



Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire

Présenté par

RETIEB Sonia et HIRECHE Karim

Pour obtention du

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : **Electrotechnique Industrielle**

Thème

Effet de stockage et d'irradiation gamma sur les propriétés diélectriques du polyéthylène utilisé dans l'isolation des câbles électriques.

Mémoire soutenu publiquement le 13/09/2018 devant le jury composé de :

Mr. Mustapha MOUDOUD
MCA, U.M.M.T.O, Président.

Mr. Djaffar BOUGUEDAD
MCA, U.M.M.T.O, Encadreur.

Mme BOUTOUCHENT-GUERFI Nabila
Chercheur à CRTSE d'Alger, Co-Encadreur.

Mr. AZZOUZ MIOUAT
MAA, U.M.M.T.O, Examineur.

Mr. Abdellah HEDIR
MAB, U.M.M.T.O, Examineur.

Promotion 2017/2018

Remerciements

D'abords nous remercions Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail.

On ne peut envisager ces remerciements, sans exprimer notre gratitude à notre directeur de projet Monsieur **BOUGUEDAD Djaffar** pour le formidable encadrement qu'il nous a accordé tout au long de ce travail. On ne peut que le remercier, non seulement pour ses compétences scientifiques, mais aussi pour ses qualités humaines et pour la confiance qu'il nous a toujours témoigné.

Nos très vifs remerciements vont à l'égard de Madame **BOUTOUCHENT - GUERFI Nabila** d'avoir co-encadré ce travail, de ses orientations, son écoute et ses encouragements. Nous avons grandement apprécié ses conseils judicieux, son attention et les détails de ses corrections de ce mémoire.

On tient à remercier le Directeur du Centre de Recherches en Technologie des Semi-Conducteurs pour l'Energétique (CRTSE) d'Alger, de nous avoir accueillis dans le cadre de ce mémoire pour effectuer une partie de nos essais, sans oublier Monsieur **Mohammed Issam ZIANE** qui a sacrifié son temps pour effectuer la caractérisation morphologique du matériau objet de notre étude.

Nous remercions sincèrement Monsieur **BELABAS Ferhat**, chef de service du laboratoire de physique à l'entreprise Electro-Industrie d'Azazga pour son accueil dans son laboratoire, sa disponibilité à réaliser une partie de nos essais, ses échanges fructueux ainsi que ses conseils précieux.

Nous remercions chaleureusement Monsieur **Mahdi IDRI** et **Hamid FENA** respectivement, chef de service contrôle et qualité et cadre technique à l'entreprise CABEL de Gué de Constantine de nous avoir accueilli au sein du laboratoire contrôle et qualité, surtout pour leur confiance qu'ils nous ont accordé ainsi que pour leur contribution dans le bon déroulement de nos travaux.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant la charge de juger ce travail.

Un grand merci à nos très chères familles qui nous ont toujours soutenu et encouragé de loin, pour leurs prières et la confiance qu'ils ont en nous.

Nos remerciements vont également à tous nos amis de la faculté du Génie électrique et informatique de l'UMMTO.

Dédicaces

À mes très chers parents Hocine et Yamina qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.

À mon frère Idir et mes sœurs Nassima, Sabrina, Kahina et Dehbia.

À Miaguila Ss.

Sonia

Dédicaces

À Tous ceux qui me sont chères

Karim

Sommaire

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

Chapitre I : Généralités sur l'isolation des câbles électriques

Les câbles électriques	4
I.1.Les câbles pour la haute tension.....	4
I.2.Les câbles pour la moyenne tension.....	4
I.3.Les câbles pour la basse tension.....	5
II.Structure des câbles électriques.....	5
III.Propriétés diélectriques des isolants solides	7
III.1.La Rigidité diélectriques.....	7
III.2.La Résistivité	8
III.2.1.La Résistivité transversale	8
III.2.2.La résistivité superficielle	9
III.3.La permittivité relative	9
III.4.Les pertes diélectriques	10
IV.Les contraintes rencontrées par la fonction isolation au cours de son application	11
IV.1.Le vieillissement.....	11
IV.2.Le phénomène d'arborescence	12
IV.3.Les contraintes électriques	13
IV.4.Les contraintes thermiques	13
IV.5.Les contraintes mécaniques.....	14
IV.6.Les contraintes climatiques	14
IV.7.Les contraintes radiatives	14
V.Les différents mécanismes de claquage.....	15
V.1.Claquage thermique	15
V.2.Claquage d'origine électronique.....	15
V.2.1.Le claquage intrinsèque	15
V.2.2.Le claquage associé au volume	16
V.2.3.Le claquage par avalanche	16
V.3.Claquage électromécanique	16

Sommaire

Chapitre 2 : Généralités sur les polymères et le PE

I. Les matériaux polymères	17
I.1. Un brin d'histoire	17
I.2. Définition du polymère	18
II. La Polymérisation	18
II.1. Voies de polymérisation	18
II.1.1. La polycondensation	18
II.1.2. La polymérisation en chaîne.....	19
III. Les additifs et les charges	19
III.1. Les additifs	19
III.2. Les charges	20
IV. Types de polymères.....	20
IV.1. Les thermoplastiques	20
IV.2. Les thermodurcissables	21
IV.3. Les élastomères	21
V. Domaines d'utilisation des polymères	21
VI. Le polyéthylène	22
VI.1. Types de Polyéthylène.....	23
VI.1.1. Polyéthylène à basse densité (PE-BD).....	23
VI.1.2. Polyéthylène à haute densité PE-HD	24
VI.1.3. Polyéthylène réticulé chimiquement.....	25
VII. Principaux avantages et inconvénients du polyéthylène	26
VIII. Les additifs du PE	27
IX. Conditions de stockage du PE.....	27

Sommaire

Chapitre 3 : Techniques expérimentales

I. Préparation des échantillons	29
I.1. Matériau utilisé.....	29
I.2. Mode opératoire	29
I.3. Formes et dimensions des éprouvettes	30
II. Dispositifs expérimentaux.....	31
II.1. Conditionnement des éprouvettes	31
II.2. Irradiation des éprouvettes	32
III. Méthodes de caractérisation	33
III.1. Caractérisation physique.....	33
III.1.1. Masse volumique	33
III.1.2. Absorption d'eau.....	33
III.2. Caractérisation morphologique par le microscope optique	35
III.3. Caractérisation mécanique.....	36
III.3.1. Mesure des dimensions des éprouvettes	36
III.3.2. La dureté	37
III.3.3. Essais de traction.....	37
III.4. Propriétés diélectriques.....	39
III.4.1. Mesure du facteur de pertes diélectriques et de la permittivité relative.....	39
III.4.2. Mesure de la résistivité transversale	41
III.4.3. Mesure de la rigidité diélectrique.....	43

Chapitre 4 : Résultats et discussion

I. Effet de stockage	44
I.1. La densité	44
I.2. Essai d'absorption d'eau	44
I.3. Aspect morphologique	45
I.3.1. Aspect morphologique du PE/2015	45

Sommaire

I.3.2. Aspect morphologique de PE/2017	46
I.4.Caractérisation mécanique	47
I.4.1. Allongement à la rupture	48
I.4.2. Résistance à la rupture	48
I.4.3. La dureté Shore D.....	48
I.5.Caractérisation électrique	49
I.5.1. Facteur de perte diélectrique.....	49
I.5.2.Permittivité relative	50
I.5.3. Résistivité transversale	51
I.5.4. Rigidité diélectrique.....	52
II.Effet des bombardements gamma	52
II.1. Facteur de pertes diélectriques.....	53
II.2. Permittivité relative.....	55
II.3. Résistivité transversale.....	56
II.4. Rigidité diélectrique.....	57
Conclusion générale.....	58
Perspectives	
Bibliographie	
Annexes	

Liste des figures

Figure 1 : Modèle de câble électrique moyenne tension supérieure à 6 kV

Figure 2 : Constitution d'un câble électrique

Figure 3 : Diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait

Figure 4 : Phénomène d'arborescence sur un isolant solide

Figure 5 : Structure d'un polymère

Figure 6 : Schéma général de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques

Figure 7 : Répartition des matières plastiques selon les domaines

Figure.8 : Granulés du polyéthylène PE

Figure. 9 : Vue de la presse utilisée pour la fabrication des plaques de PE

Figure.10 : Eprouvette en forme d'haltère pour les essais mécaniques.

Figure.11: Eprouvettes en forme de disque et d'haltère pour les différents essais.

Figure.12 : Dessiccateur

Figure.13 : Schéma de l'irradiateur pilote du CRNA.

Figure.14 : Balance utilisée pour la mesure du taux d'absorption d'eau.

Figure.15 : Dispositif adopté pour l'essai d'absorption d'eau.

Figure.16 : Photographie du microscope optique utilisé.

Figure.17 : Palmer à cadran.

Figure.18 : Duromètre Shore D.

Figure.19: Machine à traction de marque SCHENCK TREBEL.

Figure.20 : Pont de Schering de type TETEX 2830/2831.

Figure 21 : Schéma électrique du pont de Schering de type TETEX 2830/2831

Figure. 22 : Dispositif de test diélectrique pour isolants solide.

Liste des figures

Figure. 23 : Téraohmètre

Figure.24 : Branchement type pour la mesure de la résistance transversale.

Figure.25 : Photographie du Spintermètre utilisé.

Figure 26.La morphologie de la résine PE/2015 avant et après l'immersion dans l'eau ($\times 400$ Agrandissement).

Figure 27.La morphologie de la résine PE/2017 avant et après l'immersion dans l'eau ($\times 400$ Agrandissement).

Figure 28.La morphologie de la résine PE/2015 et PE/2017 après l'immersion dans l'eau ($\times 400$ Agrandissement).

Figure 29.Evolution le facteur de pertes diélectriques du PE/2017 et PE/2015 en fonction de la température.

Figure 30.Evolution la permittivité relative du PE/2017 et PE/2015 en fonction de la température.

Figure 31.Evolution de facteur de pertes diélectriques du PE/ 2017 bombardé de 0, 25 et 50K Gy en fonction de la température

Figure 32. Evolution de facteur de pertes diélectriques du PE/ 2015 bombardé de 0, 25 et 50 K Gy en fonction de la température.

Figure 33. Evolution de la permittivité relative en fonction de la température du PE/2015 (a) et PE/2017 (b) irradié de 0, 25 et 50 K Gy.

Tableau 1. Températures de fonctionnement et son seuil admis pour certains polymères isolants.

Tableau 2. La densité de la résine PE/2015 et PE/2017.

Tableau 3. Le taux d'absorption d'eau de la résine PE/2015 et PE/2017.

Tableau 4. : Les résultats mécaniques du PE/2017, PE/2015 et de la fiche technique

Tableau 5. La dureté Shore D de PE/20145 et PE/2017.

Le tableau 6. Illustre l'évolution de la résistivité transversale en fonction de la durée de stockage.

Le tableau 7, montre les résultats pour la rigidité diélectrique en fonction de la durée de stockage.

Tableau 8.L'évolution de la résistivité transversale en fonction de bombardement gamma.

Tableau 9. La rigidité diélectrique du PE/2017 et PE/2015 irradié de 0, 25 et 50 KGy.

Introduction générale

De nos jours, les diélectriques organiques autrement dit polymères synthétiques sont reconnus pour être de bons isolants électriques, jouissant d'importantes considérations auprès des industriels pour la distribution d'énergie électrique.

En effet, dans le domaine de l'électricité, les matériaux isolants subissent des transformations physico-chimiques, thermiques et morphologiques. Ils subissent ainsi des contraintes multiples lors de leur exploitation, poussant la communauté scientifique à entreprendre des travaux de recherches en vue d'étudier les propriétés de ces derniers et de mieux comprendre les défaillances afin d'améliorer leur fiabilité et leurs paramètres de mise en œuvre, du fait que la durée de vie d'un matériel est liée à celle de son isolation qui est estimée à 30 ans [1].

Pour certains matériels (câbles, transformateurs, moteurs), les contraintes thermiques sont des composantes qui dictent la conception. Les contraintes thermiques sont dues à :

- L'échauffement des conducteurs par effet Joule et par courants de Foucault (câbles isolés) ;
- Pertes magnétiques (transformateurs) ;
- Pertes diélectriques par conduction électrique.

Lors de l'apparition de ces contraintes, les matériaux qui constituent ces matériels doivent supporter les températures de fonctionnement et assurer l'isolation du système [2].

La température influe sur leurs caractéristiques, en faisant évoluer leurs propriétés qui sont :

- Pertes de masse ;
- Variation dimensionnelle ;
- Diminution des caractéristiques mécaniques ;
- Augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité électrique.

Parmi ces matériaux on retrouve le polyéthylène (PE), il est utilisé dans l'isolation des câbles électriques en raison de son faible coût et d'excellentes propriétés diélectriques. Cependant, le PE est susceptible de perdre ses particularités diélectriques et physico-chimiques si les conditions de stockage ne sont pas respectées. Donc un stockage inapproprié peut entraîner une dégradation provoquant une odeur nauséabonde et un changement de couleur, induisant la dégradation du PE.

Toutefois, l'exposition de ce polymère aux rayonnements solaires, aux intempéries (humidité relative résultante de forte pluie) et à la pollution (composants chimiques) influent notamment sur les propriétés de ce dernier [2]. Dans ce cas il est préconisé d'étudier l'influence de ces conditions.

C'est dans cet ordre d'idée que ce travail va être mené. Il a pour objectif d'étudier *l'effet du stockage et l'irradiation gamma sur les propriétés diélectriques du polyéthylène utilisé dans l'isolation des câbles électriques* qui nous a été proposée. Il est inscrit dans le cadre d'un projet de recherche programmé par le Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Energétique (CRTSE) en collaboration avec l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Pour réaliser ce travail, une résine de PE grade câblerie est utilisée pour étudier son comportement vis-à-vis des conditions du stockage ainsi qu'à l'exposition aux rayons gamma. Notre recherche est réalisée en trois parties :

- La première partie est consacrée à la caractérisation préliminaire de la résine sur deux dates de productions : 2015 et 2017.
- La seconde partie est consacrée à l'étude de l'effet du stockage sur les propriétés diélectriques de ces deux résines (PE/2017 et PE/2015)
- La dernière partie est consacrée à l'étude de l'effet du bombardement par les rayons gamma de 25 à 50 KGy.

Dans le but d'évaluer leur niveau de dégradation, des échantillons du matériau ont d'abord été caractérisés en termes de :

- Propriétés physiques (masse volumique et absorption d'eau) ;
- Propriétés diélectriques (facteur de pertes diélectriques, permittivité, résistivité transversale et rigidité diélectrique) ;
- Propriétés mécaniques (essai de traction et dureté Shore D) ;

Le présent travail comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre comprend des généralités sur les câbles électriques.
- Le second chapitre est une introduction aux isolants solides notamment les polymères en décrivant leur domaine d'utilisation ainsi que les différents procédés, les contraintes auxquels sont soumis ces polymères isolants au cours de leur utilisation, poursuivie par une présentation du matériau utilisé (PE).

- Le troisième chapitre regroupe les techniques d'analyses et le protocole expérimental.
- Le dernier chapitre est consacré aux résultats expérimentaux ainsi que leurs interprétations.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

**Généralités sur l'isolation
des câbles électriques**

Les câbles électriques sont principalement employés pour le transport et la distribution d'énergie électrique. Compte tenu de l'extension rapide de l'urbanisation et pour des raisons de sécurité et d'esthétique, l'adaptation d'un nouveau matériau reste toujours en question. Les caractéristiques de l'isolant du câble doivent être adaptées aux contraintes auxquelles le câble sera soumis.

I. Les câbles électriques

Au début des années 1960, les câbles à isolation synthétique extrudée ont commencé à concurrencer les câbles à isolation avec du papier imprégné à cause des nombreux avantages indéniables qu'ils présentent. Nous pouvons retenir les plus importants qui sont :

- ✓ Leur légèreté qui permet une pose plus facile.
- ✓ La suppression des problèmes de migration des matières d'imprégnation.
- ✓ Une fiabilité équivalente à celle d'une technologie à papier imprégné.

Dans les réseaux de transport à haute et moyenne tension les lignes souterraines sont du point de vue de l'exploitation moins avantageuse que les lignes aériennes, cependant l'utilisation des lignes souterraines est plus préconisée dans les zones urbanisées pour des raisons d'ordre technique, stratégique et environnementale.

Le transport de l'électricité se fait grâce à un réseau de grand transport et d'interconnexion à un réseau de distribution, faisant appel aux câbles électriques transportant différents niveaux de tension[3].

I.1. Les câbles pour la haute tension

Allant jusqu'à 400 kV, ils sont principalement utilisés pour assurer l'évacuation de la puissance de certaines centrales électriques, lorsqu'il n'est pas possible de faire par lignes aériennes. Leur puissance unitaire varie de 600 à 1200 mW. Les artères de pénétration dans les grandes agglomérations utilisent des câbles 225 kV, 300 à 600 mW[1].

