

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie  
Département de Génie Électrique  
Laboratoire de Génie Électrique de Bejaia

## Mémoire de Fin d'Étude

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique  
Option : Machines électriques*

**THEME : Etude du vieillissement d'un câble isolé en  
PRC sous tension alternative**

➤ **Présentés par :**

**Mr : Ammari Aïmed**

**Mr : Abdoun Lamine**

❖ **Encadré par: Dr. Nacéra ROUHA**

✓ **Devant le jury :**

**Mr. Zaboudje Youcef**

**Mr. Imaouche Yacine**

**Promotion : 2018/2019**

# Remerciements

Nos premiers remerciements vont d'abord à notre promotrice Dr. ROUHA NACERA. Nous la remercions particulièrement de nous avoir fait confiance, guidé, encouragé et conseillé.

Nous tenons aussi à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail, Mr. SAICHE AISSA, Mr ; ZEMOURI MOURAD et. Mr. BOUDINARE SALEM.

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Dans le souci de n'oublier personne, nous remercions vivement tous ceux qui ont aidé de près ou de loin au bon déroulement de nos études. Qu'ils puissent trouver ici l'expression de nos profondes reconnaissances.

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents en témoignage de ma reconnaissance pour leur patience, leurs sacrifices et leurs soutiens tout au long de mes études.

Mes sœurs ainsi que toute ma famille.

A la mémoire de mon oncle et premier professeur Ahmed

Tous mes amis et tous ceux qui me sont très chers.

**AMMARI**

# Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents qui m'ont toujours soutenu et m'ont permis d'arriver là où je suis aujourd'hui.

À Mes sœurs, mes frère et pour tout ma famille

À Mes amis.

À ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études,

**Abdoun**

# **Table des matières**

<b>Table des matières</b>	<b>Pages</b>
Liste des figures .....	i
Liste des tableaux .....	vi
Liste des symboles .....	vii
Introduction général .....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition .....	3
I.3 Mode de pose .....	4
I.4 catégories de câbles.....	4
I.4.1 câbles isolés au papier et imprégnés.....	4
I.4.2 câbles à isolation gazeuse.....	5
I.4.3 câbles hyper conducteurs.....	6
I.4.4 câble supraconducteurs.....	7
I.4.5 câble à isolation synthétique.....	7
I.4.5.1 type d'isolations synthétiques.....	9
I.5 structure d'un câble à isolation synthétique .....	9
I.5.1 Ame conductrice.....	10
I.5.1.1 Caractéristiques électriques .....	11
I.5.1.2 Formes de l'âme conductrice .....	12
I.5.1.3 Supraconducteurs.....	13
I.5.2 Ecran semi-conducteur .....	13
I.5.3 Blindage métallique.....	14
I.5.4 Gaine de protection .....	15
I.5.5 Isolation .....	15
I.6 mise en œuvre du câble isolé en PRC .....	17
I.6.1 introduction .....	17
I.6.2 Composants d'un câble en PRC .....	17
I.6.3 avantages et inconvénients de l'isolation en PRC .....	18
I.7 Conclusion .....	19
<b>Chapitre II : les polymères et leurs mécanismes du vieillissement</b>	
II.1 Introduction .....	20

II.2	Notions sur les polymères.....	20
II.3	Définition d'un polymère .....	20
II.4	Classification des polymères .....	20
II.4.1	Selon leurs origines.....	21
II.4.2	Selon leurs structures chimiques.....	21
II.4.3	Selon leurs comportements thermiques .....	21
II.4.4	Selon la structure physique .....	22
II.5	Réaction de polymérisation .....	22
II.6	Le polyéthylène dans l'isolation des câbles de haute tension.....	23
II.6.1	Le Polyéthylène (PE) .....	23
II.6.2	Types de polyéthylènes.....	24
II.6.3	Polyéthylène réticule chimiquement (PRC).....	24
II.6.4	Procédés de fabrication des câbles au PRC .....	25
II.6.4.1	Réticulation à la vapeur d'eau.....	26
II.6.4.2	Réticulation en gaz inerte chauffé.....	26
II.6.4.3	Réticulation par radiation .....	27
II.6.4.4	Réticulation aux ultrasons .....	27
II.6.4.5	Procédé de réticulation SIOPLAS .....	27
II.6.5	Propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).....	28
II.6.5.1	Propriété électrique.....	28
II.6.5.2	Propriété chimique .....	28
II.6.5.3	Propriété mécanique.....	29
II.6.6	Vieillessement électrique et rupture des câbles (PRC).....	29
II.6.6.1	Mécanismes de vieillessement électriques des polymères.....	30
II.6.6.2	Les Arborescences.....	32
II.7	Les méthodes de caractérisation physico-chimiques des matériaux isolants .....	36
II.7.1	Introduction.....	36
II.7.2	Caractéristiques physiques .....	36
II.7.2.1	La rigidité diélectrique .....	36
II.7.2.2	Mesure de résistance .....	38
II.7.2.3	Mesure de résistivité.....	39
II.7.2.4	Mesure du facteur de pertes $\text{tg}\delta$ par la méthode du pont de Schering .....	40
II.7.3	Les méthodes d'analyses.....	42

