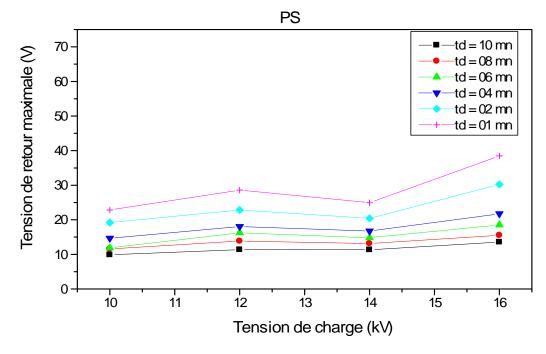
**Figure III. 39**: Variation des maxima de la tension de retour du PMMA en fonction de la tension de charge pour un temps de charge de 40mn.

III.3.6.3. PS: Tension de retour maximale pour des tensions de charge U=10kV, 12kV, 14kV et 16kV. Temps de charge: 20mn



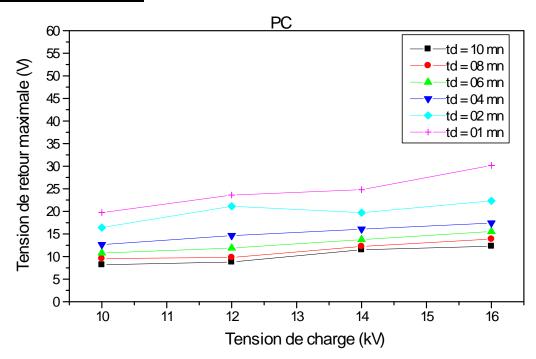
**Figure III.40**: Variation des maxima de la tension de retour du PS en fonction de la tension de charge, pour 20 mn du temps de décharge.

# III.3.6.4. PS: Tension de retour maximale pour des tensions de charge U=10kV, 12kV, 14Kv et 16kV. Temps de charge: 40mn



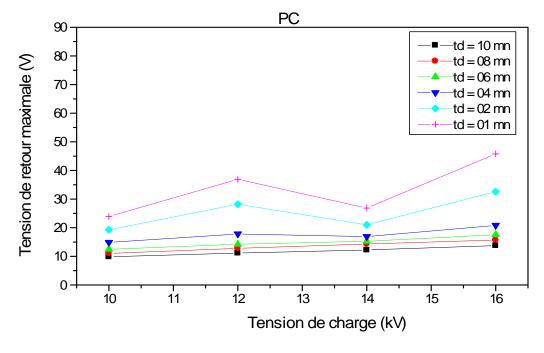
**Figure III.41**: Variation des maxima de la tension de retour du PS en fonction de la tension de charge, pour un temps de charge de 40 mn.

III.3.6.5. PC: Tension de retour maximales pour des tensions de charge U=10kV, 12kV, 14kV et 16kV. Temps de charge: 20mn



**Figure III.42**: Variation des maxima de la tension de retour du PC en fonction de la tension de charge, pour un temps de charge de 20 mn.

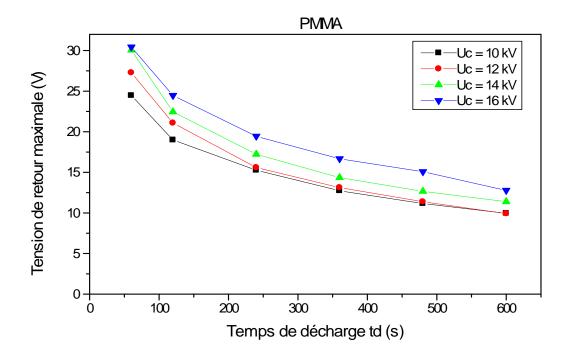
## III.3.6.6. PC: Tension de retour maximale pour tensions de charge U=10kV, 12kV, 14Kv et 16kV. Temps de charge: 40mn



**Figure III.43**: Variation des maxima du PC en fonction de la tension de charge, pour un temps de charge égale à 40 mn.

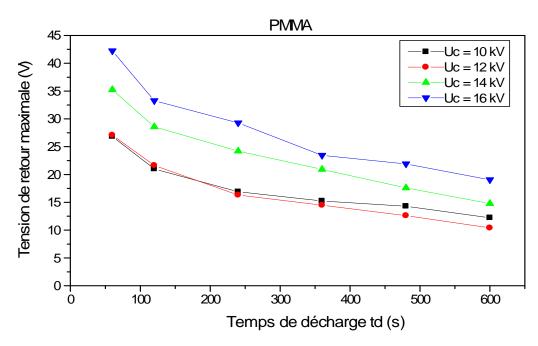
La tension de retour est influencée par le temps de décharge t<sub>d</sub>, par conséquent nous avons tracé pour chaque diélectrique l'évolution des maxima de la tension de retour en fonction du temps de décharge. Les courbes sont données par les figures III.44 à III.49.

# III.3.6.7. PMMA: Tension de retour maximale pour des temps de décharge de 10, 08, 06, 04, 02 et 01 mn. Temps de charge: 20mn



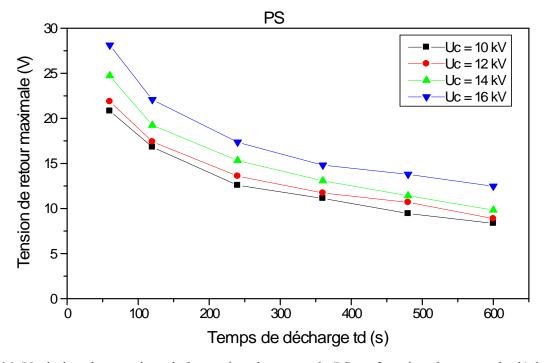
**Figure III.44** : Variation des maxima de la tension de retour du PMMA en fonction du temps de décharge, et pour un temps de charge égale à 20 mn.