I.2. Les câbles pour la moyenne tension

Ils sont classés par la Commission Électrotechnique Internationale (CEI), comme ayant une tension nominale allant de 1 kV à 100 kV[4]. Le concept de moyenne tension n'a été introduit qu'au fur et à mesure que le niveau de tension augmentait et que le besoin d'une plage de classification plus large se faisait sentir [1].

Ces câbles sont largement utilisés pour la distribution d'électricité entre l'alimentation principale haute tension et les applications à basse tension, ainsi que par les opérateurs énergétiques pour raccorder le réseau aux habitations de particuliers et complexes industriels, ou encore par les sources d'énergie renouvelables comme les installations solaires et éoliennes pour le raccordement au réseau principal.

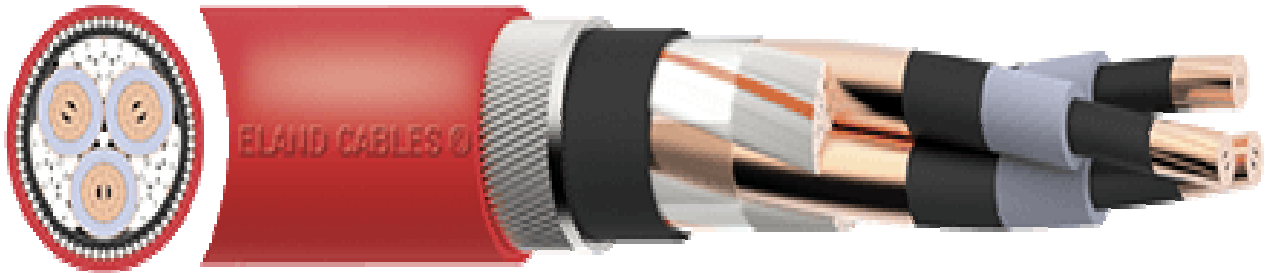


Figure 1 : Modèle de câble électrique moyenne tension supérieure à 6 kV[4].

I.3. Les câbles pour la basse tension

Ils constituent le moyen de distribution de l'énergie électrique à l'utilisateur. La chute de tension admissible dans les câbles des réseaux de distribution à basse tension requiert souvent une section des conducteurs supérieure à celle nécessaire thermiquement pour le transport du courant.

Un contrôle de la valeur de la chute de tension doit être fait après avoir déterminé la section des conducteurs en fonction du courant. La chute de tension généralement admise dans les réseaux de distribution doit être comprise entre 3 et 4 % au maximum[5].

IV. Structure des câbles électriques

Un câble électrique est l'agencement de plusieurs éléments qui permettent la protection de l'énergie diffusée.

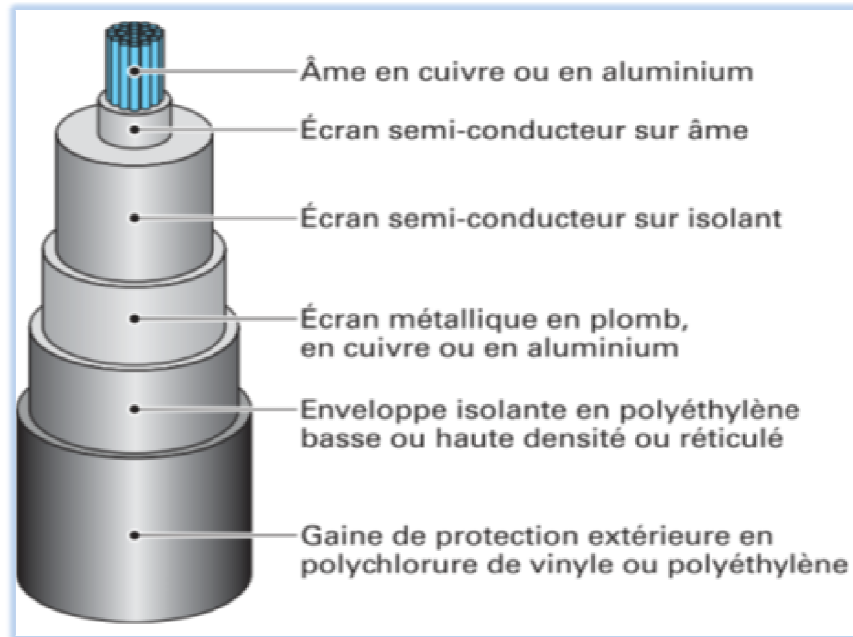


Figure 2 : Constitution d'un câble électrique[6].

La couche semi-conductrice sur l'isolant assure une répartition radiale du champ électrique dans l'isolant et forme une surface équipotentielle, rendant les caractéristiques électriques du câble indépendantes du mode de pose.

L'écran métallique, ou blindage électromagnétique a pour rôle de protéger le câble des champs électromagnétiques extérieurs pouvant perturber le fonctionnement de celui-ci. Par conséquent, il protège l'environnement des perturbations créées par le câble. Il est formé de bandes de cuivre ou d'aluminium, assure le retour du courant de court-circuit et protège le câble contre l'humidité.

L'enveloppe isolante est destinée à assurer l'isolation électrique de l'âme conductrice. Les polymères constituent les matériaux les plus utilisés actuellement dans l'isolation. Ayant de bonnes propriétés mécaniques, une bonne souplesse et une grande élasticité. Du point de vue électrique, leur rigidité diélectrique peut varier de 15kV/mm à 60kV/mm, dans la gamme des tensions de 30kV à 400kV.

La gaine de protection extérieure, constituée par un mélange extrudé de polychlorure de vinyle (PVC), sert à éviter la corrosion de l'écran métallique, et à protéger le câble contre l'humidité et les chocs mécaniques[7].

III. Propriétés diélectriques des isolants solides

La résistivité, la permittivité, les pertes diélectriques et le champ électrique admissible sont les quatre grandeurs caractéristiques d'un câble [8].

III.1. La rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique E_c est la valeur maximale du champ électrique auquel peut être soumis un diélectrique, sans apparition d'un claquage [8], perforation ou rupture, rendant impossible une nouvelle application de la tension.

La rigidité diélectrique des polymères isolants dépend [9]:

- des conditions d'essai (tension alternative, continu, onde de choc),
- des paramètres expérimentaux (procédure des essais),
- de la nature du métal des conducteurs ou des électrodes utilisés,
- de la pureté physique et chimique de l'isolant,
- de l'épaisseur de l'isolant,
- de la température,
- de la pression hydrostatique et la durée d'application de la tension, et par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des surfaces principales de l'isolant.

Déterminer la rigidité diélectrique revient à faire des essais pratiques, ces essais sont classés en deux catégories :

a. Les essais sur échantillon

L'isolant est soumis à un test dans un laboratoire, dans lequel la forme de l'échantillon et des électrodes sont spécifiées, ainsi que l'environnement, le champ appliqué à l'éprouvette peut être soit un champ continu varié par escaliers ou bien un champ sinusoïdal augmenté continuellement [8].

b. Les essais sur installation terminée

Cet essai est utilisé pour vérifier qu'aucun diélectrique de l'installation ne présente de défaut, ou n'est confronté à aucune menace de claquage en fonctionnement normal.

Les claquages se déclinent en deux catégories en fonction des mécanismes qui y sont responsables : les claquages thermiques et les claquages intrinsèques que nous allons aborder profondément ultérieurement dans les différents mécanismes de claquage [8].

III.2. La Résistivité

La résistivité électrique est la qualité d'un matériau qui oppose des difficultés au passage du courant qui le traverse.

Les notions de résistance et de résistivité qui sont généralement bien définies pour les conducteurs, peuvent être extrapolées aux matériaux isolants avec des spécificités que nous allons étudier. Lorsque l'on applique une tension continue à une éprouvette de matériau isolant, celui-ci n'étant pas parfait est traversé par un courant que l'on peut mesurer. Il est donc possible de déterminer une résistance.

La mesure de courants dans l'isolant aussi faibles est difficile et nécessite des appareils et des techniques de mesure très spécifiques. Pour les matériaux isolants, on est amené à définir plusieurs types de résistivité[9] :

III.2.1. La Résistivité transversale

La résistivité transversale est le quotient de la tension continue appliquée entre deux électrodes placées sur deux faces opposées d'une éprouvette, par le courant circulant en régime établi entre ces électrodes, à l'exclusion du courant circulant en surface [2].

La relation qui nous permet d'avoir la résistivité transversale est la suivante :

$$\rho_v = \frac{S_g}{e} \cdot R_v \text{ (I.1)}$$

R_v : Résistance mesurée (Ω).

e : Épaisseur moyenne de l'échantillon (m).

S_g : Aire effective de l'électrode gardée (m^2).

ρ_v : Résistivité transversale ($\Omega.m$).

III.2.2. La résistivité superficielle

La résistivité superficielle est le rapport de la tension continue appliquée entre deux électrodes placées sur la même face d'une éprouvette, par le courant circulant entre les électrodes après une durée d'application donnée de la tension.

La relation qui nous permet d'avoir la résistivité superficielle est la suivante[2] :

$$\rho_s = \frac{L}{d} \cdot R_s \text{ (I.2)}$$

L : longueur des électrodes (m)

d : distance inter-électrodes (m)

R_s : résistance mesurée (Ω)

III.3. La permittivité relative

Un diélectrique est caractérisé par sa permittivité relative ou sa constante diélectrique ϵ_r . Dans le cas d'un diélectrique parfait, ϵ_r est le rapport de la capacité C_x entre deux électrodes et sa capacité dans le vide C_0 :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \text{ (I.3)}$$

La permittivité absolue ϵ est le produit de la permittivité relative ϵ_r par la permittivité du vide ϵ_0 dont l'unité est (F/m) :

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \text{ (I.4)}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ (I.5)}$$

Avec : ϵ exprimé en Farad par mètre.

Pour l'air, les gaz et le vide, $\epsilon_r = 1$. Donc $\epsilon = \epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m, Pour tous les autres isolants, $\epsilon_r > 1$ [2].

III.4. Les pertes diélectriques

L'angle de pertes δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le courant de fuite. Afin de déterminer l'angle de perte diélectrique on aura besoin du diagramme de Fresnel, illustré sur la figure 3.

Le complexe I aux borne du condensateur plan rempli de diélectrique contient deux composantes :

$$I = I_p + I_c \quad (\text{I.6})$$

Le courant I_c est donné par la relation suivante :

$$I_c = j\omega C_s U \quad (\text{I.7})$$

C_s (F) : capacité d'un condensateur parfait (c'est-à-dire pour lequel l'angle de phase est égal à $\pi/2$)

Et I_p est donné par :

$$I_p = \frac{U}{R} \quad (\text{I.8})$$

$R(\Omega)$: résistance du diélectrique réel.

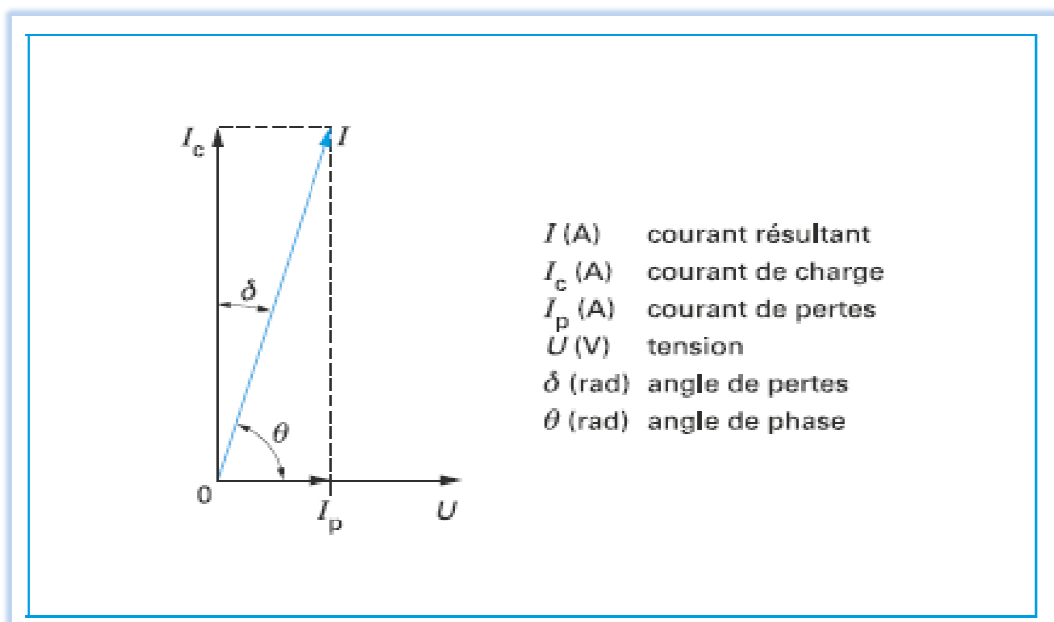


Figure 3 : Diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait [2].

La relation qui nous permet d'avoir l'angle de perte diélectrique est la suivante :

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (I.9)$$

La tangente de l'angle de perte $\tan \delta$, c'est le quotient entre le courant de perte et le courant de charge :

$$\tan \delta = \frac{I_p}{I_c} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (I.10)$$

ε'' : Indice de perte

ε' : Permittivité relative

IV. Les contraintes rencontrées par la fonction isolation au cours de son application

Les systèmes d'isolations au cours de leurs utilisations sont soumis à des contraintes qui influent sur le comportement des matériaux, parmi ces dernières :

IV.1. Le vieillissement

Le vieillissement d'un système d'isolation est défini par la CEI (commission électrotechnique internationale) et l'IEEE (institut des ingénieurs électriciens et électroniciens), comme toute altération irréversible des propriétés du matériau isolant. Ces changements affectent considérablement les performances de l'isolant et réduisent sa durée de vie.

Le degré de vieillissement d'un isolant dépend des propriétés physiques, de la composition chimique du matériau, de la nature et la durée de la contrainte appliquée, ainsi que du processus de fabrication [10].

Aucun isolant ne résiste à un champ électrique de plus de 103 kV/mm. Les mauvais isolants claquent en général par effet thermique. Le courant qui traverse le matériau chauffe ce dernier, ce qui augmente sa conductivité, et la rupture intervient par emballement thermique, tandis qu'un matériau isolant électrique peut être peu résistant à la propagation des fissures [10].

Dans ce cas, les forces électrostatiques peuvent provoquer la propagation d'une fissure jusqu'au moment où le champ provoque la rupture par avalanche (rupture électromécanique).

Deux autres mécanismes interviennent pour expliquer, à long terme, les défaillances des isolants polymères : l'oxydation progressive du matériau et la diminution de la masse moléculaire des chaînes de polymère, ce qui augmente en général la conductivité ionique. En présence d'humidité, ou de vapeur d'eau les champs électriques, même relativement faibles, provoquent l'apparition d'arborescences humides qui croissent jusqu'au claquage.

En pratique, ces défaillances proviennent du vieillissement du matériau sous l'action du champ électrique, comme elles peuvent être dues aux conditions et à la durée de stockage de ce matériau[11].

IV.2. Le phénomène d'arborescence

Les diélectriques isolants lors de leur fonctionnement dans l'isolation haute et moyenne tension, présente des défauts. En présence d'un champ électrique, ce dernier provoque l'apparition de canaux ou cavités microscopiques, dont l'ensemble rappelle une forme d'arbre appelée «arborescence électrique»[9].

Ces arborescences électriques sont donc une manifestation analogue du vieillissement sous un champ mais plus lente à s'établir, et prend une forme d'arbre comme le montre la figure 4 :

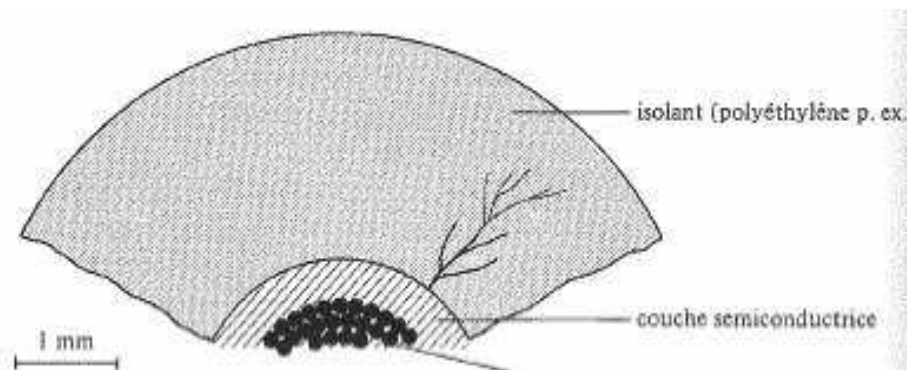


Figure 4 : Phénomène d'arborescence sur un isolant solide [9].

