

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Thème

Effet d'un champ électrique sur les propriétés diélectriques de la résine époxyde

Encadré par : M. M.A. HANDALA

Orienté par : M^{elle} F. ZEBODJE

Réalisé par : M^{elle} HAMMI SAMIRA

M^{elle} KACER SAMIA

M^{elle} RAHMANI FERROUDJA

Promotion 2012/2013

Sommaire

Remerciements

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à Monsieur M. A. Handala pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant de nous encadrer. Sa grande qualité scientifique et son entière disponibilité ont fortement contribué à l'accomplissement de ce travail. Jamais à court d'idées il nous a transmis son expérience et prodigué ses conseils tant au niveau scientifique et technique que rédactionnel. Nous le remercions chaleureusement.

Nous voudrions particulièrement remercier Mademoiselle F. Leboudj pour sa gentillesse, sa motivation et pour le temps qu'elle nous a consacré tout au long de ce travail.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail.

A mes parents qui m'ont toujours aidé soutenu et encouragé durant toutes mes études.

A mes frères et sœurs.

A mes amis.

A mes copines Feroudja et Samira avec qui j'ai partagé des moments difficiles et joyeux tout au long du cursus et toutes leurs familles.

A tout les étudiants d'électrotechnique.

Samia

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail.

A mes parents qui m'ont toujours aidé, soutenu et encouragé durant toutes mes études.

A mes frères et sœur.

A mes grands parents.

A mon future mari que je remercie pour son soutien, sa patience et surtout d'avoir su m'encourager.

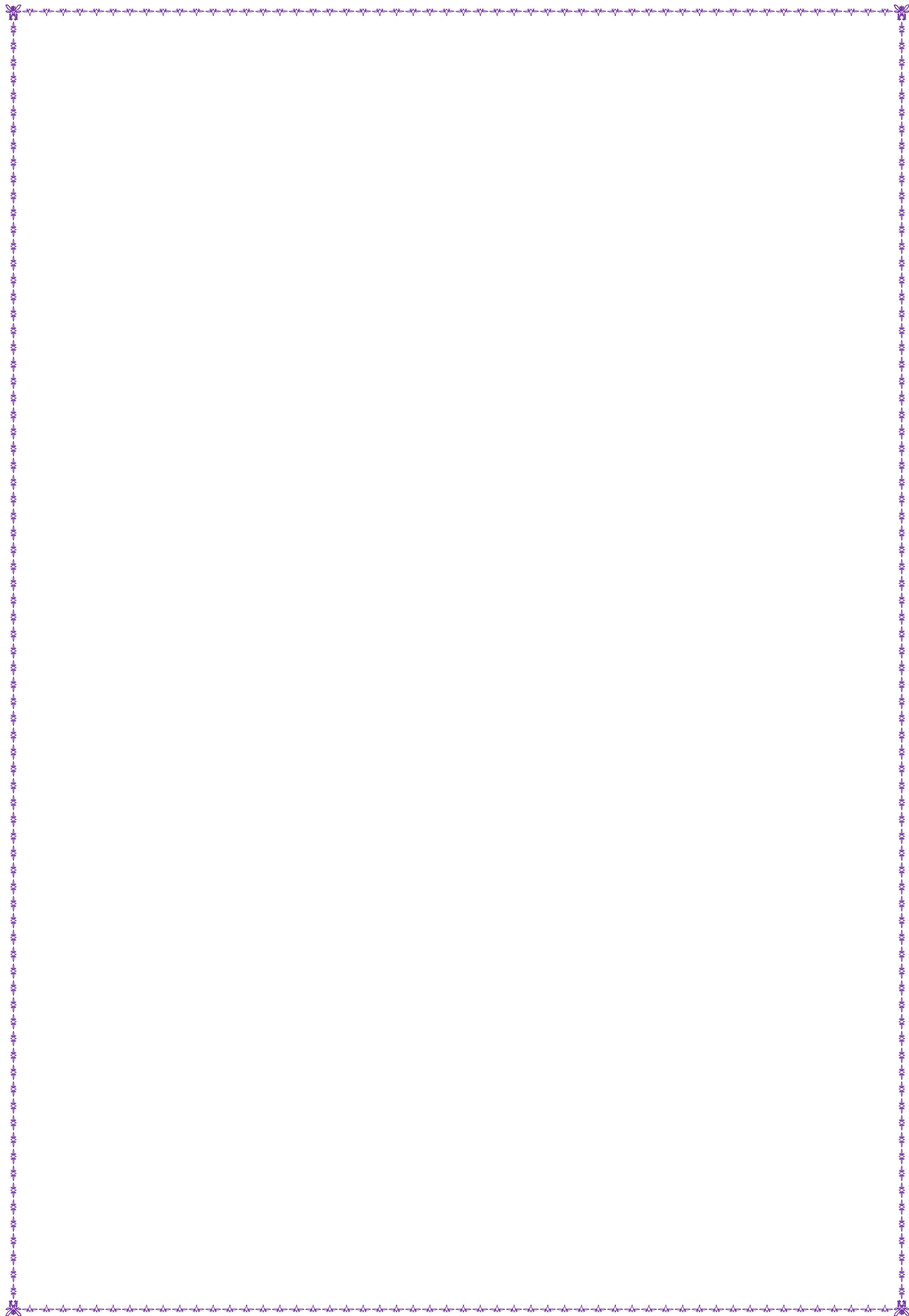
A mes beaux parents, beaux frères, belles sœurs et toute la famille.

A mes amis.

A mes copines Feroudja et Samia avec qui j'ai partagé des moments difficiles et joyeux tout au long du cursus et toutes leurs familles.

A tout les étudiants d'électrotechnique.

Samira



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail.

A mes parents qui m'ont toujours aidé, soutenu et encouragé durant toutes mes études.

A mes frères et sœur.

A mes grands parents.

A mon mari que je remercie pour son soutien, sa patience et surtout d'avoir su m'encourager.

A mes beaux parents beaux frères belles sœurs et toute la famille.

A mes amis.

A mes copines Samira et Samia avec qui j'ai partagé des moments difficiles et joyeux tout au long du cursus et toutes leurs familles.

A tout les étudiants d'électrotechnique.

Feroudja

Mots clés

- Résine époxyde
- Résistivité volumique
- Permittivité
- Facteur de pertes
- Champ électrique
- Vieillissement électrique
- Fréquence

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les isolants solides	
I.1. Introduction	2
I.2. Définition d'un isolant	2
I.3. types d'isolants	3
I.3.1. Isolants liquides	3
I.3.2. Isolants gazeux	3
I.3.2.1. Critères de sélection des gaz	3
I.3.2.2.1. Critères primaires de sélection	4
I.3.2.2.2. Critères diélectrique	5
I.3.3. Isolants solides	5
I.3.3.1. Les polymères	6
I.3.3.2. Définition	6
I.3.3.3. Synthèse des polymères (polymérisation)	7
I.3.3.4. Sature chimique des polymères	8
I.3.3.5. Structure moléculaire des polymères	8
I.3.3.6. Famille des polymères	9
I.4. Caractéristiques diélectriques des isolants	11
I.4.1. Introduction	11
I.4.2. La résistivité	11
I.4.3. Rigidité diélectrique	11
I.4.4. Permittivité	12

I.4.5. pertes diélectriques	13
I.5. conclusion	14
Chapitre II : notions sur la dégradation des isolants solides	
II.1. Introduction	15
II.2. définition d'une décharge	15
II.2.1. Les barrières diélectriques (DBD)	15
II.2.2. Les décharges glissantes	15
II.3. Types de décharges	16
II.3.1. Les décharges partielles	16
II.3.1.1. Les décharges internes	16
II.3.1.2. Les décharges superficielles	16
II.3.2. Les décharges disruptives (claquage)	17
II.4. Vieillissement	17
II.4.1. Vieillissement physique	17
II.4.1.1. Avec transfert de masse	17
II.4.1.2. Sans transfert de masse	18
II.6.2. Vieillissement chimique	18
II.4.2.1. Vieillissement électrique	18
II.4.2.2. Vieillissement climatique	18
II.4.2.3. Vieillissement thermique en présence d'oxygène	19
II.4.2.4. Vieillissement par hydrolyse	19

II.4.2.5. Vieillissement radiochimique	19
II.4.2.6. Vieillissement biochimique	20
II.4.2.7. Vieillissement mécano chimique	20
II.5. Conclusion	20
Chapitre III : Présentation du matériel utilisé et des dispositifs expérimentaux	
III.1. Introduction	21
III.2. Matériaux étudiés	21
III.2.1.La résine époxyde	21
III.2.1.1. Le durcisseur	22
III.2.1.2. Mise en œuvre du thermodurcissable	23
III.2.1.3. Propriétés de la résine époxyde	23
III.2.1.4. Utilisation des résines	24
III.2.1.5. Avantages et inconvénients de la résine	25
III.2.2. Le polypropylène	26
III.3. Dispositifs expérimentaux	27
III.4. Fabrication de la résine	29
III.5. Préparation des échantillons pour la mesure	30
III.6. Mesure des paramètres diélectriques	31
III.7. Mesure des courants de décharge	32
III.8. Conclusion	33

Chapitre IV : Résultats et interprétations	
IV.1. Introduction	34
IV.2. Méthodes de calcul des paramètres	34
IV.2.1. Résistivité	34
IV.2.2. Permittivité relative	34
IV.2.3. champ électrique	34
IV.3. Présentation des graphes	34
IV.4. Interprétation des graphes	45
IV.5. Conclusion	47
Conclusion générale	48

Introduction générale

Le développement de l'industrie chimique a permis la production d'une grande variété de polymères.

Les structures isolantes sont exposées à différents types de contraintes : mécaniques, thermiques, environnementales et électriques qui engendrent la modification de leurs propriétés menant à la dégradation superficielle ou volumique de ces derniers qui se termine généralement par leur rupture prématurée [1].

Il est important de connaître et de comprendre les mécanismes de vieillissement des matériaux isolants sous champ électrique pour déterminer avec plus de précision leurs durées de vie et donc garantir leur fonctionnement pour une durée bien déterminée.

Dans le domaine de génie électrique les matériaux isolants sont utilisés pour le fonctionnement des composants et la protection des biens et des personnes, généralement la durée de vie des isolants conditionne la durée de vie de l'appareil, c'est pour ces raisons que les polymères sont sujet de nombreuses études notamment sous contraintes électriques.

Le présent travail consiste à reprendre à la question suivante : comment la fréquence et la durée de la contrainte électrique appliquée agissent sur les paramètres diélectriques de la résine époxyde et du polypropylène ?

Notre travail comportera quatre chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les isolants et leurs caractéristiques diélectriques, ainsi que les différentes familles et constituant des polymères.
- Le deuxième chapitre aura pour objectif la description des décharges et les différents types de vieillissement.
- Dans le troisième chapitre part nous présenterons les dispositifs expérimentaux et les différents matériaux utilisés.
- Le dernier chapitre sera consacré aux essais effectués ainsi qu'à la présentation des résultats obtenus et à leurs discussions.

Enfin, l'étude se terminera par une conclusion générale sur l'ensemble du travail réalisé.

Chapitre I :

Généralités sur

les isolants solides

I.1. Introduction

La conception et le fonctionnement d'un équipement électrique dépend des matériaux disponibles. Les propriétés des isolants jouent un rôle crucial dans la construction des appareils électriques.

Avants, l'isolation utilisée dans les machines électriques était souvent assuré par du coton ou du papier imprégné de vernis spécial. Aujourd'hui, on utilise de plus en plus des isolants synthétiques pour les machines de moyenne et grandes puissance.

Les isolants utilisés pour la distribution de l'électricité sont des isolants souples (caoutchouc, papier et produits thermoplastiques). Ces isolants doivent être utilisés à des températures élevées afin de leurs assurer une durée de vie très longue.

Dans ce présent chapitre, nous examinerons les propriétés des isolants solides.

I.2. Définition d'un isolant

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée (10^8 à 10^{16}) $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer le courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit ; sa résistance en court-circuit doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif

Les isolants sont utilisés pour :

- Assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs (protection des personnes et des équipements).
- Supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns des autres et par rapport à la terre.
- Remplir les fonctions du diélectrique d'un condensateur [2].

I.3. Types d'isolants

D'après leurs états, on distingue les isolants liquides, solides et gazeux et dans notre travail nous nous intéressons aux isolants solides et gazeux ainsi qu'à leurs interfaces.

I.3.1. Isolants liquides

Les isolants liquides sont souvent utilisés dans l'isolation des machines électriques, car en plus de l'isolation, ils jouent aussi le rôle de refroidissement.

L'huile minérale est l'un des isolants les plus utilisés dans les matériels électriques (transformateur à grande puissance, les condensateurs...). Mais ils sont inflammables à une certaine température proche de 150°C.

Certains isolants liquides synthétiques (fabriqués à base d'hydrogène chloré) ou à base de silicone (obtenus par les huiles organiques) contournent le problème d'inflammabilité, mais ils sont plus chers.

I.3.2. Isolants gazeux

Le gaz le plus abondant et le plus utilisé dans l'isolation électrique (postes classiques, lignes aériennes, électrostatiques,...) est l'air. Cependant, d'autres gaz tels que l'azote (N_2), le dioxyde de carbone (CO_2) et surtout l'hexafluorure de soufre (SF_6) connaissent un succès grandissant dans le domaine des systèmes haute tension (postes blindés, câbles à isolation gazeuse, etc.). Leur utilisation a permis d'améliorer la fiabilité des systèmes et d'en réduire leurs poids et dimensions en diminuant la distance entre les conducteurs, et par conséquent, l'espace occupé par ces systèmes. Cela est remarquable en comparant un poste classique (isolé à l'air) à un poste blindé (isolé au gaz SF_6).

I.3.2.1. Critères de sélection des gaz

Compte tenu des enjeux écologiques et de certaines contraintes liées à l'utilisation des gaz isolants, on va déterminer certains critères de sélection de gaz, qui respectent l'environnement d'une part et les exigences diélectriques et sanitaires d'autre part. Ces critères peuvent être classés en deux groupes à savoir les critères primaires de sélection (indépendants des propriétés diélectriques), et les critères diélectriques (par comparaison au SF_6) [3].