## III.3.6.8. PMMA: Tension de retour maximale pour des temps de décharge de 10, 08, 06, 04, 02 et 01 mn). Temps de charge: 40mn



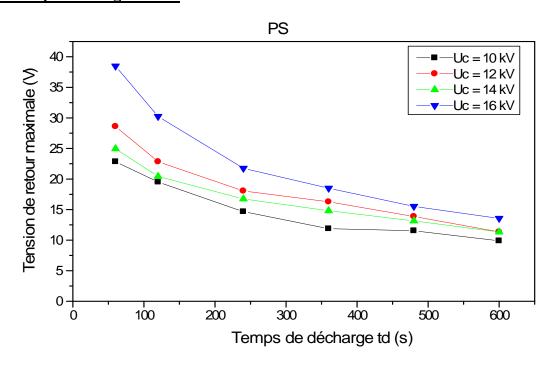
**Figure III.45**: Variation des maxima de la tension de retour du PMMA en fonction du temps de décharge pour un temps de charge de 40 mn.

# III.3.6.9. PS : Tension de retour maximale pour des temps de décharge de 10, 08, 06, 04, 02, 01 mn. Temps de charge : 20mn



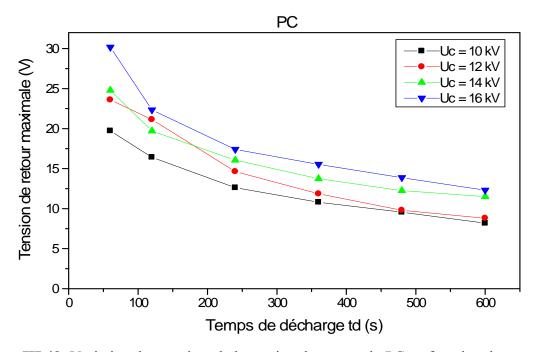
**Figure III.46**: Variation des maxima de la tension de retour du PS en fonction du temps de décharge pour un temps de charge de 20 mn.

III.3.6.10. PS: Tension de retour maximale pour des temps de décharge de 10, 08, 06, 04, 02 et 01 mn. Temps de charge: 40mn



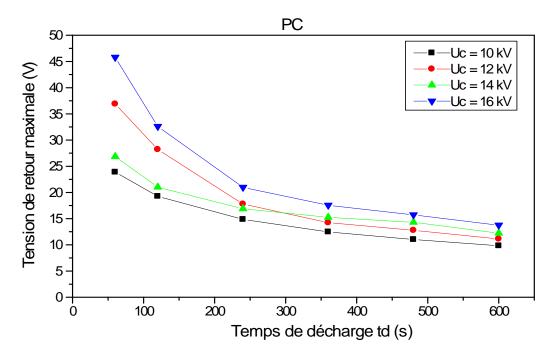
**Figure III.47**: Variation des maxima de la tension de retour du PS en fonction de temps de décharge pour un temps de charge de 40 mn.

### III.3.6.11. PC: Tension de retour maximale pour des temps de décharge de 10, 08, 06, 04, 02 et 01 mn). Temps de charge de 20mn



**Figure III.48**: Variation des maxima de la tension de retour du PC en fonction du temps de décharge, pour un temps de charge de 20 mn.

III.3.6.12. PC: Tension de retour maximale pour des temps de décharge de 10, 08, 06, 04, 02 et 01 mn. Temps de charge: 40mn



**Figure III.49**: Variation des maxima de la tension de retour du PC en fonction du temps de décharge pour un temps de charge de 40 mn.

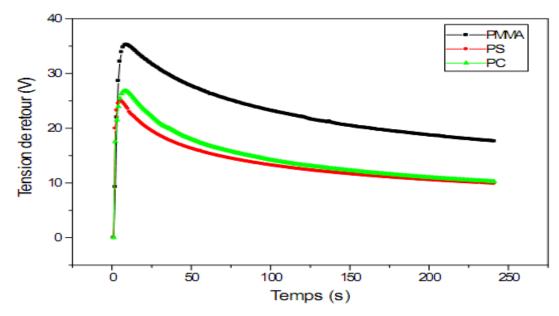
La tension de retour mesurée pour les trois matériaux est influencée par la tension appliquée ainsi que par le temps de charge et de décharge. En effet, la tension de retour augmente avec la tension appliquée à l'échantillon ainsi qu'avec le temps de charge. La tension de retour diminue avec le temps de décharge.

Si nous comparons les tensions de retour maximale  $V_{rmaxax}$  des trois matériaux, la tendance générale montre que les valeurs associées au PMMA sont supérieures à celles du PS et du PC. Il est à noter que les tensions de retour associées au PS et au PC sont proches. Le temps  $t_{max}$  au bout duquel la tension de retour atteint son maximum ne semble pas être influencé par les paramètres que nous avons variés au cours de nos essais.