Ces arborescences peuvent être classées selon l'endroit où elles prennent naissance et l'environnement d'exploitation de l'isolant. On distingue deux types d'arborescences :

a. Les arborescences ouvertes

Elles résultent de défauts de contact écran /isolant et sont susceptibles aux pénétrations d'air et d'humidité. Elles peuvent causer d'éventuelles réactions chimiques, une augmentation de la conductivité et une croissance large et rapide. Leurs tailles sont réduites lors du premier stade de vieillissement, mais avec le temps, elles peuvent croître jusqu'à être en mesure de court-circuiter l'isolation [12].

b. Les arborescences en nœud-papillon

Leur taille n'évolue pas rapidement et leur surface ne semble pas être conductrice [12].

IV.3. Les contraintes électriques

Le phénomène d'arborescence électrique dû à des décharges électriques internes détruit localement le matériau en formant des canaux très fins. Ces derniers évoluent et peuvent finalement provoquer un claquage. Dans un câble électrique la présence d'inclusions conductrices et de protubérances d'écran dans les câbles sont des exemples de formations d'arborescence électrique. Le phénomène d'arborescence d'eau ou d'arborescence électrochimique est dû à l'existence de l'eau à l'intérieur de l'isolant en présence d'un champ électrique, il y'aura donc formation de l'arborescence électrique conduisant au claquage. Ce phénomène d'arborescence d'eau évolue très lentement (plusieurs années) par rapport au phénomène d'arborescence électrique.

Les décharges partielles en présence de cavités par exemple qui dégradent l'isolant peuvent conduire au claquage par arborescences électriques [2].

IV.4. Les contraintes thermiques

Les contraintes thermiques en fonctionnement sont dues à l'échauffement par effet Joule (câbles) ou aux pertes magnétiques ou diélectriques (transformateurs).

Les caractéristiques thermiques importantes à considérer pour le matériau sont donc :

- Le coefficient de dilatation thermique ;
- La conductivité thermique ;
- La capacité thermique massique ;
- Les températures caractéristiques telles que la température de fusion et de transition vitreuse [2].

Le tableau 1 regroupe les températures de fonctionnement et les limites admissibles pour quelques types de polymères :

Tableau1. Températures de fonctionnement et son seuil admis pour certains polymères isolants[2].

Matériels	Type d'isolation	Température de fonctionnement en service normal (°C)	Température limite (°C)
Câble	Polyéthylène basse densité	70	150
	Polyéthylène haute densité	80	180
	Polyéthylène réticulé	90	250

IV.5. Les contraintes mécaniques

Les isolants solides lors de leur fonctionnement ne supportent pas juste les contraintes entre les conducteurs et le support mais aussi doivent supporter les contraintes mécaniques qui sont dus aux[2] :

- ✓ Forces électromécaniques (jeux de barres, température et dilatations cycliques...).
- ✓ Forces dues au mouvement (machines tournantes, vibrations...).
- ✓ Forces de charge (isolateurs de ligne).
- ✓ Efforts exceptionnels (court-circuit, régimes transitoires, surcharges).

IV.6. Les contraintes climatiques

Le vieillissement climatique résulte de l'exposition aux rayonnements solaires, aux intempéries (humidité relative résultante de forte pluie) et à la pollution (composants chimiques). Les matériels utilisés dans le réseau de transport et de distribution situés à l'extérieur sont directement exposés à ce type de contrainte[2].

IV.7. Les contraintes radiatives

Les contraintes radiatives se rencontrent principalement dans les applications nucléaires, spatiales, médicales. Pour EDF, c'est essentiellement l'usage des matériels électriques en

ambiance nucléaire qui a conditionné la mise au point de systèmes résistants aux rayonnements ionisants[2].

La littérature montre deux tendances opposées, en fonction des conditions d'irradiation (la dose par exemple) :

- La réticulation des molécules de polymère, ce qui augmente la résistance mécanique.
- La dégradation oxydative, qui provoque généralement une dégradation ou un vieillissement de la matière[13].

V. Les différents mécanismes de claquage

V.1. Claquage thermique

Les pertes diélectriques de polarisation et de conduction provoquent un dégagement de chaleur dans les isolants, tant que la quantité de chaleur ainsi produite est supérieure à celle que peut évacuer l'isolant.

La température augmente, ainsi que, la conductivité entraînant un accroissement de la chaleur produite par effet Joule. Si les conditions de refroidissement ne parviennent pas à diminuer la température, un claquage se produit que l'on appelle claquage thermique [8].

- Généralement le claquage thermique se produit dans la région au centre des électrodes là où le refroidissement est difficile.
- Quand un isolant est chauffé, la résistance augmente suite à l'élimination de toute trace d'humidité. Après le séchage de l'isolant, la résistivité diminuera au cours du temps.
- Il n'est pas nécessaire que la totalité du volume soit chauffé, il suffit qu'une petite partie soit altérée et chauffée.

V.2. Claquage d'origine électronique

On distingue plusieurs claquages d'origine électronique grâce à plusieurs théories proposées :

V.2.1. Le claquage intrinsèque

Lorsque le champ électrique est appliqué à un matériau pendant une courte durée en utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur, on peut assister à un

claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température, ce qu'on appelle le claquage intrinsèque.

La théorie la plus connue est celle de Fröhlich et Von Hippel, ils ont pensé que l'énergie du champ électrique est transmise au matériau par des électrons mobiles qui mettent en vibration les ions du réseau ; dès que l'énergie moyenne acquise par les électrons est supérieure à celle dissipée dans le réseau, le claquage peut se produire [14].

V.2.2. Le claquage associé au volume

Les électrons peuvent obtenir suffisamment d'énergie avec le champ électrique en traversant le volume libre pour causer la rupture diélectrique [15]. La théorie s'applique aux polymères purement amorphes et permet de calculer la plus grande distance parcourue par les électrons qui ont provoqué le claquage. Les structures chimiques (poids moléculaire, réticulation, additifs...) et physiques (cristallinité, micro vides, contraintes mécaniques...) ainsi la température, influent directement sur le phénomène du claquage [16].

V.2.3. Le claquage par avalanche

Ce type de claquage se produira si le matériau isolant comporte des électrons de conduction pouvant être accélérés pour atteindre l'énergie d'ionisation des atomes (soit 5 à 10 eV). Coelho et Aladeniz donnent une explication du processus lors de la collision ionisante avec un atome du matériau. L'électron incident peut céder à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé.

L'atome se charge positivement en libérant un électron, de sorte qu'on ait alors deux électrons libres qui peuvent acquérir avec le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc deux électrons et ainsi de suite, pour produire une avalanche [8].

V.3. Claquage électromécanique

Garton et Stark expliquent le mécanisme de claquage électromécanique, en utilisant un isolant solide placé entre deux électrodes, entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel, cet effort comprime l'isolant solide et provoque la diminution de l'épaisseur. Ce claquage apparaît lorsque l'effort de compression est supérieur à la résistivité mécanique du matériau. On rencontre ce type de claquage principalement dans les polymères thermoplastiques [16].

Chapitre II

**Généralités sur les polymères
et le PE**

Les polymères sont aujourd'hui largement répandus pour des fonctions d'isolation électrique. Ils le sont notamment pour des raisons liées entre autres à leurs qualités intrinsèques, leur exploitation aisée et la non nécessité de leur entretien. Outre ces qualités, ils disposent de bonnes propriétés électriques et mécaniques ainsi qu'une durée de vie largement supérieure à celle des autres isolants (le mica, la gutta-percha, le papier imprégné).

L'objectif général de ce chapitre est de décrire les polymères, notamment le polyéthylène (PE) qui est omniprésent dans l'industrie des câbles grâce à ses excellentes propriétés isolantes qui lui permet ainsi un réel engouement de la part des consommateurs, ce qui incite les recherches scientifiques dans ce sens.

I. Les matériaux polymères

I.1. Un brin d'histoire

Les polymères (du grec *polus*, « plusieurs » et *meros*, « partie »), appelés aussi matériaux plastiques sont constitués de la répétition d'un grand nombre d'unités constitutives appelées monomères. Ces derniers sont des molécules organiques composées d'un ou plusieurs atomes de carbone [1].

Les polymères synthétiques sont issus de la recherche scientifique intensive. Ils sont issus de la pétrochimie.

Le premier polymère synthétique (Phénol-formaldéhyde) a été développé en 1907 sous le nom de Bakélite par le chimiste Belge Leo Baekeland ce qui a déclenché l'industrie des plastiques qui s'est développée par la suite au XXe siècle [21]. A cette époque, ces matières étaient essentiellement connues pour leurs intérêts surtout en électrotechnique. Un développement remarquable, surtout pour les thermoplastiques a été observé à partir de 1926 grâce aux travaux du chimiste Allemand Staudinger. Depuis, la production mondiale annuelle des matières plastiques est en constante progression [3].

Toutefois, L'industrie électrique et électronique sont les secteurs les plus consommateurs des polymères synthétiques avec 8% de la consommation mondiale annuelle. Dans ce secteur, les polymères sont largement utilisés en raison de leurs propriétés thermiques et diélectriques spécifiques, de la flexibilité et de leur mise en œuvre ainsi leur faible coût [1].

I.2. Définition du polymère

Appelé plastique dans la vie courante, composé de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules. Une macromolécule est un enchainement linéaire de motifs structuraux identiques, monomères, qui sont reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes (figure 5).

Les macromolécules sont connectées les unes aux autres par des liaisons faibles de type Van Der Waals. La structure et les propriétés finales du matériau dépendent de la nature des atomes constitutifs, de l'agencement des unités monomères et de l'organisation des chaînes dans l'espace. Lors de la mise en œuvre du polymère, des additifs sont ajoutés pour conférer au matériau des propriétés spécifiques : thermique, mécanique, etc. Ces derniers jouent un rôle important sur le comportement du polymère.[18].

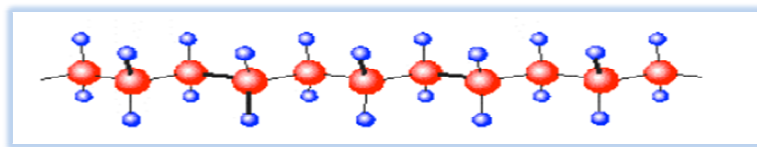


Figure5: Structure d'un polymère [18].

II. La Polymérisation

La polymérisation désigne le procédé par lequel des molécules réagissent entre elles pour former des molécules de masses molaires plus élevées, en d'autres termes, il s'agit d'une réaction chimique conduisant à la transformation d'un monomère en polymère sous certaines conditions [18].

II.1. Voies de polymérisation

On distingue deux grandes méthodes de polymérisation [18] :

- Polymérisation en chaîne
- Polycondensation.

II.1.1. La polycondensation

La polymérisation par condensation est longue et elle peut durer plusieurs heures, elle procède par réactions successives entre les groupes fonctionnels des réactifs, jusqu'à l'obtention de chaînes incorporant un grand nombre de monomères, comme suit :

Monomère + monomère → dimère

Dimère + monomère → trimère

Dimère + dimère → tétramère

Pendant la polycondensation, toutes les molécules présentes peuvent réagir les unes avec les autres [18].

II.1.2. La polymérisation en chaîne

La polymérisation en chaîne nécessite la présence de centres actifs pour la croissance rapide de la chaîne de polymérisation par addition successive de monomères, la croissance de la macromolécule ne s'arrête que lorsque le centre actif aura disparu.

Les centres actifs peuvent être créés sous l'influence d'une forme d'énergie externe (chaleur, radiations lumineuses ou ultraviolettes, rayonnements α , β , γ , neutrons), ces derniers peuvent être des radicaux, des anions ou des cations [18].

III. Les additifs et les charges

III.1. Les additifs

La synthèse d'un polymère nécessite souvent la présence d'agents amorceurs de réactions et de catalyseurs, qui sont ajoutés pour augmenter la vitesse de polymérisation. Malheureusement, les polymères « purs » sont fragiles, 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 entraînent une altération des propriétés physiques. Ils ne peuvent donc pas être utilisés tels quels. Lors de leur élaboration, les fabricants ajoutent diverses substances qui modifient et renforcent leurs propriétés :

- ✓ **Antioxydants**: Ils permettent aux polymères de ne pas réagir en présence de l'oxygène de l'air.
- ✓ **Agents de réticulation** : Ces agents permettent la formation d'un réseau macromoléculaire, qui confère au matériau une meilleure stabilité mécanique et thermique.
- ✓ **Autres additifs**: Ils peuvent aussi être ajoutés, comme des plastifiants, des colorants, des charges, des ignifugeants..., en fonction des propriétés recherchées.

Le rôle que peuvent jouer ces additifs dans l'évolution du phénomène de vieillissement électrique dans ces matériaux est considérable [1].

III.2. Les charges

Ce sont des éléments organiques et inorganiques qu'on ajoute au polymère pour réduire son coût. Il n'y a pas d'interactions entre charge et polymère. Ils ont un effet spécifique sur les propriétés du produit final que l'on appelle alors un *polymère chargé*. Dans le cas où les charges interagissent partiellement on obtiendra un *polymère à renforts réticulaires*, si les charges interagissent complètement, on obtiendra un *composite* [42].

IV. Types de polymères

Il existe un grand nombre de polymères aux propriétés différentes, on les classe en trois grandes catégories : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères [21].

IV.1. Les thermoplastiques

Ils ont une structure chimique à deux dimensions qui se ramollissent plus ou moins lorsque la température augmente, cela de manière quasiment réversible. Inversement, lorsque la température baisse, les thermoplastiques passent par une transition vitreuse et deviennent alors tout à fait rigide.

Les principaux thermoplastiques utilisés comme isolants en haute tension sont le polystyrène (isolation de condensateur), le polyéthylène (PE) que l'on trouve sous différentes formes – polyéthylène basse densité (LDPE) ou haute-densité (HDPE), ainsi que le polyéthylène réticulé (XLPE).

Certains thermoplastiques synthétiques ont été développés spécialement pour leur résistance à la chaleur. Ces produits sont connus sous leurs noms commerciaux : Nomex, Kevlar, Presspahn..., et sont couramment utilisés en haute tension, en combinaison avec des huiles isolantes (du fait de leur porosité).

La mise en œuvre des polymères thermoplastiques s'effectue selon le schéma général illustré dans la figure 6 [21].

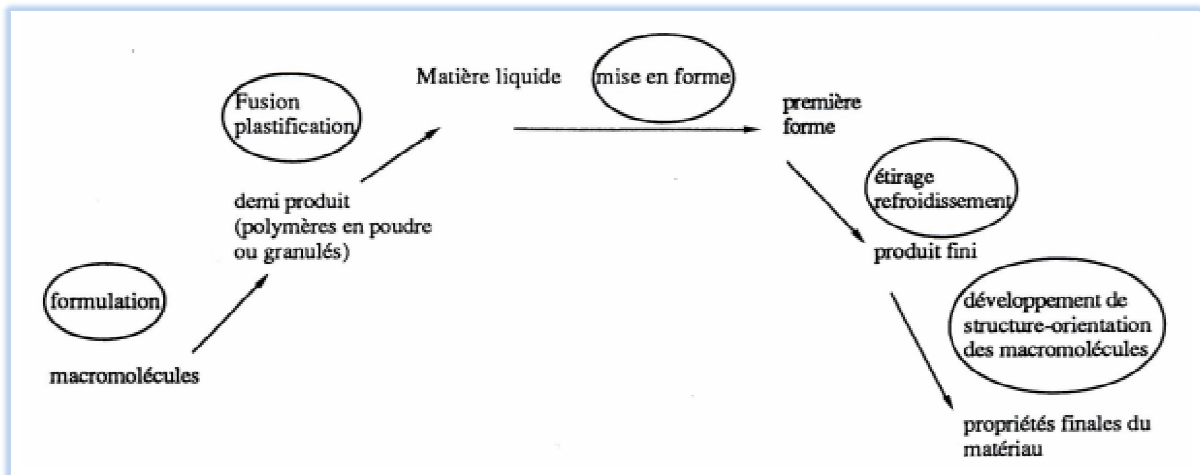


Figure 6 : Schéma général de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques [21].

IV.2. Les thermodurcissables

Ils ont une structure chimique à trois dimensions, qui durcissent de manière irréversible lorsque la température augmente, sous l'effet d'une réaction chimique particulière. Beaucoup de ces matériaux sont appelés résines mais pour ces dernières, la réaction chimique qui assure le durcissement peut être induite par un catalyseur. Ces plastiques prennent une forme définitive au premier refroidissement : ils deviennent durs et ne se ramollissent plus une fois moulés. Les aminoplastes sont les plastiques thermodurcissables les plus utilisés.

En revanche, ces résines subissent une usure par oxydation, cela est due aux effets combinés du champ électrique et des variations météorologiques. Elles ont en outre l'inconvénient de présenter des pertes diélectriques relativement importantes, et excluent toute possibilité de réparation de l'objet[21].