I.3.2.1.1. Critères primaires de sélection

Il s'agit entre autre de :

- **Non toxicité** : les gaz doivent être non toxiques pour le personnel d'entretien et technique ainsi que pour les équipements avec lesquels ils interagissent. Il existe deux catégories de toxicité : la toxicité aigüe et la toxicité à long terme. [4]
- **Température de liquéfaction** : frontière entre la phase gazeuse et liquide, elle doit être inférieure à la température minimale ($T_{\min}$) de fonctionnement de l'équipement à la pression de fonctionnement choisie p (minimum en dessous de zéro degré Celsius à 0,1 MPa).

La température de liquéfaction (T_{liq}) dépend de la pression du gaz utilisé ; elle peut être déduite de la température d'ébullition (T_{eb}) à la pression atmosphérique par une expression approximative de la forme :

$$T_{\text{liq}}(p) = T_{\text{eb}} + 27 \ln(p)$$

Où T_{liq} et T_{eb} sont en degré Celsius et p en bar. Cette relation peut être dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron pour la courbe de pression de vapeur et laisse apparaître le critère de non liquéfaction sous forme de limite supérieure au point d'ébullition (T_{eb}) :

$$T_{\text{eb}} < T_{\min} - 27 \ln(p) \text{ [bar]} - 20^\circ\text{C} \quad (\text{supposant } p > 1,2 \text{ et } T_{\min} < -20^\circ\text{C}). \text{ [4]}$$

- **Stabilité chimique** : elle peut être exprimée sous forme de deux critères. Le premier critère concerne la température de décomposition T_{dec} du gaz qui doit être supérieure à la température maximale qui pourrait se produire dans l'équipement sous test (en générale autour de 200°C) aux point chauds, $T_{\text{dec}} > 200^\circ\text{C}$). Pour le second critère, le gaz ne doit pas prendre feu (non inflammabilité) dans une réaction de décomposition provoquée par une décharge partielle produisant des étincelles qui peuvent avoir des températures supérieures à 10000°K .

Un moyen sûr est de faire en sorte que le gaz choisi soit un composant exothermique (c'est-à-dire qui a son enthalpie inférieure à zéro)

- **Inerte** : le gaz ne doit pas oxyder ou réagir avec les pièces de l'équipement pour éviter leurs dégradation.

- **Critères environnementaux** : les paramètres critiques qui ont le plus d'impact sur l'environnement sont le potentiel de dégradation de l'ozone (PDO) et le potentiel d'échauffement global (PEG). Ce dernier caractérise l'accumulation à long terme d'un gaz dans l'atmosphère. Le PEG du gaz doit, de préférence, être inférieur de 100 fois à celui du SF₆. Tous les gaz contenant du chlore ou du brome sont à proscrire car ils sont susceptibles de détériorer la couche d'ozone [3].

I.3.2.1.2. Critères diélectriques

- Le champ critique E_{cr} (rigidité diélectrique intrinsèque) qui mesure la capacité d'isolation d'un diélectrique. Il sera exprimé par rapport à la valeur du SF₆ [1].
- Non formation de produits de décomposition, au cours de la décharge, dont le dépôt sur les isolants solides de la structure (par exemple : buse dans un disjoncteur HT) pourrait créer des surfaces conductrices et favoriser l'amorçage d'étincelles.
- Critères de commutation : Ces critères englobent entre autres les propriétés suivantes :
 - Bonnes propriétés de coupure d'arc et d'isolation (stabilité à la formation d'arc, faible constante de temps d'arc...).
 - Electronégativité pour permettre la capture d'électrons libres et prévenir le phénomène d'avalanche à l'origine de l'amorçage de la décharge.
 - Grosse section efficace, stabilité chimique et thermique avec dissociation des molécules réversible (recombinaison) si possible pour une grande efficacité de coupure.
 - Grande énergie de dissociation pour un refroidissement optimale de l'arc.
 - La réaction des produits d'érosion d'arc (souvent inévitable) dus aux matériaux proche de l'arc ne doit pas former de dépôts conducteurs tels que les couches de carbone, de métal ou de semi-conducteur qui induiraient des conductivités parasites pouvant mener à la formations d'étincelles [1].

I.3.3. Isolants solides

Le rôle principal des isolants solides est de s'opposer au passage du courant électrique, mais ils servent aussi à maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions bien déterminées (par exemple : isolateurs de ligne).

Le taux d'utilisation de ces isolants varie selon le besoin. Dans certains cas la quantité d'isolants solides utilisée est très réduite (lignes aériennes en conducteurs nus). Mais la

préoccupation de réduire l'encombrement des systèmes électriques, conduit à rapprocher les conducteurs, et par conséquent à augmenter leurs isolation et les maintenir rigidement en place pour éviter qu'il se mettent en contact sous l'effet de leurs propres poids, des déformations, ou des forces extérieures. Les isolants solides peuvent être employés seuls (câble à isolation synthétique extrudée), en association de plusieurs solides (bobinage réalisé en fil émaillé imprégné de résine thermodurcissable) ou en association d'un solide et d'un liquide (isolation en papier imprégné d'huile minérale pour les transformatrices hautes tensions).

Afin d'assurer l'isolation des différents systèmes électriques, divers isolants solides sont utilisés (verre, porcelaine, matériaux composites,..., etc.), dont on s'intéresse aux polymères qui possèdent des propriétés physicochimiques (comme l'hydrophobicité) meilleures que celles du verre ou la porcelaine) [4].

I.3.3.1. Les polymères

Les polymères isolants appelés communément « matières plastiques » sont des substances organiques ou inorganiques, liquides ou solides, à température ambiante. Ils se sont imposés dans tous les domaines d'activités, des objets les plus banals jusqu'aux applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires le plus souvent synthétiques, quelques fois naturels. Ils sont très utilisés dans les équipements électriques. Ils doivent cet essor à leur large gamme caractéristiques : durs, mous élastiques, transparents ou opaques, rigidité diélectrique élevée, faibles pertes diélectriques, esthétique, hydrophobicité élevée, plus ou moins résistants aux conditions agressives de leur usage et toujours légers. C'est la nature particulière de leurs molécules en forme de chaînes, ainsi que la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent, qui est à l'origine de cette diversité. Les contraintes électriques auxquelles les polymères sont soumis en service peuvent engendrer la perte de leurs propriétés physico-chimiques superficielles.

I.3.3.2. Définition

Un polymère est un matériau composé de longues chaînes macromoléculaires issues de l'assemblage de n molécules simples répétitives appelées « monomères », lors d'une réaction chimique dite de polymérisation. Les atomes sont liés par des liaisons fortes covalentes ou

ioniques. Tandis que les chaînes sont faiblement liées entre elles par des liaisons de van der Waals.

Le degré de polymérisation est défini par le nombre moyen de monomères constituant la macromolécule. Ces matériaux possèdent de très bonnes propriétés diélectriques ainsi qu'une résistance améliorée à la température et à l'humidité [5].

Le caoutchouc naturel, les résines, les vernis, la bakélite ainsi que tous les isolants synthétiques sont des polymères.

I.3.3.3. Synthèse des polymères (polymérisation)

La synthèse d'un polymère peut se faire de différentes manières dont on distingue la polyaddition et la polycondensation qui se font selon quatre méthodes principales : en masse, en solution, en émulsion et en suspension. Le point commun de ses synthèses est la présence d'agents amorceurs ou catalyseurs, qui sont ajoutés pour augmenter la vitesse de polymérisation. Les polymères purs ne sont pas utilisés directement dans l'industrie, car ils sont très fragiles et ils peuvent subir, sous l'action de diverses sources (chaleur, humidité, lumière,...) des dégradations qui se traduisent par une modification de leur structure chimique et entraînant ainsi une altération de leurs propriétés physiques. Lors de leur élaboration, les fabricants ajoutent diverses substances qui modifient et renforcent leurs propriétés :

- Des antioxydants, permettant aux polymères de ne pas réagir en présence de l'oxygène de l'air.
- Des agents de réticulation, qui après réaction chimique, peuvent se lier aux chaînes du polymère en formant des ponts intermoléculaires, permettant ainsi la formation d'un réseau macromoléculaire qui confère au matériau une meilleure stabilité mécanique et thermique.
- D'autres additifs, comme les plastifiants,..., selon les propriétés recherchées.

La grande diversité des polymères ainsi que leurs bonnes diélectriques, mécaniques et thermiques en font un matériau de choix dans les isolations hautes tensions. Le développement de matériaux composites a été possible grâce à l'excellente stabilité thermique obtenu par les polymères. Les propriétés mécaniques sont assurées par une résine époxyde renforcée par des fibres de verre et le revêtement est en silicone ce dernier matériau possède une surface hydrophobe, ce qui permet la limitation des courants de surface (courants de fuite).

I.3.3.4. Nature chimique des polymères

On peut classer les polymères d'après leur structure chimique et d'après l'évolution de leur permittivité en fonction de la température et de la fréquence en polymères polaires et en polymères apolaires.

- Les polymères polaires

Les polymères polaires possèdent dans leurs molécules des atomes (généralement électronégatifs tels que (F, Cl, O, N) qui, fournissent des dipôles. Ils ont une permittivité élevée (3.5 à 10) et un indice de perte élevé (10^{-2} à 1) [3]

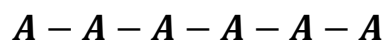
- Les polymères apolaires

Les polymères apolaires sont généralement de bons isolants avec un faible indice de pertes, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} et une permittivité quasi constante (2.5 à 3) dans un large domaine de températures et de fréquences. Leur structure chimique ne contient que de carbone et de l'hydrogène ou bien, s'ils contiennent des atomes électronégatifs tels que le fluor, ces atomes sont placés symétriquement le long de la chaîne carbonée. A ce groupe appartiennent par exemple le polyéthylène, et le polystyrène.

I.3.3.5. Structure moléculaire des polymères

La structure se rapporte à l'enchaînement des atomes, à celui des unités monomères, à la chaîne ou encore à l'ensemble de chaînes, donc la dénomination de chaque structure est nécessaire pour les spécifier.

Le produit résultant de la polymérisation directe du monomère est dit homopolymère, sa molécule ne comporte donc qu'un seul motif élémentaire de la façon suivante :

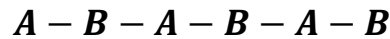


Structure moléculaire d'une homopolymère

Mais on peut obtenir aussi, par polymérisation des copolymères, en utilisant plusieurs monomères de base, ou encore par griffage à partir d'un polymère sur lequel se branche d'autres chaînes polymériques.

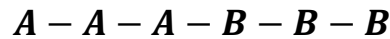
Schématiquement, on peut réaliser des copolymères à réparation de monomères :

- Structure aléatoire : (la plus courante) [6].



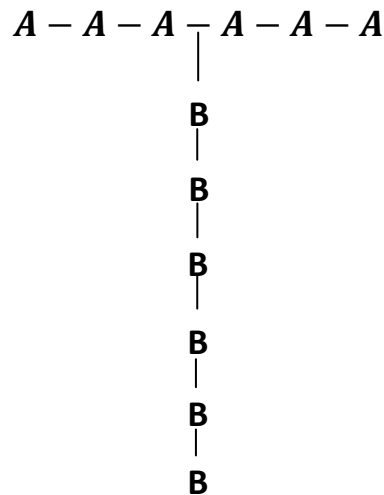
Structure aléatoire d'un copolymère

- Structure séquencée (alternance)



Structure séquencée d'un copolymère

- Structure greffée (ramification)



I.3.3.6. Famille des polymères

Il existe une grande variété de polymères utilisés dans l'industrie ; comme les peintures, les caoutchoucs, les plastiques, les fibres de synthèse, le papier, ...etc. Ils sont souvent classés selon leurs propriétés thermomécaniques, et on distingue :

- **Les thermoplastiques**

Les thermoplastiques ou thermoplastes sont des solides généralement solubles, formés de chaînes plus ou moins linéaires liées entre elles par des liaisons secondaires (forces de van der Waals ou dipolaires, liaisons d'hydrogène, etc.). Et mis en forme par chauffage et refroidissement. Selon la régularité de leurs chaînes, ces polymères peuvent cristalliser (thermoplastes semi cristallins) ou non (thermoplastes amorphes).

La majorité des thermoplastes ramollissent ou fondent dans une plage de température allant de 80°C à 225°C [4].

Parmi les thermoplastiques, on a : polyéthylène (PE), polypropylène (PP) et polystyrène (PS).

- **Les élastomères**

Les matériaux en caoutchouc ou élastomères sont des solides souples et gonflables formés de chaînes peu compactées et (à températures ambiantes) très mobiles. Pour assurer une stabilité de forme indispensable, diminuer leur propension au fluage et prévenir une souplesse excessive, les caoutchoucs sont généralement réticulés, c'est –à-dire que leur chaînes sont liées entre elles par des liaisons primaires et stables [6].

Parmi les élastomères, on trouve : poly-isoprène, polybutadiène, polychloroprène.

- **Les thermodurcissables**

Les thermodurcissables ou thermo durcis sont des solides infusibles et insolubles qui forment un réseau tridimensionnel à partir de segments moléculaires liés entre eux par une densité élevée de liaisons primaires. Les thermo durcis sont mis en forme de façon irréversible par réaction chimique des molécules d'un durcisseur avec les petites molécules d'une résine et/ou avec des chaînes linéaires. La structure chimique de la résine de départ, le choix du durcisseur et le degré de réticulation influencent l'ensemble des propriétés thermomécaniques des thermo durcis (module d'élasticité, température de transition vitreuse, résistance mécanique). Vu leur faible viscosité avant durcissement et les propriétés chimiques et mécaniques finales favorables, les thermodurcissables sont largement employés comme matrices dans les matériaux composites structuraux. Ils sont utilisés généralement pour l'appareillage électrique [4].

Parmi ces polymères on a : le poly époxyde, et le polyester.

I.4. Caractéristiques des isolants

I.4.1. Introduction

Les isolants possèdent plusieurs modes de polarisation (électronique, ionique, dipolaire, inter faciale).aux fréquences industrielles, seule la polarisation électronique a un rôle déterminant. Les polymères apolaires, tels que le polyéthylène, le propylène, sont de très bon isolants. Les polymères à faible permittivité relative limite les courants de déplacement ainsi que les pertes diélectriques.la permittivité relative des polymères est comprise entre 2 et 10 [5].