### III.3.7. Etude comparative des trois matériaux objets de notre étude

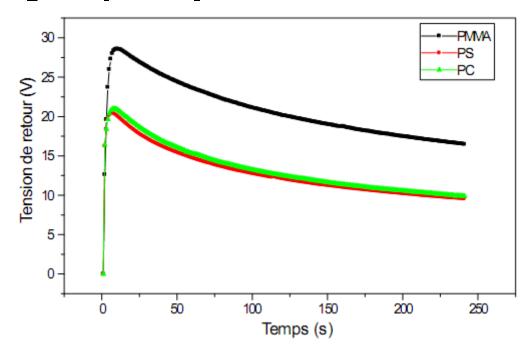
En vue de comparer les trois matériaux objets de notre étude, nous avons tracé l'évolution de la tension de retour pour un niveau de tension de 14 kV et un temps de charge de 40 mn. L'étude comparative est mise en évidence sur les figures III.50 à III.55.

### <u>III.3.7.1. $U_C = 14 \text{ kV}, t_c = 40 \text{ mn et } t_d = 01 \text{mn}$ </u>



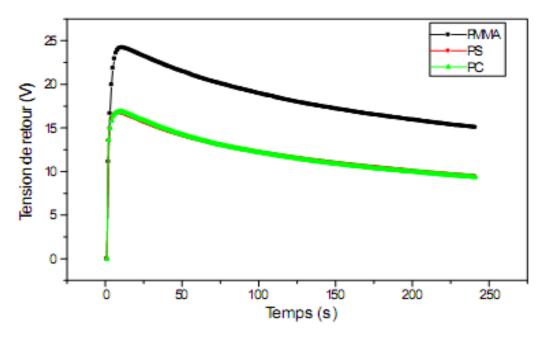
**Figure III.50**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA, PS et PC pour une tension de charge de 14kV, un temps de charge de 40 mn et un temps de décharge de 01 mn.

### III.3.7.2. $U_C = 14 \text{ kV}$ , $t_c = 40 \text{ mn et } t_d = 02 \text{mn}$



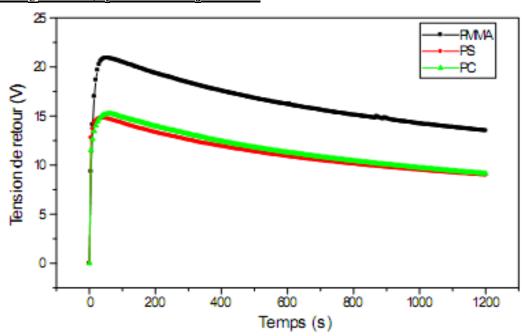
**Figure III.51**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA, PS et PC pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et un temps de décharge de 02 mn.

### <u>III.3.7.3. $U_C = 14 \text{ kV}$ , $t_c = 40 \text{ mn et } t_d = 04 \text{ mn}$ </u>



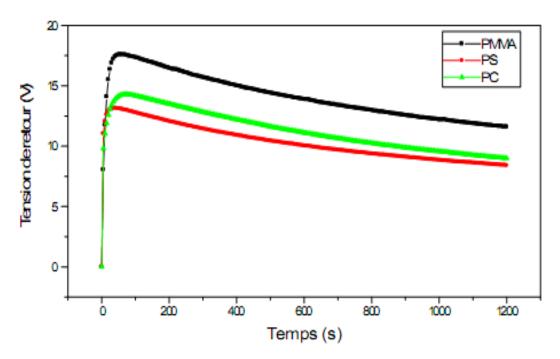
**Figure III.52**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA, PS et PC pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et un temps de décharge de 04 mn.

### III.3.7.4. $U_C = 14 \text{ kV}$ , $t_c = 40 \text{ mn}$ et $t_d = 06 \text{ mn}$



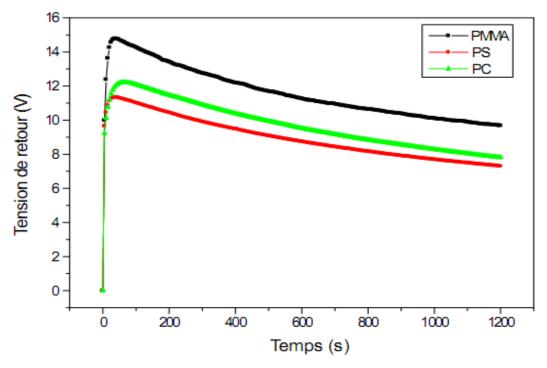
**Figure III.53**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA, PS et PC pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et un temps de décharge de 06 mn.

### <u>III.3.7.5. $U_C = 14 \text{ kV}$ , $t_c = 40 \text{ mn et } t_d = 08 \text{ mn}$ </u>



**Figure III.54** : Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA, PS et PC pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et un temps de décharge de 08 mn.

### <u>III.3.7.6. $U_C = 14 \text{ kV}$ , $t_c = 40 \text{ mn et } t_d = 10 \text{ mn}$ </u>



**Figure III.55**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA, PS et PC pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et un temps de décharge de 10 mn.

Ces courbes montrent une tension de retour élevée pour le PMMA. Les tensions correspondant au PC semblent légèrement supérieures à celles correspondant au PS. Pour essayer d'expliquer les phénomènes régissant la tension de retour, nous donnons sur le tableau III.2 les résistivités volumiques et les permittivités des matériaux étudiés.