II.7.3 .1 La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	42
II.7.3.2 La diffraction des rayons X (DRX).....	42
II.7.3.3 Microscopie électronique à balayage (MEB).....	43
II.7.3.4 Analyse thermogravimétrique ATG.....	43
II.7.3.5 Analyse thermique différentielle ATD.....	44
II.7.3.6 Analyses calorimétrique différentielle (DSC).....	45
II.8 Conclusion.....	45

### **Chapitre III : protocole expérimentale**

III.1 Introduction.....	46
III.2 Préparation des échantillons.....	46
III.3 Mesure des rayons de courbures des aiguilles.....	48
III.3 Technique expérimentale.....	50
III.4 Dispositifs expérimentaux.....	51
III .5 Microscopie optique.....	54
III.5.1 principe de fonctionnement.....	54
III.5.2 Mesures des longueurs d'arborescences.....	54
III.5.3 Analyse microstructurale de surface.....	55
III.6 analyses chimiques.....	56
III.6.1 la diffraction des rayons X (DRX).....	56
III.6.2 analyse FTIR.....	58
III.6.3 Analyses thermogravimétrique (ATG/ATD).....	59
III.8 Mesures électriques.....	60
III.8.1 Mesures des pertes diélectriques et de la capacité.....	60
III.8.2 Mesures de la rigidité diélectrique longitudinale et transversale.....	61
III.8.2.1 Mesure de la rigidité diélectrique transversale.....	61
III.8.2.2 Mesure de la rigidité diélectrique longitudinale.....	61
III .9 Conclusion.....	62

### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

IV.1 Introduction.....	63
IV.2 Résultats du vieillissement électrique - Microscopie optique.....	63
IV.3 Caractérisation physico-chimique.....	69
IV.3.1 résultats des analyses chimiques.....	69
IV.3.1.1 Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	69

IV.3.1.2 Analyse par diffraction des rayons X (DRX) .....	72
IV.3.1.3 analyse ATG/DTG.....	76
IV.3.2 Résultats des mesures électriques.....	81
IV.3.2.1 Rigidité électrique transversale et longitudinale.....	81
IV.3.2.2 Pertes diélectriques, capacité et permittivité.....	82
IV.4 Conclusion.....	82
Conclusion générale .....	84
Bibliographie	
Annexes	



# Liste des figures

**Liste des figures** **pages**

**Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension**

**Figure I.1.** Câble isolé au papier imprégné avec bobinage en plomb et acier sans écran de l'âme .....4

**Figure I.2.** Câble isole au papier imprégné avec gaine de plomb et écran de l'âme.....5

**Figure I.3(a).** Câble monophasé isolé au gaz en version flexible .....6

**Figure I.3(b).** Câble triphasé isolé au gaz .....6

**Figure I.4.** Câble hyper conducteur triphasé .....7

**Figure I.5.** Câble supraconducteur triphasé .....7

**Figure I.6(a).** Câble XLPE monophasé moyenne tension .....8

**Figure I.6(b).** Constitution d'un câble en EPR .....8

**Figure I.7.** Câble triphasé à isolation synthétique .....9

**Figure I.8.** Câble d'énergie HT .....10

**Figure I.9.** Influence de la température .....12

**Figure I.10.** Différentes structures de l'âme conductrice .....13

**Figure I.11.** Historique des câbles en PRC .....17

**Figure I.12.** Câble unipolaire en PRC 18/30 KV .....18

**Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement**

**Figure II.1** .La réaction de polymérisation .....23

**Figure II.2.** Molécule du polyéthylène .....24

**Figure II.3.** Structure chimique du PRC .....25

**Figure II.4.** Représentation schématique des processus de la réticulation dans un polymère initialement linéaire, et dans un polymère tridimensionnel .....25

<b>Figure II.5.</b> Schéma représentant le scénario standard de vieillissement .....	29
<b>Figure II.6.</b> Vieillissement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et des champs électriques auxquels ces mécanismes ont lieu.....	30
<b>Figure II.7.</b> Exemple de points faibles de propagation de l'arborescence, a) à partir de l'écran et b) à partir de l'électrode .....	32
<b>Figure II.8.</b> Exemple d'une arborescence électrique.....	34
<b>Figure II.9.</b> Diagramme d'énergie des sites réactionnels.....	35
<b>Figure II.10.</b> Schéma de la mesure de la tension de contournement d'une surface isolant.....	37
<b>Figure II.11.</b> Schéma de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolant .....	38
<b>Figure II.12.</b> schéma de mesure de la résistance transversale.....	38
<b>Figure II.13</b> Schéma de mesure de la résistance superficielle.....	39
<b>Figure II .14.</b> Schéma de principe du pont de Schering.....	40
<b>Figure II.15.</b> Principe de base de la spectroscopie FTIR .....	42
<b>Figure II .16.</b> Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage (MEB).....	43
<b>Figure .II.17.</b> Représentation schématique d'une ATG .....	44
<b>Figure II.18.</b> Principe du fonctionnement d'un système ATD .....	45

