

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

*Présenté par*

**Karim MEDJOUB**

Thème

# Influence de la température et des rayons UV sur les isolants électriques.

*Mémoire soutenu publiquement le 26/06/ 2024 devant le jury composé de :*

**M Azzouz MIOUAT**

MAA, UMMTO, President

**M. Abdallah HEDIR**

MCA, UMMTO, Encadrant

**M Ferhat SLIMANI**

MCB, UMMTO, Examineur

A decorative border of red hearts with black outlines and small black bows at the bottom, arranged in a continuous line around the page.

## *Remerciements*

*Mes vifs remerciements vont à mon promoteur, M Abdallah HEDIR , pour ses précieux conseils, recommandations et encouragements tout au long de l'année. Que les membres du jury trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance pour avoir bien voulu juger notre travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents, qui ont tant sacrifié dans leur vie pour me garantir une éducation et un avenir. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon respect et de ma profonde reconnaissance.*

*Mes sincères remerciements vont à mes sœurs et à mon frère pour leur inestimable soutien moral et pour tous les bons moments partagés avec eux cette année.*

*Je tiens aussi à remercier tous mes amies, pour leur soutien et leur aide lors des différentes étapes de la réalisation de ce travail*

## **Résumé :**

Le présent mémoire s'intéresse à l'analyse de l'impact de la température et des rayons ultraviolets (UV) sur les isolants électriques.

Malgré leurs utilisations répandues dans diverses applications, les isolants électriques sont sujets à des altérations et des dégradations influencées par des facteurs environnementaux tels que la température et l'exposition aux rayons UV. L'objectif principal de cette étude est de comprendre comment ces facteurs affectent les propriétés et la durabilité des isolants électriques dans des conditions réelles. Des méthodes expérimentales ont été utilisées pour examiner les variations des propriétés électriques, chimique et structurales des isolants après exposition à des températures élevées et à une exposition prolongée aux rayons UV. Les résultats obtenus fournissent des informations pour améliorer la conception et la durabilité des isolants électriques dans des environnements variés, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans le domaine de l'ingénierie électrique.

## **Abstract:**

This thesis focuses on analyzing the impact of temperature and ultraviolet (UV) radiation on electrical insulators. Despite their widespread use in various applications, electrical insulators are prone to alterations and degradation influenced by environmental factors such as temperature and UV exposure. The primary objective of this study is to understand how these factors affect the properties and durability of electrical insulators under real-world conditions. Experimental methods were employed to examine the variations in electrical, chemical, and structural properties of insulators after exposure to high temperatures and prolonged UV radiation. The results provide valuable insights for improving the design and durability of electrical insulators in diverse environments, thereby opening new perspectives in the fields of electrical engineering .

## *Table des matières*

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les isolants électriques</b>	
I. Introduction .....	2
II. Types d'isolants .....	2
II.1 Les Isolants liquides .....	2
II.1.1 Huiles minérales .....	3
II.1.2 Huiles synthétiques .....	3
II.1.3 Vernis .....	3
II.2 Isolants gazeux .....	3
II.2.1 Classification .....	3
II.2.2 Propriétés et caractéristiques .....	4
II.3 Isolants solides .....	5
II.3.1 Les polymères .....	6
II.3.1.1 Définition .....	6
II.3.1.2 Nature chimique des polymères .....	7
II.3.1.3 Structure moléculaire des polymères .....	7
II.3.1.4 Les types des polymères .....	8
III. Caractéristiques diélectriques des isolants .....	10
III.1 La résistivité .....	10
III.2 La permittivité relative .....	10
III.3 La rigidité diélectrique .....	11
III.4 Le facteur de pertes diélectriques .....	12
IV. Présentation du polyéthylène d'étude (PRC) .....	13
IV.1 Câble isolé par le PRC .....	13
IV.2 Méthodes de réticulation du polyéthylène .....	14
IV.3 Procédés de fabrication des câbles isolés au PRC .....	17

---

V. Conclusion .....	20
Bibliographie du chapitres I.....	21
<b>Chapitre II : Effets de la température et des rayons UV sur les propriétés des polymères</b>	
I. Introduction .....	20
II. Effets de la température sur les propriétés des polymères .....	20
II.1 Vieillessement physique .....	20
II.1.1 Modification de la morphologie .....	20
II.1.2 Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif .....	21
II.1.3 Chocs thermiques .....	21
II.1.4 Phénomènes de transport.....	21
II.1.4.1 Pénétration des solvants : .....	21
II.1.4.2 Perte d'adjuvants .....	22
II.2 Vieillessement chimique .....	23
II.2.1 Oxydation .....	23
II.2.2 Réticulation .....	24
II.2.3 Dépolymérisation .....	25
II.2.4 Coupure de chaînes statistiques.....	25
II.3 Résistance à la chaleur des matériaux isolants solides.....	25
II.3.1 Principe de la détermination de la résistance thermique des isolants solides .....	26
II.3.2 Choix des températures de vieillessement .....	27
II.3.3 Durée de vie .....	28
II.3.4 Vitesse de dégradation .....	28
III. Effets des rayons UV sur les propriétés des polymères .....	29
III.1 Les rayons ultraviolets .....	29
III.2 Source de rayonnement UV .....	29
III.2.1 Les rayons solaires .....	29
III.2.2 Autres sources de rayonnement UV .....	30
III.3 Effet des rayons Ultraviolets sur les polymères.....	30
III.3.1 La Photo-dégradation.....	31
III.3.1.1 Définition .....	31

III.3.1.2 Facteurs provoquant la photo-dégradation.....	31
III.3.2 La Photo-oxydation.....	32
III.3.2.1 Principe fondamental .....	32
III.3.2.2 Mécanisme de coupure de chaines.....	34
III.3.2.3 Réticulation .....	35
III.3.2.4 Effet de la photo-oxydation sur les propriétés des polymères .....	35
IV. Conclusion .....	36
Bibliographie du chapitre II.....	37
<b>Chapitre III : Techniques expérimentales</b>	
I. Introduction .....	37
II. Polyéthylène Borlink™ LS4201R .....	37
II.1 Description .....	37
II.2 Propriétés électriques .....	37
III. Préparation des échantillons .....	37
IV. Dispositifs expérimentaux .....	38
IV.1 Vieillessement thermique .....	38
IV.2 Intégration de source UV dans l'étuve .....	39
IV.3 Caractérisation diélectrique .....	40
IV.3.1 Permittivité relative .....	40
IV.3.2 Indice de pertes diélectriques.....	40
V. Caractérisation chimique .....	41
V.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) .....	41
VI. Conclusion .....	41
Bibliographie du chapitre III.....	42

**Chapitre IV : Résultats et discussions**

I. Introduction .....	43
II. Caractérisation diélectrique.....	43
II.1 La permittivité relative .....	43
II.2 Facteur de pertes diélectriques .....	44
II.3 L'indice de pertes diélectriques.....	46
III. Caractérisation chimique .....	47
III.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) .....	47
IV. Conclusion .....	51
Bibliographie du chapitre IV .....	52
Conclusion générale.....	55

## *Liste des figures*

<b>Figure I-1</b> : Constitution de la molécule de (SF <sub>6</sub> ). .....	5
<b>Figure I-2</b> : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère [3] .....	6
<b>Figure I-3</b> : Représentation schématique d'un polymère thermoplastique .....	9
<b>Figure I-4</b> : Échelle des résistivités de quelques matériaux [8].....	10
<b>Figure I-5</b> : Tension de claquage de quelques polymères (épaisseur e= 3 mm) .....	12
<b>Figure I-6</b> : Schéma équivalent d'un condensateur [8] .....	12
<b>Figure I-7</b> : Angle de perte .....	13
<b>Figure I-8</b> : Représentation d'un câble de transport d'énergie électrique .....	14
<b>Figure I-9</b> : Processus de réticulation : (a) polymère linéaire (b) polymère tridimensionnel. ....	17
<b>Figure II-1</b> : Durée de vie en fonction de la contrainte appliquée .....	26
<b>Figure II-2</b> : Variation de p en fonction du vieillissement pour différentes température T.....	27
<b>Figure II-3</b> : Variation de log(t) en fonction de l'inverse de la température absolue T.....	27
<b>Figure II-4</b> : Spectre de la lumière .....	29
<b>Figure II-5</b> : Promotion d'une molécule à l'état excité pas l'absorption d'un photon.....	32
<b>Figure II-6</b> : Principe d'un transfert d'énergie .....	33
<b>Figure II-7</b> : Processus de coupures de chaines macromoléculaires. ....	35
<b>Figure II-8</b> : Processus de réticulation de chaines .....	35
<b>Figure III-1</b> : Éprouvettes sous forme carrée avant le vieillissement .....	38
<b>Figure III-2</b> : Vue de l'étuve utilisée pour le vieillissement thermique.....	38
<b>Figure III-3</b> : Lampe de la marque Sylvania.....	39
<b>Figure III-4</b> : Exposition des échantillons au vieillissement combiné (radio thermique).....	40
<b>Figure IV-1</b> : Variation de la permittivité relative en fonction du temps de vieillissement.....	44
<b>Figure IV-2</b> : variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence.....	44
<b>Figure IV-3</b> : variation du Facteur de pertes diélectriques en fonction de temps de vieillissement	45
<b>Figure IV-4</b> : variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence .....	45
<b>Figure IV-5</b> : variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de temps de vieillissement	46
<b>Figure IV-6</b> : variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la fréquence .....	47
<b>Figure IV-7</b> : Spectres infrarouges du PRC avant vieillissement.....	49
<b>Figure IV-8</b> : Spectres infrarouges du PRC avant et après 120 et 240 heures de vieillissement .....	49
<b>Figure IV-9</b> : L'indice carbonyle et L'indice de double bande (DBI) en fonction du temps de vieillissement.....	50

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I-1</b> : Nomenclature des principaux gaz isolants utilisés ou susceptibles d'être utilisés en électrotechnique. ....	4
<b>Tableau II-1</b> : Longueurs d'ondes et énergies des photons pour chaque bande UV. ....	29
<b>Tableau III-1</b> : Propriétés électrique du polyéthylène Borlink™ LS4201R .....	37

### *Introduction générale*

L'avènement de l'ingénierie électrique moderne a vu l'utilisation croissante d'une vaste gamme de matériaux isolants dans diverses applications. Cependant, ces isolants essentiels sont constamment confrontés à des conditions environnementales rigoureuses, notamment des variations de température et une exposition prolongée aux rayons ultraviolets (UV). Ces facteurs environnementaux ont un impact significatif sur les propriétés et la durabilité des isolants électriques, suscitant des préoccupations majeures quant à leur fiabilité et à leurs performances à long terme.

Le présent mémoire se concentre sur l'analyse approfondie de l'impact de la température et des rayons UV sur les isolants électriques, avec pour objectif de comprendre en détail les mécanismes sous-jacents de dégradation induits par ces facteurs.

Le premier chapitre se penche sur les généralités relatives aux isolants, mettant en évidence leurs caractéristiques diélectriques et examinant les diverses familles et constituants de polymères largement utilisés dans ce domaine.

Le deuxième chapitre examine spécifiquement les impacts de la température et des rayons UV sur les propriétés physiques, électriques et structurelles des isolants électriques. Il met en lumière les réponses des matériaux isolants face à ces contraintes environnementales et explore les changements induits dans leurs caractéristiques clés.

Dans le troisième chapitre, nous aborderons les différentes méthodes de vieillissement utilisées pour étudier les effets de la température et des rayons UV sur les isolants. Nous mettrons en évidence l'importance de ces méthodes pour évaluer avec précision la durabilité des matériaux isolants dans des conditions réelles.

Le dernier chapitre sera dédié à la présentation détaillée des essais menés, des résultats obtenus et des discussions sur ces résultats.

Enfin, le mémoire se conclura par une synthèse générale soulignant les découvertes clés et les implications pour l'avenir de la conception et de la fabrication d'isolants électriques résilients face aux contraintes de température et aux rayons UV.

*Chapitre I : Généralités sur les  
isolants électriques*

## I. Introduction

Les matériaux isolants ou diélectriques sont connus pour leur résistivité élevée, ce qui se traduit par une faible conductivité électrique en raison de la présence limitée d'électrons libres. L'évaluation d'un isolant repose sur un examen approfondi de ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un isolant de qualité est caractérisé par son incapacité à conduire un courant sous de faibles tensions, sauf en cas d'exposition à des facteurs externes susceptibles d'altérer ses propriétés diélectriques.

Parmi les différents isolants utilisés en isolation électrique on peut citer le verre, la céramique ainsi que les diélectriques fluides...

Les isolants sont utilisés pour :

- Assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés protection des personnes et des équipements.
- Supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre.
- Remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur [1].

## II. Types d'isolants

Selon leur état, les isolants peuvent être classés en isolants liquides, solides ou gazeux. Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrons spécifiquement sur les isolants solides et gazeux, ainsi que sur les interactions au sein de leurs interfaces.

### II.1 Les Isolants liquides

Les isolants liquides jouent un rôle essentiel dans l'isolation des machines électriques, en plus de leur fonction principale d'isolation, ils contribuent également au processus de refroidissement. Parmi eux, l'huile minérale est l'un des isolants les plus couramment utilisés dans les équipements électriques tels que les transformateurs de grande puissance et les condensateurs. Toutefois, il convient de noter que ces huiles minérales sont inflammables à des températures proches de 150°C.

Pour pallier ce problème d'inflammabilité, certains isolants liquides synthétiques fabriqués à base d'hydrogène chloré, ainsi que ceux à base de silicone dérivés d'huiles organiques, sont utilisés, bien que leur coût soit relativement plus élevé.

### II.1.1 Huiles minérales

L'huile minérale est produite à partir de pétrole brut par distillation, utilisé pour l'isolation et refroidissement de transformateurs, extinction d'arcs électriques, câbles, câbles à huile, diélectriques pour condensateurs, il présente le risque d'incendie. Elle est caractérisée par :

- La rigidité diélectrique :  $E_c = 9 \text{ à } 10 \text{ kV/mm}$
- Le facteur de dissipation :  $\tan \delta = 4.10^{-4}$
- La permittivité relative :  $\epsilon_r = 4 \text{ à } 6$ .

### II.1.2 Huiles synthétiques

Ininflammables (pas de risque d'incendies), employé dans les transformateurs et les disjoncteurs de puissance comme les huiles chlorées, les huiles silicones (résistent à des températures élevées).

### II.1.3 Vernis

Ce sont des associations résine + solvant + siccatif, utilisés pour l'imprégnation des bobinages des machines électriques.

## II.2 Isolants gazeux

L'air et les gaz secs, considérés comme de bons isolants, sont dotés des propriétés suivantes :

- Rigidité diélectrique variable suivant la nature du gaz;
- Permittivité faible, les gaz sont auto-générateurs;
- Phénomène d'ionisation des gaz;
- Légers et inflammables.

### II.2.1 Classification

Les diélectriques ou les isolateurs de gaz sont largement utilisés dans les équipements électriques et les plus importants de ces gaz utilisés sont :

- L'air
- L'azote
- L'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ )
- L'hydrogène

**Tableau II-1** : Nomenclature des principaux gaz isolants utilisés ou susceptibles d'être utilisés en électrotechnique[8].

<b>Hydrogène</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	Isolant des alternateurs
<b>Azote</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	Générateur HT, condensateurs, diviseurs HT
<b>Dioxyde de carbone</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	Quelque générateur HT
<b>Air</b>	<b>N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub></b>	Ligne aérienne, machines, disjoncteurs
<b>Hexafluorure de soufre ligne</b>	<b>SF<sub>6</sub></b>	Disjoncteurs, transformateurs, émetteurs de puissance ligne HT, générateur THT
<b>Hexafluorure de soufre + azote</b>	<b>SF<sub>6</sub> + N<sub>2</sub></b>	Générateur THT, disjoncteurs

## II.2.2 Propriétés et caractéristiques

- **L'air**

Les composantes de l'air sont : l'oxygène(O<sub>2</sub>), le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), et l'azote(N<sub>2</sub>).

- L'oxygène : 21%, incolore, inodore, non toxique.
- Le gaz carbonique : incolore, inodore, faiblement toxique.
- La conductivité thermique à 0°C : 23,547\*10<sup>-3</sup> w/m.k.
- L'air est utilisé dans l'isolation : les lignes aériennes, transformateur, disjoncteurs.

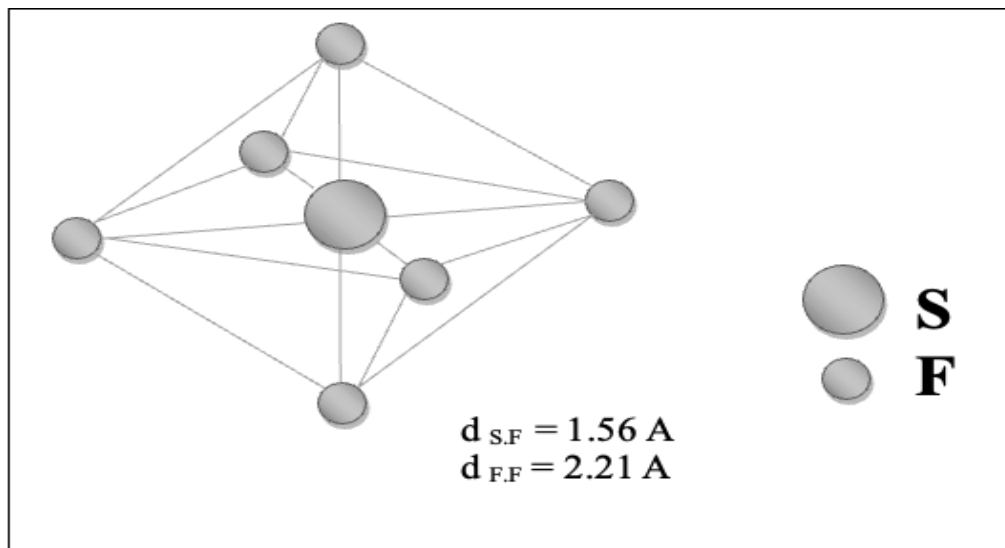
- **L'hexafluorure de soufre**

Découvert par Maison et Lebeau en 1900, et fabriqué industriellement aux états unis par synthèse du soufre et du fluor.

Il est chimiquement inerte, inodore, incolore et incombustible, c'est un gaz lourd sa masse spécifique 6.14 g/dm<sup>3</sup> dans les conditions normales.

- Sa rigidité diélectrique est égale 3 fois celle de l'air à pression atmosphérique.
- Conductivité thermique (0°C et 1.013 bar) : 12.58mw/m.k.

- Domaine d'utilisation : disjoncteur, poteaux blindés, transformateurs, câble électrique.



**Figure II-1 :** Constitution de la molécule de (SF<sub>6</sub>).

- **L'azote**

L'azote N<sub>2</sub> n'est pas un gaz électronégatif comme le SF<sub>6</sub> (pas de processus d'attachement).

L'azote se trouve principalement dans l'atmosphère. En effet, il représente en volume 78,08 % de l'air que nous respirons. A pression atmosphère, pour des températures inférieures à -196 °C, c'est un liquide incolore, un peu plus léger que l'eau.

- Incolore, inodore, absolument inoffensif ;
- Rigidité diélectrique : 1 ;
- L'azote est utilisé pour les générateurs HT, les conducteurs, diviseur HT ;

### II.3 Isolants solides

Le rôle principal des isolants solides consiste à entraver le passage du courant électrique, tout en assurant le maintien mécanique des conducteurs dans des conditions spécifiques, comme dans le cas des isolateurs de lignes électriques. L'utilisation de ces isolants varie en fonction des besoins. Dans certaines applications, une quantité minimale d'isolants solides est utilisée, comme c'est le cas pour les lignes aériennes à conducteurs nus. Cependant, pour réduire l'encombrement des systèmes électriques, les conducteurs sont rapprochés, ce qui nécessite une isolation plus importante et une fixation rigide pour éviter tout contact dû à leur propre poids, à des déformations ou à des forces externes.

Les isolants solides peuvent être utilisés seuls, comme dans les câbles à isolation synthétique extrudée, en association avec plusieurs matériaux solides, tels que les enroulements réalisés en fil émaillé imprégné de résine thermodurcissable, ou en combinaison avec un isolant liquide, comme

dans le cas de l'isolation en papier imprégné d'huile minérale pour les transformateurs haute tension.

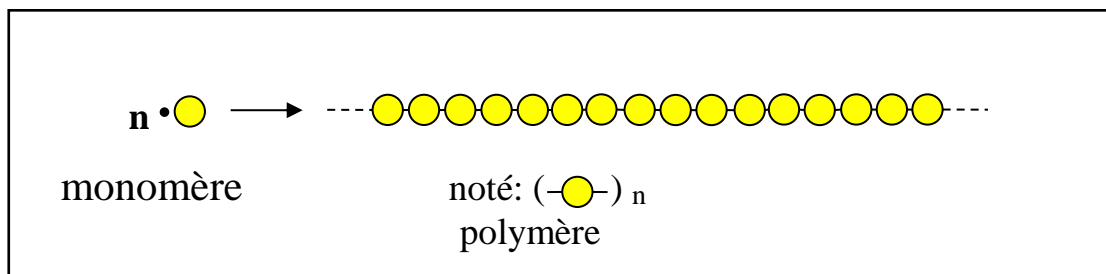
Pour garantir l'isolation des divers systèmes électriques, une variété d'isolants solides tels que le verre, la porcelaine, les matériaux composites, etc., sont utilisés. Parmi ceux-ci, l'accent est mis sur les polymères qui présentent des propriétés physicochimiques supérieures, telles que l'hydrophobicité, par rapport au verre ou à la porcelaine [2].

## II.3.1 Les polymères

### II.3.1.1 Définition

Le terme polymère (du grec polus qui signifie « nombreux, plusieurs » et mēros qui signifie « unité, partie ») ; qui regroupe tout matériau formé par la répétition d'un très grand nombre  $n$  de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui liés entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes) sachent que le monomère est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactives à ses extrémités)[3].

L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation. La réaction de polymérisation est également utilisée par les organismes vivants [3].



**Figure II-2:** Modèle schématique de la synthèse d'un polymère [3]

Le terme " $n$ " est dénommé "degré de polymérisation" ou "indice de polymérisation". Lorsque  $n$  est élevé ( $n > 100$ ), les macromolécules sont généralement désignées ainsi. La plupart des macromolécules synthétiques ont une structure similaire, se présentant sous forme de fils longs et souples.