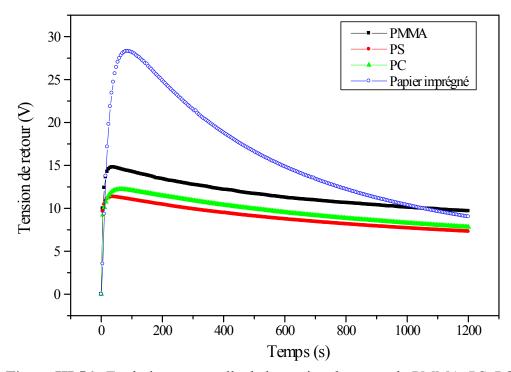
Les résistivités volumiques ont été mesurées en utilisant les dispositifs bien décrits dans [66].

Tableau III.2 : Résistivités transversales et permittivités relatives du PMMA, du PS et du PC.

Matériaux	Résistivités transversales (Ω.cm)	Permittivités relatives ε <sub>r</sub> à 50 Hz
PMMA	1.3313x10 <sup>16</sup>	3.3
PC	1.5017x10 <sup>17</sup>	2.9
PS	2.8610x10 <sup>17</sup>	2.6

En tenant compte des données du tableau III.2, nous remarquons que la tension de retour n'est pas gouvernée uniquement par la permittivité mais aussi par la résistivité volumique des différents matériaux. En effet, la tension de retour est plus élevée pour le PMMA qui présente une résistivité transversale inférieure d'un ordre de grandeur à celles du PS et du PC. Ainsi, la tension de retour serait due à des charges emprisonnées dans chaque corps du matériau. Nous pouvons donc dire que la quantité de charges localisées dans le PMMA est supérieure à la quantité de charges localisées dans le PS et dans le PC.

Un essai complémentaire concernant la tension de retour du papier imprégné destiné à l'isolation des transformateurs de puissance a été réalisé. Cet essai a été fait avec une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et un temps de décharge de 10 mn. La figure III.56 donne la tension de retour du papier ainsi que celles du PMMA, PS et PC pour les mêmes conditions expérimentales. Nous remarquons que la tension de retour du papier imprégné est supérieure à celle du PMMA. Ceci est en accord avec les caractéristiques physiques du papier associées au tableau III.3.



**Figure III.56**: Evolution temporelle de la tension de retour du PMMA, PS, PC et papier imprégné pour une tension de charge de 14 kV, un temps de charge de 40 mn et un temps de décharge de 10 mn.

Tableau III.3 : Résistivités transversales et permittivités relatives du PMMA, du PS, du PC et du papier imprégné.

Matériaux	Résistivités transversales (Ω.cm)	Permittivités relatives ε <sub>r</sub> à 50 Hz
Papier imprégné	4.3745×10 <sup>15</sup>	3.6
PMMA	$1.3313x10^{16}$	3.3
PC	1.5017x10 <sup>17</sup>	2.9
PS	2.8610x10 <sup>17</sup>	2.6

Ainsi, la tension de retour peut s'avérer un moyen fiable pour rendre compte de l'état diélectrique d'un matériau, la tension de retour la plus basse correspondant au meilleur isolant. Le polystyrène est un matériau bon marché, qui possède une grande résistivité et une faible tension de retour ce qui lui permettrait d'être un matériau du choix dans le domaine de l'isolation électrique. En effet, le polystyrène (type à impact) peut largement remplacer le polycarbonate dans plusieurs isolations électriques.

#### III.3.8. Interprétation physique des résultats

Une tension continue est appliquée aux bornes d'un condensateur en matériau polymère (PMMA, PS, PC) pendent une longue période et court-circuité pendant une petite période de temps. Après l'ouverture du court-circuit, les charges résiduelles du diélectrique liées par la polarisation tournent en charges libres provoquant une accumulation de charges sur les électrodes du condensateur dont l'échantillon de polymère étudié est le diélectrique. Ce phénomène qui définit la tension de retour s'explique par la figure III.57.

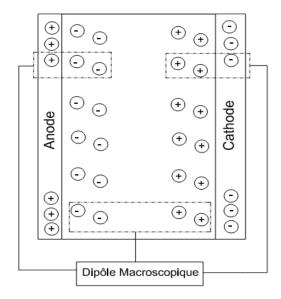


Figure III.57 : Représentation schématique du dipôle macroscopique dans l'échantillon.