IV.3. Les élastomères

Les élastomères comme les caoutchoucs sont caractérisés par leur élasticité exceptionnelle. Il existe des élastomères thermoplastiques, qui présentent une transition vitreuse à une température inférieure à la température ambiante, et des élastomères thermodurcissables dont le durcissement est obtenu par un catalyseur [21].

V. Domaines d'utilisation des polymères

Les polymères sont omniprésents dans notre vie, ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités, des objets jusqu'à des applications techniques sophistiquées[22].

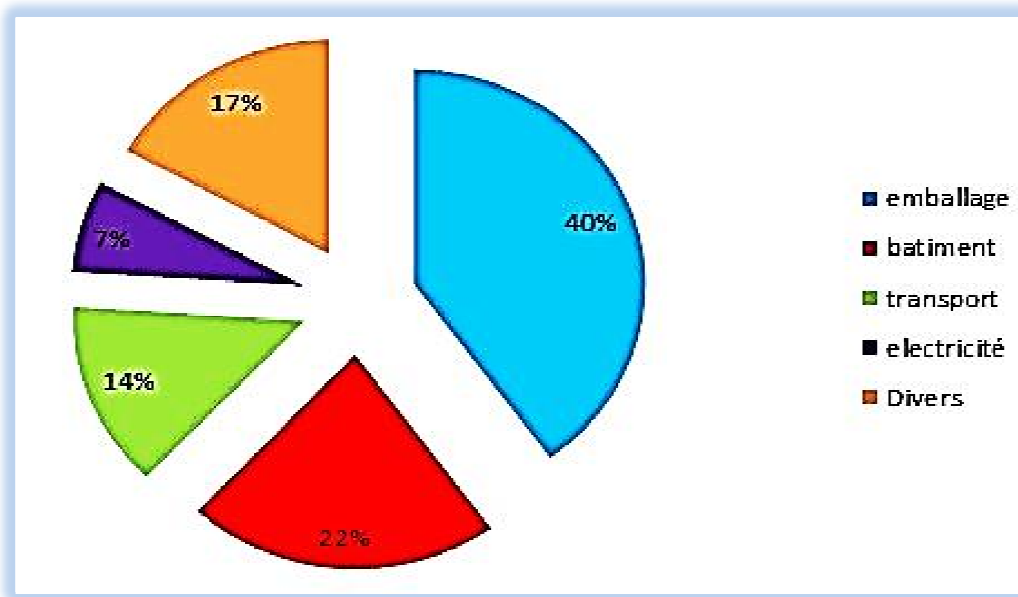
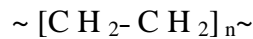


Figure 7 : Répartition des matières plastiques selon les domaines [22].

VI. Le polyéthylène

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique de la famille de polyoléfines, sa molécule se présente sous forme de chaînes contenant 1000 à 2000 monomères. La formule chimique du polyéthylène est :



Avec n : le nombre de monomères.

Il est partiellement cristallin, le polyéthylène contient deux phases :

- Une zone amorphe (caoutchouc), dans laquelle les chaînes sont disposées de manière désordonnée.
- Une zone cristalline (rigide), dans laquelle les chaînes sont disposées de manière ordonnée formant ainsi des cristallites [10].

Les PE, toutes densités confondues, sont les plus utilisés des thermoplastiques à l'échelle mondiale (près de 45%), en effet, cette matière synthétique est peu onéreuse et se prête parfaitement au revêtement des câbles électriques, du fait qu'elle est résistante aux conditions atmosphériques (très sévères) telles que des températures élevées (jusqu'au +80°C) [26].

VI.1. Types de Polyéthylène

VI.1.1. Polyéthylène basse densité (PE-BD)

Le polyéthylène basse densité a été découvert en 1933 par Fawcett et Gibson. Ce matériau est constitué de chaînes macromoléculaires comprenant des ramifications latérales de longueurs variables [14].

La polymérisation du PE-BD se fait à une pression comprise entre 1000 et 3000 atmosphères et à une température comprise entre 100°C et 300°C [23]. Sa densité est de 0,92, son taux de cristallinité est de 7% et sa température de fusion varie de 105 à 110°C [9].

a. Propriété du PE-BD

➤ Propriétés physico-chimiques

Le PE-BD se caractérise par une bonne résistance chimique [28] :

- ✓ Très résistant aux acides faibles et aux acides forts non oxydants.
- ✓ Très résistant aux bases faibles et fortes.

➤ Propriétés électriques

Le PE-BD possède d'excellentes propriétés diélectriques mise en œuvre dans l'isolation des câbles électriques [24] :

- ✓ **Résistivité transversale :**

$$\rho_v = 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$$

- ✓ **Rigidité diélectrique :** (pour une épaisseur entre 2 à 4 mm)

$$E = 20 \text{ à } 30 \text{ kV/mm.}$$

- ✓ **Permittivité relative :**

$$\epsilon_r = 2.25 \text{ à } 2.35.$$

- ✓ **L'angle de perte (10^{-4}) :**

$$\text{Tan } \delta = 1 \text{ à } 4.$$

➤ Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du PE-BD varient en fonction de sa masse molaire ainsi que sa cristallinité, citons [23] :

- ✓ La résistance à la traction varie entre 9 à 23 MPa.

- ✓ L'allongement à la rupture variant entre 150% à 1000%.
- ✓ Le module d'élasticité en traction variant entre 200 à 250%.

b. Le domaine d'utilisation du PE-BD

Le PE-BD est employé principalement pour l'emballage des aliments et de la fabrication de plusieurs produits industriels, dans le domaine de la câblerie utilisée comme isolant électrique pour différents câbles électriques, et aussi sous forme de tuyaux [23].

VI.1.2. Polyéthylène à haute densité PE-HD

Le PE-HD aussi dit, "basse pression" est obtenu par polymérisation sous des conditions moins sévères que celle de PE-BD.

La pression de polymérisation est inférieure à 50 bars et la température est voisine de 100°C. Sa densité est de 0,96 et son taux de cristallinité de 93%. Les chaînes de PEHD sont beaucoup plus alignées que celles du PE-BD, ce qui explique la valeur élevée de sa densité.

Sa température de fusion est comprise entre 130°C et 145°C [10], le polyéthylène haute densité est un matériau largement répandu dans le monde.

a. Propriétés du PE-HD

➤ Propriétés physico-chimiques

Le polyéthylène haute densité présente une bonne résistance chimique comme cité ci-dessous [9] :

- ✓ Résistant aux acides.
- ✓ Résistant à l'huile végétale et animale.
- ✓ Résistant à l'huile minérale.
- ✓ Très résistant à l'eau.

➤ Propriétés électriques

Le polyéthylène haute densité présente d'excellentes propriétés électriques quelles que soient sa masse molaire et sa cristallinité [24] :

✓ **Résistance transversale :**

$$\rho_v = 10^{16} \text{ à } 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$$

✓ **Rigidité diélectrique** (pour une épaisseur entre 2 à 4 mm) :

$$E = 20 \text{ à } 30 \text{ kV/mm}$$

✓ **Permittivité relative :**

$$\epsilon_r = 2.25 \text{ à } 2.35.$$

✓ **L'angle de perte (10^{-4}) :**

$$\text{Tan } \delta = 5.$$

➤ **Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques du PE-HD sont :

- ✓ Bonne résistance à la traction qui se situe entre 18 à 35 MPa.
- ✓ Module de Young de 700 à 1400 MPa.
- ✓ Bonne résistance aux chocs, aux flexions et aux cisaillements.

b. Le domaine d'utilisation du PE-HD

Il s'est imposé dans diverses applications grâce à ses propriétés intrinsèques en constante progression grâce au développement de nouveaux procédés de fabrication vont de la bouteille de lait au sac plastique réutilisable, en passant par les réservoirs à carburant, mais aussi le domaine de la câblerie [10], pour ses bonnes propriétés d'isolation et sa bonne résistance à la fissuration sous contrainte. Le polyéthylène haute densité est aussi utilisé pour le gainage des câbles, principalement téléphoniques [24].

VI.1.3. Polyéthylène réticulé chimiquement

Le polyéthylène réticulé chimiquement dit PRC destiné à être utilisé comme isolant dans les câbles électriques haute tension, car il a une bonne tenue à la température contrairement au PE-BD [10].

a. Propriétés du PRC

Les propriétés thermiques et électriques ne sont pas très différentes de celles du PE-BD. Il semblerait même que le PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE (non réticulé) [13].

b. Méthodes de réticulation du polyéthylène

➤ Par addition de silane

La réticulation par addition de silane (Le Silane est un nom commerciale) est l'une des plus importantes techniques de réticulation. Etablit en 1968, c'est seulement en 1970 que cette méthode est utilisée pour l'isolation des câbles électriques, à basse tension, et elle est en voie de développement pour les câbles haute tension [10].

➤ Par peroxyde

La réticulation par le peroxyde (Un composant chimique) est la méthode la plus attisée ces dernières années, car le PE-BD réticulé par peroxyde a dominé le marché des isolants des câbles électriques à moyenne et haute tension.

La première utilisation de la réticulation par peroxyde a eu lieu en 1945 par W.L.Alderson en exploitant des peroxydes organiques[24].

Toutefois les peroxydes sont des composés relativement peu stables. Ils ont la propriété particulière de se décomposer spontanément en dégageant une quantité importante de chaleur qui entraîne une élévation de température. La décomposition s'accélère alors et peut conduire à l'explosion.

➤ Par irradiation

La première fois que cette méthode a été développée c'était en 1950 en utilisant les rayons générés par des sources de Cobalt 60. Puis En 1952, A. Charlesby a publié une étude dans laquelle il a comparé entre les rayons d'une pile atomique, les rayons γ et les rayons X. Il a conclu que toutes ces énergies peuvent réticuler le PE[24].

VII.Principaux avantages et inconvénients du polyéthylène

Le PE présente des avantages et des inconvénients propres à lui tels que [25] :

a) Les Avantages

- ✓ Mise en œuvre aisée
- ✓ Excellentes propriétés d'isolation électrique
- ✓ Résistance aux chocs
- ✓ Grande inertie chimique

b) Les inconvénients

- ✓ Perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux hydrocarbures.
- ✓ Sensibilité aux UV en présence d'oxygène
- ✓ Sensibilité à la fissure sous contrainte
- ✓ Collage difficile

VIII. Les additifs du PE

Le matériau étudié (le Polyéthylène) est une formulation industrielle. Il contient, donc des additifs qui sont principalement les antioxydants. Ces molécules ont pour rôle de protéger le matériau contre l'oxydation.

Le PE peut être stabilisé par une grande variété d'antioxydants. Ces derniers sont généralement classés selon leur mécanisme d'action ou selon leur température de fonctionnement[26] :

- Les antioxydants agissant à haute température sont appelés antioxydants de mise en œuvre.
- Les antioxydants à large gamme de température sont également désignés par le nom d'antioxydants de fonctionnement. Ils garantissent la durée de vie de la pièce.
- Les antioxydants fonctionnant à basse température sont les plus efficaces à température ambiante en présence d'un rayonnement lumineux (par exemple sous rayonnement γ).

IX. Conditions de stockage du PE

Le stockage du PE peut entraîner des changements, une dégradation. Les conditions de stockage rentrent donc en jeu, tel qu'il est préconisé de stocker le PE pendant une durée de 18 mois après sa production, à température ambiante [10°C-30°C], dans un endroit sec et

dépourvu des rayons UV, il est aussi préférable de le stocker dans son packaging d'origine, ça n'induirait ainsi aucune détérioration à la qualité du matériau.

Un stockage inapproprié peut entraîner une dégradation provoquant une odeur nauséabonde, et un changement de couleur, induisant des effets négatifs sur les propriétés du PE.

Chapitre III

Techniques expérimentales

Ce présent chapitre est consacré à la description des dispositifs utilisés pour les divers essais effectués, en vue d'analyser les effets du stockage et l'effet d'irradiation gamma sur les propriétés du polyéthylène (PE), utilisé pour l'isolation des câbles électriques moyenne tension.

À cet effet, des essais physico-chimiques ont été réalisés au sein du laboratoire de chimie au Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs CRTSE (Alger), puis des essais électriques et mécaniques ont été réalisés au laboratoire de l'entreprise Electro-Industries ENEL (Azazga) et au laboratoire de contrôle qualité de câblerie CABEL (Alger).

I. Préparation des échantillons

I.1. Matériau utilisé

Le matériau d'étude est le PE, il est commercialisé sous l'appellation Visico ME4425. Ces granulés sont représentés dans la figure 8.



Figure.8 : Granulés du polyéthylène PE.

I.2. Mode opératoire

Les plaques de PE sont confectionnées au laboratoire de chimie de la câblerie CABEL d'Alger, selon le processus suivant : des granulés de polyéthylène stockés depuis 2015 et d'autres de 2017 sont placés dans les moules d'une presse à table FONTIJNE HOLLAND, montrés dans la figure 9, sous une température de 120°C dite température de préchauffage. Une fois la fusion totale est obtenue, la pression de la plaque métallique a été maintenue à 300 kN et la température a été augmentée jusqu'à 170°C pendant 2 min. Une fois les plaques sont obtenues, elles ont été refroidies jusqu'à la température de la pièce ambiante pendant 6 h.

Des plaques de forme carrée (25 x 25) cm et d'épaisseur de $(2 \pm 0,2)$ mm ont été obtenues. Elles ont été découpées en éprouvettes sous forme d'haltères ou en disques selon l'essai à réaliser.



Figure. 9 : Vue de la presse utilisée pour la fabrication des plaques de PE.

I.3. Formes et dimensions des éprouvettes

La forme et les dimensions des éprouvettes découlent de la mesure à effectuer et de la propriété à étudier :

- Pour la mesure des propriétés diélectriques (permittivité, capacité, facteur de pertes diélectriques et la résistivité transversale), les éprouvettes utilisées sont en forme de disque de 8 cm de diamètre (figure 10).
- Pour la mesure de la rigidité diélectrique, les éprouvettes citées précédemment ont été réduites aux environs de 6 cm de diamètre.
- Pour les essais mécaniques, physiques et morphologiques les éprouvettes sont sous forme d'haltères de 7,5 cm de longueur, conformément à la norme CEI 60811[27], comme l'illustre la figure 11.

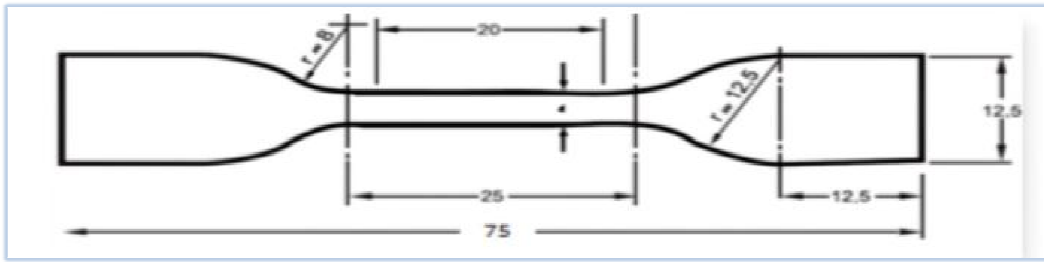


Figure.10 : Eprouvette en forme d'haltère pour les essais mécaniques.

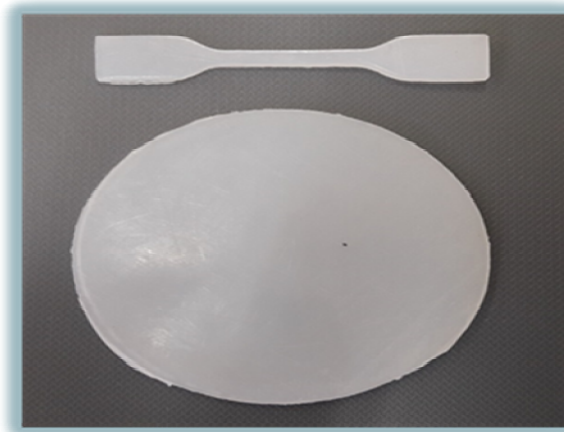


Figure.11: Eprouvettes en forme de disque et d'haltère pour les différents essais.

II. Dispositifs expérimentaux

II.1. Conditionnement des éprouvettes

Conformément à la norme CEI 60811[27], les éprouvettes doivent être conditionnées pendant 24 h dans un dessiccateur avant chaque essai afin de diminuer le taux d'humidité.