Un polymère peut être caractérisé par son degré de polymérisation ou sa masse moléculaire, qui représente le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule.

La polymérisation fait référence à la réaction chimique de production de macromolécules. Lorsque le degré de polymérisation (DP) est inférieur à 30, il s'agit d'un oligomère, tandis que

lorsqu'il est supérieur à 30, il s'agit d'un polymère [3].

### II.3.1.2 Nature chimique des polymères

Les polymères peuvent être classés selon leur structure chimique et selon la variation de leur permittivité en fonction de la température et de la fréquence, en polymères polaires et apolaires.

#### - Les polymères polaires

Les polymères polaires possèdent dans leurs molécules des atomes (généralement électro-négatifs tels que (F, Cl, O, N) qui, fournissent des dipôles. Ils ont une permittivité élevée (3.5 à 10) et un indice de perte élevé ( $10^{-2}$  à 1) [4].

#### - Les polymères apolaires

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

### II.3.1.3 Structure moléculaire des polymères[8]

La structure fait référence à l'arrangement des atomes, des unités monomères et des chaînes, de sorte que la désignation de chaque structure est essentielle pour la spécifier. Le produit obtenu par la polymérisation directe d'un monomère est appelé homopolymère, avec sa molécule ne comportant qu'un seul motif élémentaire, comme suit :



Structure moléculaire d'une homopolaire

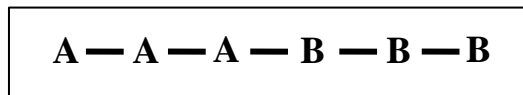
On peut également produire des copolymères par polymérisation, en utilisant plusieurs monomères de base, ou par greffage à partir d'un polymère auquel se lient d'autres chaînes polymériques. De manière schématique, les copolymères peuvent être élaborés à partir de mélanges de monomères :

- Structure aléatoire : (la plus courante)[5].



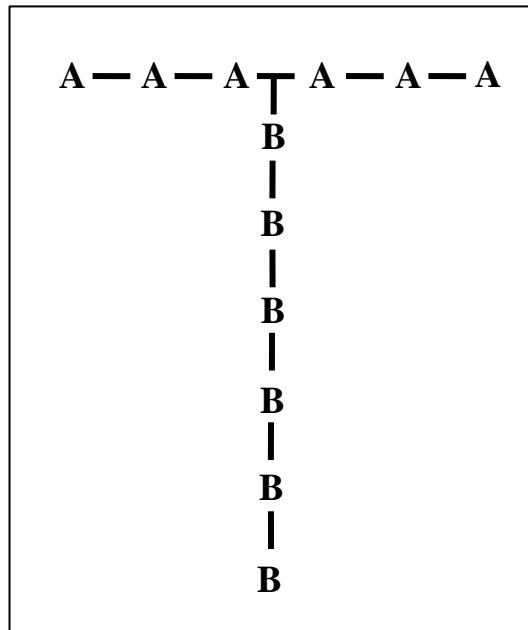
Structure aléatoire d'un copolymère

- Structure séquencée : (alternance)



Structure séquencée d'un copolymère

- Structure greffée : (ramification)



Structure greffée d'un copolymère

### II.3.1.4 Les types des polymères

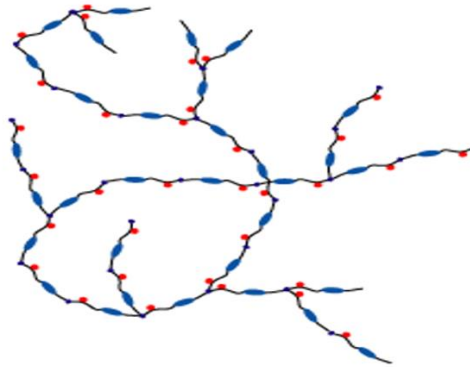
Il existe une vaste gamme de polymères utilisés dans l'industrie, tels que les peintures, les caoutchoucs, les plastiques, les fibres synthétiques, le papier, et bien d'autres. Ils sont couramment classés en fonction de leurs propriétés thermomécaniques, ce qui permet de les distinguer en différentes catégories.

#### ➤ Les thermoplastiques

Les thermoplastiques ou thermoplaste sont des solides généralement soluble, formés de chaînes plus ou moins linéaires liées entre elles par des liaisons secondaires (forces de Van Der Waals ou dipolaires, liaisons d'hydrogène, etc.). Selon la régularité de leurs chaînes, ces polymères peuvent cristalliser (thermoplastes semi cristallins) ou non (thermoplastes amorphes).

La majorité des thermoplastes ramollissent ou fondent dans une plage de température allant de 80°C à 225°C [2].

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



**Figure II-3 :** Représentation schématique d'un polymère thermoplastique

#### ➤ Les élastomères

Les matériaux en caoutchouc ou élastomères sont des solides souples et gonflables formés de chaînes peu compactées et (à températures ambiantes) très mobiles. Pour assurer une stabilité de forme indispensable, diminuer leur propension au fluage et prévenir une souplesse excessive, les caoutchoucs sont généralement réticulés, c'est –à-dire que leurs chaînes sont liées entre elles par des liaisons primaires et stables [5].

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

#### ➤ Les thermodurcissables

Les thermodurcissables ou thermo durcis sont des solides infusibles et insolubles qui forment un réseau tridimensionnel à partir de segments moléculaires liés entre eux par une densité élevée de liaisons primaires. Les thermo durcis sont mis en forme de façon irréversible par réaction chimique des molécules d'un durcisseur avec les petites molécules d'une résine et \ou avec des chaînes linéaires.

La structure chimique de la résine de départ, le choix durcisseur et le degré de réticulation influencent l'ensemble des propriétés thermomécaniques des thermo durcis (module d'élasticité, température de transition vitreuse, résistance mécanique). Vu leur faible viscosité avant durcissement et les propriétés chimiques et mécaniques finales favorables, les thermodurcissables sont largement employés comme matrices dans les matériaux composites structuraux. Ils sont utilisés généralement pour l'appareillage électrique [2].

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

### III. Caractéristiques diélectriques des isolants

De façon globale, les matériaux isolants se distinguent par :

#### III.1 La résistivité

La résistivité d'un matériau, communément notée par la lettre grecque rho ( $\rho$ ), illustre sa capacité à résister au passage du courant électrique. Elle équivaut à la résistance d'un segment de matériau d'un mètre de longueur et d'une section d'un mètre carré, et elle est généralement exprimée en ohm-mètre ( $\Omega \cdot m$ ). La figure I.4 présente, à titre informatif, l'échelle des résistivités pour quelques matériaux couramment utilisés dans le domaine de l'électrotechnique.

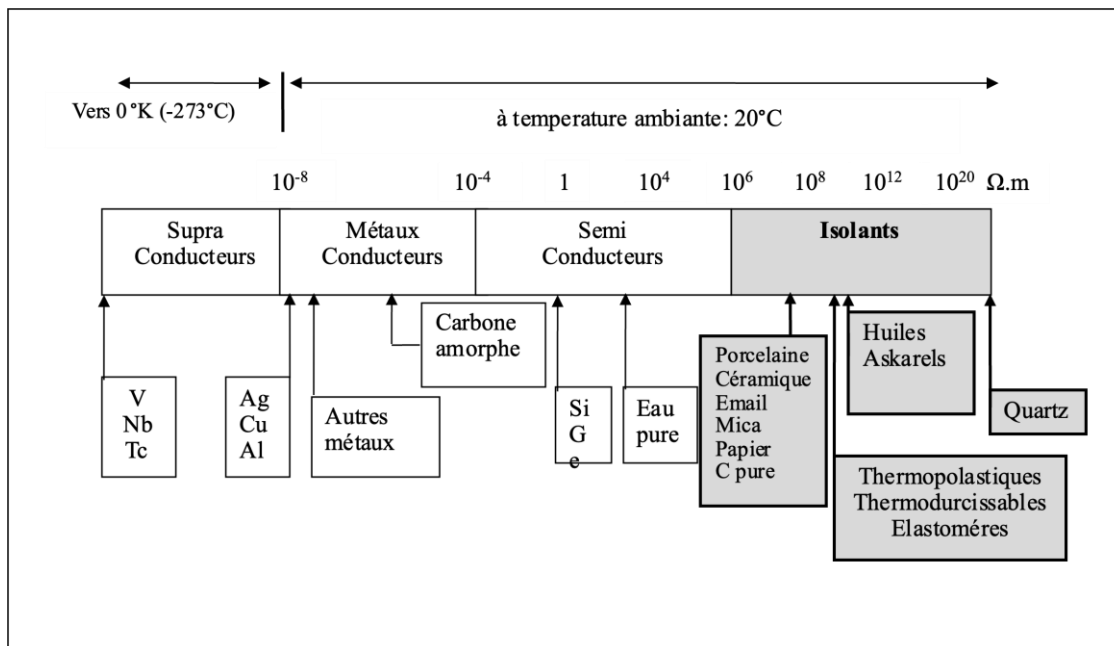


Figure III-1 : Échelle des résistivités de quelques matériaux [8].

#### III.2 La permittivité relative

Elle permet de décrire la réponse d'un milieu donné à un champ électrique. Elle est exprimée en farad par mètre [F/m].

Dans la pratique on utilise de façon quasi exclusive la permittivité relative représentant le rapport de la permittivité absolue à la permittivité du vide. On peut la calculer selon la formule suivante :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{\text{réelle}}}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} \quad \text{I.1}$$

Avec,

C : est la capacité d'un condensateur ayant le matériau comme diélectrique ;

C<sub>0</sub> : capacité du même condensateur mais avec le vide [8].

### III.3 La rigidité diélectrique

Lorsque la tension à laquelle un isolant est soumis dépasse un certain seuil, appelé tension de claquage, un arc électrique apparaît dans l'isolant, générant un courant intense qui traverse l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui-même. Dans ce cas, l'isolant est perforé, ce qui entraîne une rupture diélectrique ou un claquage,

Alors la rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer sans qu'un claquage ou une perforation ou un contournement ou un amorçage d'arc se produit, rendant impossible une nouvelle application de la tension. Selon la norme CEI 60243-1[6].

La rigidité diélectrique d'un matériau se définit comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit le claquage et la distance séparant les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension.

$$E_c = \frac{U_c}{d} \quad \text{I.2}$$

Avec,

U<sub>c</sub> : Tension de claquage en [kV].

d : Épaisseur de l'éprouvette au point de claquage en [mm].

Elle dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité,...) [1].

La figure I.5 montre la tension de claquage de quelques matériaux utilisés pour l'isolation électrique

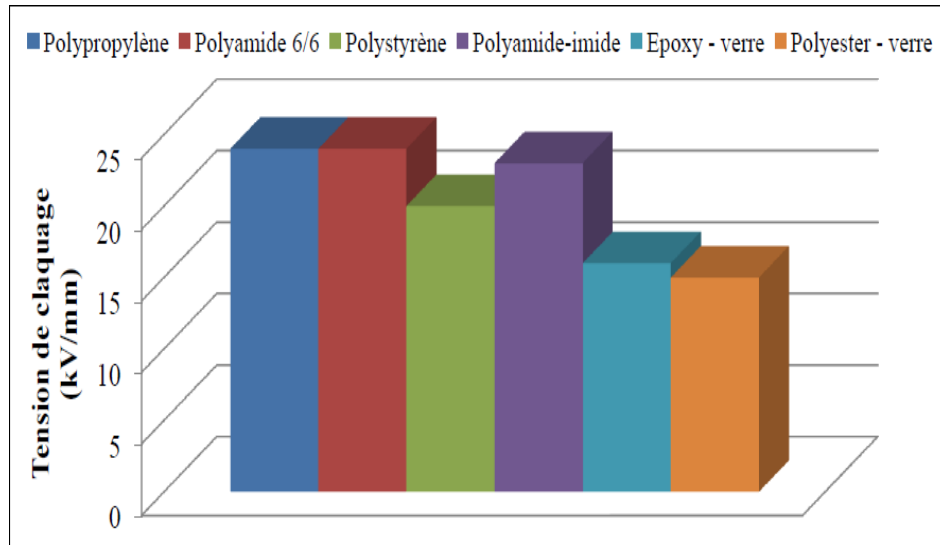


Figure III-2 : Tension de claquage de quelques polymères (épaisseur  $e = 3$  mm) [7]

### III.4 Le facteur de pertes diélectriques

Tout le monde sait qu'un diélectrique est un matériau qui empêche le courant électrique de passer. Il existe un grand nombre de ces matériaux et substances. En plus de leurs propriétés essentielles, ils possèdent un certain nombre d'autres propriétés supplémentaires.

Ces caractéristiques comprennent la perte diélectrique l'énergie qui est dissipée dans un matériau sous l'influence des champs électriques. En raison de cette énergie, le matériau se réchauffe, ce qui peut entraîner sa destruction thermique et d'autres effets néfastes.

Ensuite, nous considérons quelles sont les pertes diélectriques dans les diélectriques, comment elles surviennent et avec quoi sont mesurées.

Supposant un dispositif constituant un condensateur réel (avec pertes) est représenté par le schéma équivalent parallèle tel que représenté sur la figure I.6

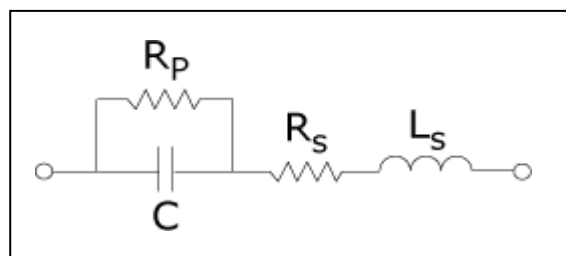


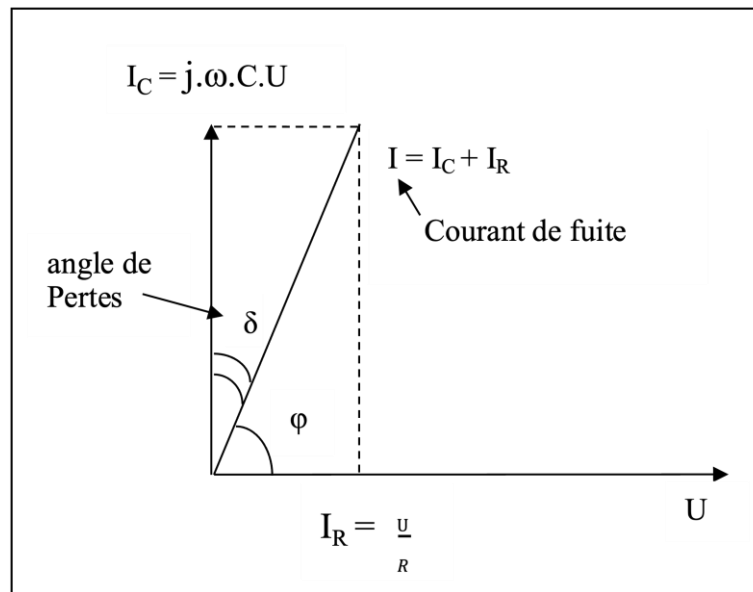
Figure III-3 : Schéma équivalent d'un condensateur [8]

$R_P$  : Résistance due aux pertes dans le diélectrique. Elle dépend de la résistance de l'isolement

$R_S$  : Résistance en série due aux connexions des armatures

$L_S$  : Inductance en série

Autrement dit l'angle de pertes  $\delta$  est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension  $U$  entre les conducteurs et le courant de fuite  $I$  traversant l'isolant figure I.7.



**Figure III-4** : Angle de perte

Le facteur des pertes est donné par :

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R} \quad \text{I.3}$$

$\omega$  : Vitesse angulaire du circuit oscillant angle parcouru par unité de temps (rd/s)

$C$  : Capacité entre les deux conducteurs

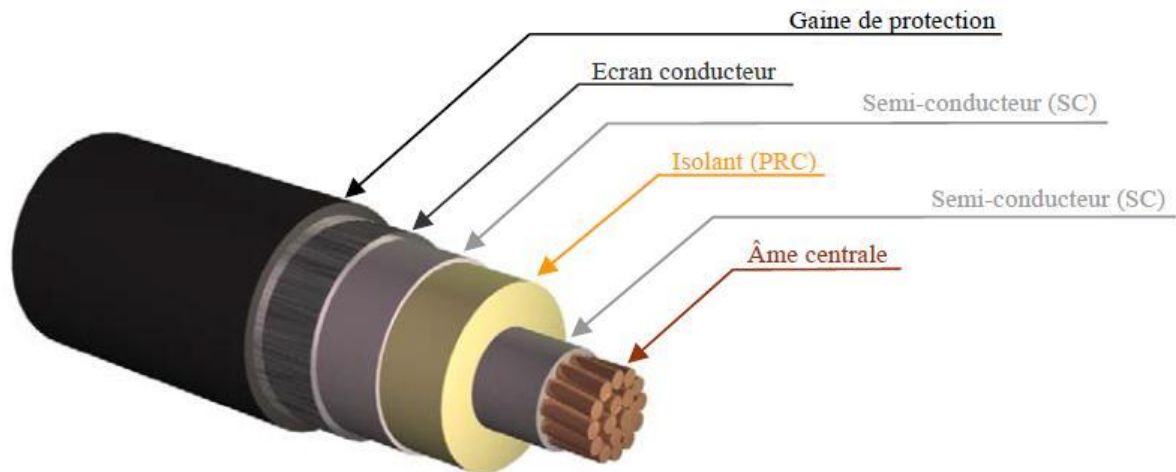
$R$  : Résistance d'isolement de l'isolant

En conclusion la valeur  $\tan \delta$  est appelée facteur de dissipation diélectrique. Il caractérise la qualité d'un isolant, en pratique il varie entre  $10^{-2}$  et  $10^{-4}$  [8].

## IV. Présentation du polyéthylène d'étude (PRC)

### IV.1 Câble isolé par le PRC

En raison de sa structure particulière et de ses remarquables propriétés diélectriques et mécaniques, le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) s'affirme comme une alternative prisée au polyéthylène (PE) dans la production de câbles destinés au transport de l'énergie électrique. Son comportement exemplaire face aux contraintes thermiques renforce sa position en tant que matériau de choix dans cette application.



**Figure IV-1 :** Représentation d'un câble de transport d'énergie électrique

La Figure I.8 illustre le schéma conventionnel de configuration d'un câble, avec une âme centrale composée de plusieurs conducteurs, généralement en cuivre ou en aluminium. Autour de ces conducteurs, un matériau semi-conducteur (SC) est disposé pour homogénéiser le champ électrique à l'interface avec l'isolant. Cet écran est créé en incorporant du noir de carbone dans un polymère, et sa conductivité se situe généralement entre  $0.1 \text{ S.cm}^{-1}$  et  $1 \text{ S.cm}^{-1}$ . La partie centrale essentielle consiste en un matériau isolant, qui, dans notre étude, est du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). L'ensemble est ensuite enveloppé d'une seconde couche de matériau semi-conducteur.

Typiquement, la fabrication des câbles haute tension implique la Co-extrusion des trois couches SC/PRC/SC sous une pression considérable, formant ainsi un revêtement avec un écran conducteur connecté à la terre. Ce dernier remplit plusieurs rôles : il agit en tant que blindage pour limiter la propagation du flux électromagnétique, assure le retour du courant en cas de court-circuit, et prévient l'intrusion d'humidité. Ce conducteur peut être constitué soit d'un métal pur, comme le cuivre, soit d'un alliage. La couche extérieure est une gaine protectrice généralement fabriquée en polyéthylène haute densité. Sa double fonction consiste à isoler l'environnement de la partie conductrice extérieure et à protéger le câble contre des agressions extérieures telles que la corrosion et l'usure mécanique [9].

## IV.2 Méthodes de réticulation du polyéthylène

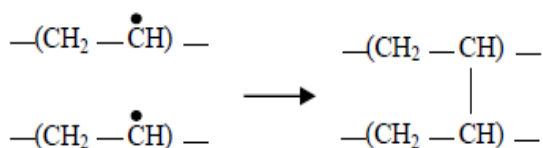
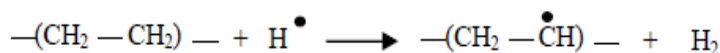
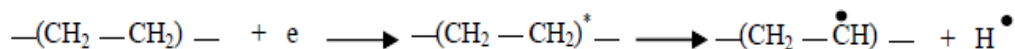
L'industrie réalise la réticulation du polyéthylène selon trois méthodes distinctes [10,11, 12] : par irradiation, par l'utilisation de peroxyde, et enfin par la réticulation au silane. Les processus de

réticulation au peroxyde et par irradiation ont été simultanément développés dans les années 1945-1955 [13, 14]. En 1970, la méthode de réticulation au silane a été introduite à travers les procédés Sioplas et Monosil : le vinyle au silane est greffé pendant l'extrusion pour obtenir un polymère [15,16], avec l'adjonction d'un catalyseur de condensation.

### a. Réticulation par irradiation

La technique de réticulation du polyéthylène basse densité (PEBD) par irradiation a été développée dans les années 1950. Cette méthode exploite les rayons gamma ( $\gamma$ ) générés par des sources de cobalt 60 [17]. En 1952, A. Charlesby a publié une étude comparant les effets des rayons provenant d'une pile atomique, des rayons gamma et des rayons X sur le PEBD. Il a conclu que toutes ces énergies peuvent induire la réticulation du PEBD [14]. Un an plus tard, Lawton et son équipe ont démontré que le PEBD peut également être réticulé par l'énergie des faisceaux d'électrons (rayons  $\beta$ ). Le degré de réticulation par irradiation est proportionnel à la dose d'irradiation absorbée par unité de masse. Généralement, une dose d'environ 20 à 30 Mrad (1 Mrad = 10 kJ/kg) est nécessaire pour réticuler le polyéthylène [14].