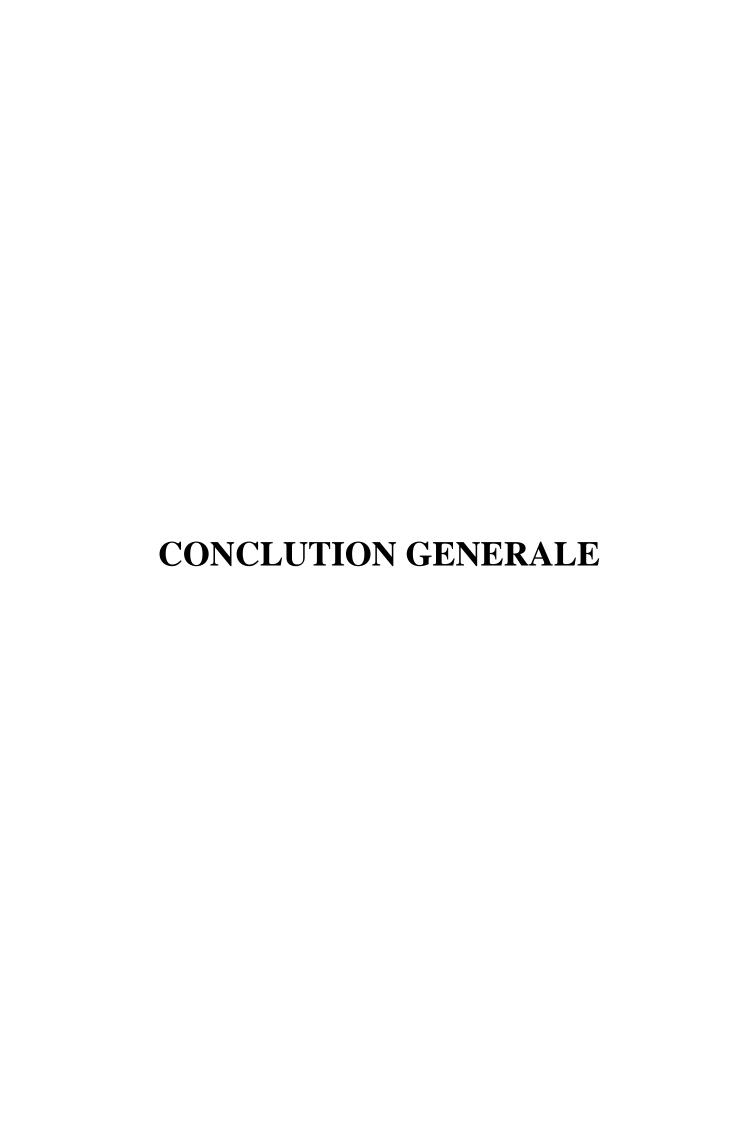
La forme et l'amplitude de la tension de retour sont une image du phénomène de polarisation et de relaxation diélectrique dans le condensateur testé. L'origine de ce phénomène est pratiquement facile à expliquer. En effet, après un temps de décharge long un certain nombre de dipôles ont le temps de s'orienter avec le champ appliqué. Puis lors de la décharge (avec toujours  $tc \succ td$ ) tous les dipôles présents dans le diélectrique n'ont pas le temps de se relaxer. Ainsi pendant la phase flottante, la tension aux bornes du condensateur va évoluer en fonction des dipôles non relaxés.

#### III.3.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'évolution temporelle de la tension de retour du polyméthacrylate de méthyle (PMMA), du polystyrène (PS) et du polycarbonate (PC). La tension de retour des diélectriques étudiés dépend de la tension appliquée aux échantillons  $U_C$ , du temps de charge  $t_c$  et de décharge  $t_d$ . Nos résultats se résument comme suit :

➤ La tension retour de chaque diélectrique augmente avec la tension de charge des échantillons U<sub>c</sub>.

- La tension de retour des trois diélectriques augmente avec le temps de charge t<sub>c</sub>.
- ➤ La tension de retour des trois diélectriques diminue avec l'augmentation du temps de décharge t<sub>d</sub>.
- ➤ Le PMMA est le diélectrique qui possède les plus grandes valeurs de la tension de retour comparativement au PS et au PC.
- Les valeurs des tensions de retour mesurées pour le PS sont très proches de celles mesurées pour le PC.
- ➤ Les temps t<sub>max</sub> pendant lesquels les maxima de la tension de retour sont atteints sont quasiindépendants de la tension de charge, des temps de charge et de décharge et du type de diélectrique.
- L'étude de la tension de retour peut rendre compte de l'état isolant d'un polymère.