Figure.12 : Dessiccateur

II.2. Irradiation des éprouvettes

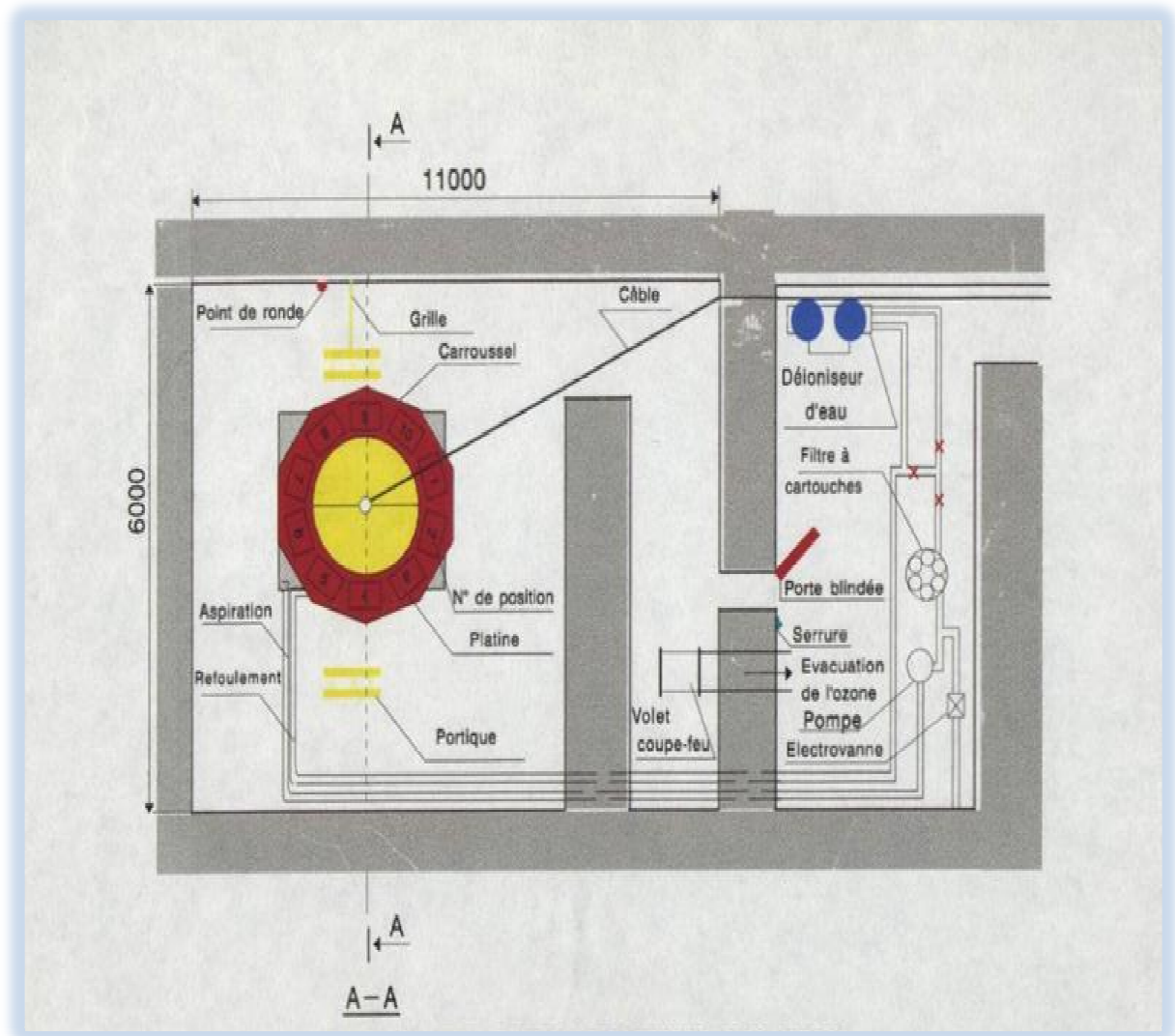


Figure.13 : Schéma de l'irradiateur pilote du CRNA.

Au cours de ce travail, une source de rayonnement Gamma de ^{60}Co est utilisée. L'irradiateur pilote du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) est composé de trois sources cylindriques de ^{60}Co de type CoP_4 fabriquées par ORIS (France). Elles sont disposées verticalement dans un porte-source en acier inoxydable comme le montre la figure 13. Les sources de dimension 384mm de hauteur et de 26,6mm de diamètre ainsi disposées forment une hauteur active de 1152mm. Pour des raisons pratiques une cale de 85mm a été déposée sous la source du bas.

III. Méthodes de caractérisation

III.1. Caractérisation physique

III.1.1. Masse volumique

La masse volumique ρ d'un corps homogène est le rapport entre sa masse (m) et son volume (V) ou encore la masse d'une unité de volume du corps à une température donnée $T(^{\circ}\text{C})$

$$\rho = m/V (\text{g}) / (\text{cm}^3) \text{ (III.1)}$$

ρ : masse volumique

m : masse

V : volume

La masse volumique d'un plastique pris dans un état physico-chimique donné (état compact, poudre ou granulé, structure alvéolaire) est fréquemment utilisée pour suivre les variations de la structure physique de différents lots d'un même plastique, ainsi que pour le calcul de la quantité de matière nécessaire pour obtenir un objet de volume donné [43].

Cette mesure a été réalisée à l'aide d'une balance graduée de marque LHOMARGY (France) selon la norme **T 51-561 (déc. 1990)**[44].

Les échantillons à analyser sont des rectangles pesant de 3 à 4g.

III.1.2. Absorption d'eau

Cet essai a été effectué au laboratoire de chimie du CRTSE. Il a été réalisé à l'aide d'une balance électronique de type SHIMADZU AYW220D de 10^{-5} g de précision comme le montre la figure 14.



Figure.14 : Balance utilisée pour la mesure du taux d'absorption d'eau.

Conformément à la norme ISO 62-2008[28], les éprouvettes qui ont été conditionnées dans le dessiccateur ont été pesées (M_1) puis immergées dans de l'eau distillée à $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ pendant 24 h comme le montre la figure 15.

Ensuite, les éprouvettes sont essuyées et pesées à nouveau (M_2).

Le résultat est donné en pourcentage selon la formule :

$$\text{Taux d'absorption d'eau \%} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \text{ (III.2)}$$

M_1 : La masse de l'éprouvette avant immersion

M_2 : La masse de l'éprouvette après immersion

L'absorption de l'eau est la moyenne des valeurs obtenues avec cinq essais.



Figure.15 :Dispositif adopté pour l'essai d'absorption d'eau.

III.2.Caractérisation morphologique par le microscope optique

En vue de mettre en évidence la différence entre la microstructure du PE stocké et celle du PE non stocké, avant et après immersion dans l'eau, on a fait appel au microscope optique de type OXION EUROMEX, équipé de 3 objectifs de grossissement et deux oculaires avec un grossissement de 10 fois, le dispositif est montré sur la figure III.16.

L'acquisition des micrographies a été effectuée au moyen d'une caméra vidéo solidaire du microscope et reliée à un ordinateur contenant le logiciel d'acquisition (Eye'sCora) et de traitement des résultats (PicedCora).



Figure.16 : Photographie du microscope optique utilisé.

III.3. Caractérisation mécanique

III.3.1. Mesure des dimensions des éprouvettes

Les épaisseurs des éprouvettes sont mesurées à l'aide d'un palmer à cadran, (figure17). Quatre mesures d'épaisseurs sont prises pour chaque éprouvette afin de calculer la moyenne.



Figure.17 : Palmer à cadran.

III.3.2. La dureté

Un duromètre Shore de type AMSLER est utilisé pour mesurer la dureté de surface Shore D du PE. La valeur de la dureté est exprimée en Shore D (pour les élastomères et les thermoplastiques).



Figure.18 : Duromètre Shore D.

La procédure consiste à appliquer une charge à l'éprouvette pendant 5 secondes selon la norme ISO 868[29], et répéter l'opération sur 5 éprouvettes du même lot, et on prend la valeur médiane des 5 valeurs obtenues pour chaque lot.

III.3.3. Essai de traction

Avant l'essai, nous avons mesuré la section droite de l'éprouvette, puis tracé deux repères distants de 20 mm sur la partie étroite de l'éprouvette. Du fait que la rupture se produit sur cette partie.

L'appareil utilisé pour l'essai de traction est de marque SCHENCK TREBEL comme le montre la figure 19. Il permet de mesurer simultanément l'allongement à la rupture et la résistance à la traction sur la même éprouvette. La machine comprend un dynamomètre muni de deux mâchoires exerçant un effort de traction croissant sur l'éprouvette.

L'essai consiste à soumettre l'éprouvette à la traction, à une vitesse constante de réglage 30mm/min jusqu'à sa rupture.



Figure.19: Machine à traction de marque SCHENCK TREBEL.

- La résistance à la traction est le rapport de la charge à la rupture par la section droite de l'éprouvette, et elle est donnée par la relation suivante :

$$R_T = \frac{F}{S} \text{ (III.3)}$$

Avec :

R_T : Résistance à la traction en N/mm^2 .

F : force de traction en N.

S : section droite de l'éprouvette en mm^2 .

- L'allongement à la rupture est exprimé en (%) et régit par la relation suivante :

$$A(\%) = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \text{ (III.4)}$$

Avec :

L_0 : la longueur entre les deux repères tracés initialement avant rupture de l'éprouvette ($L_0=20\text{mm}$).

L : la longueur entre les deux repères tracés, après rupture de l'éprouvette.

III.4. Propriétés diélectriques

III.4.1. Mesure du facteur de pertes diélectriques et de la permittivité relative

Pour cette mesure, on a varié la température à partir de 20°C jusqu'à la température maximale que peut supporter le PE avant qu'il ne fusionne c'est-à-dire 90°C, et avant chaque variation de température on relève les valeurs correspondantes : facteur de pertes diélectriques et la permittivité relative du PE, et ce sous une tension égale à 2,25 kV, et à une fréquence constante et égale à 50Hz. Cette mesure est conforme à la norme CEI 62631-1 [32], et s'effectue grâce à un pont de mesure (Pont de Schering), qui se trouve au sein du laboratoire de contrôle et qualité de CABEL. Le pont utilisé est le pont Tettex 2830/2831 (figure 20). Le schéma électrique de ce pont est représenté sur la figure 21.

Le dispositif comprend également un régulateur de température et des sources de tension alternative (AC) et continue (DC). Une alimentation électrique à haute tension est reliée au système d'électrodes d'essai de sorte que le courant circule à travers un échantillon qui est mesuré par un pico-ampèremètre intégré dans le pont Tettex 2831. Ce dispositif est entièrement contrôlé par un ordinateur intégré. Le système fonctionne sous Windows Embedded Standard 7 qui est un programme spécial avec une interface graphique pour l'utilisateur.



Figure.20 : Pont de Schering de type TETEX 2830/2831.

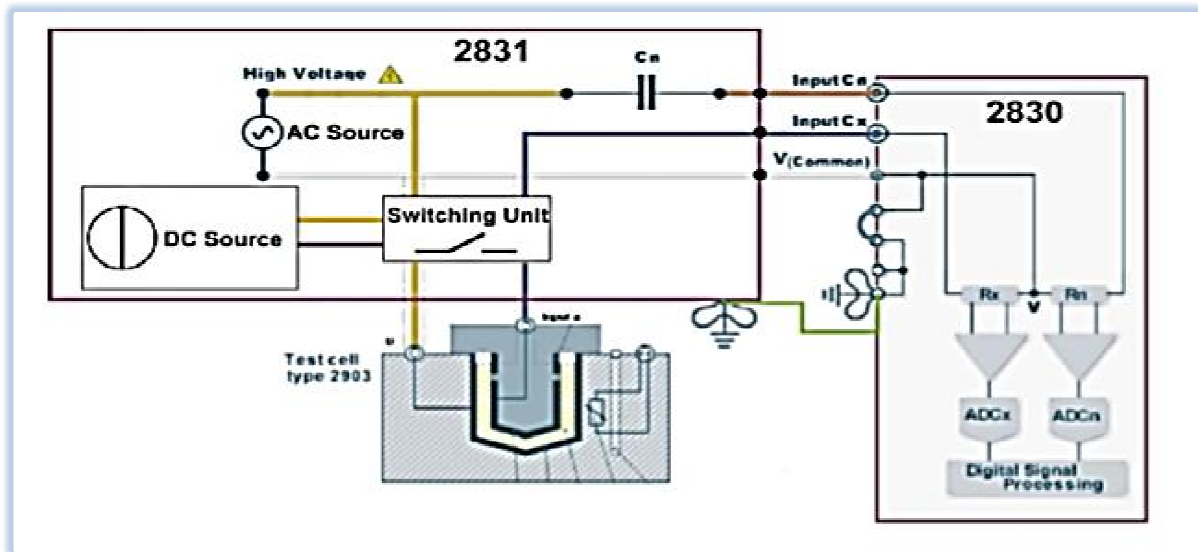


Figure 21 : Schéma électrique du pont de Schering de type TETEX 2830/2831 [37].

a) Dispositif de test diélectrique pour matériaux isolants

Ce dispositif de test diélectrique pour isolants solide (figure 22) est équipé :

- ✓ D'un condensateur à anneau de garde, destiné à effectuer des mesures diélectriques (facteur de pertes diélectriques $\tan \delta$, capacité (C) et de la permittivité relative ϵ_r),
- ✓ Deux plaques chauffantes.
- ✓ Deux électrodes en acier inoxydable de forme circulaire avec une surface de 20 cm^2 .
- ✓ D'une électrode de mesure protégée qui élimine des capacités partielles qui peuvent influencer sur les résultats d'essai.



Figure. 22 : Dispositif de test diélectrique pour isolants solide.

Les caractéristiques de la cellule sont [33] :

- Tension : 2.5 kV, 50/60 Hz.
- La température est réglable jusqu'à 250°C.
- La cellule d'essai est protégée par cloche en verre.
- Un jeu de poids qui exerce une pression de 750 g/cm² sur l'ensemble permettant d'éviter toute présence d'air entre la surface des électrodes et l'éprouvette soumise à l'essai.

III.4.2. Mesure de la résistivité transversale

La résistivité transversale a été mesurée à l'aide d'un Téraohmètre de marque Klick (figure23):

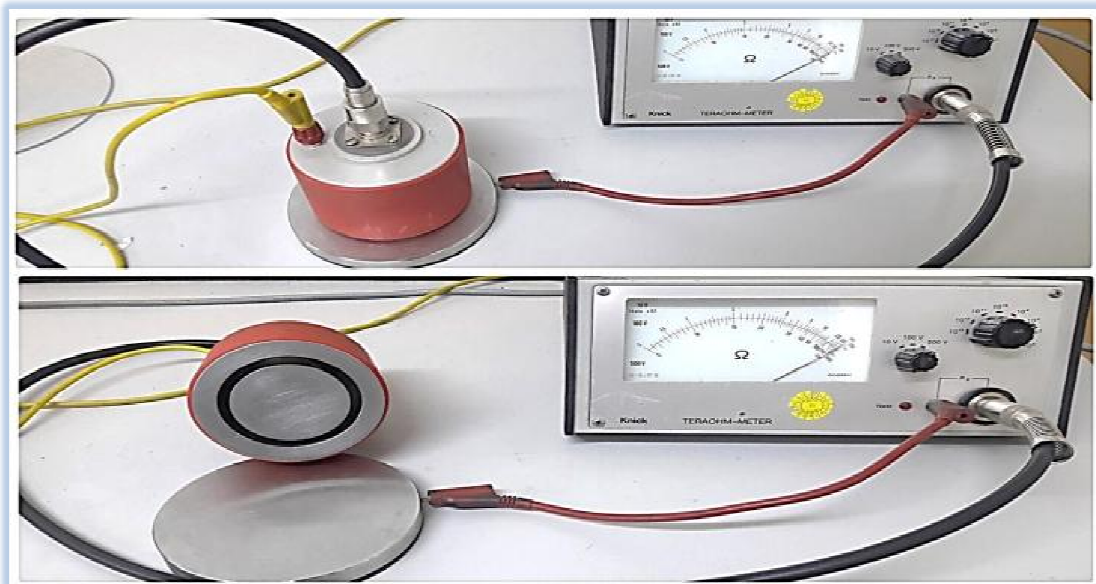


Figure. 23 : Téraohmètre

Cet appareil permet la lecture de la résistance transversale de l'éprouvette sur le cadran. Il est équipé d'une électrode de garde, d'une électrode de mesure et d'une électrode haute tension, comme indiqué sur le schéma représenté par la figure 24 avec le type de branchement effectué.

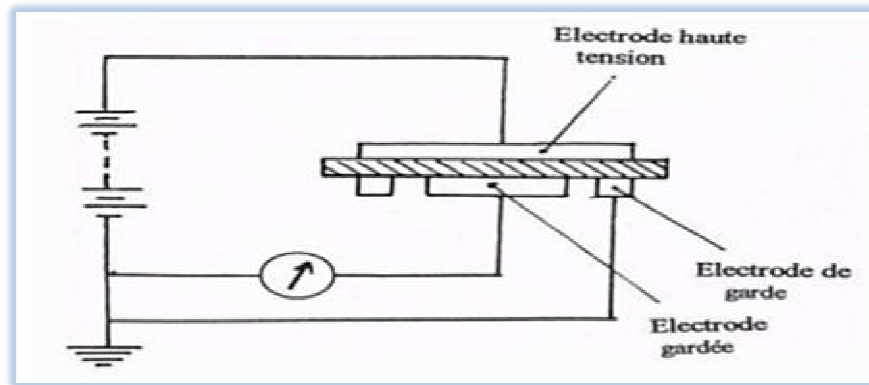


Figure.24 : Branchement type pour la mesure de la résistance transversale.