Le schéma de réticulation du polyéthylène sous l'irradiation avec un faisceau d'électrons se présente comme suit [18] :



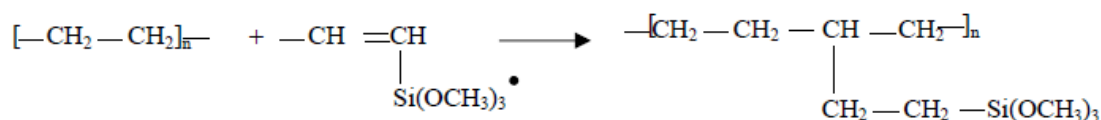
### b. Réticulation au Silane

La technique de réticulation au silane représente la méthode la plus récente parmi celles utilisées. Elle a été introduite par Dow Corning à la fin des années soixante [19], faisant usage d'organofonctionnels silanes non saturés, généralement du vinyltriméthoxysilane. Ce n'est qu'en 1970 que cette technologie a été intégrée à la fabrication des câbles. Le processus de réticulation au silane se déroule en trois étapes [19] : le silane est greffé sur la chaîne du polyéthylène à l'aide d'une petite quantité de peroxyde en tant qu'agent initiateur. Ensuite, les groupes silanes subissent une hydrolyse, suivie de la condensation de ces groupes sous forme de liaisons -Si-O-Si-, qui

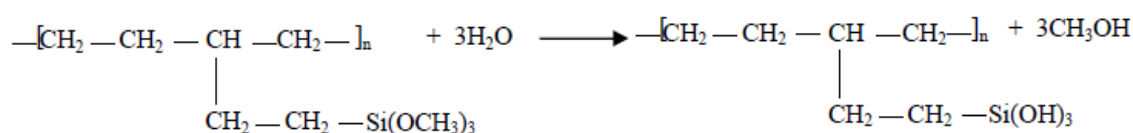
établissent des connexions entre les molécules de polyéthylène.

Les trois étapes sont illustrées dans les schémas réactionnels suivants :

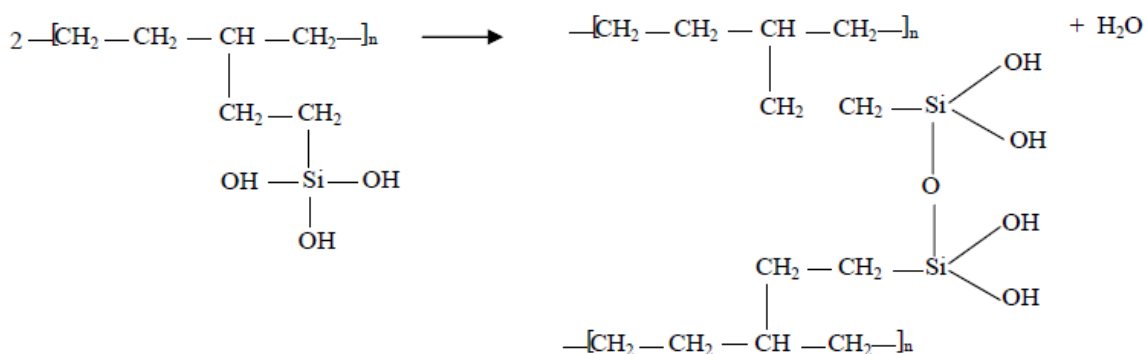
**Étape 1** : Greffage : PE+Silane+Peroxyde



**Étape 2** : Hydrolyse : H<sub>2</sub>O comme catalyseur



**Étape 3** : Condensation



La principale limitation de la technique de réticulation au silane réside dans la nécessité d'utiliser de l'eau pour hydrolyser les groupes alcoxy-silanes. Cela entraîne une diffusion significative de l'eau dans le polymère, favorisant la formation de vacuoles et d'inclusions, conduisant ainsi à la création d'arborescences [20].

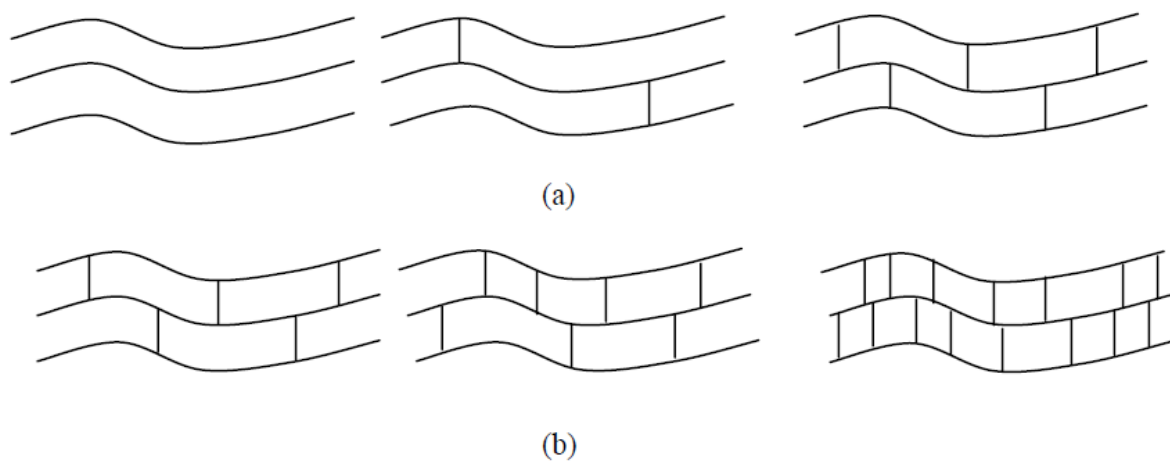
**c. Réticulation avec le peroxyde**

Le paragraphe suivant explore plus en détail la technique de réticulation au peroxyde, car c'est cette méthode qui est utilisée dans la fabrication du matériau examiné dans cette thèse. Historiquement, la réticulation du polyéthylène avec un peroxyde a été initiée en 1945 par W.L. Alderson [14]. Ce chercheur a utilisé des peroxydes inorganiques. Quelques mois plus tard, P.S. Pinkney et R.H. Wiley ont découvert d'autres peroxydes de type organique (benzoyl) pour réticuler le polyéthylène basse densité (PEBD) [6]. En 1955, F.M. Precopio et A.R. Gilbert ont introduit de

nouveaux peroxydes, parmi lesquels le peroxyde de dicumyle (DCP) [21].

#### • Principe de la réticulation avec le peroxyde

Il est essentiel de souligner en premier lieu que la réticulation constitue une opération altérant la structure moléculaire du polymère. Cette procédure vise à créer des liaisons radiales, formant ainsi des pontages entre les chaînes moléculaires et les transformant en un réseau tridimensionnel. Ce réseau confère au polymère une résistance accrue au glissement des chaînes moléculaires les unes par rapport aux autres [22]. Une représentation schématique de la réticulation peut être présentée comme suit [23, 24]:



**Figure IV-2:** Processus de réticulation : (a) polymère linéaire (b) polymère tridimensionnel.

Le taux de réticulation est défini par le nombre de pontages formés en remplacement des groupes réactifs, tels que les doubles liaisons ou les atomes d'hydrogène allyliques. La finalisation du processus de réticulation survient lorsque tous les groupes réactifs ont été consommés [24]. La quantification du taux de réticulation peut être réalisée au moyen de différentes méthodes :

- Mesure de la solubilité dans un solvant approprié (xylène ou toluène) [25].
- Mesure de la déformation à chaud sous contrainte « Hot-Set-test » [26,27].
- L'analyse enthalpique différentielle qui permet de mettre en évidence la relation existant entre la température de fusion cristalline du polyéthylène et son taux de réticulation [28].

### IV.3 Procédés de fabrication des câbles isolés au PRC

Jusqu'à la fin des années 1970, le seul procédé utilisé industriellement était la réticulation par voie chimique en présence de peroxyde et sous pression de vapeur d'eau. Depuis le début des années 1980 sont apparus de nouveaux procédés dont certains s'affranchissent du peroxyde [22].

### **a. Réticulation à la vapeur d'eau**

La ligne de vulcanisation continue, utilisée pour la fabrication des câbles isolés au polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), se compose d'une extrudeuse suivie d'une ligne tubulaire divisée en deux sections. La première section correspond à la zone de chauffage, où le matériau est porté à la température requise en utilisant de la vapeur d'eau sous pression (10 à 15 kg/cm<sup>2</sup>). La deuxième section est la zone de refroidissement, également alimentée en eau sous pression [29]. Ce procédé, fréquemment employé industriellement, est appelé "Steam Curing Process" (S.C.P). Pendant la réaction de réticulation, des produits de décomposition gazeux sont libérés, générant des microcavités dont le nombre atteint environ 10<sup>6</sup>/mm<sup>3</sup>, avec des tailles variant de 1 à 20 µm. Cela entraîne l'introduction d'une quantité notable d'eau dans l'isolant (jusqu'à 200 ppm en masse) [30]. Afin d'éviter la formation d'occlusions dans l'isolant, il est impératif de maintenir une pression de vapeur élevée tout au long du cycle de réticulation.

### **b. Réticulation en gaz inerte chauffé**

Le principe demeure similaire à celui mentionné précédemment, à l'exception que la vapeur d'eau est remplacée par un gaz inerte, en l'occurrence l'azote porté à 300°C sous une pression de 10 kg/cm<sup>3</sup>. Ce procédé permet d'atteindre des températures de réticulation plus élevées que celles du procédé S.C.P. Cependant, un inconvénient associé à cette méthode est qu'elle entraîne une contamination plus importante que celle liée à l'utilisation de la vapeur [31]. Certains auteurs ont démontré que le transfert de chaleur, de la surface à la couche interne du câble, dépend de l'épaisseur de l'isolant et de la vitesse du fluide [31]. L'utilisation du chauffage par gaz sous pression permet la réticulation rapide d'une épaisseur significative d'isolant, presque aussi rapidement qu'avec l'utilisation de la vapeur d'eau, pourvu que la vitesse du gaz soit adéquate [29]. Ce procédé élimine le risque d'inclusion d'humidité dans l'isolant, et du fait que le gaz est maintenu à haute pression, le nombre et la taille des vacuoles diminuent sensiblement, ce qui revêt une importance cruciale pour les câbles de moyenne et haute tension.

### **c. Réticulation par radiation**

Le procédé connu sous le nom de "Radiant Curing Process" (R.C.P) repose sur le chauffage par infrarouge d'un gaz inerte (N<sub>2</sub> ou SF<sub>6</sub>) sous pression, permettant ainsi la réticulation à une température proche de 300°C. Comparativement au procédé S.C.P, où la température nécessaire pour décomposer le peroxyde dépend de la pression de la vapeur et est limitée à environ 200°C en raison des contraintes mécaniques du tube de réticulation, le R.C.P offre une plage de température plus élevée. Le refroidissement dans ce procédé est assuré par de l'eau sous une pression égale à celle du gaz inerte. Les vitesses de réticulation de ce procédé dépassent celles du procédé S.C.P [29]. Les avantages de cette méthode résident d'une part dans l'absence de vapeur, entraînant une

réduction significative du taux d'humidité et des microcavités (vacuoles) dans l'isolant, et d'autre part, la possibilité de régler indépendamment la température et la pression, car le chauffage et la pressurisation sont indépendants.

#### **d. Réticulation aux ultrasons**

La méthode repose sur l'idée fondamentale de réduire le temps de réticulation en utilisant un chauffage par la mise en vibration du milieu. Elle exploite les propriétés viscoélastiques du polyéthylène, générant de la chaleur lorsque le matériau est soumis à des vibrations dynamiques telles que les ondes sonores ou ultrasonores. L'eau est utilisée comme milieu d'irradiation pour assurer une transmission quasi totale de l'onde sonore. Les fréquences utilisées se situent entre 400 et 500 kHz. Cependant, en utilisant uniquement les ultrasons comme moyen de chauffage, la température est plus élevée près du conducteur, et la réticulation est plus complète au centre. Ainsi, pour la partie extérieure du câble, un chauffage classique par vapeur d'eau est ajouté. Ce procédé présente des avantages significatifs : d'une part, la longueur du tube de réticulation peut être réduite de moitié, et d'autre part, la vitesse de production peut être augmentée d'un facteur de 1.5 par rapport au procédé S.C.P. Dans ce procédé, la taille des cavités est comprise entre 1 et 15  $\mu\text{m}$  [29].

#### **e. Procédé de réticulation SIOPLAS**

Ce procédé se distingue radicalement des précédents car il n'implique pas la décomposition d'un peroxyde. Dans cette méthode, une première réaction chimique greffe des groupes polyfonctionnels, tels que les organosilanes (dérivés organiques du silicium), sur la chaîne du polyéthylène. Une deuxième réaction établit les pontages après la condensation des groupes alkoxy [29]. Une caractéristique notable de ce procédé est que, après la première étape, l'isolation reste thermoplastique et peut être extrudée sur un conducteur. L'extrusion sur le conducteur est réalisée à partir d'une ligne classique alimentée par un mélange composé de granulés de polyéthylène greffé, de silicone et de l'initiateur de greffage, ainsi que de granulés formés par le mélange de polyéthylène, d'antioxydant et d'un catalyseur. Les pontages entre les chaînes de polyéthylène se produisent lors d'une opération ultérieure. Le câble est placé sur un touret après l'extrusion et stocké dans un lieu humide à la pression atmosphérique ou immergé dans de l'eau chaude à environ 90°C. La durée de réticulation dépend de l'épaisseur de l'isolant et varie de 1 à 4 heures pour les câbles basse tension (BT) [22]. La réticulation en une seule étape (procédure MONOSIL) est similaire à la procédure précédente, mais les réactions de greffage et de pontage sont effectuées en une seule phase à chaud. La teneur en humidité dans l'isolant (20 à 200 ppm en masse) est inférieure à celle obtenue par la réticulation par les peroxydes en phase vapeur car la réticulation par les silanes s'effectue à une température inférieure à 100°C, où l'eau est moins soluble dans le polyéthylène. Le polyéthylène réticulé au silane est appelé PRS.

## V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré divers types d'isolants électriques, tels que les isolants liquides, gazeux, et solides, en mettant en lumière leurs caractéristiques distinctives. Nous avons examiné les propriétés diélectriques essentielles, notamment la résistivité, la permittivité relative, la rigidité diélectrique, et le facteur de pertes diélectriques.

De plus, nous avons introduit le polyéthylène comme matériau d'étude spécifique, en soulignant son utilisation dans les câbles isolés. Ce chapitre pose ainsi les bases pour approfondir notre compréhension des propriétés des isolants électriques, avec un accent particulier sur le polyéthylène. Le prochain chapitre se concentrera spécifiquement sur l'influence de la chaleur et des rayons UV sur les propriétés du polyéthylène, offrant une perspective approfondie de son comportement dans différentes conditions opérationnelles.

## *Bibliographie du chapitres I*

- [1] M. Remadnia, "Les matériaux diélectriques," Chapitre 3, Université de Guelma, 2021.
- [2] D. Tilikette, S. Ismigaoua, S. Mechera, "Etude du PMMA sous décharges électriques," Mémoire de fin d'études en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.
- [3] H. Aouabdi Hadjer, "Effet du brunissage sur les propriétés mécaniques d'un PEHD2050 concentré à 2.5% de noir de carbone," Mémoire de fin d'études en électrotechnique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [4] M. Moudoud, "Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants," Thèse de doctorat, 2010.
- [5] A. Hamadi, D. Reghal, "Etude de l'influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique dans le polystyrène (PS) et le PMMA," Mémoire de fin d'études en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.
- [6] Norme CEI 60243-1, "Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai. Partie 1: essais aux fréquences industrielles," 1998.
- [7] P.J. VUARCHEX, "Caractéristiques des diélectriques liquides," Techniques de l'ingénieur, Traité K 714, Janvier 1988.
- [8] K. Simili, "Etude des propriétés diélectriques des matériaux isolants soumis à des champs très intenses," Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 27 septembre 2018.
- [9] G. Tardieu, "Apport des mesures de luminescence à la compréhension du piégeage et du transport dans les isolants synthétiques," Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2003.
- [10] A. Barlow, "The chemistry of polyethylene insulation," IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, N° 1, pp. 8-19, 1991.
- [11] B. Gustafsson, J.O. Boström, R.C. Dammert, "Stabilization of peroxide crosslinked polyethylene," Die Angewandte Makromolekulare Chemie 261/262, pp. 93-99, 1998.
- [12] B. Meola, L. Nele, L. Giorleo, "Technological characterisation of thermoshrinking cross-linked polyethylene by destructive and non-destructive techniques," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 133, pp. 353-358, 2003.
- [13] P.S. Pinkney, R.H. Wiley, DU. Pont, "Curing of polyethylene," U.S. Patent, 1945.
- [14] T. Corrales, F. Catalina, C. Peinado, N.S. Allen, E. Fontan, "Photooxidative and thermal degradation of polyethylenes: interrelationship by chemiluminescence, thermal gravimetric analysis and FTIR data," Journal of Photochemistry and photobiology A: Chemistry, Vol. 147, pp. 213-224, 2002.
- [15] H.G. Scatt, "Crosslinking of a polyolefin with a silane," U.S. Patent, 1968.
- [16] P. Green, W.J. Maillefer, "Manufacture of extruded products," U.S. Patent, 1974.

- [17] A. Barlow, J. Biggs, M. Maringer, "Radiation processing of polyolefins and compounds," *Radiat. Phys. Chem.*, Vol. 9, p. 685-692, 1977.
- [18] S. Dadbin, M. Frounchi, M. Haji Saeid, F. Gangi, "Molecular structure and physical properties of E-Beam Crosslinked low-density Polyethylene for wire and cable insulation applications" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 86, pp. 1959-1969, 2002
- [19] Y. Zhu, H.G. Yoon, K.S. Suh, "Electrical properties of silane Crosslinked Polyethylene in comparison with DCP Crosslinked Polyethylene," *IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, N° 2, pp. 164-168, April 1999.
- [20] M. Celina, G.A. George, "Characterisation and degradation studies of peroxide and silane Crosslinked Polyethylene," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 48, pp. 297- 312, 1995.
- [21] F.M. Precopio, A.R. Gilbert, US Patent, 3, 079, 370, 1955.
- [22] M. Pays, "Câble de transport d'énergie. Technologie et caractéristiques," *Techniques de l'Ingénieur*, Publication D4520, 1996.
- [23] J. Verdu, "Vieillissement des plastiques," *AFNOR Technique*, Edition Eyroles, Paris 1984.
- [24] J. Verdu, "Vieillissement chimique," *Techniques de l'Ingénieur*, Publication A3151, 1980.
- [25] "Test methods for determination of gel content and swell ratio of Crosslinked ethylene plastics," *Annual book of ASTM standards*, D2765, 1992.
- [26] C.E.I 811.2.1, "Hot Set Test," First Edition 1986.
- [27] "Test method for measurement of hot creep of polymeric insulation," *Insulated Cable Engineers Association, Inc. Publication IEC AT-28-5-5672*, 1983.
- [28] C. Caillot, C. Audoux, H. Auclair, "Application de l'analyse enthalpique différentielle à l'étude du polyéthylène haute pression pour câbles," *R.G.E.*, Tome 81, N°11, Novembre 1972.
- [29] G. Garcia, "Sur le comportement du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à l'action des décharges partielles," *Thèse de Doctorat de Spécialité de 3eme Cycle*, U.P.S. Toulouse, 1980.
- [30] S. Kageyama, M. Ono, S. Chabata, "Microvoids in XLPE insulated cables," *IEEE, Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. 4, pp. 1258-1263, July/August 1975.
- [31] S. Pelissou et al., "Caractérisation de câbles extrudés vieillis en service," *Rapport final*.

*Chapitre II : Effets de la température et des rayons  
UV sur les propriétés des polymères*

## I. Introduction

Le vieillissement thermique des polymères constitue un processus complexe qui englobe une série de phénomènes évolutifs influencés par des facteurs tels que la composition du matériau, l'environnement et la température. Ce phénomène de vieillissement peut se manifester par des altérations tant physiques que chimiques, pouvant modifier de manière significative les propriétés intrinsèques des polymères au fil du temps.

L'exposition à la chaleur et aux rayons ultraviolets (UV) peut déclencher divers mécanismes de dégradation qui peuvent altérer la structure moléculaire des polymères, ainsi que leur morphologie et leurs propriétés physiques. La nature de ces changements peut être aussi bien superficielle que profonde, affectant non seulement les polymères eux-mêmes, mais également leurs additifs.

Ce chapitre se propose d'explorer les effets du vieillissement thermique et des rayons UV sur les polymères, mettant en lumière les mécanismes sous-jacents qui contribuent à la détérioration des propriétés des matériaux. Nous examinerons les changements observés au niveau moléculaire ainsi que les conséquences sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des polymères, offrant ainsi une compréhension approfondie des processus de vieillissement thermique et des implications de l'exposition aux rayons UV sur la durabilité et la fiabilité des matériaux polymériques.

## II. Effets de la température sur les propriétés des polymères

### II.1 Vieillissement physique

Le processus physique lié au vieillissement thermique vient du fait qu'il y a [1] :

- modification de la configuration spatiale macromoléculaire ;
- pénétration de solvants et migration d'adjuvants ;
- fissuration sous contrainte en milieu tensioactif ;

#### II.1.1 Modification de la morphologie

Le vieillissement physique interne est exclusivement attribuable à des facteurs internes au matériau, tels que la mobilité moléculaire. Cela implique que, à la fin de son processus de fabrication, le matériau se trouve dans un état thermodynamiquement instable, ce qui conduit à une évolution graduelle vers un état plus stable. Le vieillissement physique est ainsi étroitement lié à la mobilité moléculaire. On peut prédire qu'il sera plus rapide à des températures élevées, mais moins rapide si l'historique thermique pendant la fabrication permet au matériau d'atteindre

un état de stabilité [2].

Le vieillissement physique se manifeste par une densification du réseau macromoléculaire, se traduisant par une réduction du volume libre disponible pour les mouvements des segments de macromolécules. Par conséquent, la masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue, et le facteur de pertes diélectriques diminue également [3].

### **II.1.2 Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif**

En présence d'un milieu tensioactif, les polymères peuvent présenter des fissures dans les zones les plus soumises à des contraintes, en fonction de la qualité des polymères. Ce phénomène de fissuration est associé au développement de forces de tension superficielle à l'interface entre le polymère et le liquide. Il dépend de plusieurs paramètres, tels que la contrainte mécanique, la température et la tension de surface du liquide, dont la viscosité détermine la vitesse de pénétration dans les fissures.

### **II.1.3 Chocs thermiques**

Lorsque des variations soudaines de température se produisent dans un matériau organique, un gradient de température se forme dans son épaisseur, ce qui entraîne une dilatation différentielle. Les chocs thermiques peuvent provoquer des ruptures mécaniques [4].