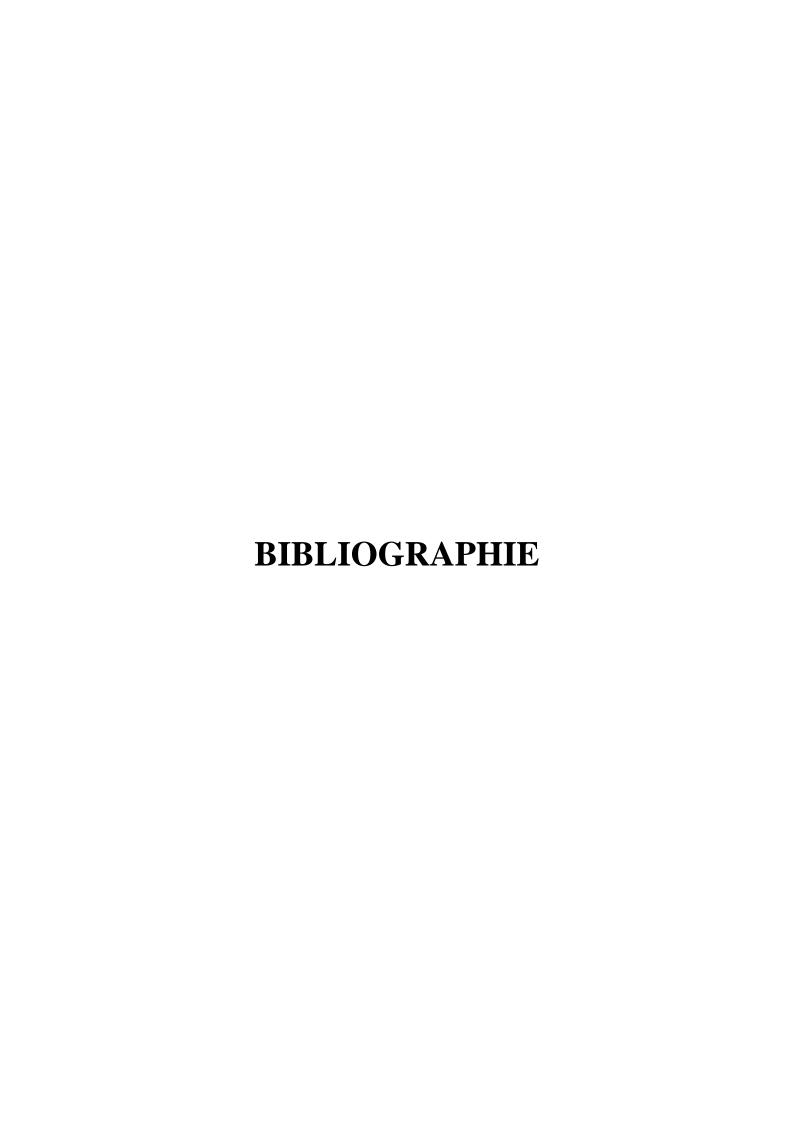


Dans ce travail nous avons appliqué la méthode de la tension de retour pour la caractérisation diélectrique de trois polymères utilisés dans l'isolation électrique. Notre étude a porté sur l'évolution temporelle de la tension de du retour polyméthacrylate méthyle (PMMA), du polystyrène (PS), et du polycarbonate (PC). L'évolution de la tension de retour est très influencée par les paramètres des essais qui sont la tension de charge du condensateur dont les matériaux étudiés constituent le diélectrique, les temps de charge ainsi que les temps de décharge. L'allure générale de la tension de retour en fonction du temps est la même pour tous les matériaux et pour tous les paramètres que nous avons variés pendant les essais. En effet la courbe représentant l'évolution temporelle de la tension de retour augmente, passe par un maximum puis diminue. De même d'après nos résultats expérimentaux, la tension de retour du PMMA, PS et du PC augmente avec l'augmentation de la tension de charge du condensateur (10, 12, 14, et 16 KV). Le temps de charge a également une influence sur la tension de retour. Cette dernière augmente à chaque fois qu'on augmente le temps de charge (20 et 40 mn). Les maxima de la tension de retour augmentent et ils sont atteints plus rapidement pour un faible temps de court-circuit. Ce temps de décharge est le facteur le plus important qu'il faut prendre en considération lors des essais sur site, il faut le définir de façon à annuler toutes les décharges résiduelles dans l'isolation.

Le type de diélectrique est un autre paramètre qui agit sur la tension de retour, les maxima de cette dernière sont différents d'un diélectrique à un autre. Le PMMA possède des valeurs de la tension de retour plus importantes suivi du PC puis du PS.

La tension de retour n'est pas gouvernée uniquement par les permittivités des matériaux. Une corrélation entre les tensions de retour et les résistivités transversales des trois matériaux a été établie. Une comparaison avec un polymère naturel qui est le papier imprégné utilisé dans l'isolation des transformateurs de puissance montre de manière indiscutable que le matériau dont la résistivité est plus faible présente la plus grande tension de retour. Ce résultat déjà établi pour des échantillons de papier presspahn de différentes résistivités [56], peut se généraliser pour la comparaison de matériaux différents. Nous pouvons donc conclure que la méthode de mesure de la tension de retour représente un moyen fiable permettant la caractérisation de l'état diélectrique des matériaux. La méthode RVM pourrait donc remplacer les méthodes conventionnelles de caractérisation des diélectriques telles la mesure de la résistivité ou le facteur de pertes diélectriques.

La principale perspective de ce travail est la caractérisation des différents polymères suite à des vieillissements thermique et électrique séparés puis combinés.



- [1] J.C. DUBOIS, "Propriétés diélectriques des polymères", Techniques de l'ingénieur, Référence E1850, Paris 1998.
- [2] R.HAGEBERG, L.LUNDGAARD, "Dielectric relaxation and DC conductivity of transformer pressboard and XPLE cable insulation", The Norwegian Electric Power Research Institute, Conference Publication N° 7034, © IEEE, Trondheim, Norway, 1992.
- [3] A. A. PAITHANKAR, C. T. PINTO, "Transformer insulation diagnosis: recovery voltage meausurement and dc absorption test", IEEE Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 597-600, 16-18 Octobre, 2001.
- [4] A. BOGNAR, L. KALOCSAI, G. CSEPES, E. NEMETH, J. Schmidt, "Tests de diagnostic des système d'isolement haute tension à papier huilé (en particulier isolement des transformateur) par mesure diélectrique par courant continu", Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, pp. 1-7, 28 Août 1<sup>er</sup> Septembre, 1990.
- [5] Y. C. KUANG, G. GHEN, P. JARMAN, "Recovery voltage measurement on oil-paper insulation with simple geometry and controlled environment", IEEE International Conference on Solid Diélectrics, Toulouse, France, July 5-9, 2004.
- [6] G. M. URBANI, R. S. BROOKS, "Using the recovery voltage methode to evaluate aging in oil-paper insulation", IEEE Internationale Conference on conduction and Breakdown in solid Dielectrics, pp. 93-97, Sweden, June 22-25, 1998.
- [7] A. KRIVDA, G. RUSSEL, "Assessment of oil impregnated paper insulation insulation using recovery voltage measurements", IEEE International Conference on conduction and Breakdown in solid Dielectrics, pp. 93-97, Sweden, June 22-25, 1998.
- [8] M. IHSAN BIN SUJANI, "Degradation of polymeric power cable due to water tree under dc voltage", Licence en technologie, Faculté Electrice Engineering, Université de technologie Malaysia, Avril 2010.
- [9] X. DUCOURET, "Lignes aériennes: matériels isolateurs", Technique de l'ingénieur, Référence D4423, Paris 2006.