Les essais ont été effectués sous une tension continue de 500 V. La durée d'application de la tension est de 1 minute, et ceci dans le but d'avoir une position stable de l'aiguille du Téraohmètre conformément aux normes CEI 60093[30]. À l'aide du Téraohmètre, nous avons mesuré la résistance de l'éprouvette, ensuite nous avons déterminé la résistivité transversale à l'aide de la relation suivante :

$$\rho_v = \frac{S_g}{e} \times R \quad (\text{III.5})$$

Avec :

R : résistance mesurée en (Ω)

e : épaisseur moyenne de l'éprouvette en (cm).

S_g : Aire effective de l'éprouvette (cm^2).

ρ_v : Résistivité transversale ($\Omega \cdot \text{cm}$)

La surface S de l'éprouvette est donnée par la formule suivante :

$$S_g = \frac{\pi (d_1 + h)^2}{4} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

d_1 : diamètre de l'électrode gardée.

h : distance entre électrode gardée et l'anneau de garde.

S_g : surface de l'éprouvette.

Dans notre cas, la surface de l'éprouvette est égale à 19.6 cm^2 .

III.4.3. Mesure de la rigidité diélectrique

En vue de déterminer la rigidité diélectrique du matériau, nous avons utilisé un Spintermètre automatique de type DTA100 fabriquant BAUR, (Allemagne) montré sur la figure 25. Le système d'électrode utilisé est un système plan-plan conformément aux recommandations de la norme VDE 0303-2 [34].

Un couvercle en plexiglas assure en première lieu, la protection de l'utilisateur de tout risque de choc électrique lors de la mise sous tension de l'appareil et en deuxième lieu l'observation du système d'électrodes et le diélectrique. Afin d'éviter les contournements, nous avons plongé l'ensemble (isolant et électrode) dans un bac transparent comportant de l'huile minérale isolante conforme à la norme CEI 60296[35].



Figure.25 : Photographie du Spintermètre utilisé.

La tension de claquage a été mesurée conformément à la norme CEI 60243-1[31], à une vitesse de montée en tension du spintermètre automatique de 2,5 kV/s, pour avoir un claquage au bout de 10 à 20s en appliquant une tension croissante jusqu'au claquage.

Le rapport de la tension de claquage sur l'épaisseur de l'éprouvette au point de perforation représente la rigidité diélectrique de l'isolant, et elle est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{U_d}{e} \text{ (III.7)}$$

E :rigidité diélectrique (kV/mm).

U_d :tension de claquage (kV).

e :épaisseur de l'éprouvette (mm).

Chapitre IV

Résultats et discussion

Le but de ce chapitre est de présenter l'influence de la durée de stockage et l'irradiation gamma de 0 à 50 kGy sur les propriétés du polyéthylène. Dans un premier temps, une caractérisation préliminaire du matériau sera réalisée, puis nous nous intéresserons à l'évolution des propriétés diélectriques sous l'effet de la durée de stockage ainsi que le bombardement gamma.

I. Effet du stockage

Le matériau dont nous disposons n'a pas subi de vieillissement accéléré, en revanche il a été stocké pendant une durée de plus de deux ans (depuis 2015) à l'état granulé, le but de cette étude est de comparer les propriétés (physiques, mécaniques et diélectriques) de ce matériau, avec celles d'un même matériau produit en 2017.

I.1. La densité

Le PE/2017 et PE/2015 sont caractérisés en termes de densité. Le tableau 2 regroupe les résultats des essais de la densité de PE/2015 et PE/2017 ainsi leurs densités mentionnées dans la fiche technique fourni par le fournisseur. La mesure de la densité des résines est conforme à la littérature [36].

Les densités sont pratiquement du même ordre de grandeur que celle donné par la fiche technique qui est de $0,93\text{g/cm}^3$. On peut noter aussi que la densité du PE 2017 est légèrement supérieure à celle du PE 2015.

Tableau 2. La densité de la résine PE/2015 et PE/2017.

Densité	Mesurée	Fiche technique
PE/2015	0,918	0,930
PE/2017	0,921	

I.2. Essai d'absorption d'eau

Le tableau 3, regroupe les résultats du taux d'absorption d'eau du PE/2015 et PE/2017.

Tableau 3. Le taux d'absorption d'eau de la résine PE/2015 et PE/2017.

Résine	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Le taux d'absorption (%)
PE/2015	1,13360	1,13389	0,2557
PE/2017	1,17519	1,17558	0,3317

Avant de faire la comparaison entre les deux matériaux 2015 et 2017, on constate que pour les deux cas leur masse a augmenté après l'immersion dans l'eau.

On remarque bien que le taux d'absorption d'eau pour le PE/2017 est positif, cela signifie que la résine a subi le *phénomène de sorption* par la pénétration des gouttelettes d'eaux du milieu extérieur vers la résine, ce qui insinue que cette dernière possède des micros vides [28]. Ce phénomène est également observé pour le cas PE/2015, mais ce taux d'absorption est moins important que le précédent, ce qui signifie que la quantité des gouttelettes d'eaux pénétrée est infime, cela laisse à supposer que le PE/2017 possède des micros vides plus que la résine produite en 2015.

On conclut qu'il existe des cavités ou des pores sur la surface des deux échantillons permettant la pénétration d'eau, entraînant un processus de fissuration.

I.3. Aspect morphologique

Le suivi du changement de l'état de surface du PE à l'aide de la microscopie optique est illustré sur les figures 26 et 27 :

I.3.1. Aspect morphologique du PE/2015

Lors de la réalisation d'essai d'absorption d'eau, des images par microscope optique d'agrandissement 400 fois ont été prises avant et après l'immersion dans l'eau.

La figure 26, représente les deux photos prises pour le PE/2015. On remarque la présence des microcavités dans la matrice du PE/2015, ce qui explique le phénomène de sorption qui a été constaté précédemment.

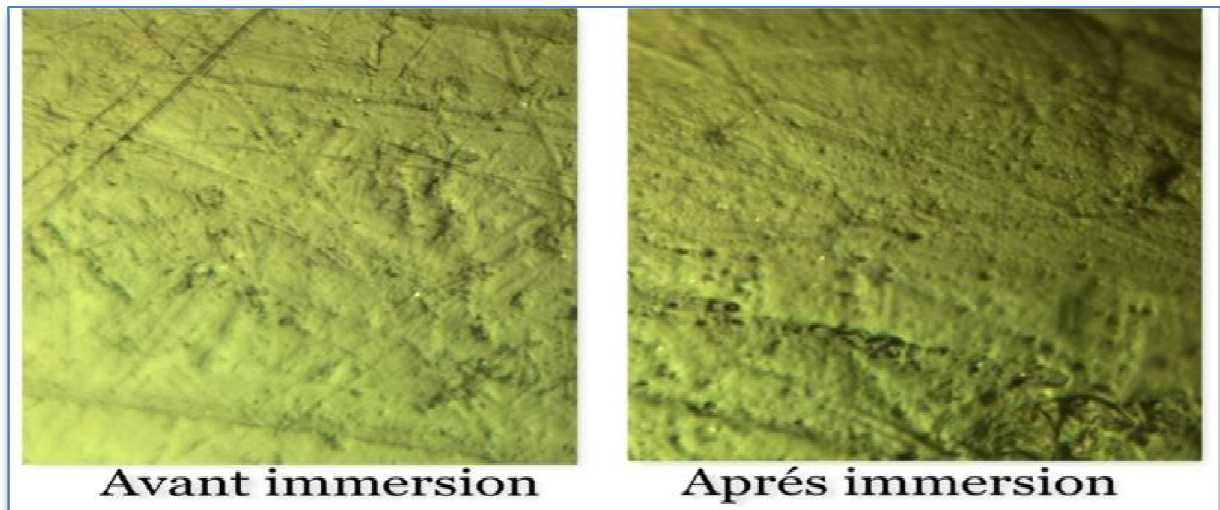


Figure 26.La morphologie de la résine PE/2015 avant et après l'immersion dans l'eau.

I.3.2. Aspect morphologique de PE/2017

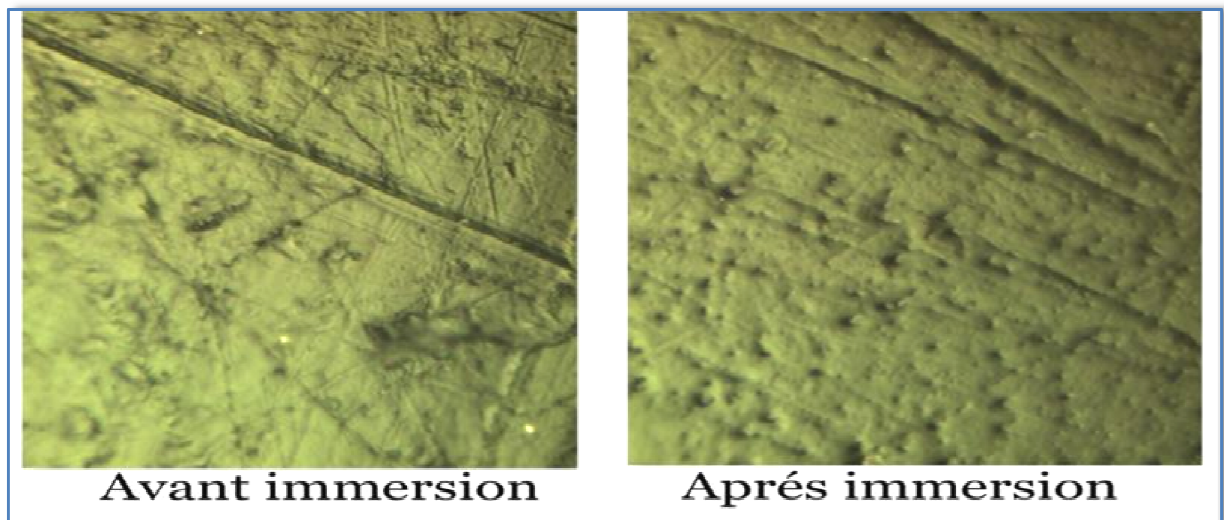


Figure 27.La morphologie de la résine PE/2017 avant et après l'immersion dans l'eau.

Les images de la figure 27 sont des photos prises par un microscope optique avant et après l'immersion dans l'eau de la résine PE/2017 lors de l'essai d'absorption d'eau. On remarque l'apparition de nouveaux micros vides dans la résine PE/2017 après le contact avec de l'eau. Cela signifie la présence des cavités qui favorise cette pénétration. Toutefois, on remarque aussi que le nombre de cavités observé dans le cas de PE/2017 est supérieur à PE/2015 comme le montre la figure 28, ce résultat confirme le résultat précédent.

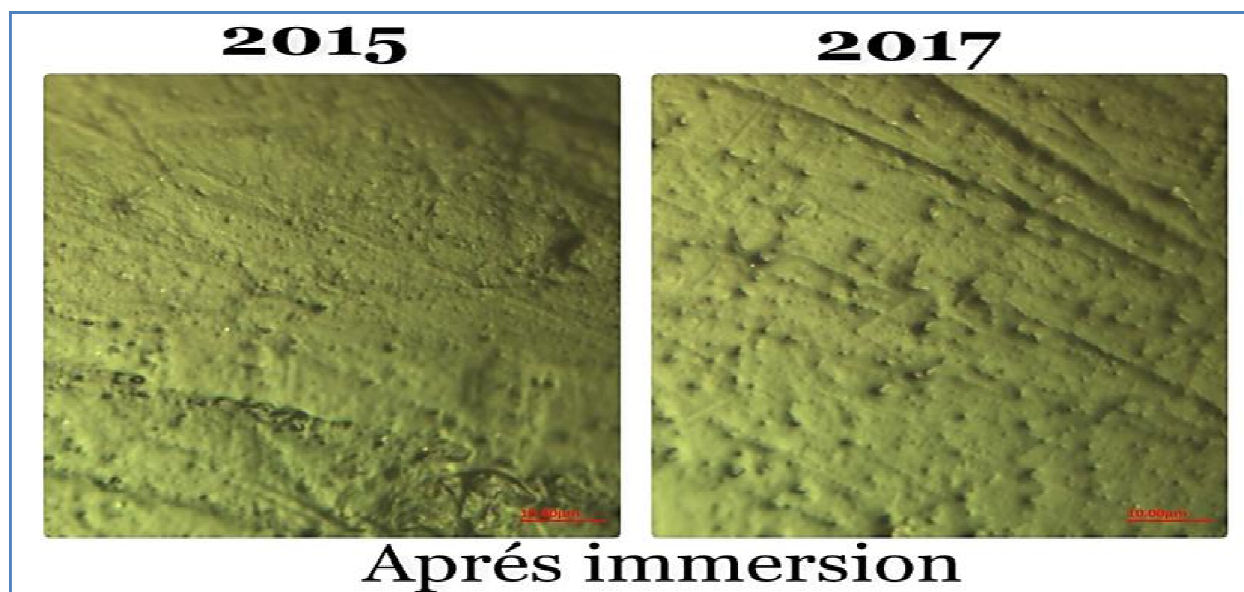


Figure 28. La morphologie de la résine PE/2015 et PE/2017 après l'immersion dans l'eau.

Les cavités présentes dans ces matériaux peuvent affecter leurs caractéristiques mécaniques et électriques entraînant un claquage [2].

I.4. Caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique peut être un indicateur des modifications physico-chimiques ayant lieu dans les macromolécules du matériau. Nous illustrons les résultats des essais mécaniques effectués pour observer l'effet de la durée de stockage sur le PE, à savoir l'allongement à la rupture, la résistance à la traction et la dureté Shore D.

Tableau 4. : Les résultats mécaniques du PE/2017, PE/2015 et de la fiche technique.

Résine	Allongement à la rupture (%)		Résistance à la rupture (N /mm ²)	
	Mesuré	Fiche technique	Mesuré	Fiche technique
PE/2015	560	>300	17,10	20
PE/2017	580		17,10	

I.4.1. Allongement à la rupture

Les résultats de cet essai montrent que l'allongement à la rupture pour les deux échantillons est supérieur à celui régit par la fiche technique $>300\%$, par ce fait on peut dire que pour les deux cas le matériau reste indemne du coté de cette contrainte.

Puis en comparant les résultats obtenus pour les deux échantillons on constate que l'allongement à la rupture pour 2017 (580%), est supérieur à celui de 2015 (560%). On remarque alors une légère diminution de 20%, en fonction de la durée de stockage.

I.4.2. Résistance à la rupture

Pour cet essai, on observe une diminution importante et identique de la résistance à la traction pour les deux échantillons, par rapport à celle déterminée par la fiche technique du matériau. La résistance à la rupture est passée de 20MPa à 17,10MPa pour les deux échantillons, on déduit alors que la durée de stockage a influé sur cette propriété.

La réduction des propriétés mécaniques est attribuée à l'oxydation du matériau du fait que le PE est l'un des polymères les plus affecté par cette dernière. Et comme, l'oxydation s'accroît en fonction du temps, elle risque d'engendrer des coupures de chaînes du matériau, provoquant ainsi une diminution de la masse moléculaire moyenne et du taux de réticulation, engendrant ainsi une fragilisation du matériau.

D'une manière générale, le comportement mécanique est gouverné par les caractéristiques morphologiques du polymère comme le degré de cristallinité, l'épaisseur des cristallites et le rapport cristal-amorphe.

I.4.3. Dureté Shore D

Etant donné que la dureté de surface soit un bon indicateur caractérisant la dégradation d'un polymère, son étude en fonction de la durée de stockage demeure importante :

Tableau 5. La dureté Shore D de PE/20145 et PE/2017.

Résine	PE/2015	PE/2017
Dureté shore D	53,5	55,8
Fiche technique	55	

- ✚ Pour le matériau de 2017 sa dureté est approximativement demême grandeur que celle de la fiche technique.
- ✚ Pour le matériau de 2015 sa dureté a diminué ce qui signifie que le PE/2015 est devenue élastique.

En comparant ces résultats avec la fiche technique qui est de 55, on constate que la durée et les conditions de stockage de cette résine a fait perdre la ductilité de cette dernière et ce résultat a été aussi constaté dans la mesure l'allongement à la rupture.

I.5.Caractérisation électrique

Dans cette partie, nous présenterons les résultats correspondant à l'évolution des propriétés électriques du PE utilisé comme isolant de câbles de basse et moyenne tension sous l'effet du champ électrique, cette partie est dédiée aux variations du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité relative en fonction de la durée de stockage et de la température. L'étude de la variation de la résistivité transversale et de la rigidité diélectrique en fonction de la durée de stockage a fait l'objet de la seconde partie.