L'humidité est également un facteur déterminant pour la qualité de l'isolation, elle influence notamment la résistance superficielle des polymères solide. Les polymères employés pour l'isolation ont une résistivité suffisamment élevée pour être considérés, sur ce plan, comme de bons diélectriques. Mais en modifiant leur état de surface, particulièrement sous l'action de décharges électriques, on peut obtenir des matériaux mouillables capable de conduire des courants de surface [5].

I.4.2. La résistivité

La résistance d'isolement R_i traduit une imperfection du matériau diélectrique isolant qui présente une certaine conductivité électronique et ionique. Elle dépend de la température, qui accroît la mobilité ainsi que la concentration des porteurs de charges de la tension continue appliqué et du temps écoulé après la mise sous tension. Les impuretés au sein du matériau, les pollutions de surfaces et les effets de bord influencent fortement la valeur et le comportement de la résistance d'isolement d'un condensateur.la résistivité électrique ρ_i est déduite directement de la valeur de la résistance R_i par la relation : $R_i = \rho_i e/s$

La résistivité est le deuxième paramètre avec $\tan \delta$ qui rend compte des pertes énergétiques dans le matériau diélectrique.

L'ordre de grandeur des résistivités des matériaux utilisés pour des applications condensateur doivent avoir une valeur supérieure à $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$. les matériaux comme très performant ont des valeurs de résistivité d'isolement de l'ordre de $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ à $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ [7].

I.4.3. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique notée généralement (G) est définie comme étant la valeur maximale des champs électriques qu'on peut appliquer à un isolant sans que se produise un

claquage ou une perforation diélectrique rendant impossible une nouvelle application de la tension.

$$G = \frac{U}{L} \quad [\text{kV/mm}]$$

La rigidité intrinsèque des polymères et des solides isolants en générale peut atteindre plusieurs centaines de kV/mm, mais leur rigidité pratique est souvent limitée à quelques dizaines de kV/mm. Elle varie pour les polymères plus utilisés de 10 à 24 kV/mm. En pratique, le claquage se produit à partir de points faibles tels que l'inclusion de gaz, le défaut à la surface des électrodes ou les surfaces de séparation gaz/solide. La rigidité diélectrique est influencée par certains facteurs tels que la forme de la tension, la température et l'épaisseur du solide isolant. Elle dépend également des caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant :

- des décharges superficielles peuvent se produire dans ce milieu, en particulier quand il s'agit de l'air.
- La permittivité et la résistivité du milieu ambiant modifient la répartition du champ électrique [5].

I.4.4. La permittivité

La permittivité définit la possibilité d'être traversé par un courant électrique sous l'action du champ électrique.

Pour les condensateurs on choisit des matériaux à grande permittivité permettant d'obtenir des capacités élevées. Mais pour les isolations où l'on cherche plutôt à réduire la capacité, les matériaux à faible permittivité sont plus intéressants. Dans l'isolation composée, le champ électrique est inversement proportionnel à la permittivité. Il est plus élevé dans le matériau qui présente la plus faible permittivité notamment dans les gaz associés aux solides isolants. L'air a une permittivité ($\epsilon_r=1,00053$) légèrement supérieure à celle du vide, alors que les diélectriques courants ont une permittivité comprise entre 2,2 et 8 à 50 Hz.

La permittivité décroît avec la fréquence et l'indice de perte $\epsilon_r \cdot \tan \delta$ qui caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique, présente souvent des maxima très marqués pour certaines fréquences [5].

ϵ_r exprime la facilité d'un matériau de se polariser sous l'action d'un champ électrique.

Donc, un matériau qui ne se polarise pas à $\epsilon_r = 1$ tandis qu'un matériau qui se polarise à $\epsilon_r > 1$. Plus ϵ_r est grande ; plus la polarisation du matériau est forte.

Dans le cas des champs électriques harmoniques la susceptibilité électrique et la permittivité relative sont des grandeurs complexes :

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j \epsilon''_r$$

Ou ϵ'_r garde la même signification physique que ϵ_r , tandis que ϵ''_r caractérise les pertes diélectriques dues à la polarisation électrique du matériau.

Les valeurs de ϵ'_r dépendent de la structures physico-chimique des matériaux, de leur état d'agrégation, des caractéristiques du milieu ambiant et du champ électrique. Ainsi, les valeurs de ϵ'_r pour les matériaux polaires sont supérieurs à celles des matériaux non polaires [8].

I.4.5. Pertes diélectriques

Les diélectriques réels présentent toujours les pertes diélectriques dues à la conduction ohmique, même très faible dans la plupart des isolants, mais surtout à la relaxation qui peut être importante en tension alternative. En effet, le retard à la polarisation du diélectrique provoque des pertes diélectriques représenté par le facteur de dissipation.

Avec

δ : angle de perte, c'est l'angle complémentaire de déphasage entre la tension appliqué diélectrique et le courant qui en résulte.

Dans le cas du diélectrique réel, on définit la permittivité relative complexe qui permet d'introduire les pertes diélectriques :

$$\epsilon_r^* = \epsilon'_r - j \epsilon''_r$$

Les pertes diélectriques augmentent avec l'intensité du champ électrique appliqué, surtout à partir du moment où le seuil d'ionisation du gaz contenu dans les vacuoles incluses dans le polymère est atteint. Elles dépendent également de la fréquence de la tension appliquée. En effet, la représentation de la permittivité par un nombre complexe, la composante du courant en phase avec la tension est donné en valeur efficace par la formule :

$$I_r = V C_0 \epsilon''_r \omega$$

Et les pertes diélectriques par la formule :

$$P = V^2 C_0 \varepsilon_r'' \omega$$

C_0 : capacité du vide [F]

V : tension appliqué [V]

P : pertes [W]

ω : pulsation [rd/s]

Le facteur de dissipation des polymères les plus utiliser varient de 10^{-4} à 2.10^{-2} à 50 Hz. même si en terme de pertes d'énergie les pertes diélectriques sont très faible elles peuvent provoquer un échauffement de l'isolant qui peut conduire, à plus au moins long terme, à une démunissions de la qualité de l'isolant. de façon générale, les pertes diélectriques nous renseigne sur la qualité de l'isolant [5]

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des généralités sur les propriétés diélectriques des interfaces isolantes solides/gaz, en effet, les structures, les caractéristiques diélectriques, aussi nous avons classé les polymères selon leurs caractéristiques thermo mécaniques et leurs natures chimiques. L'accent dans le deuxième chapitre est mis sur la dégradation et le vieillissement de ces isolants.

Chapitre II :

Notions sur la dégradation des isolants solides

II.1. Introduction

Les décharges électriques souvent inévitables dans un grand nombre de dispositifs de génie électrique, sont aussi des sources de particules chargées. Il existe des configurations dans lesquelles la surface libre d'isolant se trouve en contact avec des décharges ce qui conduit à de sévères dégradations [9].

II. 2. Définition d'une décharge

Le terme de décharge électrique s'applique à tout mécanisme de passage de courant dans un gaz, il doit son origine au fait que la première méthode d'obtention de ces courants a été la décharge de condensateur à l'air [10].

Lorsque on applique à un diélectrique un champ électrique suffisamment élevé, il apparaît un courant dont la valeur dépend de celle du milieu. On parle alors de décharges électriques. Ce phénomène prend une multitude de formes différentes [9].

L'application de la tension fait apparaître un certain nombre de phénomènes parasites qui provoquent une détérioration des isolants susceptible de mettre ceux-ci rapidement hors usage.

Selon la disposition et la forme des électrodes, et de l'isolant solide on peut distinguer deux catégories de décharges qui se produisent à la surface d'un isolant solide :

II.2.1. Les barrières diélectriques (DBD) : où les isolants gazeux et solides sont en générale en série entre les deux électrodes et avant de se propager sur la surface du solide la décharge se développe dans le volume du gaz.

II.2.2. Les décharges glissantes : où les deux électrodes sont toujours en contact avec la surface du diélectrique solide. La décharge électrique prend naissance et se développe dans le gaz en restant en contact avec la surface de l'isolant solide sur laquelle elle se propage.

Le plus important et le plus nocif de ces phénomènes est celui des décharges partielles.

II.3. Types de décharges

II.3.1. Les décharges partielles

Il est connu depuis de nombreuses années que les décharges partielles affectent gravement les isolants solides. Elles prennent naissance aux bords des électrodes ou dans des inclusions ou cavités gazeuses que peut renfermer le matériau dès que la tension appliquée atteint la tension seuil correspondant au minimum de Paschen du gaz en présence (air ou autres). Leur action peut conduire à des transformations chimiques radicales (scission de la liaison moléculaire sous l'effet du bombardement électronique et ionique, échauffement local, création de radicaux,...) entraînant la dégradation du matériau voire sa défaillance, à la suite de l'un des processus suivants: [11].

- Propagation à travers le matériau de canaux microscopiques (arborescence)
- Echauffement cumulatif par les décharges
- Cheminement superficiel ou contournement.

On distingue deux types de décharges partielles :

II.3.1.1. Les décharges internes

Les décharges partielles internes se développent dans les cavités remplies d'air dues aux défauts de fabrication du diélectrique, ou bien créées par une fatigue électromécanique, aux points de concentration du champ.

La mise en court-circuit par une décharge d'une vacuole dans une isolation donne naissance à des phénomènes physiques dus à la transformation de l'énergie électrique fournie en énergie thermique, lumineuse, contribuant surtout à la détérioration plus ou moins lente de l'isolant.

II.3.1.2. Les décharges superficielles

Les décharges superficielles sont des décharges électriques qui apparaissent à la surface d'un solide placé dans un milieu isolant gazeux ou liquide. Le champ électrique donnant lieu à cette décharge à sa composante principale tangente à la surface du matériau.

Le courant de ces décharges est généralement un courant de déplacement qui résulte de la variation du champ électrique :

$$I_d = \left(\varepsilon \frac{dE}{dt} \right)$$

II.3.2. Décharges disruptives (claquage)

Le claquage est l'annihilation au moins temporaire subite des propriétés isolantes du milieu. Le développement de la décharge disruptive est lié à un ou une association des phénomènes suivants :

- Décharge intrinsèque
- Décharge thermique
- Décharge partielle

II.4. Vieillissements

On appelle vieillissement tout phénomène qui se traduit par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériau.

Le terme vieillissement n'implique pas un mécanisme précis, on est même souvent en présence de phénomènes complexes faisant intervenir simultanément plusieurs mécanismes comme l'oxydation à température modérée, l'hydrolyse ...

Parmi les plus sévères contraintes en service nous pouvant citer la contrainte thermique qui peut conduire à la réduction de la durée de vie suite au vieillissement du matériau.

Le vieillissement thermique peut provoquer aussi la modification de sa structure et de ses propriétés diélectriques et mécanique.

On distingue deux types de vieillissement

II.4.1. Vieillissement physique

Le vieillissement physique peut se produire avec ou sans transfert de masse :

II.4.1.1. Avec transfert de masse

Un solvant peut pénétrer dans un matériau, dans les polymères, il peut avoir plastification accompagnée d'un gonflement ou également perte d'adjuvants par extraction ou évaporation. Lorsque le matériau est soumis à des contraintes (mécanique, électrique....) le solvant peut provoquer une craquelure. Si la déformation du polymère se poursuit, il se produit un phénomène de fissuration ou cracking.

Avec l'eau il peut exister des gradients de concentration dus à diffusion, à un gonflement différentiel fibre-polymère pour les matériaux composites ou un gonflement dû aux hétérogénéités du matériau cette pénétration de l'eau dans le matériau contribue à la

démunissions de la résistance d'isolement, elle se produit généralement lorsque le matériel, par exemple des moteurs, sont à l'arrêt.

II.4.1.2. Sans transfert de masse

Un matériau peut se fissurer sous contraintes en présence d'un composé tensio-actif. Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en œuvre, il peut en résulter un vieillissement physique interne [9].

II.4.2. Vieillissement chimique

Le vieillissement chimique est tout phénomène qui provoque une modification du matériau sous l'influence de l'environnement. En pratique, il se superpose à un vieillissement physique. Les décharges partielles dans l'air atmosphérique ionisent l'air et produisent des espèces chimiques (l'ozone, électrons énergétique, ions, photons). l'interaction de ces espèces avec les molécules de la surface solide isolant (C-H, C-O, C-C), provoque les processus suivant : l'oxydation, hydrolyse, coupure de chaînes statiques, dépolymérisation et réticulation. Les isolants peuvent être soumis à différents types de vieillissement chimique [1].

II.4.2.1. Vieillissement électrique

Si le matériau est soumis à des décharges partielles dont les effets se traduisent par la formation des radicaux libre, ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène. Il en suit une dégradation généralisée ou localisée (arborescence électrique) des isolants en présence d'humidité d'impureté ionique sous l'influence de la température. Des réactions électrochimiques peuvent conduire à une dégradation des propriétés du matériau.

II.4.2.2. Vieillissement climatique

Le vieillissement climatique résulte de l'exposition directe des matériaux aux rayonnements solaires, aux intempéries et à diverses pollutions. La lumière solaire accélère le vieillissement des plastiques et des élastomères. la température joue également un rôle important.

Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques de la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminement.

II.4.2.3. Vieillissement thermique en présence d'oxygène

L'oxydation se produit à des températures modérées (généralement inférieures à 300°C) ; la présence de l'oxygène dans le matériau a pour effet :

- Entrainer une prédominance des coupures de chaînes des polymères par rapport aux réticulations.
- D'abaisser le seuil de température au-delà duquel un vieillissement thermochimique anaérobie démarre.
- Provoquer une plus forte exo thermicité.

L'utilisation d'anti oxygénés ou de noir de carbone peut inhiber (empêcher ou ralentir) le phénomène d'oxydation.

On distingue par oxydation un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissous. Il se forme tout d'abord des produits des réactions solubles, puis par polymérisation, des produits qui sont plus ou moins solubles, les dépôts étant appelés boues d'oxydation [9].

II.4.2.4. Vieillissement par hydrolyse

Sous l'influence de l'humidité ($\geq 95\%$) et de la température (au moins de 100°C), certains polymères (polyesters...) peuvent se dégrader. Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques à la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminement.