- [10] J. L. HALARY et F. LAUPRËTRE, "De la macromolécule au matériau polymère ", Edition Belin, Paris, 2006.
- [11] J.PHALIPPOU, "Verre : Aspects théorique", Technique de l'Ingénieur, Référence AF3600, Montpellier, Juillet, 2001.
- [12] J. P. MERCIER, "Polymérisation des monomères vinyliques, Procédés et matériaux nouveaux", Première édition Presses Polytechnique Romandes, Suisse, 1983.
- [13] A. ANTON et J.L. STEINLES, "Micas et produits micacés", Techniques de l'Ingénieur, Référence D2360, Toulouse, Mai 1997.
- [14] R. FOURNIE, "Les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanisme de dégradation application industrielle ", Edition Eyrolles, Paris, 1990.
- [15] S. LAFAYE, "Propriétés mécaniques de friction et de déformation des surfaces de polymères solides", Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg, Novembre, 2002.
- [16] M. FONTANILLE et Y. GNANOU, "Chimie et physico-chimie des polymères", Edition Dunod, Paris, 2002.
- [17] P. ROBERT, "Matériaux de l'électrotechnique", Volume II, Edition Dunod, 1987.
- [18] M. J. BLAŽEK, "Study of the reaction kinetics of the thermal dégradation of polymer", thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Novembre, 2005.
- [19] K.BOUDRAA, "Elaboration et caractérisation de réseaux de polymères interpénétrés à base de monomères d'acrylate de butyle (ABu) et d'éthyl-héxyl-acrylate (EHA) : Gonflement dans des solvants isotropes", Mémoire de Magister en Physique, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [20] F. AYMONINO, "Contribution à l'étude du comportement des systèmes des machines tournantes à courant alternatif fonctionnant sous très haute température (200-400°C)", thèse de doctorat, Toulouse, 2008.

- [21] J. LECOMTE-BECKERS et Ch. BRASSINE, "Les matériaux polymères", Sélection des matériaux, Université de Liège, 2009.
- [22] Y. MECHERI, "Influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension", Thèse de Magister en Electrotechnique, ENP d'Alger, Octobre 1998.
- [23] A. MOUATSI, "Etude de l'effet de l'humidité sur les propriétés électriques de la surface d'un polymère", Mémoire de Magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine.
- [24] J.N. DEMAY et J.C. BOBO, "Matériaux pour les câbles haute tension à isolation polyéthylène ou polyéthylène réticulé chimiquement", R.G.E Tome 85 N°9, Septembre 1976.
- [25] D. AUSSEUR, "Poly (chlorure de vinyle) ", Les Techniques de l'Ingénieur, Traité Plastique et Composite, Référence AM3325.
- [26] R. DOSSOGNE, "Polyéthylènes haute densité PE-HD", Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites, Référence A 3 315, 1996.
- [27] L. BOUKEZZI, "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés électriques et mécaniques du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension –essai sur éprouvettes", Thèse de magister en électrotechnique, ENP d'Alger, 2000.
- [28] Ch. A. HARPER et, E. M. PETRIE, "Plastics materials and processes, a concise encyclopedia", Édition John Wiley- & SONS, INC, New Jersey, 2003.
- [29] J. KEERBULIK et E.SAUVAGER, "les polymères dans l'optique et le virage", Monographie de L'institue Supérieur de Plasturgie d'Alençon, Novembre, 2005.
- [30] A.W. JOHSON, "Invitation à la chimie organique", Edition Jones and Bartlett, Paris, 1999.
- [31] D. H. NGUYEN, "Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l'isolation électrique ", Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 28 Novembre, 2005.

- [32] M. CHANDA, "Introduction to polymer science and chemistry a problem solving approach ", Edition Taylor & Francis group, US, 2006.
- [33] V. ASCHENBRENNE, T. UCIK et L. VALENTA, "Sensitivity of RVM parameters in view of the changes of water content in the course of power transformers drying", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003, Smit (ed.) © 2003 Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-79-8.
- [34] J. P. MANCEAU, "Etude du phénomène de relaxation diélectrique dans les capacités Métal-Isolant-Métal", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunication, Signal, Université Joseph Fourier, Mai 2008.
- [35] A.G. SCHALAG, "The recovery voltage measurement for transformer diagnosis, Tettex instruments", 1995.
- [36] G. SEMART, "Condition assessment of a medium voltage cable network by insulation diagnostics and failure statistics", Master en Science, Ecole Electrique Engineering, Stockholm, Suède 2008.
- [37] G. CSÉPES, I. HAMOS, R. BROOKS, V. KARIUS, "Practical foundations of the RVM (Recovery Voltage Methode) for oil/paper Insulation Diagnosis", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Volume 1, pp. 345-355, 25-28, October, 1998.
- [38] G. CSEPES, I.HAMOS, I.KISPAL, J.SCHIMIDT, A.BOGNAR, "Un système expert à courant continu (RVM) permettant de vérifier l'efficacité de la remise à neuf d'un système isolant HT à papier huilé à partir de l'analyse spectrale de polarisation dans la bande des longues constantes de temps", Conférence Internationale des Grande réseaux Electriques, pp.1-6, 28 Août 3 Septembre, 1994.
- [39] V. ASCHENBRENNER, T.UCIK, "The possibilities and limits of estimation of ageing degree of paper-oil insulation in power transformers by recovery voltage methode", Diélectric Materials, Measurements and Applications, Conference Publication, N° 473, pp.335-340, IEE 200.