I.5.1. Facteur de pertes diélectriques

La figure 29 illustre l'effet de la durée de stockage sur le facteur de pertes diélectriques, $\text{tg}\delta$, en fonction de la température :

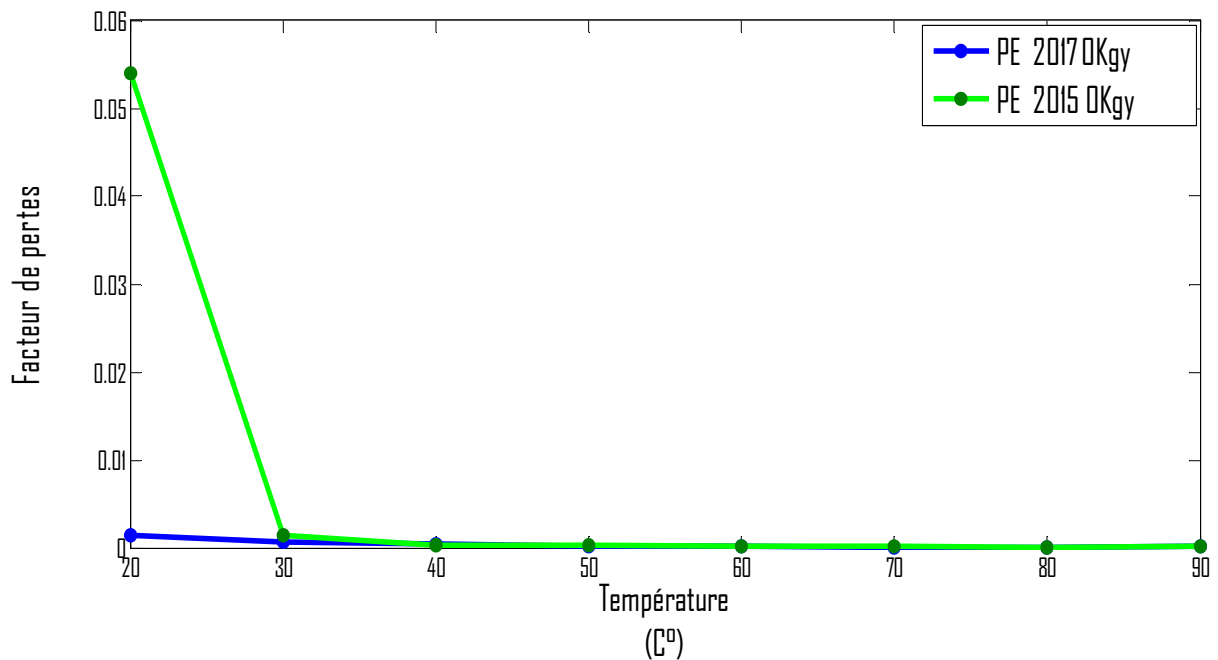


Figure 29. Evolution le facteur de pertes diélectriques du PE/2017 et PE/2015 en fonction de la température.

✚ Dans le cas du PE 2017, les pertes diélectriques sont négligeables de 20°C jusqu'à 90°C qui représente la température de fonctionnement du polyéthylène.

✚ Dans le cas du PE 2015, les pertes diélectriques sont considérables à température ambiante, puis diminue brusquement avec l'élévation de la température jusqu'à 30°C, et à partir de là, les pertes deviennent pratiquement négligeables. Cette diminution est attribuée à l'évacuation de l'humidité emmagasinée dans le matériau lors de son stockage.

On déduit alors que la durée de stockage influe sur le facteur de pertes du matériau, de telle sorte qu'il emmagasine un certain taux d'humidité qui s'évacue sous l'effet de la température.

I.5.2. Permittivité relative

La figure 30, illustre l'effet de la durée de stockage sur la permittivité relative du PE, en fonction de la température.

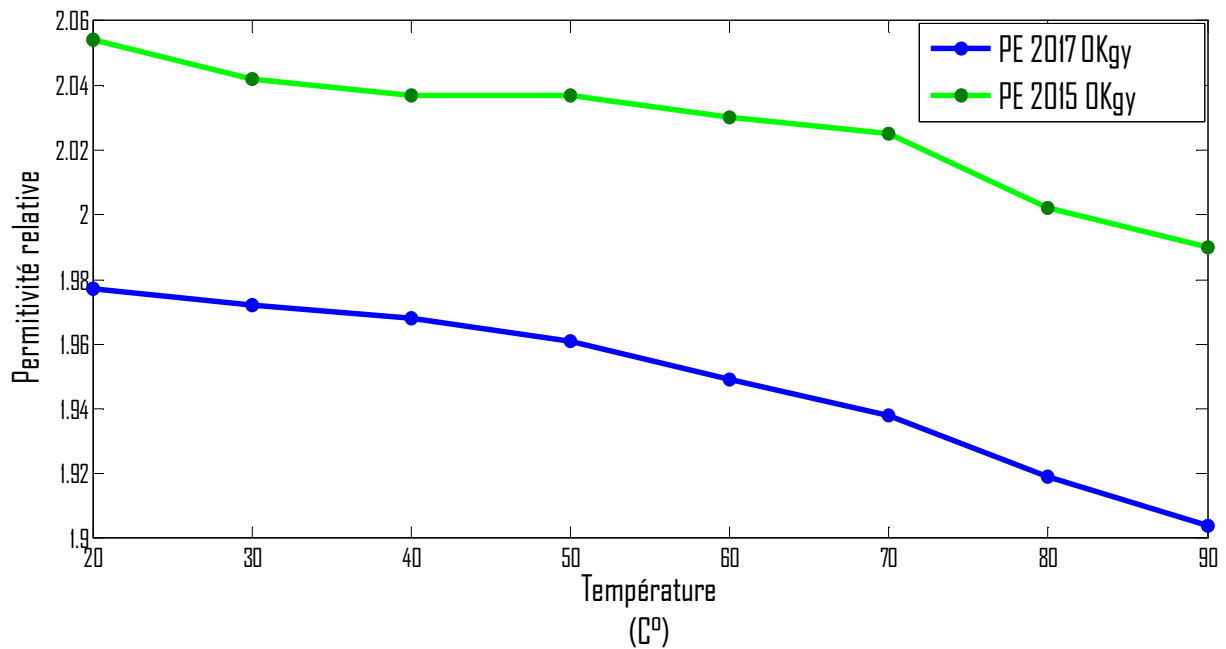


Figure 30. Evolution la permittivité relative du PE/2017 et PE/2015 en fonction de la température.

La figure 30 présente deux allures semblables et décroissantes en fonction de la température tel que :

✚ Pour le PE 2017, la permittivité relative diminue progressivement à partir de 1,98 à température ambiante jusqu'à atteindre 1,9 à 90°C.

✚ Pour le PE 2015, la permittivité relative diminue de la même façon, mais à partir de 2,06 à température ambiante jusqu'à atteindre 1,99 à 90°C.

On déduit que le PE/2015 a une meilleure permittivité relative que celle du PE/2017, vu qu'elle est plus proche de celle donnée par la fiche technique et qui est de 2,3. Cette diminution que nous avons constatée pour les deux allures serait attribuée à la diminution de la densité du matériau à haute température [10].

I.5.3. Résistivité transversale

Le tableau 6, illustre l'évolution de la résistivité transversale en fonction de la durée de stockage.

Résine	PE/2015	PE/ 2017
Résistivité transversale($\Omega.cm$)	$>10^{16}$	$5,44.10^{15}$
Fiche technique ($\Omega.cm$)	$>10^{15}$	

✚ On remarque que la résistivité transversale pour le PE/2015 est nettement supérieure à celle du PE/2017, même qu'elle ne peut pas être mesurée par le Téraohmètre parce que la valeur obtenue dépasse le calibrage maximal de l'appareil.

On déduit alors que l'effet de la durée de stockage influe positivement sur cette propriété vue que le matériau devient plus résistif.

I.5.4. Rigidité diélectrique

Le tableau 7, montre les résultats pour la rigidité diélectrique en fonction de la durée de stockage.

Résine	PE/2015	PE/2017
Rigidité diélectrique (kV/mm)	28,20	36,5
Fiche technique	22	

La rigidité diélectrique du PE/2017 est nettement supérieure à celle du PE/2015, on constate néanmoins que malgré la durée importante du stockage, le matériau a une bonne rigidité diélectrique.

II. Effet des bombardements gamma

Dans cette partie on observe l'effet du bombardement gamma sur les propriétés électriques du PE, sous l'effet du champ électrique, tel qu'en premier lieu on étudie la variation du facteur de pertes diélectriques et de la permittivité relative en fonction de la dose des rayons gamma et de la température, et en second lieu la variation de la résistivité

transversale et de la rigidité diélectrique en fonction de la dose des rayons gamma et cela pour 25 et 50 kGy.

II.1. Facteur de pertes diélectriques

a. PE/2017

La figure 31, illustre l'effet de la dose des rayons gamma sur le facteur de pertes diélectriques du PE/2017, en fonction de la température.

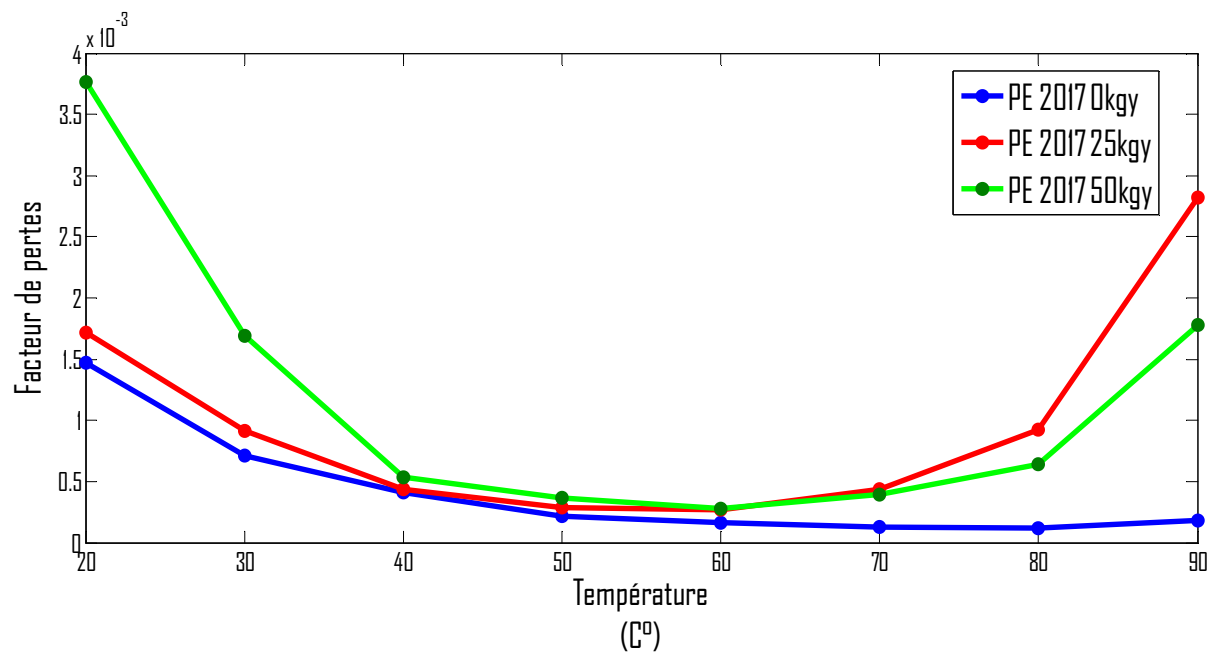


Figure 31. Evolution de facteur de pertes diélectriques du PE/ 2017 bombardé de 0, 25 et 50 kGy en fonction de la température.

On constate d'après les 3 courbes obtenues dans la figure 31, que :

- ✚ Á 0 kGy, le matériau présente moins de pertes et ces pertes diminuent progressivement au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à 80°C où il marque un minimum.

- ✚ Á 25 kGy, on remarque une légère augmentation du facteur de perte, celui-ci présente un minimum à 60°C, tout comme le PE/2017_{50K}.

- ✚ Á 50 kGy, les pertes sont beaucoup plus importantes du fait que le facteur de perte atteint $4 \cdot 10^{-3}$ à température ambiante et diminue ensuite avec l'augmentation de la température.

✚ Dans la première phase où l'on remarque une diminution des pertes diélectriques, cette diminution serait due à l'évacuation de l'humidité emmagasinée dans le matériau, vu que le même phénomène a été observé sur le PVC [37].

✚ Dans la deuxième phase, l'augmentation du facteur de pertes pour les échantillons irradiés serait attribuée d'une part à l'augmentation des pertes ioniques dues à la croissance de la mobilité des porteurs de charges et d'autre part aux pertes dues à l'oxydation et la relaxation des dipôles dans la zone cristalline.

On déduit alors que les pertes diélectriques pour le PE/2017 s'amplifient à mesure que l'on augmente la dose d'irradiation, en revanche les résultats obtenus pour les trois échantillons présentent des valeurs inférieures à la valeur maximale recommandée par la fiche technique : 5×10^{-3} .

b. PE/2015

La figure 32, illustre l'effet des rayons gamma sur le facteur de pertes diélectriques du PE/2015 en fonction de la température.

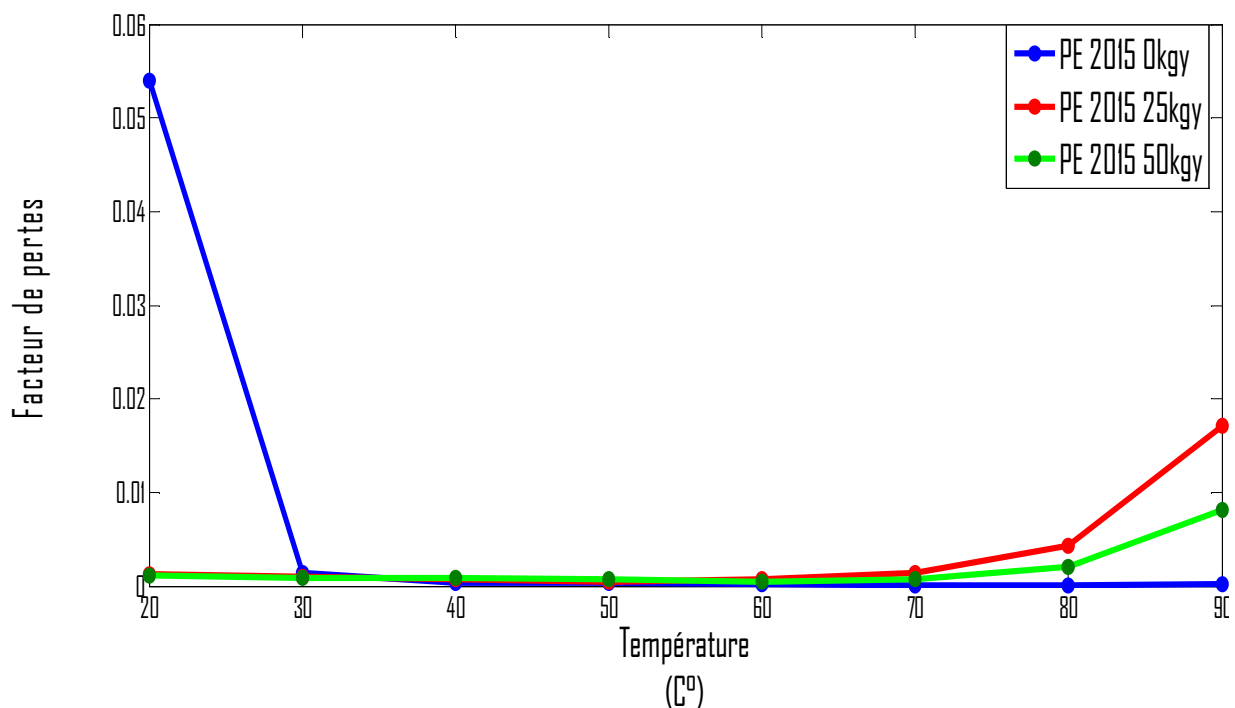


Figure 32. Evolution du facteur de pertes diélectriques du PE/ 2015 bombardé de 0, 25 et 50 kGy en fonction de la température.

✚ A 0 kGy, les pertes diélectriques à température ambiante sont abondantes, puis s'annulent brusquement à 30°C jusqu'à atteindre la température assignée maximale (90°C).

✚ Tandis que pour les deux échantillons bombardés à 25kGy et 50 kGy les pertes sont négligeables jusqu'à ce que la température dépasse les 60°C, c'est là que le matériau se dégrade vu que la valeur du facteur de perte fixée par le fournisseur est dépassée : 5×10^{-3} .

On constate alors que la température de service pour le PE 2015 irradié à 50kGy et 25 kGy ne doivent absolument pas dépasser respectivement les températures suivantes : 60°C et 50°C.