La réaction hydrolyse s'effectue en présence d'eau H_2O .

Les phénomènes d'hydrolyses ont un certain nombre de caractéristiques communes suivantes ;

- Très lent à la température ambiante.
- Les effets d'hydrolyse se superposent aux effets physiques de l'absorption d'eau.
- Ce sont des réactions activées par les agents chimiques divers : ions H^+ , OH^- , métaux de transition...etc.

II.4.2.5. Vieillissement radiochimique

Dans les applications nucléaires spatiales, médicales,...les matériaux sont soumis à des réactions (α , β , γ , X, neutrons) de forte énergie ; il s'ensuit des coupures de chaînes et des

réticulations ; l'oxygène réagit avec les radicaux libres formés avec un rendement qui décroît avec le débit de dose, Le vieillissement radiochimique décroît avec le débit de dose. L'oxygène est en effet consommé si rapidement qu'il ne peut se renouveler par diffusion dans le matériau.

Le vieillissement radiochimique décroît donc avec le débit de dose et est influencé par la température ; l'oxygène, l'humidité jouent un rôle important.

II.4.2.6. Vieillissement biochimique

Certains micro-organismes (moisissure, champignons,...) peuvent dégrader les polymères ; plusieurs mécanismes de vieillissement sont connus : dégradation biochimique du matériau, consommation des adjuvants, attaque mécanique par les rongeurs.

La biodégradation est favorisée par des milieux humides, à des températures supérieures à la normale. Pour limiter les phénomènes de biodégradation on peut utiliser les additifs suivants : phénols, dérivés organométalliques (Hg, Sb, As, Sn, Zn).

II.4.2.7. Vieillissement mécano chimique

Les contraintes mécaniques s'exerçant sur les isolants d'une machine sont des facteurs de vieillissement significatifs. Un vieillissement mécano chimique peut apparaître sous l'influence d'une contrainte mécanique telle que le broyage, le fluage.

Dans ce cas les radicaux libres produits sous l'action des contraintes mécaniques réagissent avec l'oxygène.

II.5. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre l'accent est mis sur les différentes notions de dégradation des isolants solides, et ce, en donnant des rappels sur la définition de décharges, types de décharges, le vieillissement et ses types. Dans le chapitre qui suit nous allons présenter le matériau choisi pour ce projet.

Chapitre III :

Présentation des matériels utilisés et des dispositifs expérimentaux

III.1. Introduction

Les polymères sont très utilisés dans le domaine de génie électrique pour assurer une bonne fonctionnalité des équipements et garantir la sécurité des personnes. Ceci explique les nombreuses études consacrées sur ce type d'isolants solides. Notre étude est consacrée à la caractérisation diélectrique de deux polymères : la résine époxyde et le polypropylène.

III.2. Matériaux étudiés

On distingue deux types de résine selon son extraction

- Résines naturelles : ce sont des résines naturelles amorphes.
- Résines synthétiques : composées en général de deux produits chimiques différents (durcisseur, résine).

Il existe d'autres types de résines : acrylique uréthane cellulosique polyester....

Les résines les plus utilisées sont les résines époxyde et les polyesters.

III.2.1. La résine époxyde

Dès son apparition dans les années 50 le poly époxyde est devenu l'un des grands succès de l'industrie des matières plastiques. Environ deux tiers de la production sont transformés en peinture et vernis de décoration et de protection et un quart de cette production est utilisée en génie électrique (électronique, électricité). Ces résines possèdent en effet d'exceptionnelles propriétés de dureté et de résistance au choc, à la chaleur, à l'eau et à de nombreux produits chimiques Figure (III.2.1).

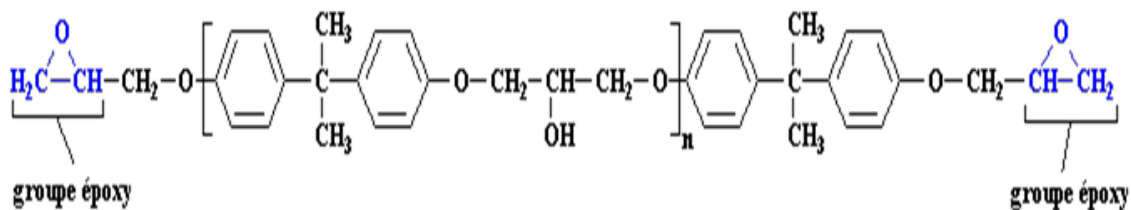


Figure(III.2.1) résine époxyde

Les résines époxydes sont des polymères thermodurcissables résultant d'une réaction de polyaddition entre une résine époxyde et un durcisseur de type anhydride d'acide ou amine

Les résines époxyde contiennent dans leurs molécules, deux ou plusieurs fonctions époxydes (appelés aussi groupes époxydes) fortement réactifs.

❖ **Structure chimique de la résine époxy :**



Formule chimique de la résine époxy

III.2.1.1. Le durcisseur

Le passage des résines époxydes de leurs formes linéaires à leur structure finale tridimensionnelle se fait grâce à l'utilisation de durcisseur qui permet la formation de pont entre les chaînes linéaires.

Les durcisseurs sont habituellement classés en deux principaux groupes : les polyamines et les anhydrides d'acide [12].

Dans notre étude nous allons utiliser le durcisseur anhydrides d'acide (figure III.2.1.1)



Figure (III.2.1.1) durcisseur

III.2.1.2. Mise en œuvre du thermodurcissable

Les matrices “poly époxydes” seront réalisées en deux temps :

- Synthèse de polymère.
- Formation d’un réseau tridimensionnelle par réticulation des poly époxydes en présence du durcisseur.

On utilise en général des époxydes à deux composants liquides qui peuvent être durcis soit à température ambiante soit à chaud sans appliquer une tension. Il suffit de les faire mouler au contact ou sous vide partiel éventuellement. Le durcisseur est relativement lent, quelques heures selon la réactivité de la résine et de son durcisseur.

III.2.1.3. Propriétés de la résine époxyde

- **Propriétés physico chimiques et mécaniques**

Une des propriétés du matériau est la température de transition vitreuse T_g de la résine. Cette température marque le passage de l’état vitreux à l’état caoutchouteux où les chaînes moléculaires acquièrent de la mobilité. Elle est comprise entre 60 et 70 °C. D’autres propriétés sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau : propriétés physico chimiques de la résine époxyde.

Propriétés	Valeurs
Densité	1.77 à 1.81g/cm ³
Température de décomposition	$\geq 350^\circ\text{C}$
Résistance à la traction	70 à 80 mpa
Allongement à rupture	2 à 2.5 %
Module d’élasticité	9400 à 10400 mpa

- **Propriétés électriques et diélectriques**

La rigidité diélectrique est l’une des propriétés fournis dans la fiche technique. Elle est mesurée à base de deux types d’échantillons.

Les caractéristiques diélectriques telles que la permittivité ϵ_r et le facteur de perte $\tan \delta$ sont donnés à 50Hz en fonction de la température dans la fiche technique.

III.2.1.4. Utilisation des résines**❖ Dans le domaine du génie électrique**

- Réalisation de circuits imprimés.
- Toutes les cartes pourvues de composants électrique en sont faites (en informatique).
- Dans l'isolation des installations électriques (transformateurs, turbines, conducteurs de transmission, interrupteurs, machines tournantes et armoires électriques.
- Pour les couches de protection et le confort pour les appareils managers.
- Dans les panneaux solaires
- Les résines de coulée sont utilisées pour la fabrication de modèles et de moules (matériel d'isolation électrique).

Dans les revêtements : peinture et vernis allant du revêtement des citernes et piscines aux protections des sols et murs contre les produits chimiques.

Comme domaine d'utilisation de la résine, nous pouvons citer l'exemple de la machine électrique.

Dans les machines électriques, l'isolation joue un rôle très important dans la séparation des composants de différents potentiels et différents circuits électriques. En plus du rôle cité ci-dessus, l'isolation améliore la force des structures des enroulements. Elle peut servir comme conducteur de chaleur entre l'enroulement et l'environnement ainsi qu'à protéger l'enroulement contre les perturbations externes (pollution, humidité...)

La résine époxy est utilisée dans :

- Isolation aux extrémités du bobinage.
- Isolation des pôles d'enroulement.
- Isolation des câbles et des bornes de raccordement
- Vernis extérieure et peinture protectrice.
-

❖ Dans d'autres domaines :

- Dans les encres d'imprimerie
- Dans les adhésifs pour les articles de sport (skis bicyclette...).
- Dans la construction (béton).

- Comme produit de grande performance dans la construction aéronautique (pale d'hélicoptère...)
- Comme fixateur de pièces histologiques en microscopie électronique et dans les huiles à immersion pour microscopie optique.
- Construction spatiale : nez de fusée, pièces de satellites.

III.2.1.5. Avantages et inconvénients de la résine

❖ Avantages

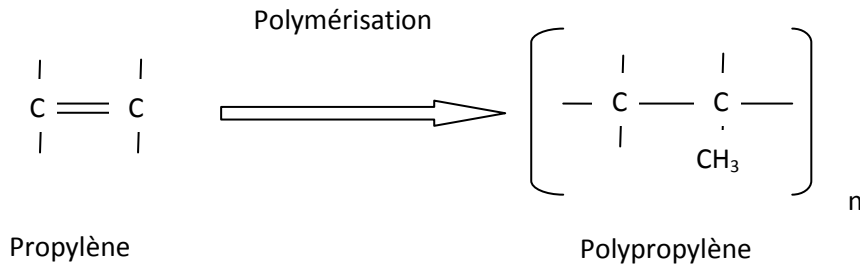
- Excellentes propriétés mécaniques en association avec les fibres (verre aramide, carbone...).
- Excellente tenue à la chaleur (130° à 200°)
- Très faible retrait au moulage.
- Stabilité dimensionnelle.
- Bon comportement chimique, mise en œuvre sans solvant.

❖ Inconvénients

- Temps de polymérisation très long.
- Sensibilité à humidité.
- Vieillessement sous température.
- Sensibilité au choc.
- Prix d'achat très élevé.
- Comme tout produit chimique, il peut causer des irritations (allergie) localisées généralement aux mains et au visage, ainsi que des troubles respiratoires mais ils sont beaucoup plus rares.

III.2.2. Le polypropylène

Le polypropylène est un thermoplastique obtenu par la polymérisation du propylène [4].



Ce thermoplastique a été découvert en 1957. Ce produit a de nombreux avantages comme : une rigidité élevée, une bonne résistance à la fissuration, une transparence et un brillant de surface.

Le polypropylène est très polyvalent et sert à la fois comme thermoplastique et comme fibre. Ce solide fond à des températures de 160 à 170 °C. Ces propriétés sont bonne résistance à la chaleur et à la plus part des agents chimiques, mais il est difficile à recycler surtout s'il est imprimé.

En raison de ses bonnes propriétés électriques et mécaniques, le polypropylène est largement utilisé en particulier dans les domaines suivants :

- Isolateurs d'antennes.
- Câbles de transport en continu.
- Condensateurs de puissances servant comme compensateur d'énergie réactive.
- Ailettes de refroidissement dans les moteurs [9].

III.3. Dispositifs expérimentaux

Cette partie est consacrée aux expériences et mesures effectuées au niveau du laboratoire de la haute tension du département d'électrotechnique de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou (figure III.3.1)



Figure III.3.1. Laboratoire haute tension

Le schéma du dispositif expérimental utilisé dans cette étude est représenté sur les figures (III.3.1 et III.2). Les décharges électriques ont été obtenues en alimentant les deux électrodes à l'aide d'une tension alternative délivrée par un transformateur d'essai, figure (III.3) dont les caractéristiques sont les suivantes : $U=100\text{kV}$, $f= 50\text{Hz}$, $P=10\text{kVA}$. La variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur qui se trouve au niveau du pupitre de commande, figure (III.4)

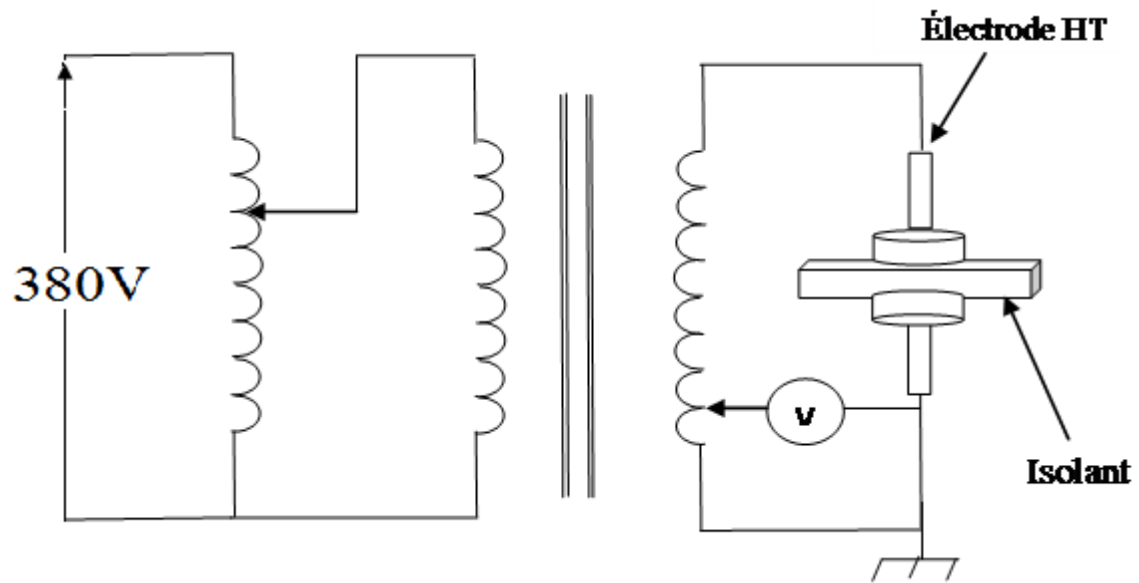


Figure III.1. Dispositif expérimental



Figure III.2. Dispositif expérimental



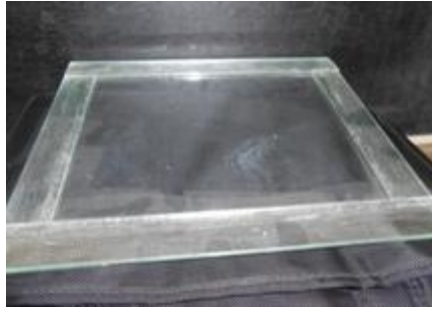
Figure III.3 transformateur d'essai



Figure III.4 Pupitre de commande

III.4. Fabrication de la résine

Le matériau utilisé est un polymère obtenu à partir du mélange de deux substances liquides, résine époxyde et durcisseur. Nous avons pesé à l'aide d'une balance électrique un tiers ($1/3$) en poids du durcisseur et deux tiers ($2/3$) en poids de résine époxyde, puis nous avons mélangé le tout à l'aide d'un agitateur électrique pendant quelques minutes afin d'assurer une homogénéité du mélange. Le mélange obtenu a été écoulé dans un moule en verre de 3 mm d'épaisseur (figure III.4). Après solidification complète du mélange (environ 2 jour) nous avons obtenu une plaque de forme parallélépipède