### **II.1.4 Phénomènes de transport**

Les phénomènes de transfert de masse impliquent principalement des concepts de solubilité, de diffusion et de plastification. Le degré de solubilité des petites molécules dans le polymère dépend du nombre de sites présents sur les macromolécules, capables d'interagir avec les petites molécules et de les retenir. Ces interactions dépendent principalement de la polarité électrique des groupes présents. Ainsi, les polymères peu polaires ont généralement peu ou pas d'affinité avec la plupart des solvants [3].

Selon la direction du transfert de masse, du matériau vers l'environnement ou inversement, on peut observer soit la pénétration de solvants soit la perte d'adjuvants.

#### **II.1.4.1 Pénétration des solvants :**

Si une espèce de faible masse moléculaire (sous forme de vapeur ou de liquide) est présente dans l'environnement et qu'elle présente une solubilité non négligeable, on observe généralement sa pénétration dans le polymère. L'eau est le solvant le plus courant et peut poser des problèmes, en particulier si les matériaux ne sont pas entièrement hydrophobes [5].

Lorsque le solvant pénètre dans le polymère, cela se fait selon une loi de diffusion qui peut varier en fonction du cas étudié. Deux cas peuvent se présenter :

- **le solvant n'induit pas de modification de la structure du polymère** : la concentration du solvant tend vers une limite correspondant à la saturation (limite de solubilité), qui dépend, dans le cas d'un environnement gazeux, de la pression partielle du solvant dans l'atmosphère .
- **le solvant induit une modification de la structure du polymère ou de sa morphologie (fissuration liée à un gonflement différentiel)** : dans ce cas, on peut observer une variation continue de la concentration en solvant.

La pénétration du solvant dans un polymère est influencée par les facteurs suivants :

- **la structure chimique du motif structural élémentaire** : c'est elle qui détermine essentiellement l'affinité du polymère pour le solvant considéré.
- **la morphologie** : les zones cristallines peuvent être considérées comme imperméables. La solubilité globale décroît donc avec le taux de cristallinité. Dans les polymères amorphes, l'état de gélification, qui détermine la compacité du réseau macromoléculaire, joue également un rôle important.
- **Le taux de réticulation** : La perméation du solvant est favorisée lorsque le degré de réticulation du polymère est faible. Ce processus de perméation induit la plastification du polymère, ce qui se manifeste par une réduction du module d'élasticité, de la contrainte à la rupture, une augmentation de l'allongement à la rupture et une baisse de la température de transition vitreuse [3].

En effet, en ce qui concerne l'eau, il est estimé qu'une teneur en eau de 1 % réduit la température de transition vitreuse du polymère d'environ 10 à 20 °C, ce qui entraîne un ramollissement du matériau [5].

#### II.1.4.2 Perte d'adjuvants

Les polymères renferment souvent des substances organiques de faible masse moléculaire qui, sous l'effet de la chaleur, peuvent migrer plus ou moins lentement hors du matériau.

La perte de plastifiants par migration peut impliquer des quantités considérables, ce qui peut notablement affecter les propriétés du matériau, en particulier ses propriétés mécaniques.

On observe une diminution de l'allongement à la rupture, une augmentation de la température de transition vitreuse et du module de Young. En ce qui concerne les stabilisants, c'est leur stabilité

chimique qui sera compromise. Plusieurs mécanismes contribuent à la migration des adjuvants, notamment l'évaporation et l'extraction.

### ➤ L'évaporation

La solubilité des adjuvants dans les polymères joue un rôle crucial, tout comme la masse molaire de l'adjuvant, dans le phénomène d'évaporation. En effet, la vitesse de migration et d'évaporation augmente lorsque la masse molaire diminue.

La vitesse de perte de plastifiant dépend principalement de l'épaisseur du matériau (la vitesse est inversement proportionnelle à l'épaisseur), de la température (la vitesse augmente avec l'augmentation de la température), du confinement de l'atmosphère (la vitesse augmente avec la diminution du confinement) et de la structure du plastifiant.

Ce phénomène d'évaporation se traduit également par une perte de masse.

### ➤ L'extraction

Les phénomènes d'extraction doivent être pris en compte lorsqu'un polymère entre en contact avec un milieu liquide. Dans ce contexte, la stabilité de l'adjuvant dans le liquide est susceptible de jouer le rôle le plus crucial et constitue le premier paramètre à considérer lors du choix des matériaux.

## II.2 Vieillessement chimique

Le vieillissement chimique fait référence à tout processus impliquant une altération chimique du matériau sous l'influence de son environnement. En pratique, le vieillissement chimique se mêle souvent à un vieillissement physique, les deux phénomènes interagissant de manière complexe.

Les processus chimiques impliqués dans la dégradation des polymères sont divers et nombreux, et leur nature dépend étroitement des caractéristiques propres des matériaux en question. Cependant, malgré cette diversité, plusieurs formes principales de détérioration sont couramment observées dans la plupart des cas.

### II.2.1 Oxydation

La principale cause de dégradation, depuis longtemps reconnue, est l'action de l'oxygène sur la chaîne hydrocarbonée des polymères, entraînant des ruptures de chaînes ou des réticulations indésirables. Ce processus d'oxydation progressif conduit à la formation de produits acides, augmentant ainsi la conductivité, et à la rupture des chaînes, ce qui diminue la résistance à la rupture.

L'oxydation est une réaction en chaîne amorcée par la rupture d'une liaison, conduisant à la formation de radicaux libres et à l'accumulation de groupes tels que OH et CO. L'oxydabilité des matériaux dépend de la solubilité et de la vitesse de diffusion de l'oxygène dans le matériau, ainsi que de la quantité, de la qualité et de la répartition des antioxydants incorporés.

La dégradation thermo-oxydative des polymères se caractérise principalement par des ruptures de chaînes et la formation de groupes polaires tels que les cétones, les aldéhydes, les alcools et les acides. Les ruptures de chaînes entraînent une diminution de la viscosité du polymère, tandis que les groupes polaires favorisent la mobilité des porteurs de charges.

### II.2.2 Réticulation

Le processus de réticulation se caractérise par la formation de liaisons covalentes entre les segments de chaînes voisines, ce qui réduit la souplesse du matériau et sa capacité d'allongement, le rendant ainsi cassant.

Dans le cas des polymères linéaires à faible taux de réticulation, la réticulation se manifeste par l'apparition de chaînes plus ramifiées et de masse moléculaire plus élevée par rapport aux chaînes initiales. Le polymère perd partiellement sa solubilité dans les cas de taux de réticulation élevés.

Dans le cas des polymères tridimensionnels, la réticulation se manifeste par une augmentation de la concentration en nœuds de réseau, ce qui induit une diminution de la masse moléculaire moyenne. Cela se traduit par une diminution du taux de gonflement et une augmentation de la température de transition vitreuse ( $T_v$ ) ainsi que du module d'élasticité. Les propriétés physiques du matériau subissent peu de modifications, à l'exception de la solubilité qui diminue. En ce qui concerne les propriétés mécaniques, la réticulation entraîne une augmentation du module d'élasticité, de la contrainte à la rupture et de la température de ramollissement [3].

Dans le cas de polymères initialement linéaires, une réticulation modérée peut également entraîner une augmentation de l'allongement à la rupture. En conditions réelles de vieillissement, la réticulation est presque toujours accompagnée de ruptures de chaînes

Dans le cas du vieillissement thermique, de nombreux polymères tridimensionnels peuvent subir simultanément des ruptures de chaînes et une réticulation. Leurs propriétés évoluent alors en fonction de la part respective de chacun de ces processus. La caractérisation du processus de réticulation dans le cas des polymères tridimensionnels est effectuée en mesurant leur taux de réticulation ou les grandeurs physiques qui y sont associées, telles que la température de transition vitreuse.

### II.2.3 Dépolymérisation

La dépolymérisation est un cas spécifique de la réaction de rupture de chaînes. Une rupture de chaîne crée un site actif qui déstabilise la liaison du monomère voisin, entraînant ainsi l'élimination séquentielle de molécules de monomère. La dépolymérisation est plus facile lorsque l'énergie de liaison monomère-monomère est faible. Elle joue un rôle plus ou moins important dans les divers types de dégradation [4].

### II.2.4 Coupure de chaînes statistiques

Les coupures de chaînes statistiques surviennent de manière aléatoire sur des sites répartis à travers le réseau macromoléculaire. Divers mécanismes chimiques, tels que l'hydrolyse, peuvent être à l'origine de ces coupures. Il est généralement admis que la dégradation d'un polymère commence toujours par une rupture de liaison (scission primaire) causée par l'apport d'énergie (chimique, mécanique, photochimique, thermique, etc.) à la macromolécule. Lorsque cette énergie dépasse l'énergie de liaison, la rupture se produit.

Le mécanisme de coupure de chaînes statistiques dans les polymères est lié à la stabilité thermique, car il existe une corrélation entre l'énergie de dissociation des liaisons et la stabilité thermique des polymères, la stabilité étant déterminée par la liaison la plus faible.

Ainsi, l'énergie de la liaison la plus faible détermine en grande partie la stabilité globale.

Sur le plan de la structure, ces coupures de chaînes entraînent une réduction de la masse moléculaire moyenne dans le cas des polymères linéaires et une diminution du taux de réticulation dans le cas des polymères tridimensionnels. Les coupures de chaînes ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques du matériau [5].

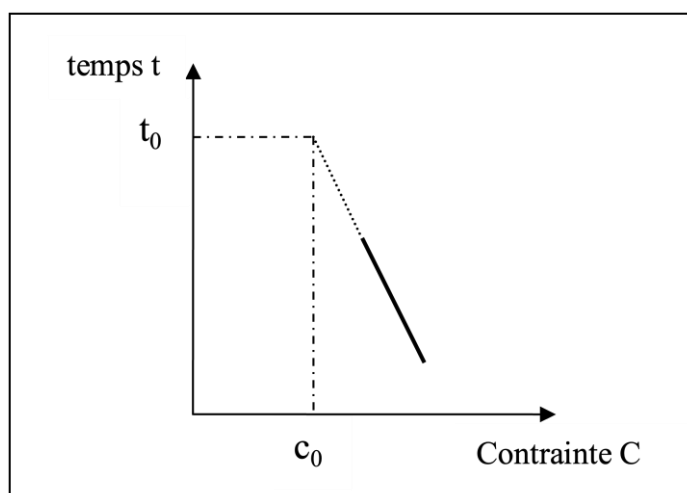
## II.3 Résistance à la chaleur des matériaux isolants solides

Des chercheurs comme Fallou[6] et Moraine[7] se sont penchés sur la résistance à la chaleur des polymères. L'étude du vieillissement et de la stabilité à long terme des isolants solides cherche à répondre à l'une des questions suivantes :

- Pendant quelle durée peut-on maintenir un matériau isolant sous une contrainte initiale  $C_0$  ?
- Si l'on souhaite une durée de vie spécifique  $t_0$ , quelle contrainte maximale est admissible?

La contrainte peut se présenter sous forme de température, de tension ou de champ électrique.

La figure II.1 illustre la relation entre la durée de vie d'un matériau et la contrainte appliquée.



**Figure II-1:** Durée de vie en fonction de la contrainte appliquée [6].

### II.3.1 Principe de la détermination de la résistance thermique des isolants solides

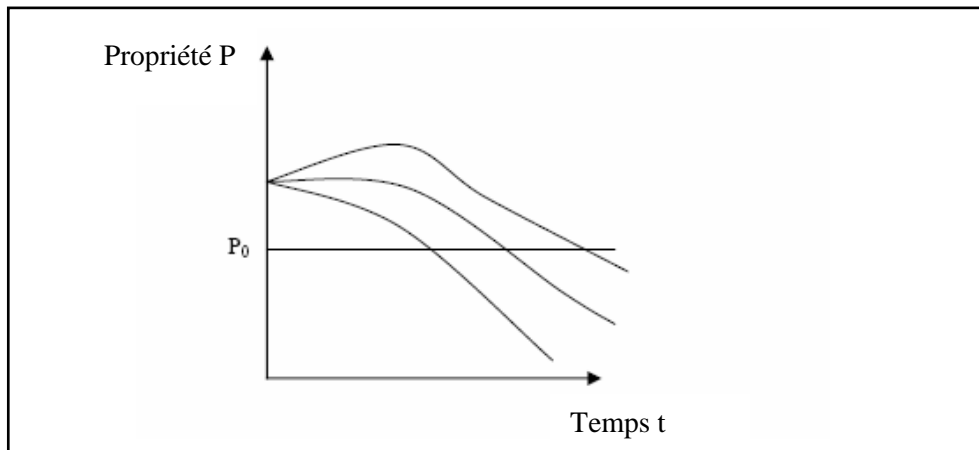
Les recherches portant sur la résistance à la chaleur des matériaux isolants solides visent à établir des méthodes générales permettant de déterminer leur stabilité. L'objectif de ces tests est de simplifier les résultats et de les utiliser sous forme d'indicateurs de température associés aux propriétés mécaniques d'une part, et aux propriétés électriques d'autre part, des matériaux en question.

En général, les variations d'une propriété d'un matériau en fonction du temps de vieillissement sont déterminées pour différentes valeurs de contraintes appliquées telles que  $C_1, C_2, C_3, \dots C_n$ .

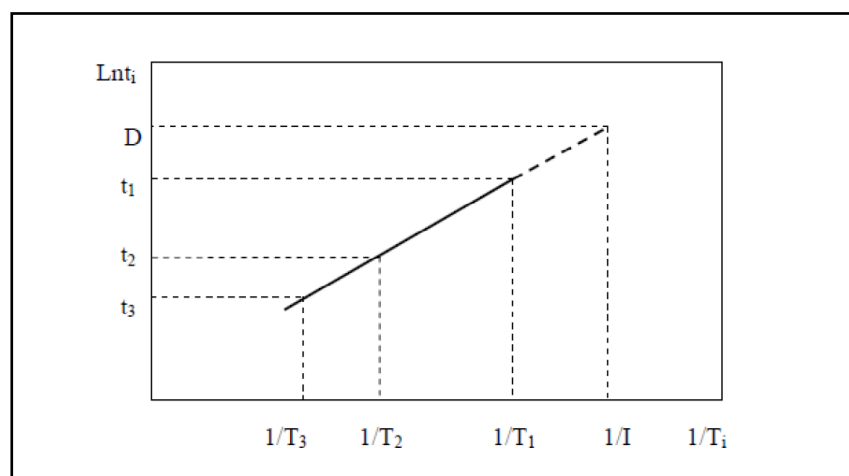
En fixant une valeur de la propriété  $P_0$ , choisie en fonction des critères d'utilisation, on obtient la relation  $C(t)$  relative à la propriété  $P_0$ . Cette courbe est appelée courbe de durée de vie.

La propriété peut être de nature électrique, telle que la rigidité diélectrique, ou une propriété mécanique, telle que la charge à la rupture. Concernant les tests de vieillissement thermique, les matériaux sont soumis à une exposition prolongée à la chaleur, puis l'évolution d'une ou plusieurs de leurs propriétés est déterminée en fonction du temps, ce qui permet de tracer les caractéristiques  $P=f(t)$  comme illustré dans la figure II.2.

Le choix d'une valeur limite de la propriété  $P_0$  permet de déterminer les temps auxquels cette limite est atteinte, c'est-à-dire la durée de vie, pour plusieurs températures de vieillissement. En répétant les essais, il est possible de tracer la courbe d'endurance thermique  $P=f(t)$ , comme illustré dans la figure II.2.



**Figure II-2 :** Variation de  $p$  en fonction du temps de vieillissement pour différentes température  $T$ [6].



**Figure II-3 :** Variation de  $\log(t)$  en fonction de l'inverse de la température absolue  $T$ [8].

En général, on se concentre sur l'indice de température, défini comme le nombre correspondant à la température exprimée en degrés Celsius, qui correspond, sur le graphique de l'endurance thermique, à un temps normalement équivalent à 20 000 heures. Certains chercheurs réalisent des vieillissements accélérés correspondant à un temps de 500 heures au lieu de 5 000 heures, ce qui équivaut à une division par 10[6].

### II.3.2 Choix des températures de vieillissement

La norme 216-1 de la Commission électrotechnique internationale [9] spécifie un minimum de trois températures différentes, chacune étant éloignée d'au moins 20°C de la plus proche, de manière à ce que le critère de dégradation soit atteint.

- En un temps inférieur à 100 heures pour la température la plus élevée.
- En un temps inférieur à 5000 heures pour la température la plus basse.

### II.3.3 Durée de vie

En 1930, Montsinger a étudié l'impact de la température sur les isolants électriques et a avancé une formule empirique décrivant la réduction de la durée de vie pour chaque augmentation de 8 degrés Celsius de la température du papier, utilisé comme isolant dans les transformateurs [10].

La durée de vie est le laps de temps nécessaire pour qu'une propriété techniquement importante atteigne une valeur limite, permettant ainsi au matériau de continuer à fonctionner de manière satisfaisante [11].

La durée de vie  $T$  d'un matériau isolant solide en fonction de la température de vieillissement est déterminée par une relation de type Arrhenius [12] :

$$\ln T = A + \frac{E}{R_t} \quad \text{II.1}$$

$A$  : constante caractéristique du matériau ;

$R$  : constante des gaz parfait ( $R=8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) ;

$T$  : Température absolue (K) ;

$E$  : Énergie d'activation du phénomène (Kcal/mol).

### II.3.4 Vitesse de dégradation

Les altérations qui se produisent dans les matériaux isolants, affectant leurs caractéristiques, trouvent leur origine principale dans des réactions chimiques. Par conséquent, il est logique d'observer, pour l'évolution de ces propriétés, des lois similaires à celles régissant ces réactions chimiques. Cela se traduit, en pratique, par une loi conforme à la relation d'Arrhenius, établissant un lien entre la vitesse d'évolution  $V$  d'une propriété donnée et la température absolue  $T$  [13].

$$\ln V = -\frac{A}{T} + B \quad \text{II.2}$$

Avec :

$A, B$  : constantes caractéristiques du polymère.

La vitesse de dégradation est aussi donnée par une relation analogue

$$V = V_0 \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right) \quad \text{II.3}$$

Avec :

E : Énergie d'activation du phénomène (Kcal/mol)

R : Constante des gaz parfait ( $R=8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

$V_0$  : Constante ;

T : température absolue (K).

La dégradation est d'autant plus rapide que la température est élevée.

### III. Effets des rayons UV sur les propriétés des polymères

#### III.1 Les rayons ultraviolets

Les rayons ultraviolets (UV) sont des rayonnements électromagnétiques similaires à la lumière visible, mais avec des longueurs d'onde plus courtes qui les rendent invisibles à l'œil humain. Leur courte longueur d'onde leur confère une énergie plus élevée que celle de la lumière visible, pouvant même causer des brûlures sur la peau humaine. Le spectre des UV est généralement subdivisé en trois bandes connues sous le nom d'UVA, UVB et UVC. La plage de 200 à 320 nm, souvent utilisée dans le domaine de la photogravure, est appelée UV actiniques.

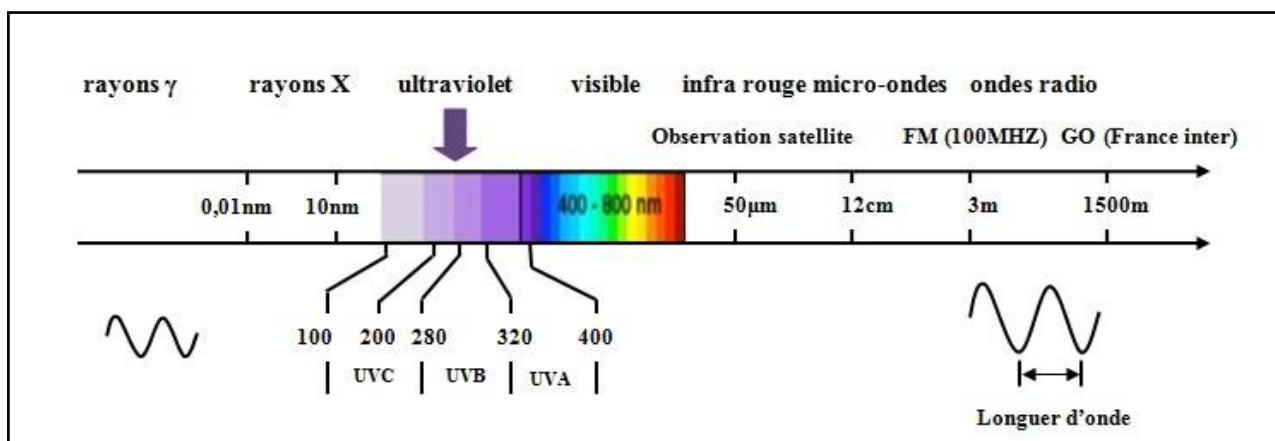


Figure III-1 : Spectre de la lumière

Tableau III-1 : Longueurs d'ondes et énergies des photons pour chaque bande UV.

Nom	Longueur d'onde	Énergie du photon
UVA	320–400 nm	3.10–3.94 eV
UVB	290–320 nm	3.94–4.43 eV
UVC	100–280 nm	4.43–12.4 eV

#### III.2 Source de rayonnement UV

##### III.2.1 Les rayons solaires

Sur terre, l'énergie solaire qui nous parvient se compose d'un rayonnement comprenant 5%

d'UV, 39% de rayonnement visible et 56% d'infrarouge.

Les UV, notamment les UVC, sont en grande partie bloqués par la couche d'ozone avant d'atteindre la surface. Malgré l'atténuation due à l'atmosphère et aux particules en suspension, les UVA et les UVB parviennent tout de même à frapper la planète, avec des proportions respectives de 98% et 2%.

Concernant l'impact des nuages, les nuages hauts ne filtrent qu'une petite fraction des UV, soit entre 5 et 10%. Les nuages d'altitude moyenne, quant à eux, ont la capacité de bloquer entre 30 et 70% du rayonnement UV. Seuls les nuages bas, massifs et foncés, sont capables de stopper entièrement les UV.

### III.2.2 Autres sources de rayonnement UV

Les sources d'UV nécessitent des enveloppes fabriquées en quartz, car le verre n'est pas transparent aux UV. Parmi ces sources, on peut identifier :

#### ➤ Les arcs à souder

La soudure électrique à l'arc génère une émission considérable d'UV, ce qui rend indispensable le port d'un masque de protection pour les yeux et le visage.