- [40] F. BITAM MEGHERBI, M.MEGHERBI, "Effect of oil or pressboard paper barriers on negative corona discharge", Iranian Journal of Computer Engineering, Issue 2, Summer-Fall, 2007.
- [41] M. J. HEATHCODE, "The J & P Transformer Book", Twelfth edition, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 1998.
- [42] E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J.KUFFEL, "High voltage engineering, fundamentals", Second edition, published by Butterworth-Heinemann, 2000.
- [43] M. A. TALIB, N. A. M. GHAZALI, M. CHRISTIE, Z. WAN, I. HASHIM, U. SHAHANOM, et M. N. JAMALI, "Diagnosis of Transformer Insulation Condition Using Recovery Voltage Measurements", National power and Energy Conference (PECon) Proceedings, Bangi, Malaysia, 2003.
- [44] J. P. V. BOLHUIS, J. J. SMIT, G. M. URBANI, "Interpretation of recovery voltage measurement on power transformers", High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August, 1999, Conference Publication No. 467, IEE, 1999.
- [45] M. FARHANI, H. BORSI, E. GOCKENBACH, "Experience with partial discharge, dissipation factor and recovery voltage for the evaluation of insulation systems of high voltage rotating machine", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 454-459-2002.
- [46] S. M. ISLAM, P. R. S. JOTA, M. STACE, "Detection of oil-paper equilibrium moisture content in power transformers using hybrid intelligent interpretation of polarisation spectrums from recovery voltage measurements", Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, pp. 16-19, June 7-10, 1998.
- [47] V. ASCHENBRENNER, T. UCIK, L. VALENTA, "Sensitivity of RVM parameters in view of the changes of water content in the course of power transformers drying", XIIIth International Symposium on Voltage Engineering, ISBN 90-77017-79-8, Netherlands, 2003.

- **[48]** V. ASCHENBRENNER, T. UCIK, "The possibilties and limits of estimation of ageing degree of paper-oil insulation in power transformers by recovery voltage method", Dielectric Materials, Measurements and Application, Conference Publication N° 473, © IEE 2000.
- [49] A.K. JONSHER, "Dielectric relaxation in solids", London, 1983.
- [50] H. PROVENCHER, "Analyse de la réponse diélectrique du complexe papier-huile dans les transformateurs de puissance", Maîtrise en Génie Electrique, Ecole de Technologie, Montreal, 16 Septembre 2008.
- [51] S. WOLNY, "The influence of temperature and dampness on the value of the main time constant of paper-oil insulation determined by using Deby's model", Physics and Chemistry of solid state, pp. 572-476, V.7, N°3, 2006.
- [52] V.DER HOUHANESSIAN, W.S. ZAENGL, "Time domain measurements of dielectric response in oil-paper insulation systems", Conference Record of 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Québec, Juin 1996.
- [53] Y. C. KUANG, G. CHEN, P. JARMAN, "A new model of recovery voltage oil-paper insulation system", IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse France, July 5-9, 2004.
- [54] P.OSVATH et H. ZAHN, "Polarisation sepectrum analysis for diagnosis of oil/paper insulation systems", Conference record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, USA, juin 1994.
- [55] S. BIRLASEKARAN et YU XINGZHOU, "Relaxation Studies on Power Equipment", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, N°6, décember 2003.
- [56] F. BITAM-MEGHERBI, "Etude d'une isolation combinée huile/papier isolant Approche non destructive", Thèse de doctorat d'état en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Décembre 2007.

- [57] SUSAN H.SMITH "Extraction of additives from polystyrene and subsequent analysis", These de magister (master), Blacksburg, 1998.
- [58] C. COMBEAUD "Etude des instabilités volumiques en extrusion de polystyrène et polypropylène", Thèse de Doctorat, l'Ecole des mines de Paris, Décembre 2004.
- [59] AUDREY, "Polystyrène expansé, polystyrène cristal, PSE, PS cristal", Techniques de l'ingénieur France, Mars 2008.
- [60] Commission Européenne Direction Générale CCR Centre Commun De Recherche. Institut de Prospective Technologique, "Fabrication des polymères ", Octobre 2009.
- [61] V. BOUCHER, S. DUQUESNE, S. BOURBIGOT, "Etude de la dégradation de nanocomposites à matrice polycarbonate lors d'un procédé d'extrusion", Laboratoire des Procédés d'Elaboration de Revêtements Fonctionnels (PERF) UMR-CNRS 8008/LSPES, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille (ENSCL) de France.
- [62] M.L. BARTHES, "Régénération d'ABS et de PC issus de DEEE sous forme d'alliages de polymères techniques ou de nanocomposites", Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences Physiques pour l'Ingénieur, Mécanique et Ingénierie, Bordeaux, Mars 2010.
- [63] D. A. FOLATJAR, K. HORN, "Polycarbonate PC", Technique de l'Ingénieur, traité plastiques et composites.
- [64] H.T PHAM, S. MUNJAL, C.P BOSNYAK, "Polycarbonates, Handbook of thermoplastics", Ed. OLABISI O, 609-631, 1997.
- [65] M. CARREGA, J.F. AGASSANT, M. BIRON M, C. CLOZZA, C. DUVAL, J.M. HAUDIN, C. HOUDRET, J.P. MACHON, J.P. QUESLEL, B. SEGUELA, G. VILLOUTREIX, R. WIRTH, "Matériaux industriels Matériaux polymères", Edition DUNOD, 2000.
- [66] F. BITAM-MEGHERBI, M. MEGHERBI, "Time Evolution of Current through Insulating Paper under DC Voltage Stress", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume 14, Issue 3, pp. 656-662, June, 2007.