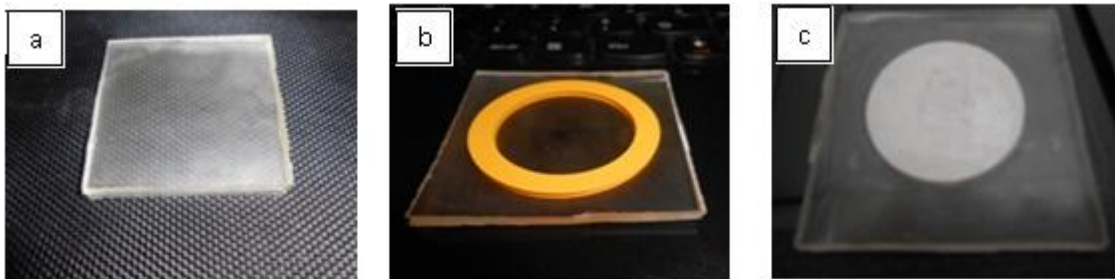


Figure(III.4) : moule en verre

III.5.Préparation des échantillons pour la mesure

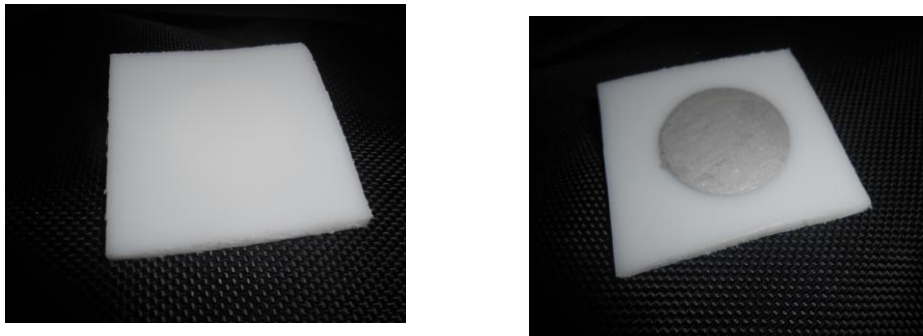
Après solidification complète du mélange (environ 2 jour) nous avons obtenu une plaque de forme parallélépipède. Nous avons découpés des échantillons de forme carrée de 5 x 5 cm et de 3 mm d'épaisseur (figure III.5.1.a). Après nettoyage des échantillons avec de l'alcool, nous avons délimité une surface conductrice (électrode) de 3 cm de diamètre sur l'échantillon de résine. Figure (III.5.1.b) à l'aide d'un anneau auto collant.

La surface conductrice est obtenue en peignant l'intérieur de l'anneau avec une résine conductrice (résine a l'argent ELECOLIT 342). Après avoir séché pendant 15 à 20mn cette préparation, nous avons enlevé l'anneau come le montre la figure (III.5.1.c).



Figure(III.5.1) échantillons de résine

Concernant le polypropylène on a utilisé des échantillons fabriqués industriellement. Figure(III.5.2).



Figure(III.5.2) échantillons de polypropylène

III.6. Mesure des paramètres diélectriques

La figure (III.6.1) représente le schéma du dispositif expérimental que nous avons utilisé pour mesurer la capacité, la résistance et le facteur de pertes en utilisant un LCR mètre.

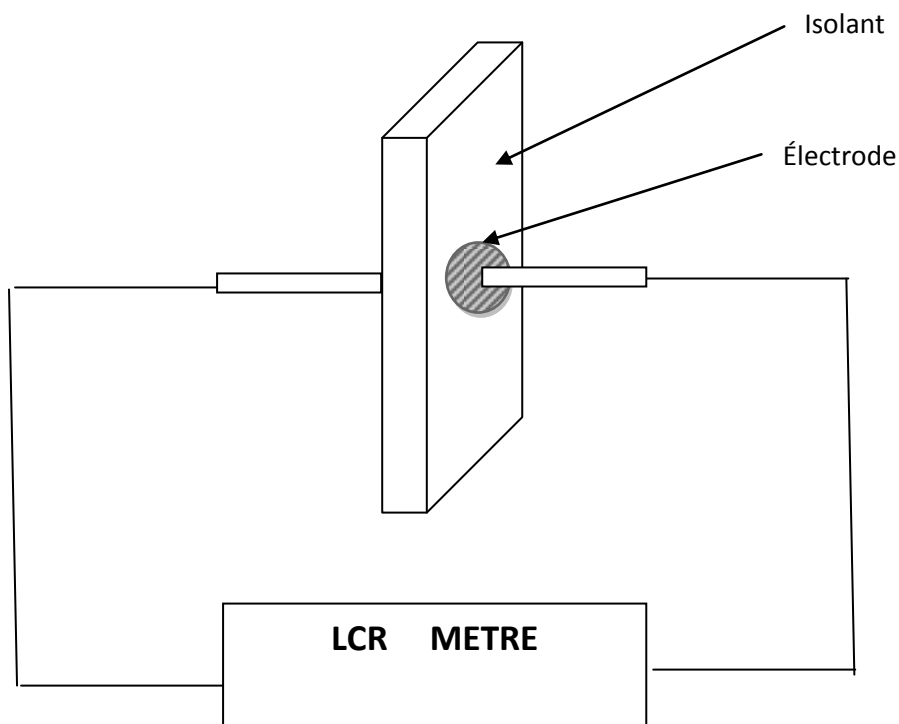


Figure III.6.1. Dispositif expérimentale

Le LCR mètre est un appareil électronique qui sert à mesurer : La capacité (C), la résistance (R), le facteur de pertes (D) et l'inductance (L) figure (III.6.2). Il permet d'obtenir des résultats rapides avec une bonne précision. De plus, sa mise en œuvre facile et sa gamme de fréquence correspond à celle d'une grande partie des applications, cela permet de caractériser les composants passifs dans leur future gamme d'utilisation.

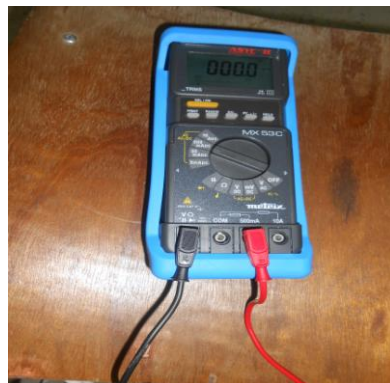
Durant notre thèse nous avons utilisé un LCR mètre 817 [13].



Figure III.6.2. LCR mètre

III.7. Mesure des courants de décharge

A l'aide d'un multimètre (figure III.7) placé en série avec la mise à la terre, nous avons mesuré les valeurs efficaces du courant de décharge.



Figure(III.7) le multimètre utilisé

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différents polymères (résine époxyde et polypropylène) utilisées dans notre étude.

Ensuite nous avons présenté les dispositifs expérimentaux utilisés et les appareils de mesure.

Pour réaliser notre projet nous avons opté pour le matériel suivant :

- LCR mètre
- Multimètre
- Un système de deux électrodes planes soumis à une tension pour le vieillissement.

Chapitre IV :

Résultats et

interprétations

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats et leur interprétation. L'expérimentation consiste en l'étude de l'influence du vieillissement électrique et la fréquence sur les paramètres diélectriques (résistivité, permittivité et facteur de pertes) et les courants de décharge et ce, en faisant une comparaison entre les résultats obtenus sur la résine époxyde et ceux du polypropylène.

IV.2. Méthodes de calcul

Le LCR mètre nous donne les valeurs de la résistance (R), la capacité(C). Donc pour le calcul de la résistivité(ρ) et de la permittivité (ϵ_r) on utilise les méthodes de calcul suivantes :

- **Résistivité**

$$\rho = \frac{R.S}{e} [\text{k}\Omega \cdot \text{cm}], \text{ avec :}$$

R : la résistance du solide en $\text{k}\Omega$.

S : la surface de l'électrode en cm^2

e : l'épaisseur de l'isolant en cm.

- **Permittivité relative**

$$\epsilon_r = \frac{C.e}{\epsilon_0 S}, \text{ avec}$$

ϵ_r : La permittivité devides.

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Le facteur de pertes est donné directement par le LCR mètre.

- **Champ électrique**

Système plan-plan

$$E = \frac{U}{d} [\text{kV/mm}]$$

U : la tension appliquée [kV]

d: la distance entre les deux électrodes (épaisseur de l'isolant) [mm]

IV.3. Présentation des graphes

- Nous fait vieillir les échantillons sous tension, durant des temps différents (0,2,4,6,8h).Puis à l'aide du LCR mètre on a effectué les mesures en faisons varier les fréquences de 500 à 10000Hz.Les résultats obtenus sont représentés sur les graphes suivants :