#### ➤ Les tubes fluorescents basse pression

Les tubes renferment de l'argon et une infime quantité de mercure placé dans un champ électrique. Les électrons en se déplaçant percutent et cèdent leur énergie aux atomes de mercure qui passent à l'état excité. Le retour à l'état fondamental se fait en émettant un photon dans l'UVC (185 et 254 nm). La paroi interne des tubes est enduite d'un produit qui fluoresce sous l'action des UVC dans la gamme des UVA.

#### ➤ Les lampes haute pression

Ces lampes suivent un principe similaire à celui des lampes à basse pression, sauf que la pression élevée (> 1 bar) crée un plasma plus chaud et plus intense, ce qui rend impérative l'utilisation d'une ampoule en quartz.

#### ➤ Les diodes UV

En mai 2006, la première diode UV a été développée au Japon. Fonctionnant à une longueur d'onde de 210 nm, cette technologie a permis d'améliorer la précision de la gravure des circuits intégrés et de concevoir des DVD capables de stocker des quantités d'informations considérables.

### III.3 Effet des rayons Ultraviolets sur les polymères

Lorsque les polymères sont exposés aux ultraviolets pendant une période prolongée, cela

entraîne des dégradations photochimiques de leur surface, conduisant à la formation de nouveaux produits chimiques. Parmi les effets les plus remarquables des UV sur les polymères, on compte la décoloration et l'augmentation de la rugosité de la surface [14] [15].

### III.3.1 La Photo-dégradation

#### III.3.1.1 Définition

La photo-dégradation désigne la dégradation d'une molécule photodégradable induite par l'absorption de photons, en particulier les longueurs d'onde présentes dans la lumière solaire, telles que le rayonnement infrarouge, la lumière visible et la lumière ultraviolette. Néanmoins, d'autres formes de rayonnement électromagnétique peuvent également entraîner une photo-dégradation.

La photo-dégradation englobe la photodissociation, qui se réfère à la fragmentation de molécules en de petits fragments sous l'effet des photons. Elle implique également la modification irréversible de la structure d'une molécule.

La photo-dégradation des polymères, engendre des changements tant physiques que chimiques, suite à une exposition aux rayonnements ultraviolets ou à la lumière visible. Pour être efficace, la lumière doit être absorbée par le matériau en question. Par conséquent, la présence de groupes chromophores au sein des macromolécules est une condition préalable à l'initiation d'une réaction photochimique [16].

#### III.3.1.2 Facteurs provoquant la photo-dégradation

En générale, la photo-dégradation des matériaux polymères est le résultat de nombreux facteurs, pouvant être classés en deux catégories distinctes [16] :

➤ **Les impuretés internes**

Ces dernières peuvent contenir des groupes chromophores, qui sont introduits dans des macromolécules pendant le traitement et le stockage polymérisation ; ils comprennent:

- a. Hydro peroxydes.
- b. Carbonyles.
- c. Liaisons insaturées (C = C).
- d. Résidus de catalyseur.
- e. Complexes de transfert de charge avec de l'oxygène.

### ➤ Les impuretés externes

Qui peuvent contenir des groupes chromophores, à savoir les :

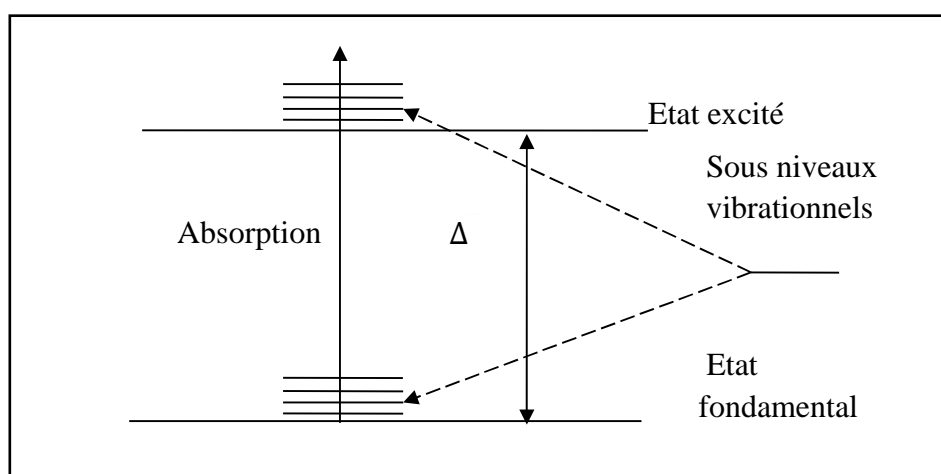
- Traces de solvants, catalyseurs, ...etc.
- Composés d'une atmosphère urbaine polluée et résidus chimiques, par exemple les hydrocarbures polycycliques tels que le naphthalène et l'anthracène en polypropylène et le polybutadiène.
- Traces de métaux et d'oxydes métalliques à partir des équipements de traitement et des récipients, tels que Fe, Ni ou Cr.

## III.3.2 La Photo-oxydation

### III.3.2.1 Principe fondamental

La photo-oxydation est déclenchée par la combinaison de deux éléments : l'énergie lumineuse, qu'elle soit dans le spectre ultraviolet (UV) ou visible, et la présence d'oxygène. Ce processus ne se déclenche que lorsqu'il y a des chromophores présents dans le matériau, capables d'absorber ces rayonnements [17].

En conséquence, le chromophore est rapidement conduit vers un état excité de courte durée, caractérisé par une énergie potentielle considérablement élevée. Par conséquent, l'amorce de la photo-oxydation se produit par l'élévation des chromophores vers des états excités d'énergie élevée (figure II.5).



**Figure III-2** : Promotion d'une molécule à l'état excité par l'absorption d'un photon.

Dans cet état excité, l'énergie potentielle peut atteindre des valeurs très élevées, jusqu'à environ 400 kJ/mol. En comparaison, une élévation de température ne permet généralement d'atteindre qu'une énergie potentielle inférieure à 100 kJ/mol. C'est pourquoi la photo-oxydation permet

l'activation de certains processus qui ne se produisent pas lors de la thermo-oxydation[18].

$$\Delta E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{II.4}$$

E : l'énergie

h : la constante de Planck

$\nu$  : la fréquence

c : la vitesse de la lumière (3.108 m/s-)

$\lambda$  : la longueur d'onde du photon incident soit telle que :

Dans certains cas, l'énergie de l'état excité peut être transférée d'une espèce absorbante à une autre espèce potentiellement non absorbante, ce qui lui permet de réagir à partir de son état excité (voir Figure II.6). Cette réaction serait impossible si l'espèce non absorbante était isolée. Si D représente la molécule donneuse et A la molécule accepteuse, la réaction peut être formulée de la manière suivante :  $D_0 + h\nu \rightarrow D^*$  et  $D^* + A_0 \rightarrow D_0 + A^*$

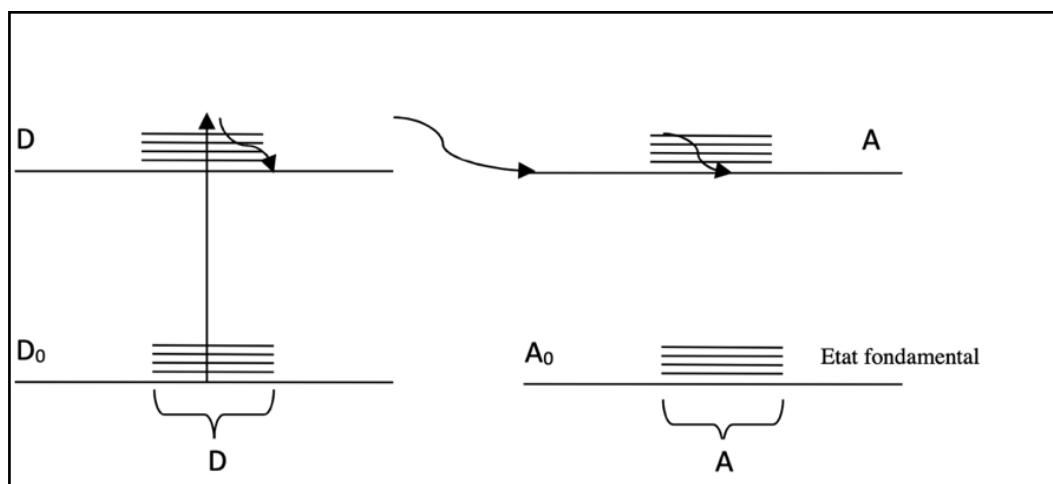
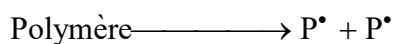
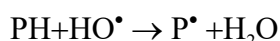
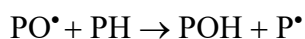
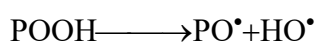
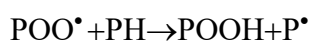
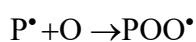
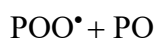


Figure III-3 : Principe d'un transfert d'énergie

Le vieillissement par photo-oxydation se manifeste par l'exposition simultanée aux rayons ultraviolets et à l'oxygène, ce qui en fait l'une des principales causes du vieillissement des polymères. Il est classé parmi les processus de vieillissement chimique liés aux phénomènes d'oxydation. Contrairement au vieillissement physique, il induit des modifications chimiques préférentiellement à la surface des échantillons, la capacité de diffusion de l'oxygène dans le matériau constituant le facteur limitant de ce processus [19] [20].

Pour décrire les réactions impliquées dans la photo-oxydation, on peut se référer à un schéma qui se compose principalement de trois étapes : l'initiation, la propagation et la terminaison.

1: Initiation2: PropagationProduits inactifs + O<sub>2</sub>3: Terminaison

Avec :

PH = polymère,

P<sup>•</sup> = radical alkyle de la chaîne polymérique,PO<sup>•</sup> = radical alkoxyde,POO<sup>•</sup> = radical peroxyde,

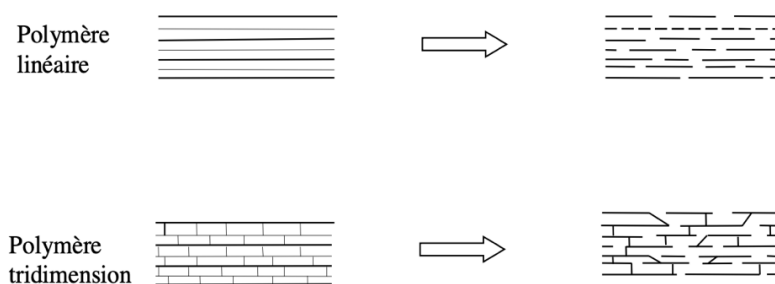
POOH = hydro peroxyde,

HO<sup>•</sup> = radical hydroxyle.

Les mécanismes de dégradation impliqués dans la photo-dégradation sont similaires à ceux observés dans tous les autres types de vieillissement chimique. Ils comprennent principalement les processus de rupture de chaîne et de réticulation[21].

### III.3.2.2 Mécanisme de coupure de chaînes

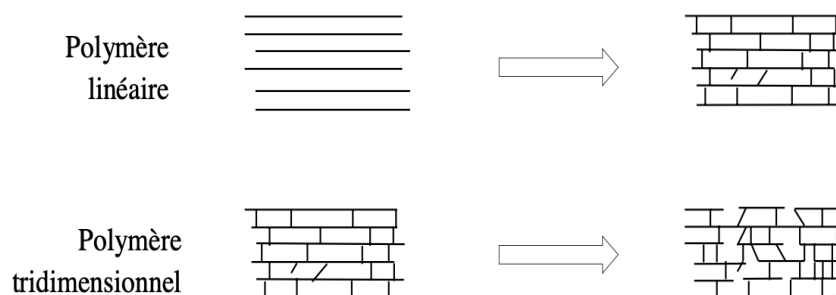
Ce processus de dégradation se traduit par une réduction de la masse moléculaire moyenne du polymère, et il peut être représenté schématiquement par la Figure II.7.



**Figure III-4** : Processus de coupures de chaînes macromoléculaires.

### III.3.2.3 Réticulation

C'est le processus inverse de la rupture de chaînes. Il se caractérise par la formation de liaisons croisées entre les segments adjacents des macromolécules. (II.8).



**Figure III-5** : Processus de réticulation de chaînes

Ce processus de dégradation se manifeste par une augmentation de la masse moléculaire moyenne due à l'association des différentes chaînes. Cependant, ces deux mécanismes interviennent simultanément dans la plupart des cas [22] [23].

### III.3.2.4 Effet de la photo-oxydation sur les propriétés des polymères

L'impact du processus de photo-dégradation sur la durée de vie des polymères a suscité un vif intérêt au cours des dernières décennies [24] [25] [26].

Les études documentées dans la littérature ont révélé que l'exposition des polymères aux rayonnements ultraviolets entraîne systématiquement des changements dans leur structure. Ces changements se caractérisent par la libération de radicaux, la réduction du poids moléculaire et la formation d'une couche oxydée à leur surface, résultant de la diffusion de l'oxygène et de la pénétration des rayonnements UV. Ces altérations entraînent une détérioration des performances diélectriques et mécaniques du matériau [27] [28] [29].

Toutes ces modifications sont directement attribuables à l'évolution chimique du matériau lorsqu'il subit un processus de vieillissement. Dans ce contexte, deux phénomènes peuvent se produire, à savoir la rupture des chaînes macromoléculaires et la réticulation [30].

De même, plusieurs études récentes ont démontré que la photo-oxydation est souvent associée à des altérations des propriétés physiques du matériau, notamment la formation de fissures (microfissures) et la perte des propriétés mécaniques [26] [31] [32].

En ce qui concerne l'évolution de l'état de surface des polymères, de nombreuses études ont été menées pour comprendre l'effet des rayonnements ultraviolets sur l'usure de la surface des polymères et pour estimer le degré de dégradation de ces matériaux [33] [34] [35].

Ces études ont conclu que la résistance à l'usure est directement liée à la quantité d'oxygène responsable du processus d'oxydation, ainsi qu'au degré de réticulation du matériau [36].

Il a été observé une amélioration de la résistance à l'usure de certains matériaux après exposition aux rayonnements ultraviolets [35].

#### **IV. Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a mis en évidence les divers effets du vieillissement des polymères, tant sous l'influence de la chaleur que des rayons ultraviolets. La première partie a mis en évidence les changements morphologiques et les altérations chimiques liés au vieillissement physique et chimique. En ce qui concerne l'effet des rayons ultraviolets, nous avons examiné de près la dégradation photochimique des polymères, en mettant l'accent sur la photo-dégradation et la photo-oxydation, et en soulignant l'importance des facteurs atmosphériques tels que l'oxygène et les rayons UV dans ces processus. Ces connaissances sont essentielles pour comprendre la durabilité des polymères dans des environnements soumis à des contraintes thermiques et aux rayonnements UV.

## *Bibliographie du chapitre II*

- [1] P. Paloniemi, "Théorie de l'égalisation des processus de vieillissement thermique de l'isolation électrique des matériaux dans les tests d'endurance thermique," IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-16, février 1981.
- [2] Y. Mecheri, "Influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension," Thèse de Doctorat, ENP, 2008.
- [3] J. Verdu, "Vieillissement des plastiques," Eyrolles, 1984.
- [4] J. Verdu, "Vieillissement physique," Techniques de l'ingénieur, 1980.
- [5] J. Verdu, "Effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques," Echanges physique-Industrie, 2000.
- [6] B. Fallou, "Comportements spécifiques des matériaux isolants solides soumis à diverses contraintes (chaleur, champ électrique, radiations). Résumé des connaissances actuelles et normalisation," RGE N° 10, pp. 756-767, octobre 1985.
- [7] E. Moriame, "L'endurance thermique des isolants et systèmes d'isolation. Incidence dans la construction des matériels. Indice de température. Contrôle du vieillissement thermique de différents matériaux isolants," RGE N° 7/8, pp. 445-451, juillet/août 1974.
- [8] A. Barlow, "The chemistry of polyethylene insulation," IEEE, Electrical Insulation Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 8-19, 1991.
- [9] CEI 216-1, "Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique, des indices de températures et des profils d'endurance thermique," 1974.
- [10] Z. Szczepanski, "Uktady izolacyjne urzadzen elektroenergetyczne," praca zbiorowa W.W.T, Varsovie, 1978.
- [11] G. Stevens, B. Fallou, A. Day, "Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants," CIGRE rapport N°3 groupe 15, 1982.
- [12] L. Deschamps, C. Caillot, M. Paris, J. Perret, "L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles HT et THT," RGE N°5, pp. 343-359, 1982.
- [13] C. Menguy, "Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides," Techniques de l'ingénieur, D 2310, D2II, 1997.
- [14] C. Jin, P.A. Christensen, T.A. Egerton, E.J. Lawson, J.R. White, "Rapid measurement of polymer photo-degradation by FTIR spectrometry of evolved carbon dioxide," Polymer Degradation and Stability, vol. 91, no. 5, pp. 1086-1096, mai 2006.
- [15] N. Grassie, M.I. Guy, N.H. Tennent, "Degradation of epoxy polymers: Photodegradation of bisphenol-A diglycidyl ether," Polymer Degradation and Stability, vol. 13, no. 3, pp. 249-259, 1985.

- [16] E. Yousif, R. Haddad, "Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review," SpringerPlus, vol. 2, no. 1, pp. 398-430, 2013.
- [17] G. Mertz, "Evolution des propriétés physico-chimiques et mécaniques de composites à base caoutchoucs lors du photo-vieillessement," Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2010.
- [18] Yakimets-Pilot, "Elaboration d'un modèle viscoélastique et son application au comportement d'un polypropylène sous sollicitations mécaniques complexes et physico-chimiques," 2004.
- [19] A.V. Shyichuk, "Comparison of UV-degradation depth-profiles in polyethylene, polypropylene and an ethylene-propylene copolymer," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 88, no. 3, pp. 415-419, 2005.
- [20] J.R. White, A.V. Shyichuk, "Effect of stabilizer on scission and crosslinking rate changes during photo-oxidation of polypropylene," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 92, no. 11, pp. 2095-2101, 2007.
- [21] A. Rivaton, "Investigation of the photophysical processes and photochemical reactions involved in PVK films irradiated at  $> 300$  nm," *Macromolecules*, vol. 36, no. 15, pp. 5815-5824, 2003.
- [22] A. Lahoen, J. Arman, "Etude de mélanges de polyéthylène et de polystyrène par diffraction de rayons X et par densimétrie," *European Polymer Journal*, vol. 31, no. 4, pp. 347-352, 1995.
- [23] S. Wu, "Study on ultraviolet irradiation modification of high-density polyethylene and its effect on the compatibility of HDPE/PVA fibre composites," *Materials Letters*, vol. 57, no. 18, pp. 2647-2650, 2003.
- [24] M.J. Melo, S. Bracci, O. Chiantore, F. Piacenti, "Photodegradation of acrylic resins used in the conservation of stone," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 66, no. 1, pp. 23-30, 1999.
- [25] N. Nagai, T. Matsunobe, T. Imai, "Infrared analysis of depth profiles in UV photochemical degradation of polymers," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 88, no. 2, pp. 224-233, 2005.
- [26] S. Oprea, V. Oprea, "Mechanical behavior during different weathering tests of polyurethane elastomer films," *European Polymer Journal*, vol. 38, no. 6, pp. 1205-1210, 2002.
- [27] J. Tóthček, Z. Vrātnicková, "Polymer life-time prediction: The role of temperature in UV accelerated ageing of polypropylene and its copolymers," *Polymer*, vol. 36, pp. 82-87, June 2014.
- [28] T. Kurihara, T. Takahachi, H. Homma, T. Okamoto, "Oxidation of cross-linked Polyethylene due to Radiation-thermal Deterioration," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 3, pp. 878-887, 2011.
- [29] K. Anandakumaran, "Aging and Condition Monitoring Studies of Composite Insulation Cables Used in Nuclear Power Plants," *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, no. 1, pp. 227-237, 2007.

- [30] L. Doumingue, S. Mallarino, S. Cohendoz, X. Feaugas, J. Bernard, "Extrinsic fluorescence as a sensitive method for studying photo-degradation of high-density polyethylene: Part I," *Current Applied Physics*, vol. 10, no. 4, pp. 1211-1215, 2010.
- [31] B.U. Ahn, S.K. Lee, J.H. Park, B.K. Kim, "UV curable polyurethane dispersions from polyisocyanate and organosilane," *Progress in Organic Coatings*, vol. 62, no. 3, pp. 258-264, 2008.
- [32] Z.F. Wang, B. Wang, X.M. Ding, M. Zhang, L.M. Liu, N. Qi, J.L. Hu, "Effect of temperature and structure on the free volume and water vapor permeability in hydrophilic polyurethanes," *Journal of Membrane Science*, vol. 241, no. 2, pp. 355-361, 2004.
- [33] S. Baxamusa, T. Laurence, M. Worthington, P. Ehrmann, "Photo-oxidation of polymer-like amorphous hydrogenated carbon under visible light illumination," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 122, pp. 133-138, 2015.
- [34] K.S. Toohey, T.A. Blanchet, D.D. Heckelman, "Effect of accelerated aging conditions on resultant depth-dependent oxidation and wear resistance of UHMWPE joint."
- [35] B. Menzel, T.A. Blachet, "Enhanced wear resistance of gamma-irradiated PTFE and FEP polymers and the effect of post-irradiation environmental handling," *Wear*, vol. 258, no. 5-6, pp. 935-941, 2005.
- [36] M. Ramanujam, V. Wachtendorf, P.J. Purohit, R. Mix, A. Schonhals, J.F. Friedrich, "A detailed dielectric relaxation spectroscopy study of artificial UV weathered low-density polyethylene," *Thermochimica Acta*, vol. 530, pp. 73-78, 2012.

## *Chapitre III : Techniques expérimentales*

## I. Introduction

Ce chapitre représente une introduction aux techniques expérimentales qui seront employées pour évaluer l'influence de la température et des rayons ultraviolets sur les isolants. Nous commencerons par explorer la fiche technique du matériau d'étude, le polyéthylène Borlink™ LS4201R. Ensuite, nous aborderons la caractérisation diélectrique du matériau, puis nous examinerons sa caractérisation physico-chimique à travers l'analyse Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).