Nous avons ainsi constaté que la température maximale assignée pour les deux états du matériau est de 50°C s'il est irradié à 25kGy et 60°C si la dose est doublée. Ces résultats sont en bon accord avec ceux rapportés à la littérature [13, 40, 41].

II.2. Permittivité relative

La figure 33, illustre l'effet des rayons gamma de 0 à 50 KGy sur la permittivité relative du PE/2017 et du PE/2015 sur les deux figures (a) et (b) respectivement, en fonction de la température

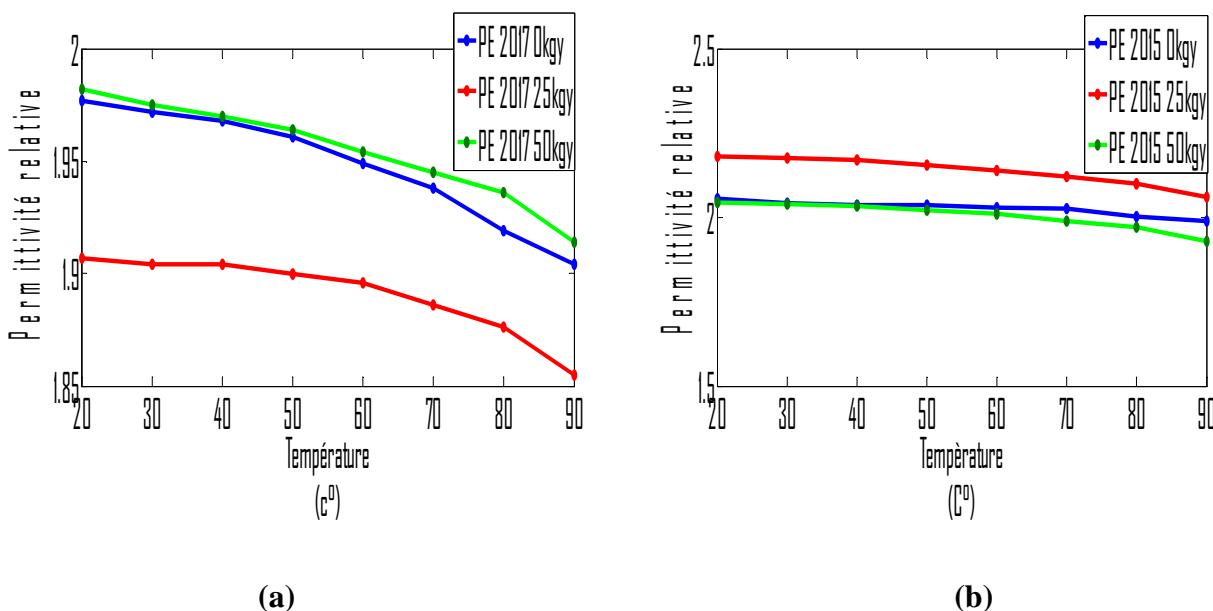


Figure 33. Evolution de la permittivité relative en fonction de la température du PE/2015 (a) et PE/2017 (b) irradié de 0, 25 et 50 kGy.

✚ La permittivité relative diminue en fonction de la température pour les deux matériaux en fonction du taux d'irradiation.

✚ Pour le PE/2017 irradié à 50 kGy, la constante diélectrique est quasiment supérieure à celle de l'échantillon non irradié et celui irradié à 25 kGy qui représente les valeurs les plus basses pour cette propriété.

✚ Pour le PE/2015 irradié à 25 kGy, la constante diélectrique est quasiment supérieure à celle de l'échantillon sans irradiation et celui irradié à 50 kGy qui représente les valeurs les plus basses pour cette propriété.

On constate que lorsque le taux de bombardement est doublé à 50 kGy pour le PE/2017, la constante diélectrique est largement supérieure, à celle du PE/2015, pour lequel l'effet s'inverse.

II.3. Résistivité transversale

Le tableau 8, illustre l'évolution de la résistivité transversale en fonction du bombardement gamma :

Tableau 8. Evolution de la résistivité transversale en fonction de bombardement gamma :

Résine	Résistivité transversale ($\Omega.cm$) A $T^{amb} : 22^{\circ}C$
PE/2015	$> 10^{16}$
PE/2015 /25KGy	$2,65.10^{15}$
PE/2015/50KGy	$7,36.10^{15}$
PE/2017	$5,44.10^{15}$
PE/2017/25KGy	$3,7.10^{14}$
PE/2017 50KGy	$5,6.10^{14}$

✚ La résistivité transversale du PE/2015 et PE/2017 diminue fortement pour une dose de 25 kGy, puis à une dose plus élevée (50 kGy) la résistivité commence à augmenter pour les deux échantillons.

On remarque alors, l'effet d'irradiation tel qu'une dose de 25kGy traduit une diminution de cette propriété électrique tandis qu'une dose plus élevée engendre une augmentation de celle-ci.

II.4. Rigidité diélectrique

Tableau 9. La rigidité diélectrique du PE/2017 et PE/2015 irradié de 0, 25 et 50 kGy.

Résine	La rigidité diélectrique (KV/mm)
PE/2015	28,20
PE/2015/25KGy	26,60
PE/2015/50KGy	39,00
PE/2017	36,50
PE/2017/25KGy	30,3
PE/2017/50KGy	28,51

La rigidité diélectrique du PE/2015 irradié à 25 kGy diminue puis lorsque la dose est doublée, la réponse s'accroît jusqu'à 39 kV/mm, en revanche le PE/2017 montre une nette diminution de la rigidité diélectrique, à fur et à mesure qu'on augmente le taux de bombardement.

Du point de vue rigidité diélectrique, on constate que l'effet du taux de bombardement est positif pour le PE/2015, la rigidité diélectrique augmente pour une dose de 50 kGy, tandis que pour le PE/2017, cette propriété diminue sous l'effet d'irradiation.

Conclusion générale

L'objectif initial de ce travail était, de mettre en évidence l'effet qu'engendre le stockage ainsi que l'exposition aux rayons gamma de 0 à 50 kGy sur le polyéthylène grade câblerie.

Dans le premier chapitre, nous avons donné quelques généralités sur les câbles électriques puis les propriétés diélectriques des isolants solides et les contraintes que rencontrent ces derniers au cours de leur emploi. Ensuite, nous avons parlé des phénomènes intervenant dans les matériaux isolants soumis au champ électrique, à savoir les différents mécanismes de claquage des isolants électriques.

Dans le second chapitre, nous avons parlé des polymères isolants qui présentent d'excellentes propriétés isolantes, visant à répondre aux exigences techniques de l'isolation des câbles électriques. Comme on retrouve aussi la présentation du matériau étudié, ses différents types, sa composition et ses propriétés (physico-chimiques, mécaniques et diélectriques).

La présentation des techniques expérimentales a fait l'objet du troisième chapitre. Nous avons d'abord présenté le matériau étudié et le mode opératoire pour sa mise en œuvre sous forme de plaques. Ensuite, nous avons évoqué le protocole expérimental utilisé pour la caractérisation électrique, mécanique, physico-chimique du PE.

Enfin au quatrième chapitre, nous avons discuté de l'évolution des propriétés du PE et mieux cerné l'influence de la durée de stockage ainsi que la dose de rayonnement gamma sur le Polyéthylène.

En effet, nous avons démontré que le stockage réduit l'allongement à la rupture et la dureté Shore D, ainsi que la densité du PE, tandis que sa morphologie bonifie avec le temps, ce qui signifie que le PE perd son élasticité avec le temps par effet de réticulation et scission de chaînes qui induit la migration de de son plastifiant. Concernant les propriétés diélectriques du matériau, nous observons une nette amélioration de la résistivité transversale et de la permittivité du matériau, contrairement à la rigidité diélectrique qui s'amointrit, nous avons ainsi constaté que le PE emmagasine un certain taux d'humidité au cours du stockage induisant une augmentation des pertes diélectriques.

Il ressort de nos résultats que l'exposition du PE/2017 aux rayonnements gamma engendre une forte augmentation des pertes diélectriques, tandis que le PE/2015 présente moins de pertes, ce qui revient à dire que le PE/2017 est plus sensible à ces rayonnements.

Concernant la permittivité pour le PE irradié aux rayons, on constate qu'elle diminue sous l'effet de la température, néanmoins elle est élevée à une dose de rayonnement de 50 kGy pour le PE/2017, tandis que pour le PE/2015 sa valeur maximale est obtenue pour une dose de 25 kGy.

Le suivi de l'évolution de la résistivité transversale et de la rigidité diélectrique en fonction de la dose d'irradiation a montré que ces caractéristiques se dégradent pour une dose de 25 kGy, puis s'améliore en élevant cette dernière à 50 kGy.

Pour conclure on estime que le stockage du PE n'est pas synonyme de dégradation, bien qu'il soit sensible à l'oxydation, il a une excellente stabilité de stockage, du fait qu'on retrouve certains aspects améliorés pour ce matériau. Par contre les propriétés du PE dont il est susceptible de perdre, peuvent être améliorés avec l'irradiation aux rayons gamma, à une dose de 50 kGy. Si ce matériau est destiné pour l'isolation des câbles électriques d'une centrale nucléaire la température de service ne doit pas dépasser 60°C.

La récupération de la résine de polyéthylène après l'avoir irradiée à une dose élevée dépassant les 50 kGy permet de diminuer l'impact environnemental et ce en évitant de jeter les stocks de PE périmés.

Perspective

On peut compliquer ce travail en proposant l'étude de l'effet de stockage et d'irradiation gamma sur les propriétés diélectriques du Polyéthylène réticulé utilisé dans l'isolation des câbles électriques.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] N.LAHOUD, « Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contraintes électriques, application à la fiabilité des matériaux », Thèse Doctorat, Université de Toulouse III, 2009.
- [2] B.PINEL, F.DUCHATEAU, « Matériaux isolants en électrotechnique », Techniques de l'ingénieur, Rubrique fonction isolation dans les matériels électriques, D 2302, 1999.
- [3] M.TALEB, « Phénomènes aux interfaces des isolants. Mesure et simulation », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, 2011.
- [4] ELANDCABLES, « Câbles moyenne tension », disponible sur : <https://www.elandcables.com/fr/>.
- [5] NEXAN, « Câbles de réseau basse tension », disponible sur : [https://www.nexans.ch/Switzerland/group/doc/en/NX-%20BT%20\(F\).pdf](https://www.nexans.ch/Switzerland/group/doc/en/NX-%20BT%20(F).pdf).
- [6] M-A. DOUAR, « Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques Haute Tension », Thèse Doctorat, Ecole Doctorale ELN, ETH, AUT, Lyon, 2014.
- [7] S.CHAIBI, « Contribution à la modélisation des propriétés électriques des matériaux polymères utilisés dans l'isolation des câbles HT et MT », Projet de Fin d'Etudes, ENP D'Alger, 2007.
- [8] P.ROBERT, « Traité d'électricité Matériaux de l'électrotechnique », 3ème Edition ISBN, Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1999.
- [9] J-M.BUREAU, « Propriétés diélectriques des polymères », Technique de l'ingénieur, E1850 V4, 2016.
- [10] L.BOUKEZZI, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse Doctorat, ENP, Alger, 2007.
- [11] M-A. HEDIR, « Effets des contraintes électriques et des paramètres environnementaux sur les propriétés diélectriques des isolants », Thèse Doctorat, UMMTO, 2017.
- [12] I.BEN SAIDJ, « Simulation de la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène », Mémoire de Magister, UMMTO, 2017.
- [13] V.VASCONCELOS, M. SENNE JR, « Changes in mechanical properties due to gamma irradiation of high-density polyethylene », Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2007.
- [14] R. FOURNIE, « Les isolants en électrotechnique, concepts et théories », Editions Eyrolles, 1986.

Bibliographie

[15] D. BOUGUEDAD, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère », Thèse de doctorat, UMMTO, 2010.

[16] M-B. KEYROUZ, « Etude des matériaux isolants d'encapsulation pour la montée en température des modules de puissance haute tension », Thèse Doctorat, Université de Toulouse, 2011.

[17] O. LAVOISY, « Bakélite », Encyclopaedia Universalis.

[18] Y-N. RAVACHE, « La polymérisation : les méthodes de polymérisation et applications », Futura Sciences, Vulgarisation les polymères synthétiques, 2015.

[21] SURPRISES, « Les isolants solides », disponible sur : www.surprises.ch/HT/annexes.

[22] LICENCE-ALIPACK, « Les emballages plastiques », 2015, disponible sur : <http://licencealipack.e-monsite.com/blog/les-emballages-plastiques.html>.

[23] P. MARECHAL, « Polyéthylène basse densité PE-BD », Technique de l'ingénieur, publication AM3310, V1, 2011.

[24] R. DOSSOGNE, « Polyéthylène haute densité PE-HD », Technique de l'ingénieur, publication A3315, V3, 1996.

[25] N. SCHULTZ, « Comparaison entre les polyéthylènes hauts et basse densité PEhd et PEbd », Université Strasbourg France, 2000.

[26] I. MKACHER, « Vieillissement thermique des gaines PE et PVC de câbles électriques », Thèse Doctorat, Sciences de l'ingénieur Arts et Métiers, ParisTech, 2012.

[27] Norme CEI 60811, « Détermination des propriétés mécanique des mélanges pour les enveloppes isolantes et les gaines », 2012.

[28] Norme ISO 62-2008, « Détermination de l'absorption d'eau », 2008.

[29] Norme ISO 868, « Détermination de la dureté par pénétration au moyen d'un duromètre (dureté Shore) », 2003.

[30] Norme CEI 60093, « Méthodes pour la mesure de la résistivité transversale et de la résistivité superficielle des matériaux isolants électriques solides », 1980.

[31] Norme CEI 60243-1, « Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai », 1998.

[33] Norme CEI 62631-1, « Détermination des Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides », 2011.

[34] 2830/2831, « Precision Oil and Solid Dielectric Analyzer: operating instructions », 2012.

[35] VDE 0303-2, « Tension disruptive et rigidité diélectrique », 1974.

Bibliographie

- [36] Norme CEI 60296, « Fluides pour applications électrotechniques », 2012.
- [37] Norme ISO/R 1183/F, « La masse volumique et la densité relative des matières plastiques à l'extrusion des plastiques alvéolaires », 1970.
- [38] M-A. DOUAR, « Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques Haute Tension », Thèse Doctorat, Ecole Doctorale ELN, ETH, AUT, Lyon, 2014.
- [39] M. DOLE, « The radiation chemistry of macromolecules », I and II Academic Press, 1972, 1973.
- [40] A. CHAPIRO, « L'utilisation des rayonnements dans l'industrie », Les Cahiers du MURS n°11, Paris, 1988.
- [41] J. SILVERMAN, « Application of radiation techniques in industry », Laboratory for Radiation and Polymer Science, University of Maryland, Etats-Unis.
- [42] O. ALBENGE, « Les matériaux à la page », disponible sur :
http://olivier.albenge.pagesperso-orange.fr/page_site/Site_mat/polym/polym.htm
- [43] M. LABROSSE, « Plastiques, essais normalisés ; essais physico-chimiques généraux », Technique de l'ingénieur, A 3520, pp. 1-3, 1995.
- [44] Norme ISO/R 1183/F, « La masse volumique et la densité relative des matières plastiques à l'extrusion des plastiques alvéolaires », 1970.

Bibliographie

Annexes



Annexe 1. Attestation de participation au séminaire « journée de restitution et lancement du projet socio-économique » au CRTSE.



Annexe 2. Attestation de participation au séminaire « journée de restitution et lancement du projet socio-économique » au CRTSE.

Résumé :

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence du stockage et des irradiations gamma sur les caractéristiques du PE utilisé autant qu'isolant de câbles électriques en moyenne tension(MT). En effet, une caractérisation mécanique et physique a été effectuée en plus de la caractérisation électrique qui concerne le suivi de l'évolution du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité relative et de la résistivité transversale. Les résultats que nous avons obtenus pour le PE datant de 2015 ont été comparés à ceux obtenus pour le PE produit en 2017, cela en fonction de la température et de la dose de rayonnement γ . Les résultats obtenus au cours de ce travail ont montré que les deux paramètres étudiés simulent, à des degrés différents, les propriétés du PE.

Mots-clés: Polyéthylène (PE), Isolation, Stockage, irradiation γ , Propriétés électriques, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques

Abstract:

The aim of this work is the study of the influence of storage and gamma irradiation on the characteristics of PE, used as insulators of medium voltage (MT) electrical cables. Indeed, a mechanical and physical characterization has been carried out in addition to the electrical characterization which concerns the monitoring of the evolution of the dielectric loss factor, the relative permittivity and the transverse resistance. The results we obtained for the PE from 2015 were compared to those obtained for the PE produced in 2017, depending on the temperature and the radiation dose. The results that we got during this work showed that the two parameters studied simulate, to different degrees, the properties of PE.

Keywords : Polyethylene (PE), Isolation, Storage, γ Irradiation, Electrical properties, Mechanical properties, Physical properties