➤ La résistivité

• Pour le polypropylène

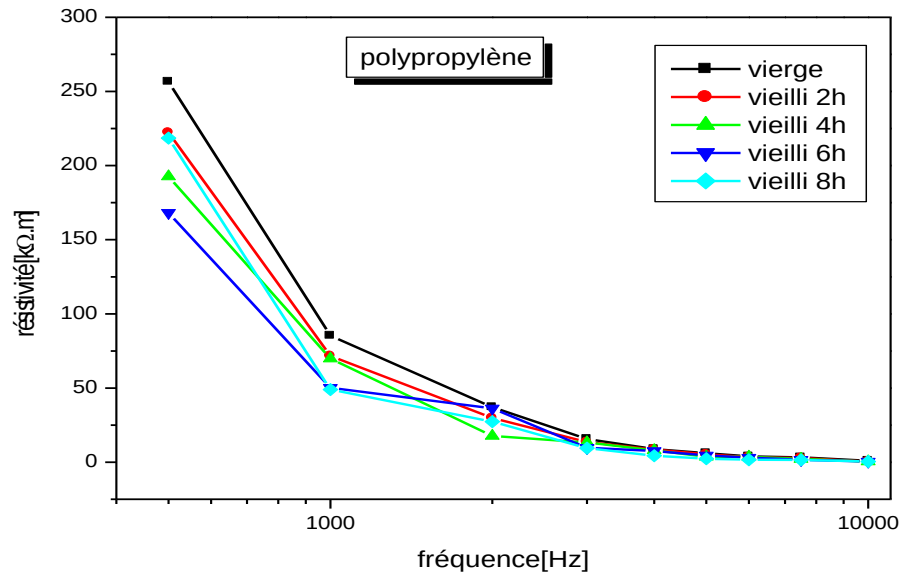


Figure IV.3.1. Variation de la résistivité en fonction de la fréquence

• Pour la résine époxyde

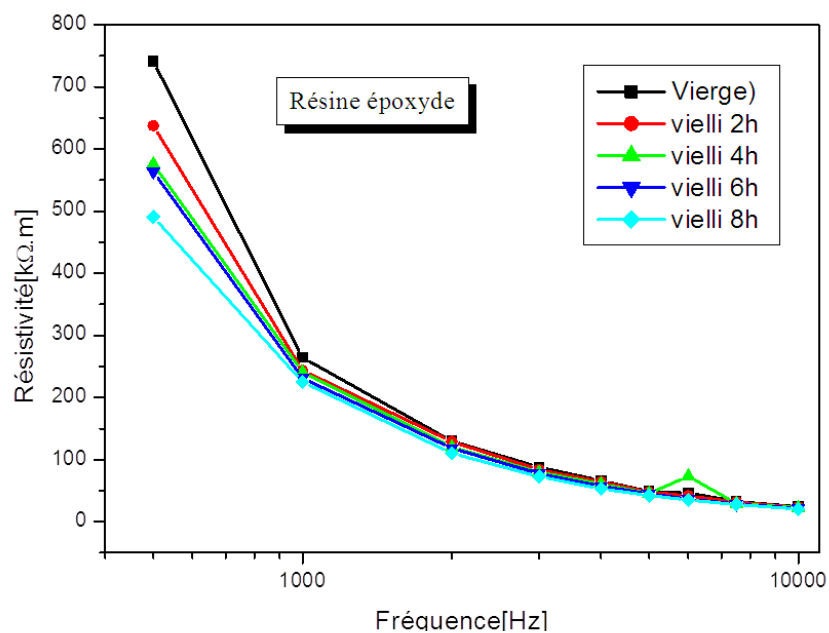


Figure IV.3.2. Variation de la résistivité en fonction de la fréquence

Pour $f=500\text{Hz}$

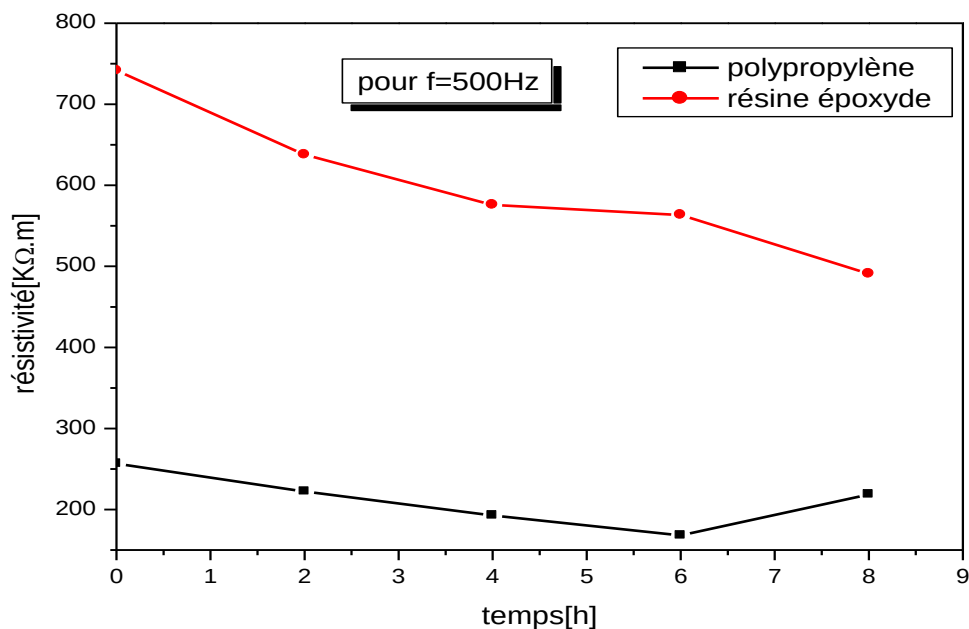


Figure IV.3.3 variation de la résistivité en fonction du temps $f=500\text{Hz}$

Pour $f= 2000\text{Hz}$

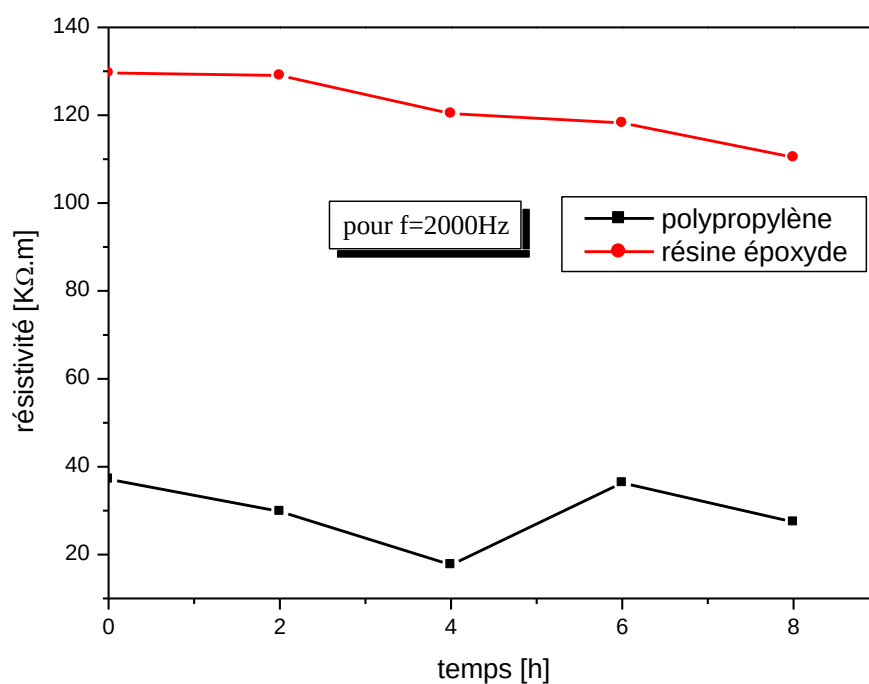


Figure IV.3.4.variation de la résistivité en fonction du temps $f=2000\text{Hz}$

Pour $f=4000\text{Hz}$

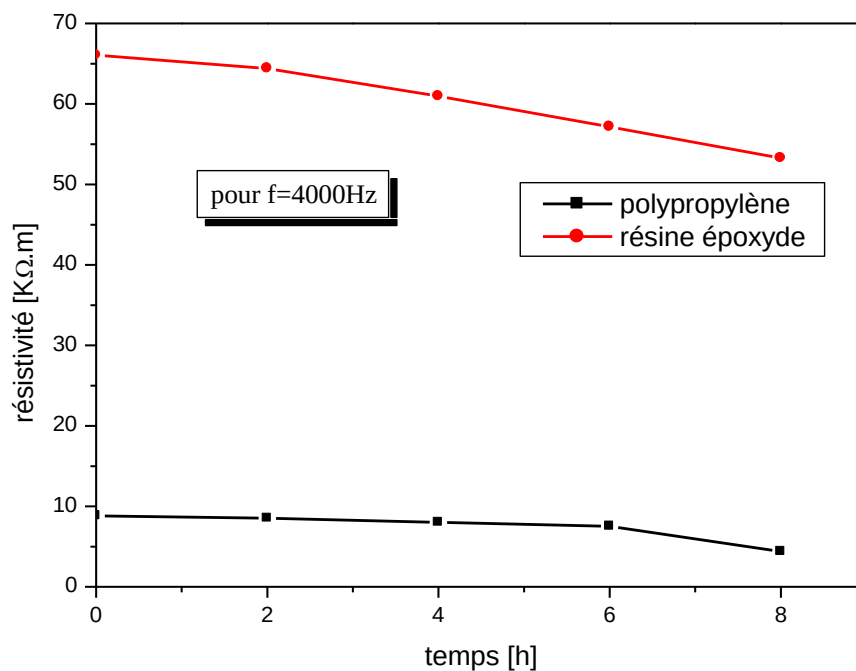


Figure IV.3.5. Variation de la résistivité en fonction du temps $f=4000\text{Hz}$

Pour $f=10000\text{Hz}$

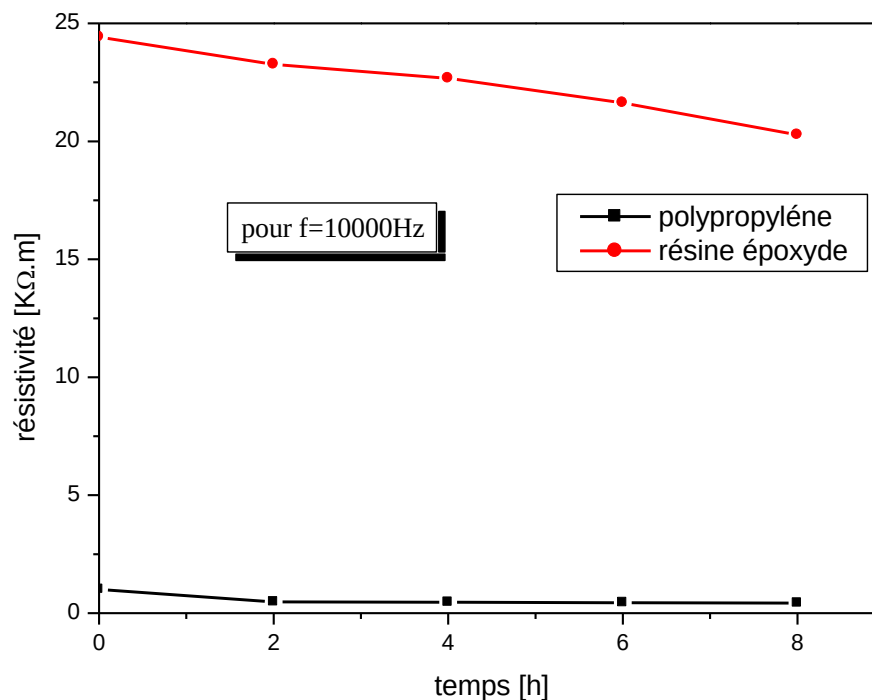


Figure IV.3.6. Variation de la résistivité en fonction du temps $f=10000\text{Hz}$

➤ La permittivité

Pour le polypropylène

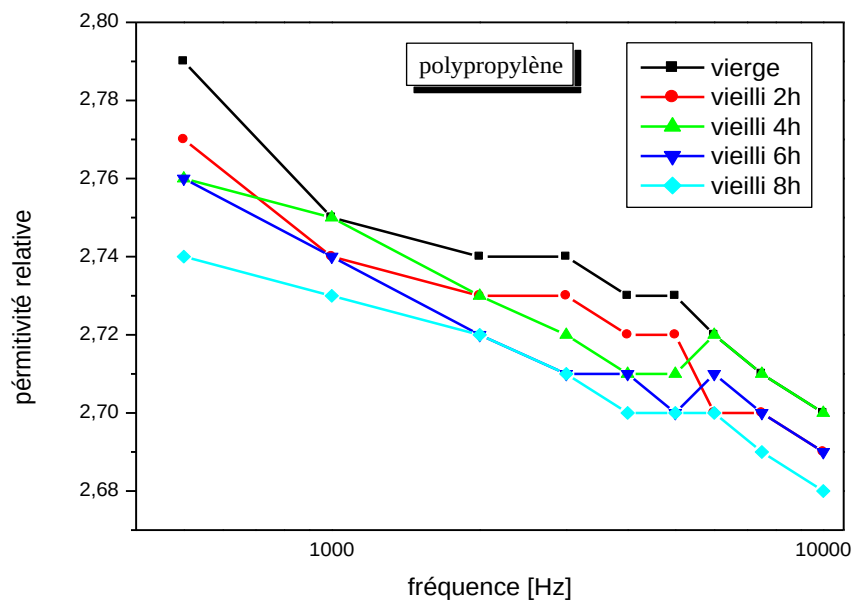


Figure IV.3.7. Variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence

• Pour la résine époxyde

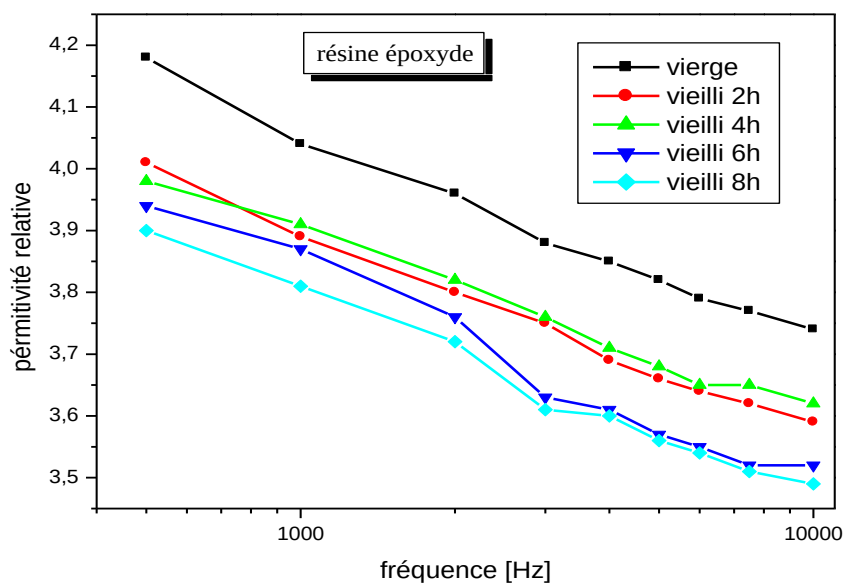


Figure IV.3.8. Variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence

Pour $f=500\text{Hz}$

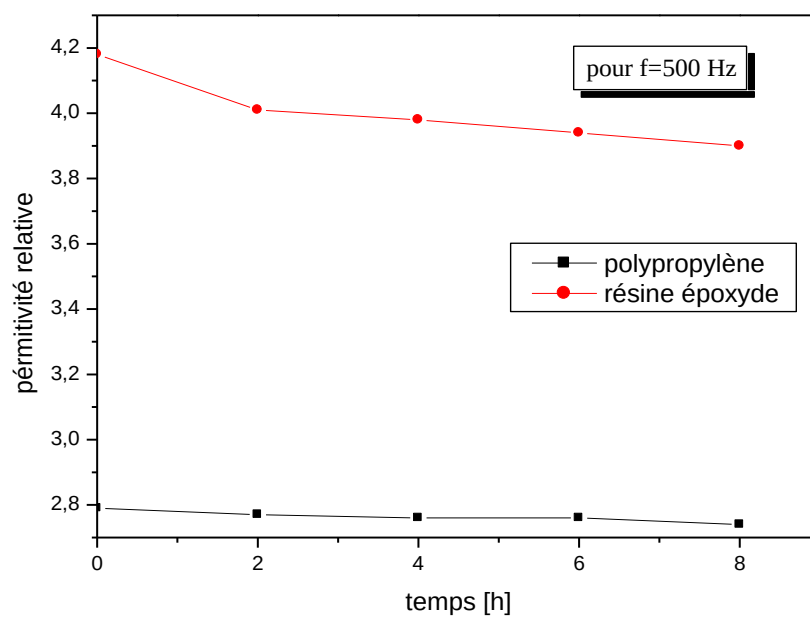


Figure IV.3.9.variation de la permittivité relative en fonction du temps $f=500\text{Hz}$

Pour $f=2000\text{Hz}$

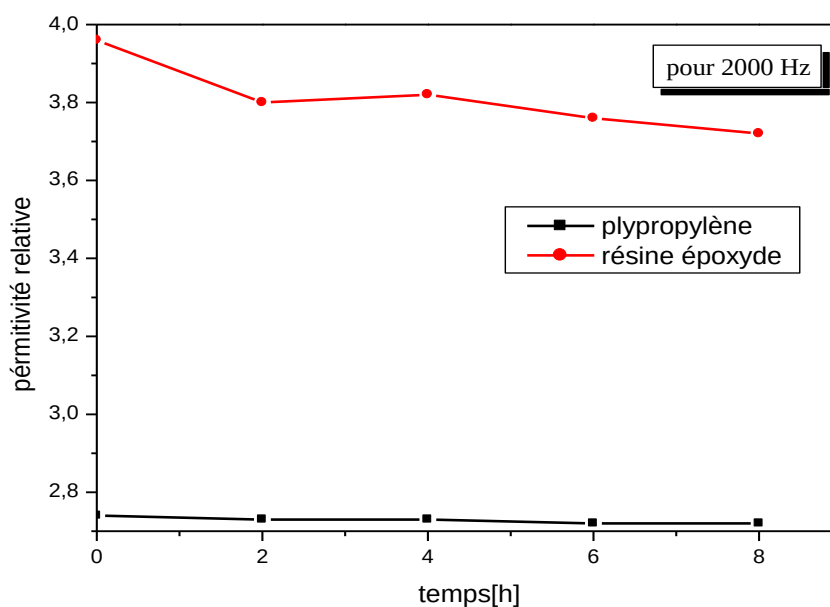


Figure IV.3.10.variation de la permittivité relative en fonction du temps $f=2000\text{Hz}$