## II. Polyéthylène Borlink™ LS4201R [1]

### II.1 Description

Le Borlink LS4201R est un composé de polyéthylène naturel réticulable basé sur la technologie Supercure, spécialement conçu pour l'isolation des câbles électriques.

Le Borlink LS4201R est destiné à l'isolation des câbles électriques moyenne tension (MT) en polyéthylène réticulé (XLPE) avec des tensions nominales allant jusqu'à 69 kV ( $U_m = 72,5$  kV). Les valeurs correspondent aux tensions entre phases telles que définies dans la norme IEC 60183.

### II.2 Propriétés électriques

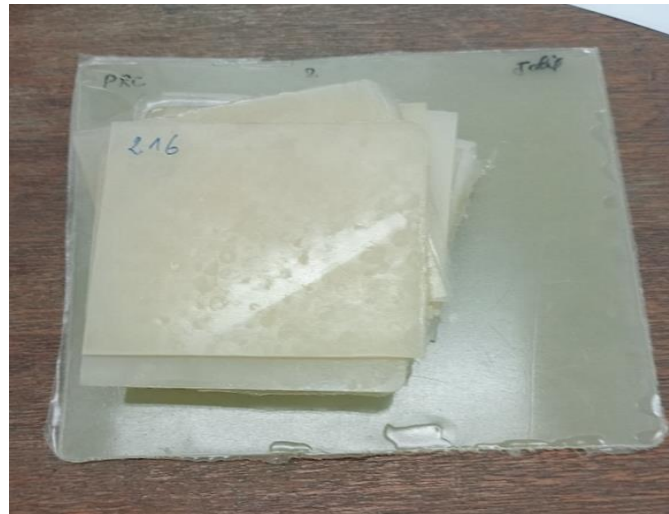
**Tableau II-1:** Propriétés électrique du polyéthylène Borlink™ LS4201R

Propriété	Valeur Typique	Méthode d'Essai
Constante diélectrique (50 Hz)	2,3	IEC 60250
Résistivité volumique en courant continu (23 °C)	> 10 PΩcm	IEC 62631
Facteur de dissipation (50 Hz)	0,0003	IEC 60250

## III. Préparation des échantillons

Pour nos expériences, nous avons découpé des échantillons de PRC en forme carrée de 6,5 cm\* 6,5 cm. Nous disposons de 11 plaques pour la caractérisation électrique et 11 plaques pour la caractérisation physico-chimique. Chaque groupe comprend une plaque destinée à observer l'état

initial et 10 plaques pour effectuer des prélèvements après chaque période de 24 heures, totalisant ainsi 240 heures de vieillissement.



**Figure III-1** : Éprouvettes sous forme carrée avant le vieillissement

## IV. Dispositifs expérimentaux

### IV.1 Vieillissement thermique [2]



**Figure IV-1** : Vue de l'étuve utilisée pour le vieillissement thermique.

Dans le cadre de cette étude, le vieillissement thermique des échantillons sera réalisé dans des étuves à convection naturelle de la marque NUVE, modèle FN 500, avec les caractéristiques suivantes :

- Plage de température : de la température ambiante à +5 °C jusqu'à 250 °C, avec une précision de  $\pm 1$  °C.
- Contrôle automatisé via un système de microprocesseur PID programmable.
- Interface utilisateur conviviale avec des affichages numériques pour la température et le temps.
- Possibilité de programmation d'une minuterie avec démarrage différé.
- Excellente uniformité et stabilité de la température assurées par un haut niveau d'isolation et un système de contrôle avancé.
- Chambre en aluminium anodisé pour une conductivité thermique optimale.
- Distribution homogène de la température obtenue par convection naturelle de l'air.
- Perte de chaleur minimale grâce à une porte hermétiquement pressée contre le joint de la chambre.
- Évacuation externe pour le rejet contrôlé de la vapeur d'eau.
- Intégration d'un thermostat de sécurité standard.

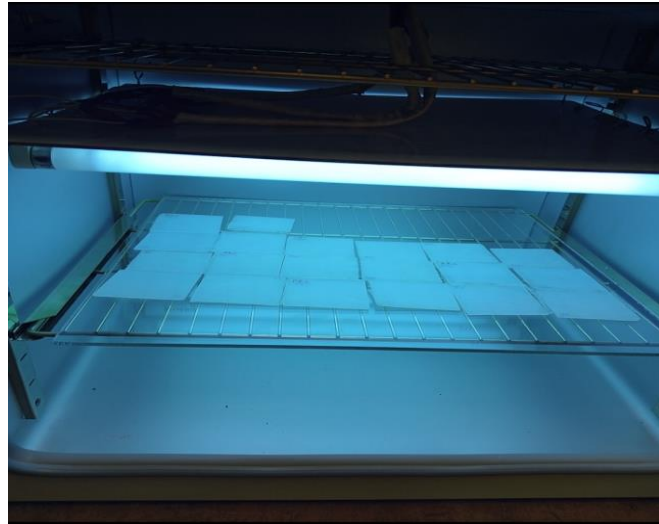
L'étude de vieillissement sera menée sur diverses périodes, variant de 24 à 240 heures, à une température constante. Les caractéristiques avancées de l'étuve NUVE FN 500 fournissent un environnement de vieillissement thermique précis et contrôlé, pour la compréhension des propriétés évolutives du matériau.

## IV.2 Intégration de source UV dans l'étuve

Pour induire un vieillissement combiné (radio thermique) nous avons intégré 8 lampes de la marque Sylvania dans l'étuve afin de générer des rayons ultraviolets.



Figure IV-2 : Lampe de la marque Sylvania



**Figure IV-3 :** Exposition des échantillons au vieillissement combiné (radio thermique)

### IV.3 Caractérisation diélectrique

Le facteur de pertes diélectriques, la résistance d'isolement et la capacité de l'éprouvette sont mesurés directement à l'aide d'un LCR-mètre. La permittivité relative, l'indice de pertes diélectriques et la résistivité transversale seront déterminés à l'aide d'équations qui sont fonction de la géométrie et des électrodes utilisées

#### IV.3.1 Permittivité relative

On obtiens la permittivité relative par la relation (III.1).

$$\varepsilon' = \frac{C \cdot e}{\varepsilon_0 \cdot S} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

C : la capacité

e : Epaisseur de l'isolant en cm.

S : surface de l'électrode en cm<sup>2</sup>.

#### IV.3.2 Indice de pertes diélectriques

On détermine l'indice de pertes diélectrique à l'aide de la relation (III.2)

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \text{tg } \delta \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$\varepsilon'$  : Permittivité relative

tg  $\delta$  : Facteur de pertes diélectrique

## V. Caractérisation chimique

### V.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

Dans l'objectif d'identifier les divers groupements fonctionnels présents dans le polymère et de détecter les composés éventuels (impuretés) présents à l'état initial ainsi que ceux introduits dans le matériau suite aux différents types de vieillissements, une analyse spectroscopique FTIR a été planifiée.

La spectroscopie infrarouge, une technique largement utilisée et fondamentale dans l'analyse moléculaire, elle repose sur l'absorption de la radiation infrarouge par les molécules. Lorsqu'elles sont exposées à ce rayonnement, les molécules subissent des changements d'état vibrationnel à des fréquences spécifiques à chaque groupe moléculaire. La condition essentielle pour qu'une vibration moléculaire soit détectée en infrarouge est un changement net dans le moment dipolaire, où la variation doit être significative.

Les bandes d'absorption infrarouge, généralement associées aux vibrations de liaisons polaires, sont caractéristiques de chaque molécule. Cette méthode qualitative et non destructive exploite le principe d'oscillation harmonique, où chaque fréquence fondamentale correspond à l'absorption d'un rayonnement spécifique. Ces fréquences, variant de 500  $\text{cm}^{-1}$  à 4000  $\text{cm}^{-1}$ , se situent dans la plage infrarouge.

À une longueur d'onde donnée, l'absorption d'un composé est déterminée par le rapport entre l'intensité  $I$  du rayonnement transmis par l'échantillon et l'intensité  $I_0$  de la source. Ce rapport est exprimé en pourcentage sous le terme de "transmission" ( $T = I/I_0$ ) [5].

## VI. Conclusion

En résumé, ce chapitre expérimental a fourni une vue détaillée de la fiche technique du polyéthylène Borlink<sup>TM</sup> LS4201R. Nous avons également présenté les dispositifs utilisés pour les expériences, notamment le vieillissement thermique et sous rayonnements ultraviolets (UV), ainsi que la caractérisation diélectriques (permittivité relative, indice de pertes diélectriques, résistivité transversale) et l'analyse physico-chimiques (spectroscopie infrarouge FTIR, microscopie électronique à balayage MEB). Ces approches variées renforcent notre capacité à analyser les propriétés du polyéthylène dans différentes conditions, pour la compréhension des effets du vieillissement thermique et des rayonnements UV sur le matériau.

### *Bibliographie du chapitre III*

- [1] Borealis AG, "Wagramer Strasse 17-19, 1220 Vienna, Austria," Ed.2, Oct. 2, 2017.
- [2] M. Hedir, "Effets des contraintes électriques et des paramètres environnementaux sur les propriétés diélectriques des isolants," Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2017.
- [3] Q. Wu, B. Qu, Y. Xu, Q. Wu, "Surface photo-oxidation and photostabilization of photocross-linked polyethylene," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 68, no. 1, pp. 97-102, avril 2000.
- [4] M. Moudoud, "Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants," Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.
- [5] L. Boukezzi, "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension," Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.

## *Chapitre IV : Résultats et discussions*

## I. Introduction

Le but de ce chapitre est d'examiner comment la température et les rayons UV affectent les caractéristiques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). Nous commencerons par suivre l'évolution temporelle et fréquentielle des propriétés électriques. Ensuite, nous chercherons à combiner les résultats de la caractérisation physico-chimique (FTIR) avec les études précédentes.

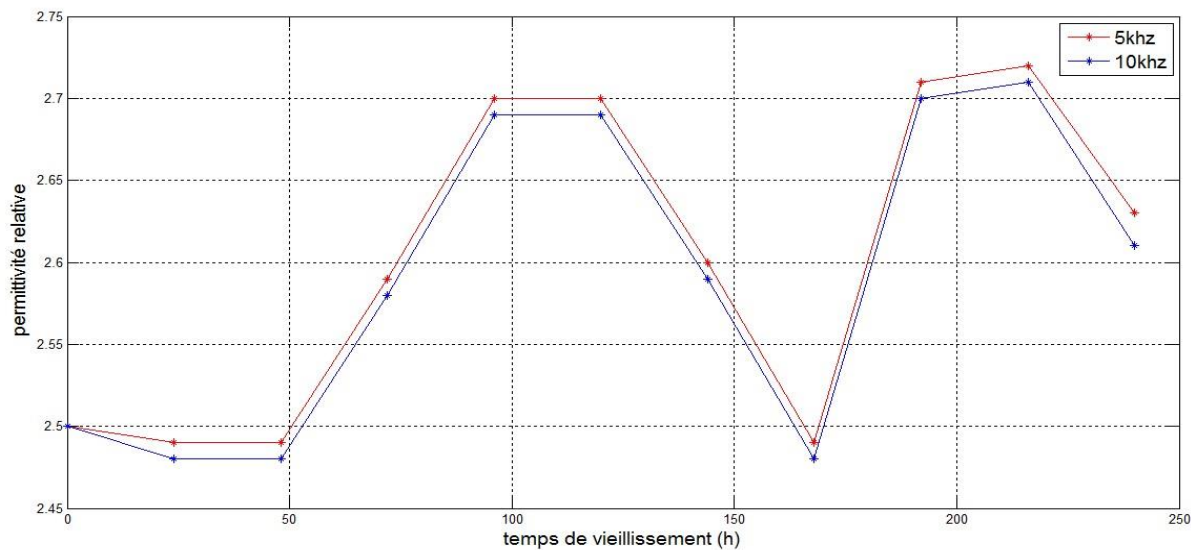
## II. Caractérisation électrique

Cette section se concentre sur les résultats relatifs à l'évolution des propriétés électriques du PRC sous l'effet du vieillissement combiné radio thermique. Nous examinerons les variations de la permittivité relative, du facteur de perte diélectrique et de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement et de la fréquence, en utilisant les données fournies par le LCR mètre.

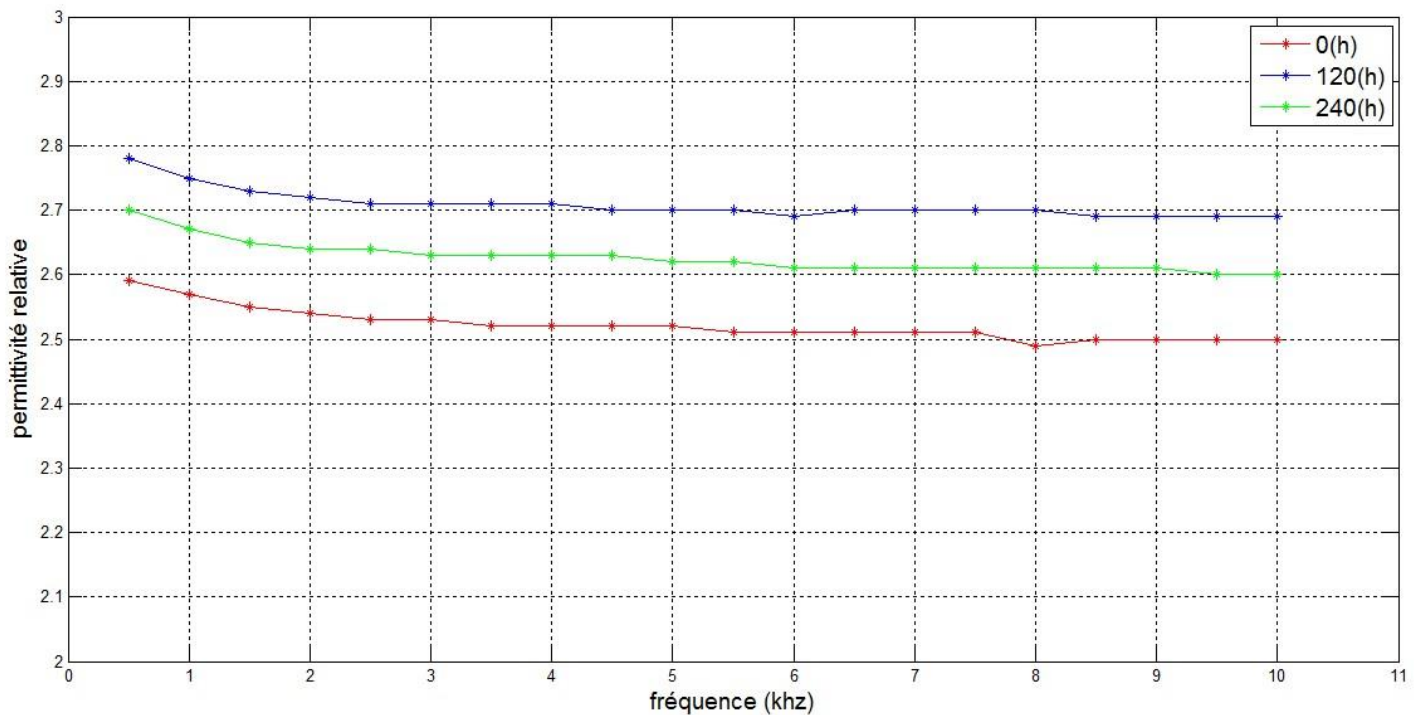
### II.1 La permittivité relative

La variation de la permittivité relative en fonction du temps de vieillissement à des fréquences constantes (5 kHz, 10 kHz) est illustrée dans la figure II-1. On observe que les deux courbes suivent une tendance similaire : une diminution au début du vieillissement, atteignant un minimum après environ 24 heures, suivie d'une augmentation rapide, puis d'une stabilisation. Ensuite, on note une diminution rapide jusqu'à  $t = 166$  h, suivie d'une augmentation rapide pendant les 24 heures suivantes, puis d'un ralentissement de l'augmentation et enfin d'une diminution jusqu'à la fin du vieillissement. Les variations observées dans la permittivité relative peuvent être attribuées aux changements structuraux induits par le vieillissement radio thermique. En effet, plusieurs réactions, telles que la réticulation et la scission des chaînes, peuvent se produire simultanément. L'évolution de la permittivité est déterminée par la réaction dominante : une diminution indique un phénomène de réticulation, tandis qu'une augmentation indique une scission des chaînes [1].

La variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence et à des différents temps de vieillissement (0h, 120h, 240h) est illustrée sur la figure II-2, dans cette figure nous remarquons que toutes les courbes ont la même forme que l'état vierge, la permittivité relative présente des allures décroissantes pour les basses fréquences, puis devient stable pour les hautes fréquences, ce comportement observé par plusieurs auteurs [2], [3], [4], peut être attribué au phénomène de polarisation et de relaxation prenant naissance dans le matériau.



**Figure II-3:** Variation de la permittivité relative en fonction du temps de vieillissement



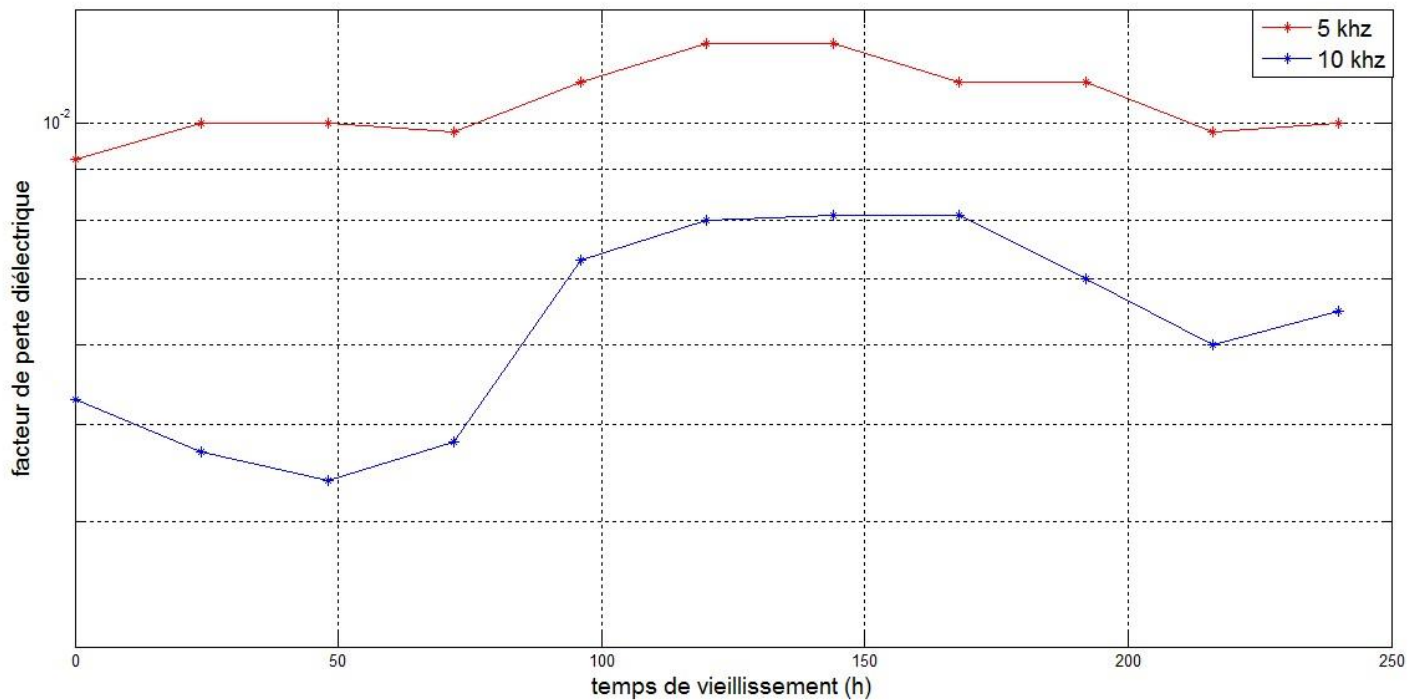
**Figure II-4 :** variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence

## II.2 Facteur de pertes diélectriques

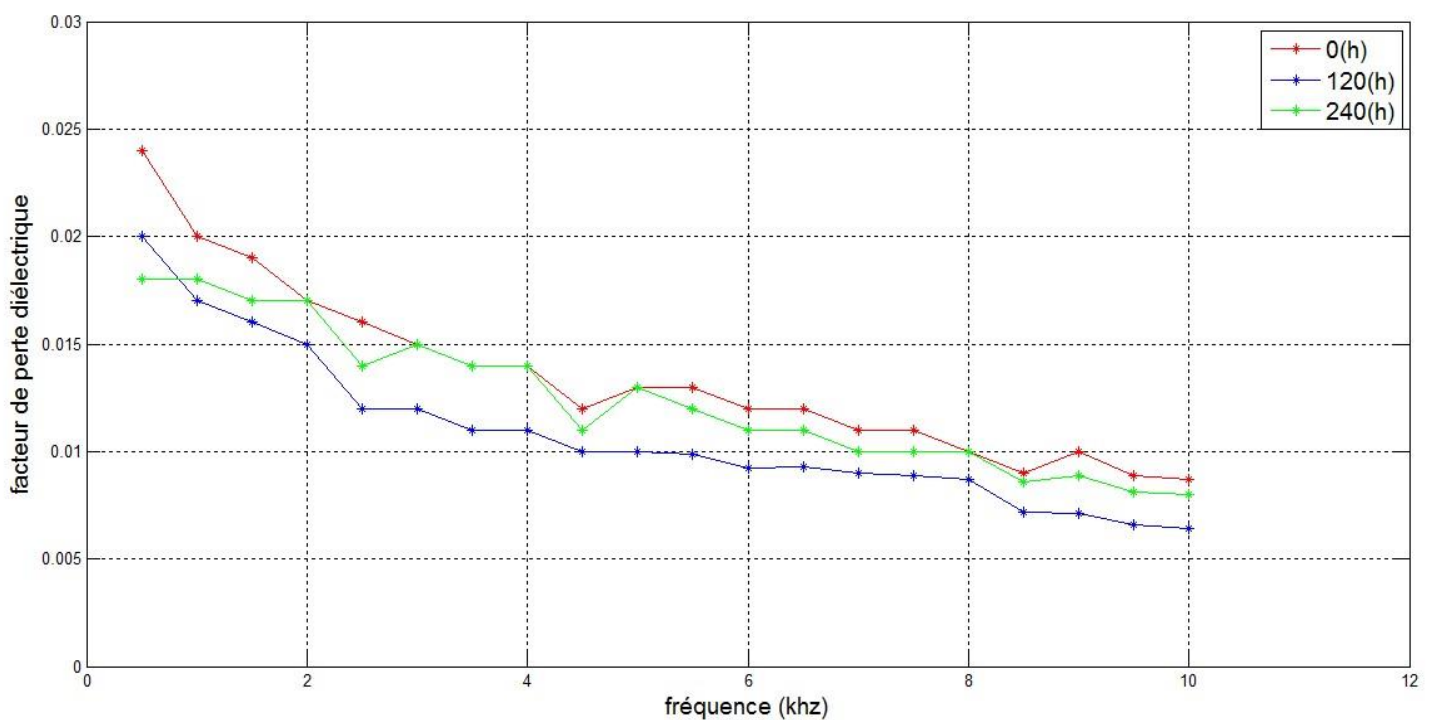
La variation du Facteur de pertes diélectriques en fonction de temps de vieillissement à des fréquences différentes (5KHz ,10KHz), est illustrée sur la figure II-5, dans cette figure nous remarquons que avant les premières 72 h de vieillissement le facteur de pertes diélectriques présente une allure décroissante pour la fréquence 10 Khz et croissante pour la fréquence 5 khz, puis ils suivent la même allure. La diminution du facteur de pertes diélectriques peut être attribuée à l'augmentation de la cristallinité du PRC [5]. La croissance de  $\tan\delta$  peut être assignée à la

présence des dipôles due aux composés carbonylés formés suite au phénomène d'oxydation [5].

La variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence pour différentes temps de vieillissement (0h, 120h, 240h) est illustrée sur la figure II-6, dans cette figure nous remarquons que le facteur de pertes présente des allures décroissantes, avec la présence de quelques pics qui seront dus aux relaxations des dipôles [1].



**Figure II-7 :** variation du Facteur de pertes diélectriques en fonction de temps de vieillissement

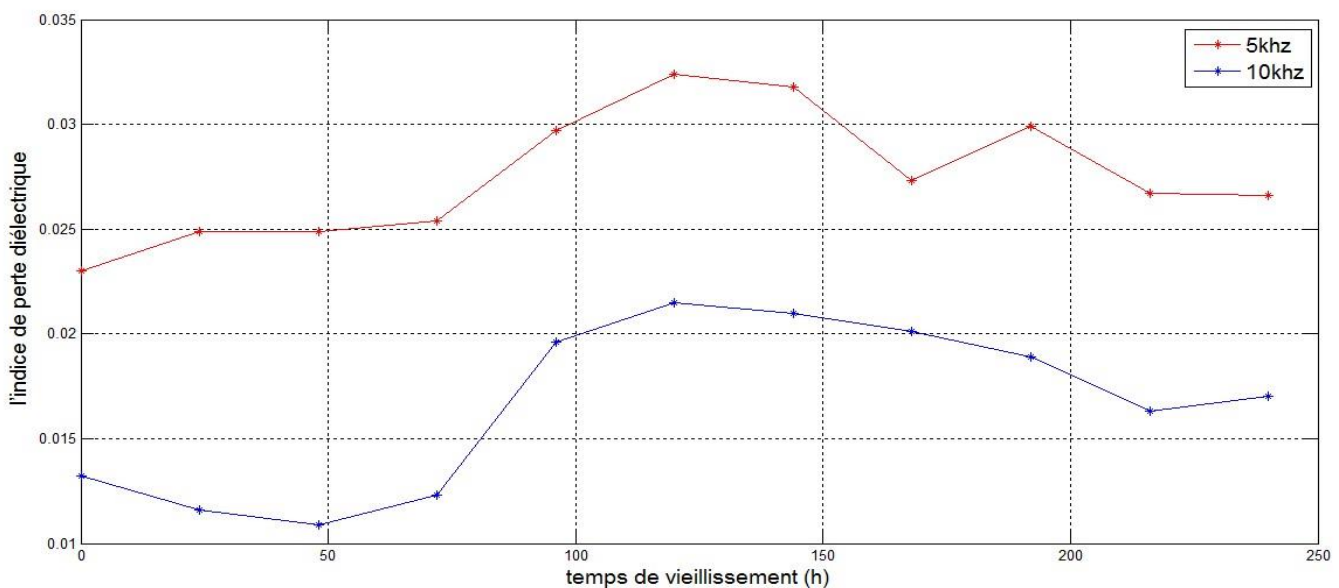


**Figure II-8 :** variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence

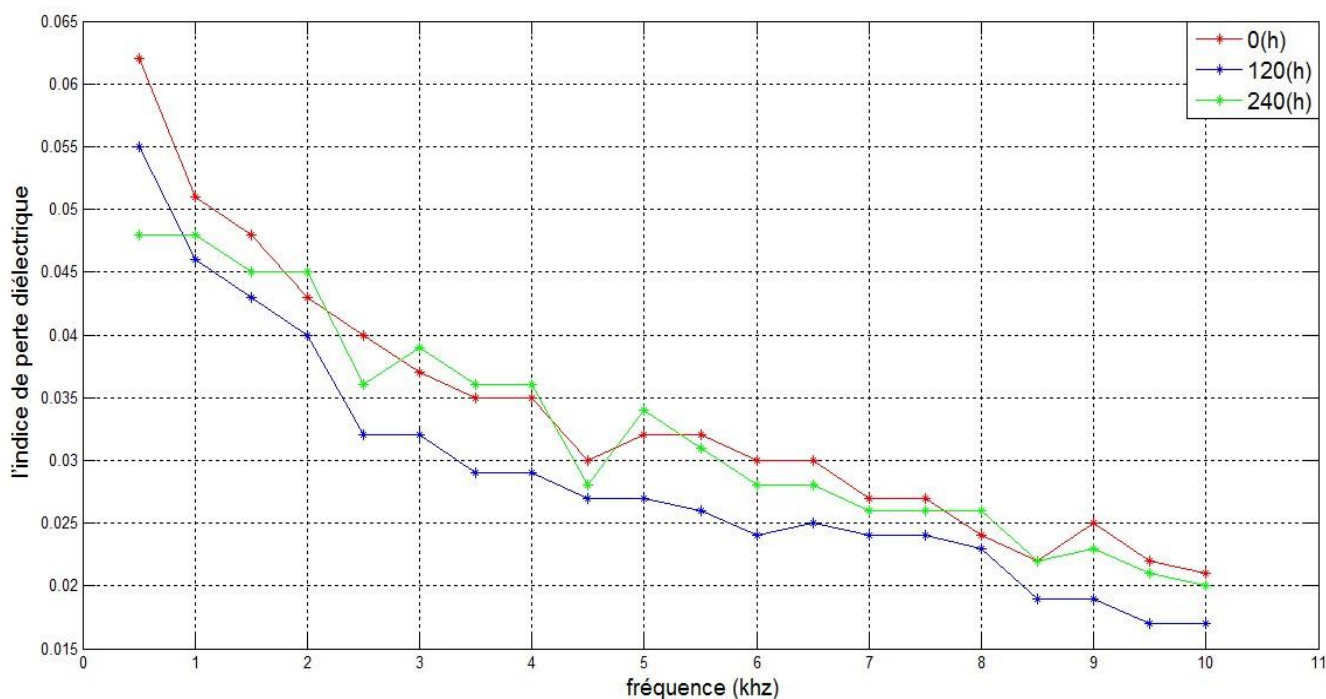
### II.3 L'indice de pertes diélectriques

La variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de temps de vieillissement à des fréquences constantes (5KHz ,10KHz) est illustrée sur la figure II-9, sur cette figure nous observons une légère augmentation de l'indice de pertes au cours du vieillissement pour les deux fréquence étudié, avec la présence des pics qui seront dus à l'évolution de l'indice de pertes diélectriques qui renseigne sur la puissance perdue dans le polymère. Donc toute augmentation ou diminution de l'indice de pertes correspond à une augmentation ou diminution de la puissance perdue dans le matériau [6].

La variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la fréquence et à des différents temps de vieillissement (0h, 120h, 240h) est illustrée sur la figure II-10, dans cette figure nous remarquons que toutes les courbes ont la même forme que l'état vierge. L'indice de pertes diélectriques présente des allures décroissantes pour les basses fréquences avant et après vieillissement, puis devient monotone et stable pour les hautes fréquences, la diminution de l'indice de pertes diélectriques peut être expliquée par la puissance perdue dans le matériau, on observe aussi des pics qui seront dus aux phénomène de relaxation et de polarisation [7,8].



**Figure II-11** : variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de temps de vieillissement



**Figure II-12 :** variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la fréquence

### III. Caractérisation chimique

#### III.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) fonctionne en analysant la manière dont les groupes chimiques et fonctionnels des molécules réagissent au rayonnement électromagnétique. Cette technique a été initialement employée pour évaluer la dégradation du polyéthylène par Tabb et Koenig [9].

Nous utilisons cette méthode dans notre étude dans le but d'évaluer les altérations dans la structure chimique, particulièrement causées par l'oxydation du PRC vieilli. Nous présentons dans la figure III-1 les spectres infrarouges de l'échantillon initial (avant vieillissement), tandis que dans la figure III-2, nous montrons ceux correspondant aux échantillons vieillis après 120 heures et 240 heures. L'analyse des spectres révèle des modifications dans la structure moléculaire du PRC vieilli exposé à une température de 60°C et aux rayons ultraviolets.

En se référant à la documentation disponible sur ce sujet, l'analyse du spectre de l'échantillon initial met en évidence la présence de plusieurs bandes correspondant à l'absorption des divers groupes chimiques.

- La bande observée à une longueur d'onde de  $720\text{ cm}^{-1}$  correspond au balancement des groupes méthylènes ( $-\text{CH}_2$ ), ce qui est un pic caractéristique du PRC [10,11,12]. Cette bande est confirmée par des bandes à  $1471\text{ cm}^{-1}$ ,  $2856\text{ cm}^{-1}$  et  $2937\text{ cm}^{-1}$ , qui correspondent

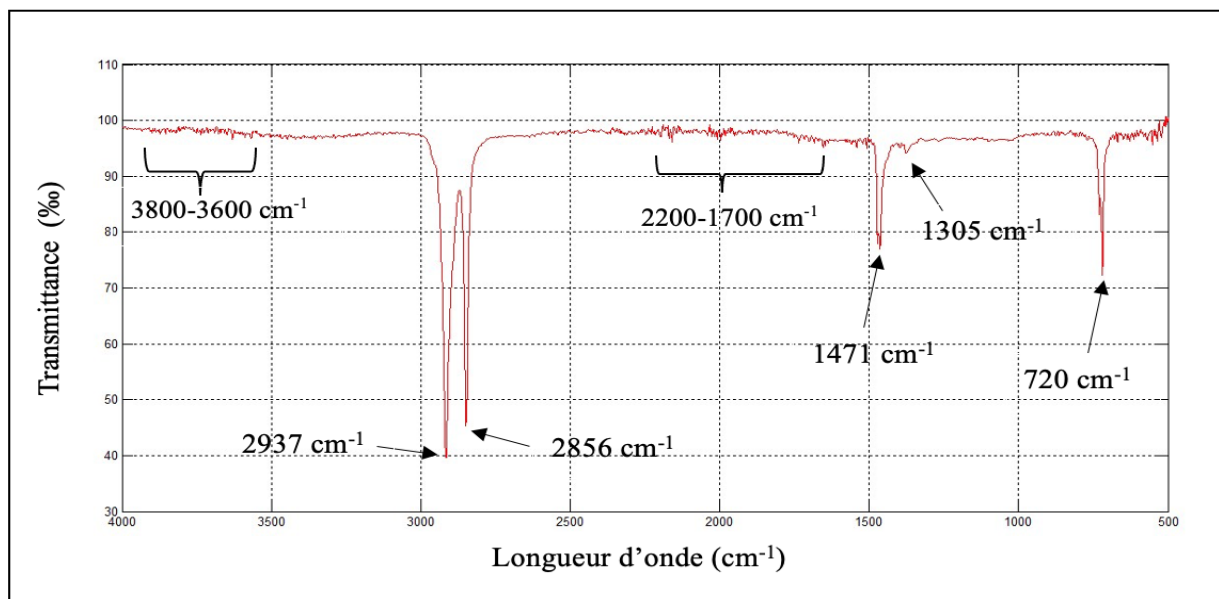
respectivement aux vibrations de valence, symétriques et asymétriques du groupe (-CH<sub>2</sub>) [12-13].

- La bande détectée à la longueur d'onde de 1898 cm<sup>-1</sup> correspond à l'absorption de la partie cristalline du matériau [14], tandis que la partie amorphe absorbe à une longueur d'onde de 1305 cm<sup>-1</sup> [14,15]. Cette même longueur d'onde de 1305 cm<sup>-1</sup> correspond également à l'absorption de l'acétophénone [16], un produit de décomposition résultant de l'opération de réticulation du polyéthylène.
- La thermo-oxydation se manifeste au niveau des groupes carbonyles. Ces derniers présentent de petites bandes d'absorption dans une plage s'étalant de 1700 cm<sup>-1</sup> à 2200 cm<sup>-1</sup>. Dans notre matériau, nous avons détecté des bandes situées dans cette région, indiquant une absorption de l'acide carboxylique, de l'aldéhyde ou de l'ester [17,11,18,19,14,20,21]. La présence de ces bandes dans l'échantillon non vieilli souligne le déclenchement du processus d'oxydation lors de la phase de fabrication des échantillons.
- La région entre 3600 cm<sup>-1</sup> et 3800 cm<sup>-1</sup> présente une absorption correspondant à la fonction (-OH) des groupes hydroxyles [19,22]

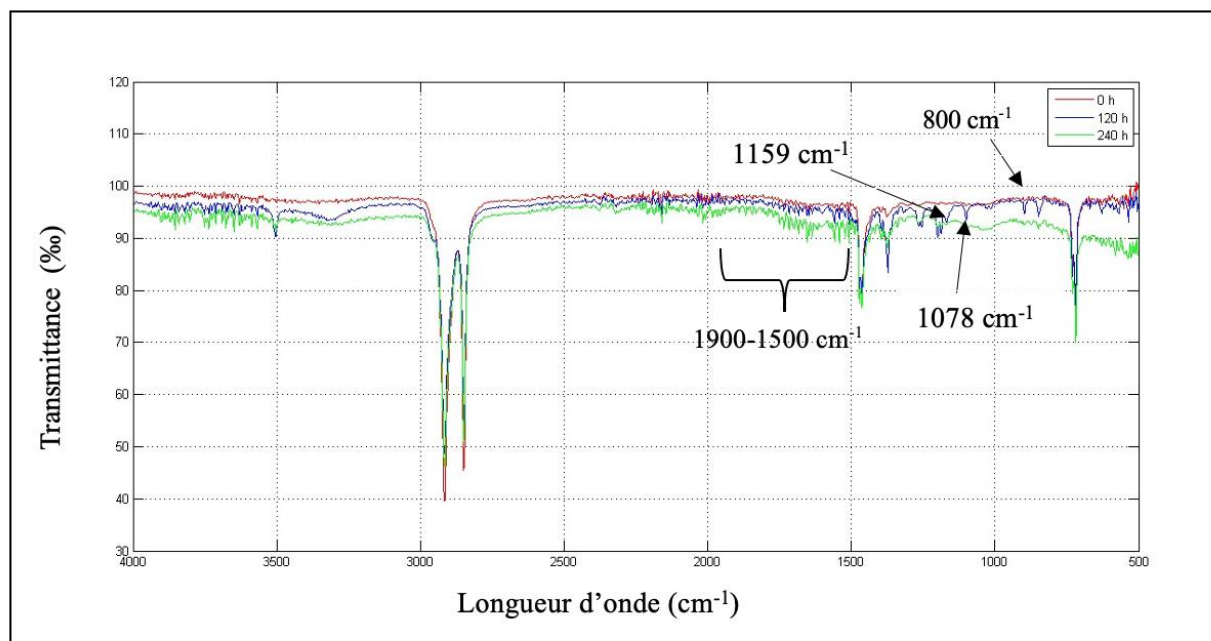
Après 120 et 240 heures de vieillissement radio thermique, les changements à noter sont les suivants :

- L'oxydation, caractérisée par l'absorption des groupes carbonyles, se manifeste par une zone d'absorption intense entre 1500 cm<sup>-1</sup> et 1900 cm<sup>-1</sup>, indiquant une concentration élevée de ces produits après le vieillissement. Cette concentration accrue suggère que l'oxydation due au vieillissement a atteint un stade avancé.
- La diminution de l'intensité des bandes caractérisant l'antioxydant (1078 cm<sup>-1</sup> et 1159 cm<sup>-1</sup>) accompagne l'apparition de la zone précédente. Cela indique que lorsque l'oxydation est avancée, l'antioxydant est pratiquement épuisé.
- L'augmentation de l'absorption à 1305 cm<sup>-1</sup> après 240 heures de vieillissement par rapport à 120 heures implique que l'acétophénone s'est évaporée pendant le vieillissement entre 120 heures et 240 heures.
- Une diminution de l'intensité des spectres est observée. Ce résultat suggère que le vieillissement radio thermique réduit les forces de cohésion entre les chaînes et augmente la mobilité des chaînes [23], [24].
- Augmentation de l'absorbance dans la région 800 cm<sup>-1</sup>- 1100 cm<sup>-1</sup> est attribuée aux groupes insaturés C=C [25].

- Apparition d'une bande d'absorption à  $3500\text{ cm}^{-1}$  qui correspond à l'absorption de la phase amorphe du PRC [25].



**Figure III-3** : Spectres infrarouges du PRC avant vieillissement



**Figure III-4** : Spectres infrarouges du PRC avant et après 120 et 240 heures de vieillissement

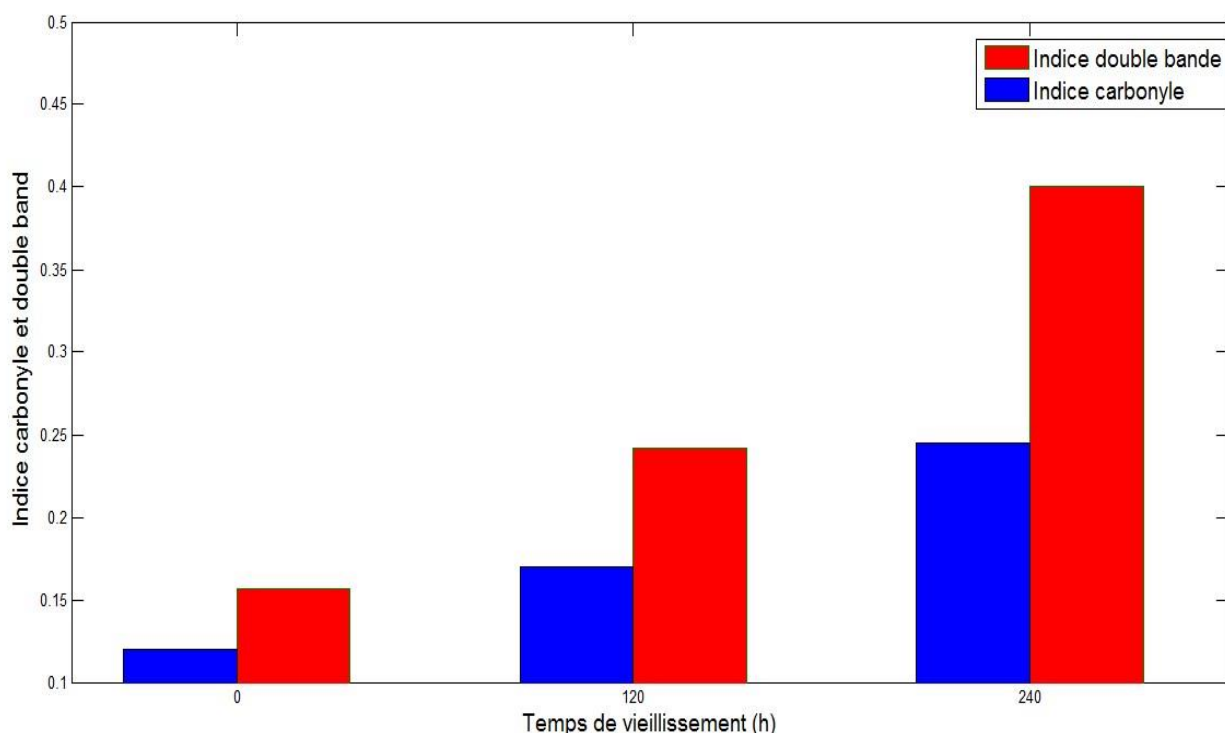
À partir des spectres FTIR, il est possible d'évaluer le niveau d'oxydation. Généralement, deux indices peuvent être évalués pour obtenir des informations quantitatives sur le niveau d'oxydation des polyéthylènes. Ces deux indices sont [26] :

- L'indice carbonyle, qui est l'intensité relative de la bande carbonyle à  $1741\text{ cm}^{-1}$  (absorption de l'aldéhyde) par rapport à la bande méthylène à  $1471\text{ cm}^{-1}$ . L'indice carbonyle (CI) est calculé selon l'équation (IV.1) :

$$CI = \frac{Abs_{1741}}{Abs_{1471}} \quad (IV.1)$$

- L'indice de double bande (DBI) qui représente l'intensité relative du groupe insaturé vinyldène ( $C=C$ ) à  $1635\text{ cm}^{-1}$  par rapport à la bande méthylène à  $1471\text{ cm}^{-1}$ . Le DBI est calculé selon l'équation (IV.2) :

$$DBI = \frac{Abs_{1635}}{Abs_{1471}} \quad (IV.2)$$



**Figure III-5 :** L'indice carbonyle et L'indice de double bande (DBI) en fonction du temps de vieillissement

Comme montré dans la Figure IV.9, les échantillons exposés et non exposés contiennent des groupes carbonyle. Les indices carbonyle et DBI de l'échantillon vierge sont respectivement de 0,120 et 0,157. Après exposition pendant 120 heures, ces indices augmentent et atteignent les valeurs de 0,17 et 0,242. À la fin de l'exposition, les indices atteignent les valeurs de 0,24 et 0,4. L'augmentation de la concentration de groupes carbonyle indique une augmentation du taux de réaction d'oxydation, et donc une croissance dans la génération de produits de vieillissement [26]. Dès lors, le mécanisme préféré associé au vieillissement semble être celui produisant des doubles liaisons. Ce résultat est en accord avec l'analyse FTIR relative aux processus d'oxydation et de dépolymérisation, qui se sont produits pendant le vieillissement. Des études similaires ont été rapportées dans des études précédentes.[27]

## IV. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre le mécanisme de vieillissement radio thermique du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) utilisé dans l'isolation des câbles de moyenne et haute tension. Dans un premier temps, nous avons étudié l'effet de ce phénomène sur les propriétés électriques du matériau. Nous avons démontré que l'exposition du PRC à la température et aux rayonnements UV entraîne une augmentation du facteur de pertes diélectriques, attribuée à la formation de groupes polaires, principalement des carbonyles, qui augmentent la polarité du matériau. Nos résultats indiquent également que l'exposition à la chaleur et aux UV provoque une augmentation de la constante diélectrique, due à la formation de certains défauts structurels dans le matériau suite à la scission des chaînes. Par ailleurs, on observe une diminution des propriétés diélectriques avec l'augmentation de la fréquence.