Pour $f=4000\text{Hz}$

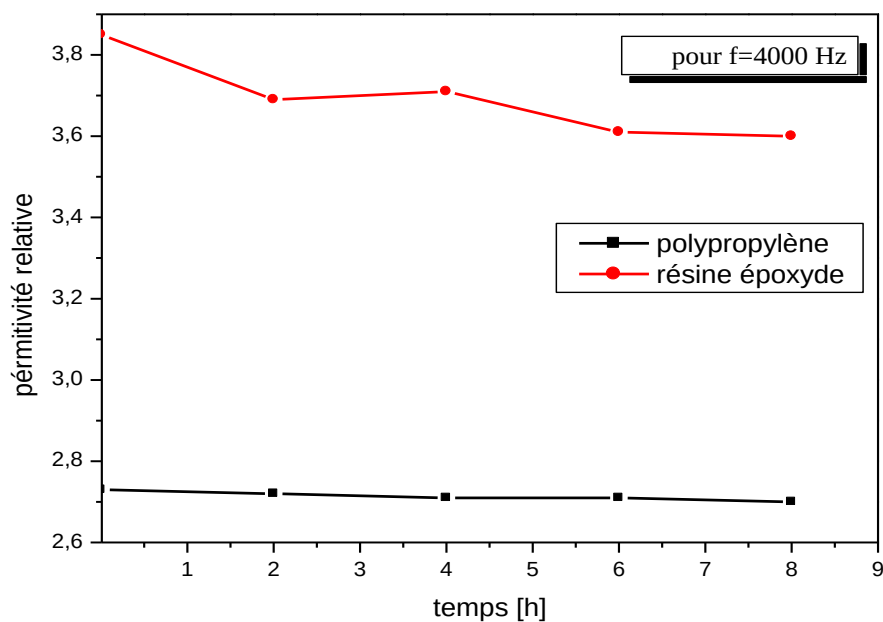


Figure IV.3.11. Variation de la permittivité en fonction du temps $f=4000\text{Hz}$

Pour $f=10000\text{Hz}$

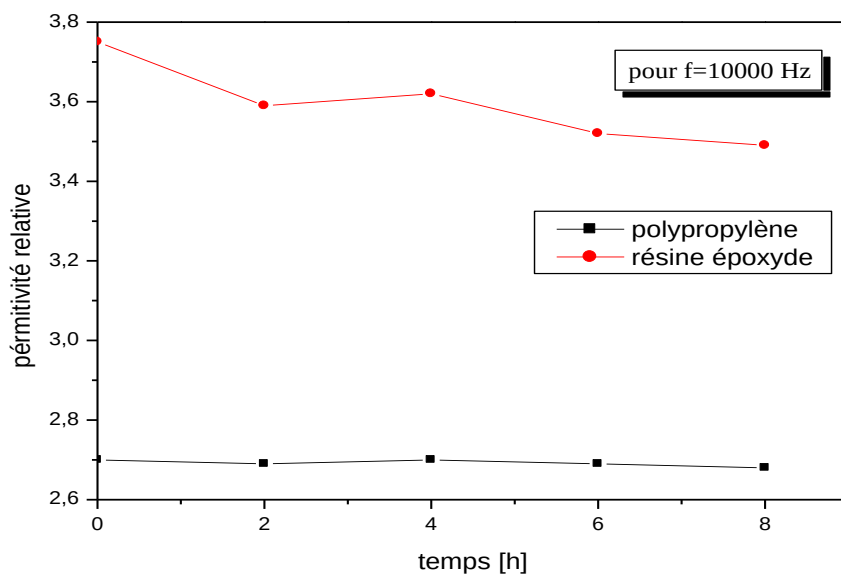


Figure IV.3.12. Variation de la permittivité relative en fonction du temps $f=10000\text{Hz}$

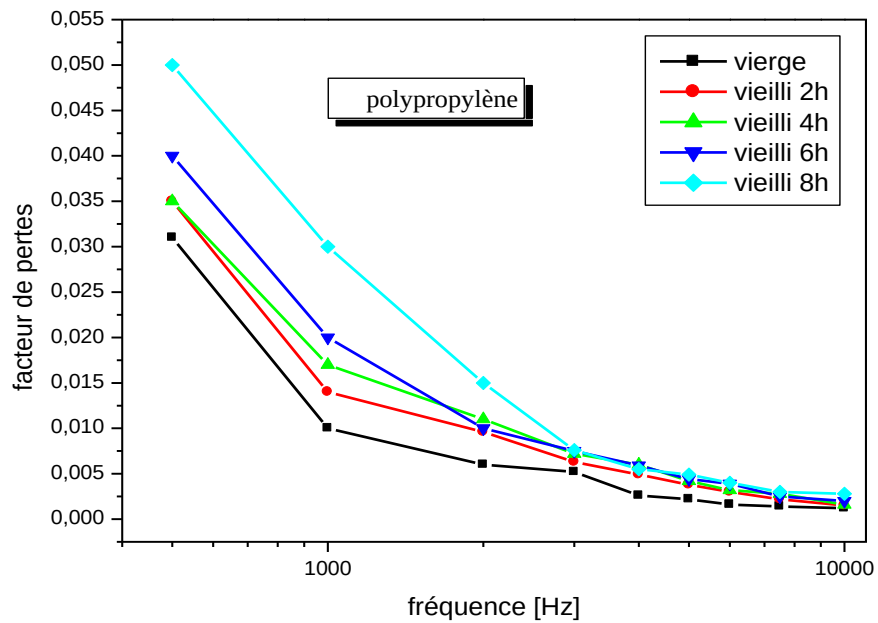
➤ **Facteur de pertes**• **Pour le polypropylène**

Figure IV.3.13. Variation du facteur de pertes en fonction de la fréquence

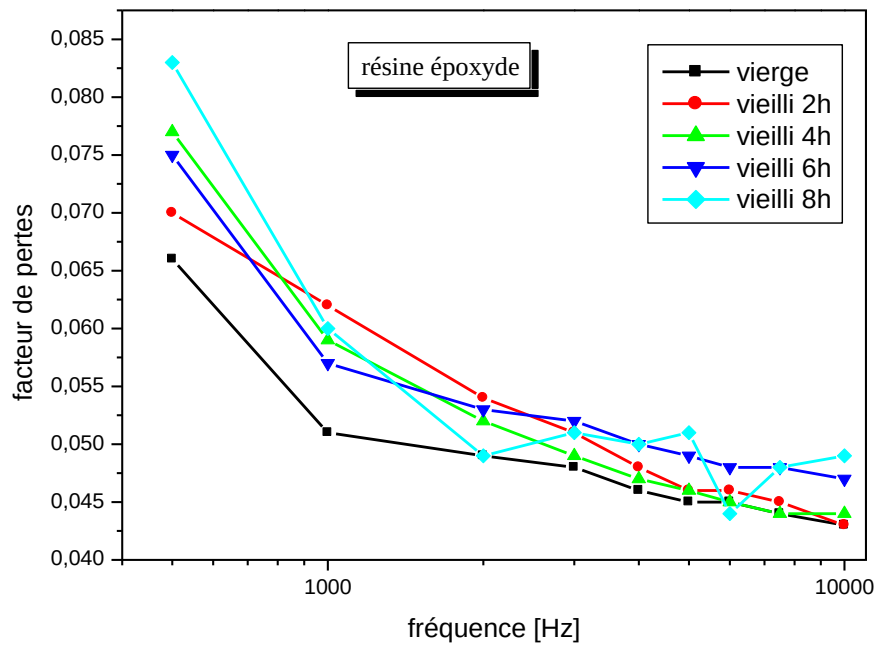
• **Pour la résine époxyde**

Figure IV.3.14. variation du facteur de pertes en fonction de la fréquence

Pour $f=500\text{Hz}$

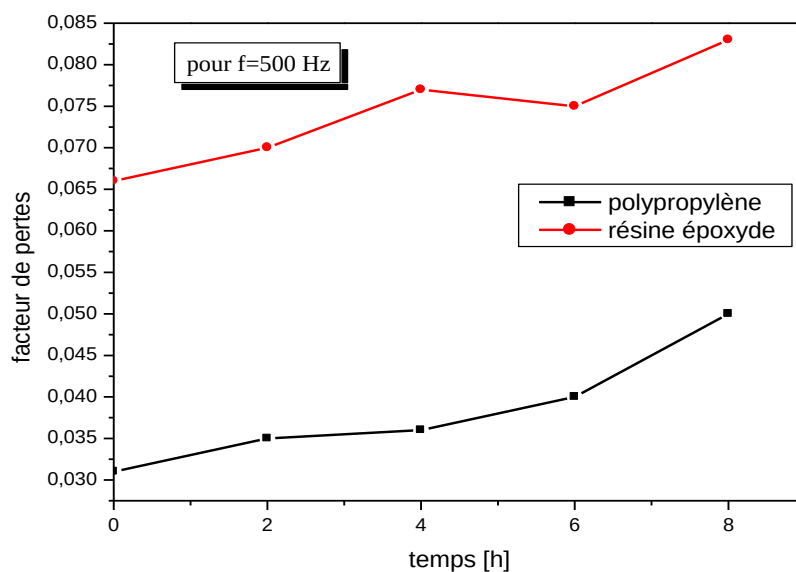


Figure IV.3.15. variation du facteur de perte en fonction du temps $f=500\text{Hz}$

Pour $f=2000\text{Hz}$

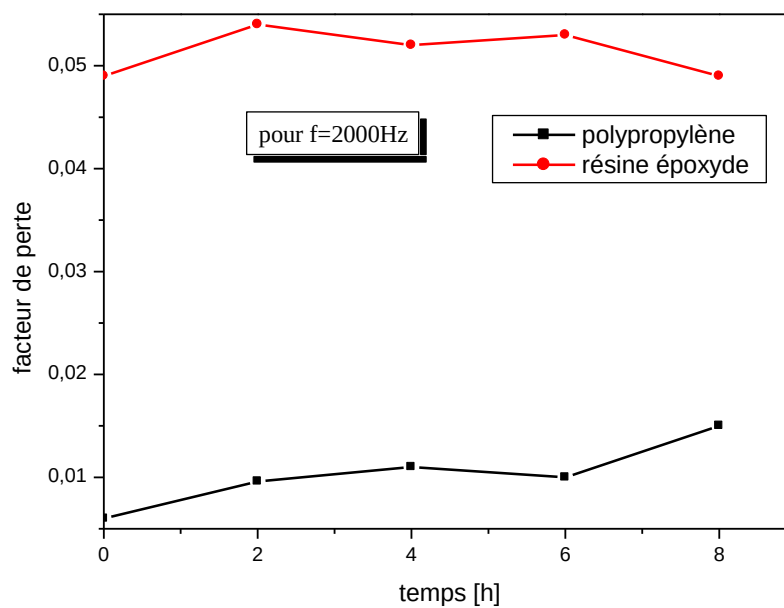


Figure IV.3.16. Variation du facteur de pertes en fonction du temps $f=2000\text{Hz}$

Pour $f=4000\text{Hz}$

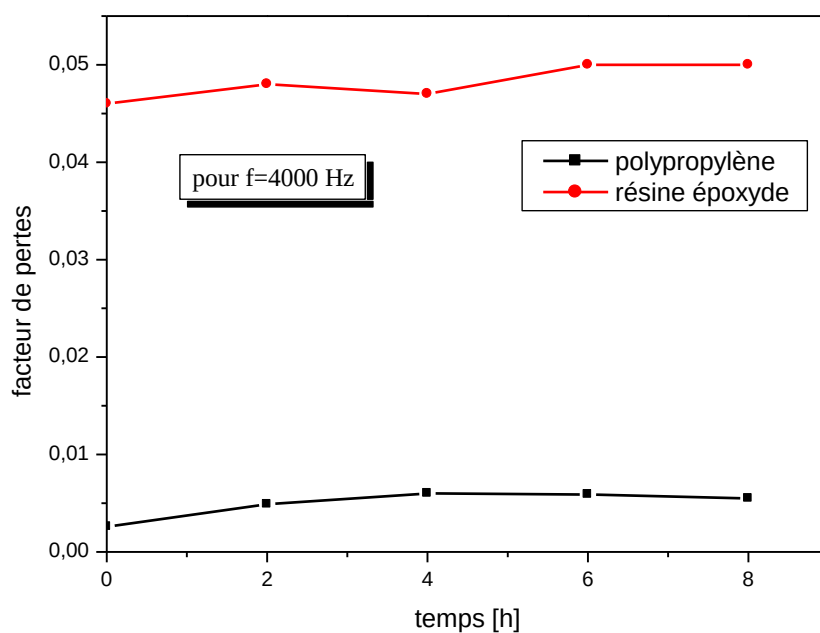


Figure. IV.3.17. Variation du facteur de pertes en fonction du temps $f=4000\text{Hz}$

Pour $f=10000\text{Hz}$

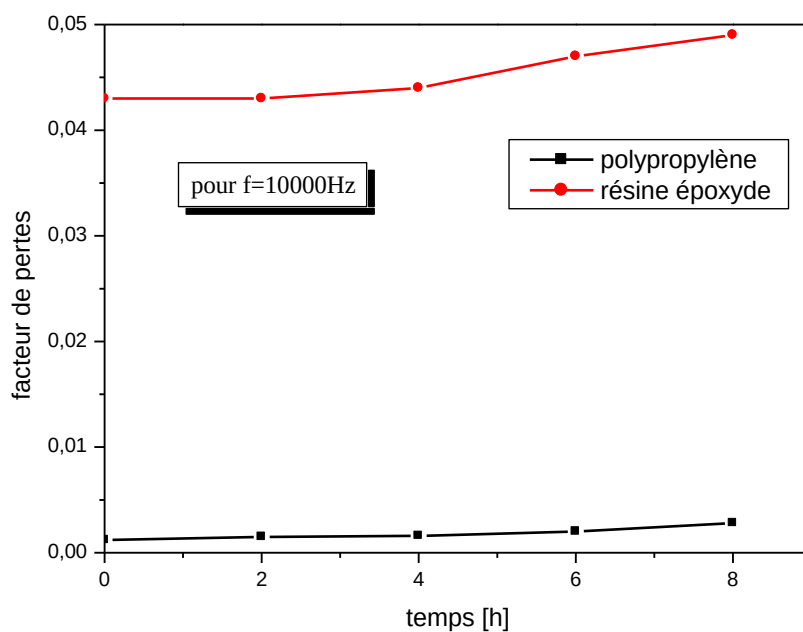


Figure IV.3.18. Variation du facteur de pertes en fonction du temps $f=10000\text{Hz}$

- **Courant de décharge**

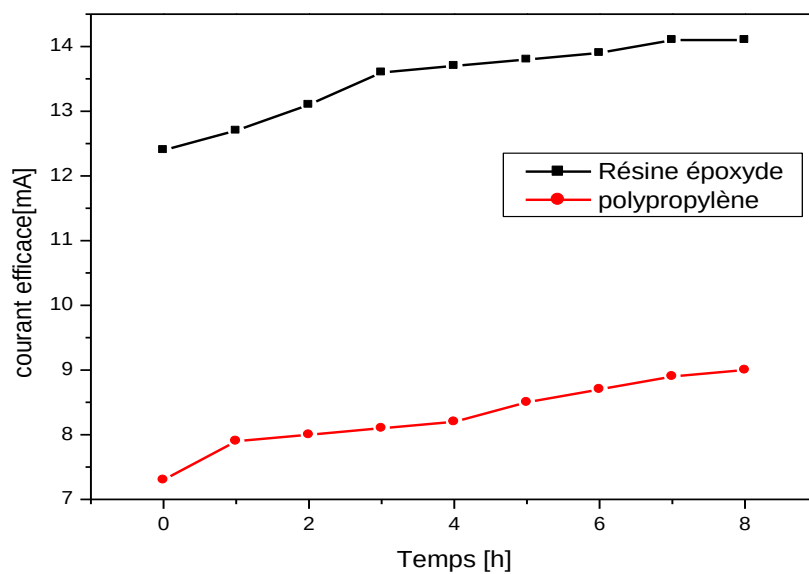


Figure IV.3.19.variation du courant de décharge en fonction du temps

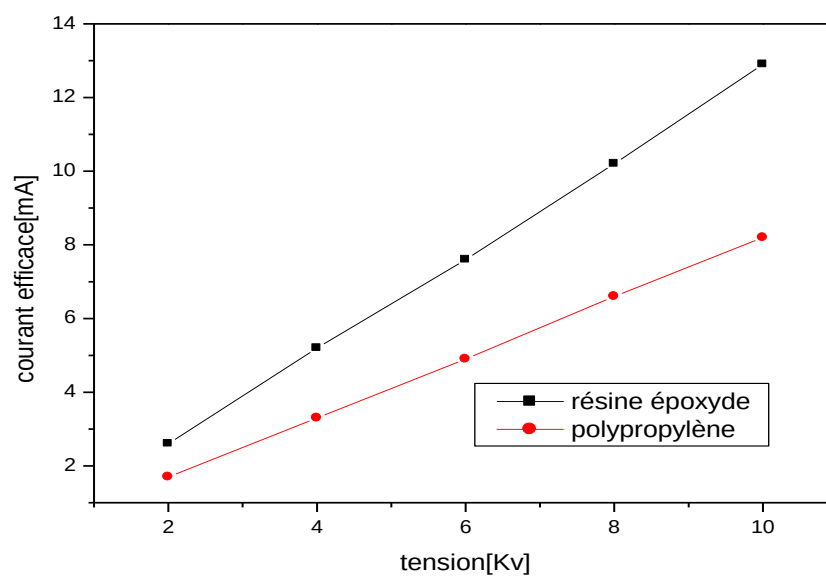


Figure IV.3.20.variation du courant de décharge en fonction de la tension

❖ Interprétation des résultats

Les précédentes figures montrent l'influence de la fréquence et du temps d'application de la tension la durée de la tension appliquée (temps de vieillissement) sur les paramètres diélectriques (résistivité, permittivité relative et facteur de pertes) des deux matériaux étudiés (résine époxyde et polypropylène). Les échantillons étaient vieillis sous un champ électrique de 3.33kV/mm.

Influence de la fréquence sur la permittivité relative et le facteur de dissipation :

Les figures (IV.3.7), (IV.3.8), (IV.3.13) et (IV.3.14) montrent que les valeurs de la permittivité réelle, calculée à partir de la mesure de C celle calculée (ϵ_r') et la permittivité imaginaire (ϵ_r'') qui représente physiquement le facteur de dissipation ($\tan\delta$), diminuent avec l'augmentation de la fréquence.

Cette diminution pourrait s'expliquer par le fait qu'en faibles fréquences les dipôles permanents suivent facilement la variation du champ électrique. Le facteur de dissipation ϵ_r'' donc les pertes, sont faibles. Avec l'augmentation de la fréquence le facteur de dissipation ϵ_r'' augmente jusqu'à une valeur maximum. Puis il marquera une diminution aussi aux fréquences élevées. En hautes fréquences les dipôles permanents n'arrivent plus à suivre le changement de polarité, ils restent immobiles, les pertes sont faibles.

En fréquences intermédiaires les dipôles suivent aussi difficilement la variation du champ électrique appliqué et la polarisation se fait avec des pertes d'énergie.

Les permittivités, réel ϵ_r' et imaginaire ϵ_r'' , décroissent dans la plage de fréquences 500 à 10^5 Hz, le même résultat est trouvé par NOTINGHER dans son étude [19].

Ceci peut être interprété selon cette relation :

$$\tan\delta = \frac{1}{C\omega R}$$

Avec, $\omega = 2\pi f$.

Quant f augmente $\tan\delta$ diminue.

Influence de fréquences sur la résistivité :

Les figures (IV.3.2) et (IV.3.1) montrent que l'augmentation de la fréquence induit une diminution des valeurs de la résistivité et ce, pour les deux isolants.

Donc la résistivité est aussi inversement proportionnelle à la fréquence.

Influence du temps de vieillissement sur la permittivité et la résistivité

Les figures (IV.3.3), (IV.3.4), (IV.3.5), (IV.3.6), (IV.3.9), (IV.3.10), (IV.3.11) et (IV.3.12), montrent que pour une fréquence donnée les valeurs de la permittivité et la résistivité diminuent avec l'augmentation de la durée de l'application de la contrainte électrique et ce, pour les deux isolants.

Le vieillissement électrique est engendré par la mobilité moléculaire de la partie époxy du composite, ce vieillissement entraîne la rupture des liaisons covalentes et liaisons simples, ainsi la structure chimique initiale du matériau est modifiée. Ces modifications influent directement sur les caractéristiques thermiques et mécaniques du composites, il provoque une diminution de la densité de réticulation et diminution de la rigidité mécanique de la résine époxyde (état caoutchouteux)

Les éléments formés par ce type de vieillissement sont des groupes oxygénés :

Ester($O - C = O$), ether($C - O - C$).[15]

Ce changement dans la structure chimique de la résine, évite la fissuration de l'échantillon ; contrairement aux autres polymères, notamment le polypropylène.

Influence du temps de vieillissement sur le facteur de dissipation

Le vieillissement électrique de ces deux isolants entraîne une augmentation du facteur de pertes qui est plus marqué pour la résine, ceci est dû à la présence de vacuoles d'air qui se sont formé aux cours de son élaboration au laboratoire.

Influence du niveau et de la durée d'application de la contrainte électrique sur le courant de décharge

Pour les courants de décharge, et d'après la figure (IV.3.19) et (IV.3.20) nous remarquons que l'amplitude du courant efficace augmente proportionnellement avec la tension appliquée et temps d'application de cette contrainte pour les deux isolants.

Les amplitudes sont plus significatives pour la résine époxyde, parce que la résine utilisée est synthétique, élaborée au laboratoire, donc elle n'est pas vraiment pure (présence de vacuoles d'air dans l'échantillon).

Ce courant efficace représente la quantité d'énergie active à laquelle est soumis l'isolant. Il correspond aussi à la valeur d'un courant continu qui produirait un échauffement dans une résistance, cette valeur se calcul par :

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt}$$

Où : I_{eff} : courant efficace [mA]

T : période [s]

i : courant instantané [mA].

Conclusion

Dans ce chapitre et d'après cette étude, nous avons montré que la fréquence et la durée de vieillissement sont des paramètres qui influencent les paramètres diélectriques de la résine époxyde et du polypropylène.

Une altération significative de la résistivité, de la permittivité et une augmentation du facteur de dissipation des deux matériaux (résine époxyde et polypropylène) en fonction de la fréquence est mise en évidence dans le présent travail.

Nous avons remarqué l'augmentation du facteur de dissipation et la diminution de la résistivité volumique et la permittivité relative et ce, en fonction de la durée de l'application de la contrainte électrique.

La tension d'alimentation et la durée de vieillissement influent sur le courant de décharges.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail accompli dans le cadre de ce mémoire avait comme objectif l'étude expérimentale de l'influence du vieillissement électrique et de la fréquence, sur les paramètres diélectriques de deux polymères isolants (résine époxyde et polypropylène). Ceci nous a permis de comprendre d'une manière qualitative ses effets sur les paramètres des isolants utilisés dans les dispositifs à haute tension.

L'évolution des propriétés diélectriques a été suivie lors du vieillissement sous contrainte électrique.

Avec l'augmentation de la fréquence nous avons remarqué une diminution continue dans les valeurs de la résistivité et de la permittivité, pour la résine époxy ainsi que pour le polypropylène.

En augmentant la durée d'exposition des deux polymères à la contrainte électrique, nous avons observé une décroissance progressive dans les valeurs de la résistivité et la permittivité relative, et une augmentation du facteur de dissipation. Ce qui se traduit par une diminution de leur capacité et leur résistance un affaiblissement de leurs capacités et leurs résistances.

Dans notre travail nous avons étudié aussi les courants de décharges, qui apparaissent se produisent dans un matériau thermodurcissable à base de résine époxyde, et un matériau thermoplastique le polypropylène.

Les résultats ont montré que la quantité d'énergie dissipée, représentée par l'amplitude du courant efficace mesuré, augmente avec l'augmentation de la fréquence tout en faisant augmenter la tension et sa durée d'application.

Cette augmentation est plus remarquable pour la résine époxy que pour le polypropylène, ce qui est dû aux défauts de la synthèse de la résine époxy.

Bibliographie

- [1] N. Ferhaoui, L. Dirami : « Etude de l'hydrophobicité d'un matériau diélectrique soumis à une décharge électrique ». Mémoire de fin d'études en électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, promotion 2012.
- [2] N. Chemloul, K. Kecir : « Contribution à l'étude de l'effet des décharges électriques sur la surface d'un solide isolant sous tension alternative 50 Hz ». Mémoire de fin d'études en électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, promotion 2007/2008.
- [3] M. Moudoud: « Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants ». Thèse de doctorat 2010.
- [4] D. Tilikette, S. Ismigaoua, S. Mechera : « Etude du PMMA sous décharges électriques ». Mémoire de fin d'études en électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, promotion 2010.
- [5] M. A. Handala : « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50Hz ». Thèse de doctorat en électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2007.
- [6] A. Hamadi, D. Reghal : « Etude de l'influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique dans le polystyrène (PS) et le PMMA ». Mémoire de fin d'études en électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, promotion 2010.
- [7] N. Amaouz : « Synthèse et caractérisation des matériaux diélectriques à structure perovskite complexe ». Thèse doctorat en chimie de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [8] P. FILHOL: «Techniques d'ingénieur» E 1922, 2004.
- [9] D. Saad : « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques ». Thèse magistère en électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [10] R. Fourier : « Les isolants en électrotechnique essais et application industrielle »
- [11] E. BELHITECHE : « Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis à une décharge électrique de surface » mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [12] « Dermatoses professionnelles aux résines époxy » INRS, documents pour le médecin du travail N°91, 3^{em} trimestre 2002.
- [13] B. Kechaou : « Corrélation entre propriétés diélectriques et mécaniques de composites à matrice époxyde, renforcée par des fibres de verres ». Thèse doctorat de l'école centrale de Lyon et de la faculté des sciences de SFAX, 2003.

[14] E. Brun : « Vieillissement hygrothermique d'un composite résine époxyde silice et impact sur sa rigidité diélectrique ». Thèse doctorat de l'université Josef Fourier de Grenoble, 2009.

[15] P.V.Notingher, M.Plopeanu, S.Grigorescu, C.Stancu: « The influence of water trees on permittivity and loss factor of medium voltage cables polyethylene insulation». International conference on Solid dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.

[16] M. LE.MAGDA : «Influence du vieillissement sur le comportement des matériaux et les interfaces des systèmes mécatroniques ». Thèse doctorat de l'université de Rouen, 2011.

Résumé

Le travail accompli dans le cadre de ce mémoire avait comme objectif l'étude expérimentale de l'influence du vieillissement électrique et de la fréquence, sur les paramètres diélectriques de deux polymères isolants (résine époxyde et polypropylène). Ceci nous a permis de comprendre d'une manière qualitative ses effets sur les paramètres des isolants utilisés dans les dispositifs à haute tension.

L'évolution des propriétés diélectriques a été suivie lors du vieillissement sous contrainte électrique.

Avec l'augmentation de la fréquence nous avons remarqué une diminution continue dans les valeurs de la résistivité et de la permittivité, pour la résine époxy ainsi que pour le polypropylène.

En augmentant la durée d'exposition des deux polymères à la contrainte électrique, nous avons observé une décroissance progressive dans les valeurs de la résistivité et la permittivité relative, et une augmentation du facteur de dissipation. Ce qui se traduit par une diminution de leur capacité et leur résistance un affaiblissement de leurs capacités et leurs résistances.

Dans notre travail nous avons étudié aussi les courants de décharges, qui apparaissent se produisent dans un matériau thermodurcissable à base de résine époxyde, et un matériau thermoplastique le polypropylène.

Les résultats ont montré que la quantité d'énergie dissipée, représentée par l'amplitude du courant efficace mesuré, augmente avec l'augmentation de la fréquence tout en faisant augmenter la tension et sa durée d'application.

Cette augmentation est plus remarquable pour la résine époxy que pour le polypropylène, ce qui est dû aux défauts de la synthèse de la résine époxy.