Des variations dans les intensités de plusieurs pics dans l'analyse FTIR ont été remarquées. Cette évolution suggère que la chaleur et les radiations UV réduisent les forces de cohésion entre les chaînes, augmentent le taux de réticulation et la mobilité des chaînes. En plus de la réticulation, l'exposition du PRC à la température et aux UV peut induire l'oxydation. L'oxydation est confirmée par la rupture des chaînes et une augmentation des indices carbonyle et DBI. Ces deux réactions chimiques se produisent préférentiellement dans la phase amorphe.

## *Bibliographie du chapitre IV*

- [01] Z. Chen, J. Zhao, S. Yan, Y. Yuan, S. Liu, Dielectric properties of photocrosslinkable polyimide/functional graphene oxide composites, *Materials letters*, Vol. 157, pp. 201-204, October 2015.
- [02] S. Raghu, K. Archana, C. Sharanappa, S. Ganesh, H. Devendrappa, Electron beam and gamma ray irradiated polymer electrolyte films: Dielectric properties, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 9, No. 2, pp. 117-124, April 2016.
- [03] N. Mahdhi, B. Askri, K. Raouadi, G. Damamme, R. Dakhli, Study of dielectric properties of composite insulators for use in medium voltage overhead lines, *Journal of Electrostatics*, Vol. 71, No. 5, pp.892-897, October 2013.
- [04] E. Linde, L. Verardi, D. Fabiani, U.W. Gedde, Dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for cable insulation based on crosslinked polyethylene, *Polymer Testing* Vol. 44, pp. 135-142, July 2015.
- [05] L. Boukezzi, A. Boubakeur, S. Rondot, O. Jbara, C. Laurent, Characterization tests and analysis of cross-linked polyethylene (XLPE) used in high voltage cables insulation under thermal constraint, 2014 International Conference on Electrical and Technologies in Maghreb(CISTEM), 3-6 November 2014, Tunis, Tunisia.
- [06] Dj. BOUGUEDAD, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de EPDM », Thèse de Doctorat, UMMTO, 2010
- [07] N. Mahdhi, B. Askri, K. Raouadi, G. Damamme, R. Dakhli, Study of dielectric properties of composite insulators for use in medium voltage overhead lines, *Journal of Electrostatics* 71 (2013) 892-89.
- [08] E. Linde, L. Verardi, D. Fabiani, U.W. Gedde, Dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for cable insulation based on crosslinked polyethylene, *Polymer Testing* 44 (2015) 135-142.
- [09] D.L. Tabb, J.J. Sevicik, J.L. Koenig, “Fourier transform infrared study of the effects of irradiation on polyethylene”, *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Editions*, Vol. 13, Issue 4, pp. 815-824, 1975.
- [10] M. Celina, K.T. Gillen, R.L. Clough, “Inverse temperature and annealing phenomena during degradation of Crosslinked polyolefins”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 61, pp. 231-244, 1998.
- [11] D. Srivastava, P. Kumar, G.N. Mathur, “Thermo-oxidative degradation studies of ternary blends of polyethylenes”, *Advances in Polymer Technology*, Vol. 23, N° 1, pp. 59-70, 2004.
- [12] L. Boudou, J. Guastavino, “Physico-chemical observations on polyethylene base resin under the effect of thermal ageing”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 35, pp. 1-4, 2002.

- [13] T. Volke-Sepúlveda, E. Favela-Torres, A. Manzur-Guzmán, M. Limón-González, G. Trejo-Quintero, "Microbial degradation of thermo-oxidized Low-Density Polyethylene", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 73, pp. 1435-1440, 1999.
- [14] E. David, J.-L. Parpal, J.-P. Crine, "Influence of mechanical strain and stress on the electrical performance of XLPE cable insulation", *IEEE, Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 170-173, Pittsburgh, PA USA, June 5-8 1994.
- [15] P.K. Roy, P. Surekha, C. Rajagopal, R. Raman, V. Choudhary, "Study on the degradation of low-density polyethylene in the presence of cobalt stearate and benzil", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 99, pp. 236-243, 2006.
- [16] S.S. Bamji, A.T. Bulinski, H. Suzuki, M. Matsuki, Z. Iwata, "Luminescence in crosslinked polyethylene at elevated temperatures", *Journal of Applied Physics*, Vol. 74, N° 8, pp. 5149-5153, October 1993.
- [17] A. Motori, G.C. Montanari, S. Gubanski, "Low-Frequency dielectric properties for diagnosis of aging in polymeric cables", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 59, pp. 1715-1724, 1996.
- [18] V. Sáenz de Juano-Arbona, A. Vallés-Lluch, L. Contat-Rodrigo, A. Ribes-Greus, "Chemical and thermal characterization of high and low-density irradiated polyethylenes", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 86, pp. 1953-1958, 2002.
- [19] M. Gamez-Garcia, R. Bartnikas, M.R. Wertheimer, "Modification of XLPE exposed to partial discharges at elevated temperature", *IEEE, Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 25, N° 4, pp. 688-692, August 1990.
- [20] E.L. Leguenza, G.C. Silva, J.V. Gulmine, P.C.N. Scarpa, D.K. Das-Gupta, "Dielectric behaviour of AC aged XLPE cables", *IEE, Dielectric Materials Measurements and Applications*, pp. 241-246, 2000.
- [21] T. Corrales, F. Catalina, C. Peinado, N.S. Allen, E. Fontan, "Photooxidative and thermal degradation of polyethylenes: interrelationship by chemiluminescence, thermal gravimetric analysis and FTIR data", *Journal of Photochemistry and photobiology A: Chemistry*, Vol. 147, pp. 213-224, 2002.
- [22] A. Akowska, "Service experience with PE and XLPE insulated power cables", *IEEE, Power Cable and Accessories 10kV-500kV*, pp. 46-49, November 1993.
- [23] M. Moudoud, O. Lamrous, S. Diaham, M. Megherbi, "Electrical ageing effects on dielectric properties of polymethyl methacrylate", *European Physics Journal. Applied*.
- [24] J.V. Gulmine, P.R. Janissek, H.M. Heise, L. Akcelrud, "Polyethylene Characterization by FTIR", *Polymer Testing*, Vol. 21, No. 5, pp. 557-563, April 2002.
- [25] M. Hedir, "Effets des contraintes électriques et des paramètres environnementaux sur les propriétés diélectriques des isolants," *Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou*, 2017.
- [26] Boukezzi, L.; Boubakeur, A.; Laurent, C.; Lallouani, M. 2008, 17, 611.

- [27] Ghunem, R. A.; Tay, L.-L.; Terrab, H.; El-Hag, A. H. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2016, 23, 3539.

## *Conclusion générale*

Dans ce mémoire, notre objectif était d'étudier l'influence de la température et des rayonnements ultraviolets (UV) sur les caractéristiques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). Nous nous sommes intéressés à l'évolution du vieillissement combiné radio-thermique en fonction du temps sur les propriétés diélectriques (permittivité relative, indice de pertes et facteur de pertes diélectriques) et chimiques (analyse FTIR).

Dans le premier chapitre, nous avons donné quelques rappels sur les isolants et les diélectriques, puis des généralités sur les polymères, à savoir leurs définitions, leurs types et leurs propriétés. Dans le deuxième chapitre, nous avons exploré les effets du vieillissement thermique et des rayons UV sur les polymères, en particulier l'oxydation, la réticulation, la dépolymérisation et la rupture de chaînes. La présentation des techniques expérimentales a fait l'objet du troisième chapitre, où nous avons d'abord présenté les caractéristiques du matériau étudié, détaillé le protocole de vieillissement, et évoqué les différentes techniques expérimentales utilisées pour les caractérisations diélectrique et chimique.

L'analyse de la variation des propriétés diélectriques nous a permis d'aboutir aux résultats suivants. La permittivité relative fluctue avec le temps de vieillissement, diminuant parfois en raison de la réticulation, et augmentant dans d'autres cas en raison de la scission des chaînes. Toutefois, en comparant les valeurs initiales et finales, une augmentation globale de la permittivité relative est observée, ce qui indique que la scission des chaînes est le phénomène dominant... En termes de fréquence, nous avons constaté que la constante diélectrique ne subit pas de changements à haute fréquence, mais diminue à basse fréquence en raison du phénomène de polarisation. L'indice de pertes diélectriques présente une légère augmentation au cours du vieillissement pour les deux fréquences étudiées, avec la présence de pics dus à la puissance perdue dans le polymère. Donc, toute augmentation ou diminution de l'indice de pertes correspond à une augmentation ou diminution de la puissance perdue dans le matériau. En fonction de la fréquence, l'indice de pertes diminue, ce qui peut être expliqué par la puissance perdue dans le matériau et par les phénomènes de relaxation et de polarisation.

Pour l'étude du comportement chimique, nous avons effectué une analyse FTIR. L'analyse des spectres infrarouges montre que le vieillissement radio thermique conduit à l'oxydation, appuyée par l'apparition d'une zone d'absorption entre  $1500\text{ cm}^{-1}$  et  $1900\text{ cm}^{-1}$ , correspondant à la gamme d'absorption des groupes carbonyles. Cette même analyse a révélé une diminution du pic caractérisant l'antioxydant. Des changements dans les intensités de plusieurs pics dans l'analyse FTIR indiquent que la température et les radiations UV réduisent les forces de cohésion entre les chaînes et induisent une augmentation du taux de réticulation et de la mobilité des chaînes.

De plus, l'oxydation est confirmée par l'augmentation des indices carbonyle et l'indice double bande.

## **Perspectives**

Les résultats présentés dans ce mémoire ouvrent la voie à plusieurs extensions de nos travaux sur les différents points abordés. Pour approfondir notre investigation expérimentale, il serait important d'effectuer une analyse au microscope électronique à balayage (MEB). Cette méthode permettra d'identifier avec précision les mécanismes d'endommagement après vieillissement.

Il est également important de prolonger les périodes de vieillissement et de déterminer les conditions optimales de temps et de température afin d'établir des corrélations entre la microstructure et les propriétés mécaniques. Par ailleurs, l'étude de l'influence du champ électrique sur les isolants représente une autre piste de recherche intéressante.

**Annexe 1.** Caractéristiques du polyéthylène de base utilisé pour la fabrication de plaques de PRC.

**Annexe 2.** Caractéristiques des lampes utilisées pour le vieillissement du PRC sous rayonnements UV.

**Annexe 3.** Spectre des lampes utilisées pour le vieillissement du PRC sous irradiations UV.

 **Polyethylene**  
**Borlink™ LS4201R**  
Crosslinkable Insulation Compound

### Description

**Borlink LS4201R** is a crosslinkable natural polyethylene compound based on Supercure technology, specially designed for insulation of power cables.

### Applications

**Borlink LS4201R** is intended for insulation of XLPE medium voltage (MV) AC cables with rated voltages up to 69kV ( $U_m = 72,5$  kV).

The values are voltages between phases as defined in IEC 60183.

### Specifications

**Borlink LS4201R** is expected to meet the applicable requirements included in the below mentioned standards provided it is processed using sound material handling, extrusion and crosslinking practices as well as appropriate testing procedures. This applies up to the maximum recommended voltage level indicated in "Applications" section above since some standards cover wider voltage ranges.

IEC 60840  
IEC 60502-2  
AEIC CS9  
AEIC CS8  
ANSI/ICEA S-108-720  
ANSI/ICEA S-93-639

ANSI/ICEA S-94-649  
ANSI/ICEA S-97-682  
Cenelec HD 632 S1  
Cenelec HD 620 S2 (Part 1)  
NF C33-226  
UL 1072

### Special Features

**Borlink LS4201R** is a ready-to-use natural compound. Thanks to its inherent properties, Borlink LS4201R provides very good electrical performance. It offers excellent scorch resistance and long production runs. Borlink LS4201R cleanliness level is assured through the Borealis quality management system.

## PRODUCT DATA SHEET



**Polyethylene**  
**Borlink™ LS4201R**

### Physical Properties

Property	Typical Value	Test Method	
Data should not be used for specification work			
Density (Base Resin)	922 kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183	
Melt Flow Rate (190 °C/2,16 kg) <sup>1</sup>	2 g/10min	ISO 1133	
Tensile Strain at Break (250 mm/min) <sup>2</sup>	> 450 %	ISO 527	
Tensile Strength (250 mm/min) <sup>2</sup>	> 17 MPa	ISO 527	
Change of Tensile Properties After Ageing (168 h, 135 °C) <sup>2</sup>	< 20 %	IEC 60811-401	
Hot Set Test (200 °C, 0,20 MPa) <sup>2</sup>	Elongation under load Permanent deformation	75 % 5 %	IEC 60811-507
MDR, max torque	2,9 - 3,8 dNm	ISO 6502	
Methanol Wash <sup>3</sup>	< 800 ppm	BTM 00118	
Moisture	< 200 ppm	ISO 15512	

<sup>1</sup> Base Resin

Borlink is a trademark of the Borealis group.

<sup>2</sup> Measured on crosslinked specimens

<sup>3</sup> BTM = Borealis Test Method

### Electrical Properties

Property	Typical Value	Test Method
Data should not be used for specification work		
Dielectric constant (50 Hz)	2,3	IEC 60250
DC Volume Resistivity (23 °C)	> 10 PΩcm	IEC 62631
Dissipation Factor (50 Hz)	0,0003	IEC 60250

### Processing Techniques

To produce a good and reliable cable, it is essential to ensure careful and very clean handling of the insulation material. Hence all material handling should preferably be conducted in closed systems and in clean room conditions. Please contact your Borealis representative for more details

### Extrusion

A screen-pack on the extruder is recommended for improved melt homogenisation.

Melt temperature 125 - 135 °C

### Packaging

Package: Octabins  
Cleantainers

PRODUCT DATA SHEET



**Polyethylene**

**Borlink™ LS4201R**

**Storage**

**Borlink LS4201R** has a shelf life of 24 months from production date if stored in unopened original packages, under dry and clean conditions at temperatures between 10 - 35°C (50 - 95°F).

The material can be stored at ambient temperature up to 40°C (104°F) for a period up to 6 months provided it is in unopened original packages and under dry and clean conditions. Material shelf life is affected by the storage conditions and extreme conditions influence the general material quality and performance.

Before use, material shall be conditioned indoors (production room) to reach ambient temperature. It is also recommended to ensure proper stock rotation by First In – First Out principle.

More information on storage is found in the Safety data sheet (SDS) / Product safety information sheet (PSIS) for this product.

PRODUCT DATA SHEET



**Polyethylene**

**Borlink™ LS4201R**

**Safety**

Please see the Safety data sheet (SDS) / Product safety information sheet (PSIS) for details on various aspects of safety, recovery and disposal of the products. For more information, contact your Borealis representative.

**Disclaimer**

**The product(s) mentioned herein are not intended to be used for medical, pharmaceutical or healthcare applications and we do not support their use for such applications.**

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication; however we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information.

Borealis makes no warranties which extend beyond the description contained herein. Nothing herein shall constitute any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

**It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy itself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products.**

No liability can be accepted in respect of the use of any Borealis product in conjunction with any other products and/or materials. The information contained herein relates exclusively to our products when not used in conjunction with any other material unless as specifically provided for in the test methods stated above.



## Blacklight BL368 Linear T8

F15W T8 BL368

0000082



### Product features

- Les tubes BL368 émettent une radiation UV très élevée avec un pic à 368nm. La sensibilité de l'œil des insectes volants est généralement à cette longueur d'onde. Version Toughcoat avec gaine de protection anti-bris de verre. 18" 438mm ; 24" 590mm ; 48" 1200mm.



### PRODUCT OVERVIEW

Nom du produit	F15W T8 BL368
Technologie	Special applications
Forme de la lampe	Forme tubulaire
Culot	G13
Finition de la lampe	Dépoli
Type de luminaire (ouvert/fermé)	Fermé
Application générale	SPG
Classe ETIM	EC002962
Numéro virtuel FI	4940737
Couleur de lumière	BL368 lumière noire
Power consumption (W)	15
Wattage (W)	15.00
Dimmable	Non
Dimming method	N/A
Durée de vie moyenne (nominal) (hr)	14000
Code EAN	5410288000824

### TABLEAU DE DONNÉES

#### Données générales

Nom du produit	F15W T8 BL368
Technologie	Special applications
Forme de la lampe	Forme tubulaire
Culot	G13
Finition de la lampe	Dépoli
Type de luminaire (ouvert/fermé)	Fermé
Application générale	SPG
Plage de température de fonctionnement (°C)	-15°C...+40°C



## Blacklight BL368 Linear T8

F15W T8 BL368

0000082

Classe ETIM	EC002962
Numéro virtuel FI	4940737

### Données optiques

Température ambiante pour un flux lumineux maximum (° C)	25
Couleur de lumière	BL368 lumière noire
Chromaticité réglable	Non

### Caractéristiques électriques

Power consumption (W)	15
Wattage (W)	15.00
Actuel (A)	0.310
Primary Supply/Product voltage - min (V)	46
Primary Supply/Product voltage - max (V)	64
Appareillage obligatoire	Oui
Dimmable	Non
Dimming method	N/A
Courant de commande driver (mA)	310

### Durée de vie

Durée de vie moyenne (nominal) (hr)	14000
-------------------------------------	-------

### Données physiques

Longueur (mm)	450.0
Diamètre nominal produit (mm)	26
Longueur de culot à culot (mm) - A	437.4
Longueur de culot à broche Min-Max - B	442.1-444.5
Longueur max. de la lampe (mm) C/L	451.6
Diamètre max. de la lampe (mm) - D	28.0
Poids (kg)	0.07



## Blacklight BL368 Linear T8

*F15W T8 BL368*

**0000082**

### Emballage

Code EAN	5410288000824
Longueur simple de l'emballage (cm)	45.2
Largeur simple de l'emballage (cm)	2.9
Hauteur emballage unitaire (cm)	2.8
DUN14 (outer)	15410288000821
Unités par emballage extérieur	25
Packaging outer length / height (cm)	48.0
Packaging outer width (cm)	15.5
Profondeur boîte extérieure (cm)	15.0

### Sécurité

Contenu en mercure de la lampe (mg)	9.0
Condition de fonctionnement optimal (° C)	-15-40
Consignes de nettoyage en cas de bris	D'application

Recommandation pour l'élimination en fin de vie Applicable

Lampe à objectif spécial	Yes
Destination prévue	Flykilling - Insect attraction
Convient à l'éclairage résidentiel	No
Safety message	Ne convient pas à un usage domestique

**SYLVANIA**

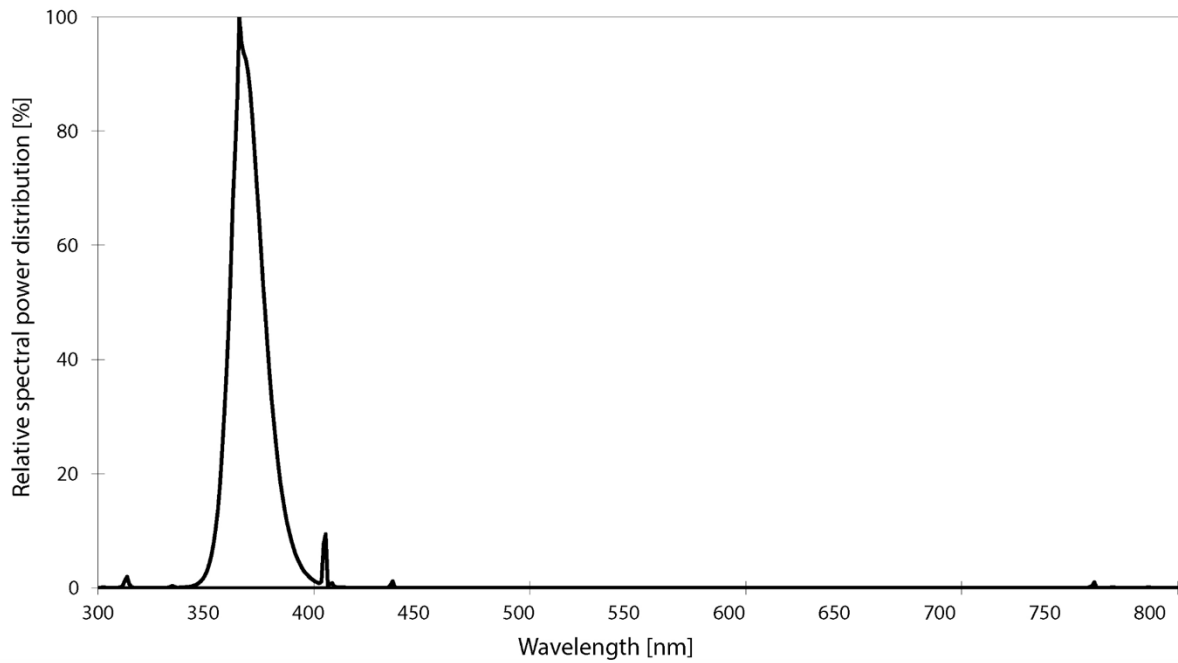
Blacklight BL368 Linear T8

F15W T8 BL368

0000082

**PHOTOMÉTRIE**

BLB



Annexe 3. Spectre des lampes utilisées pour le vieillissement du PRC sous irradiations UV.