### **Chapitre III : Protocole expérimental**

<b>Figure III.1.</b> Constituants d'un câble à haute tension .....	47
<b>Figure III.2.</b> Objet d'essais .....	48
<b>Figure III.3.</b> Photo du microscope optique utilisé pour la détermination des rayons de courbures .....	48
<b>Figure III.4</b> Schéma de principe du microscope optique.....	49

<b>Figure III.5</b> Méthode de détermination du rayon de courbure .....	50
<b>Figure III.6</b> Dispositif expérimental de vieillissement électrique et la mesure de la tension et du temps de vieillissement électrique.....	52
<b>Figure III.7</b> Schéma électrique du dispositif.....	53
<b>Figure III.8</b> Photo des éléments du dispositif d'essais et de mesure de la haute tension du laboratoire HT G.E. Univ. de Bejaia .....	53
<b>Figure III.9</b> photographies de l'objet d'essai .....	54
<b>Figure III.10</b> principe de mesures des longueurs d'arborescences .....	55
<b>Figure III.11</b> photographie du microscope optique utilisé .....	56
<b>Figure III.12</b> Schéma de principe du diffractomètre de rayons X .....	57
<b>Figure III.13</b> appareil utilisé pour l'analyse DRX.....	58
<b>Figure III.14</b> appareil d'analyse FTIR utilisé .....	59
<b>Figure III.15</b> Appareil d'analyse ATG utilisé.....	60
<b>Figure III.16</b> : Constituants d'un câble à haute tension .....	61
<b>Chapitre IV : Résultats et discussion</b>	
<b>Figure IV.1</b> : Forme buissons multiples de l'arborescence observée(x10) .....	65
<b>Figure IV.2</b> : Cinétique de propagation de l'arborescence électrique $I(t)$ dans l'isolation de PRC en fonction du temps de vieillissement électrique .....	66
<b>Figure IV.3</b> : Photo de l'arborescence montrant le canal de retour (x10).....	67
<b>Figure IV.4</b> : Photo montrant les ramifications filamenteuses de l'arborescence buisson (x500).....	68
<b>Figure IV.5</b> : Photo de la surface interne de l'arborescence (x1000) .....	68
<b>Figure IV.6.a</b> spectres infrarouge des différents états d'évolution de l'arborescence.....	69

<b>Figure IV.6.b</b> spectres infrarouge des différents états d'évolution de l'arborescence (500 à 2000 $\text{cm}^{-1}$ ).....	71
<b>Figure IV.6.c</b> spectres infrarouge des différents états d'évolution de l'arborescence (2000 à 4000 $\text{cm}^{-1}$ ).....	72
<b>Figure IV.7</b> : Spectre DRX des échantillons de PRC (vierge, vieillis durant 18 et 30 heures) .....	73
<b>Figure IV.8</b> Spectre DRX des échantillons vierge et vieillis durant 18 et 30 heures à $2\theta$ compris entre $20^\circ$ et $25^\circ$ .....	75
<b>Figure IV.9 a</b> thermo grammes de variation du taux de perte de masse (ATG%) en fonction de la température de traitement T( $^\circ\text{C}$ ) des échantillons de PRC vierge, vieilli durant 6,18 et 30 heures .....	77
<b>Figure IV.9.b</b> –Thermo grammes de variation du taux de perte de masse (ATG%) en fonction de la température de traitement T( $^\circ\text{C}$ ) des échantillons de PRC vierge, vieilli durant 6,18 et 30 heures - Zoom sur les températures de tenue thermique T .....	78
<b>Figure IV.9.c</b> –Thermo grammes de variation du taux de perte de masse (ATG%) en fonction de la température de traitement T( $^\circ\text{C}$ ) des échantillons de PRC vierge, vieilli durant 6,18 et 30 Heures - Zoom sur les températures de fin de dégradation $T_{fd}$ .....	78
<b>Figure IV.10.a</b> thermo-gramme de la variation de la vitesse de dégradation thermique du PRC (vierge, vieilli 6,18 et 30 heures).....	80
<b>Figure IV.10.b</b> Zoom sur le point de maximum de dégradation thermique du PRC (vierge, vieilli 6,18 et 30 heures) .....	80

# Liste des tableaux

**Liste des tableaux** **pages**

**Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension**

**Tableau I.1** : Matériau conducteur utilisés pour les câbles transmission de puissance .....11

**Tableau I.2** : Résistivité spécifique son coefficient de température .....11

**Tableau I.3** : Propriétés des isolants .....15

**Tableau I.4** : Propriétés thermique des isolants .....16

**Chapitre III : Protocole expérimental**

**Tableau III .1:** Principales propriétés du polyéthylène utilisé pour la fabrication de plaques de PRC .....46

**Chapitre IV : Résultats et discussion**

**Tableau IV.1** : Evolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement .....64

**Tableau IV.2** : Bandes d'absorption caractéristique du PRC .....71

**Tableau IV.3** : Caractéristiques des pics principaux des spectres DRX des échantillons de PRC .....74

**Tableau. IV.4** : Taux de cristallinité des différents échantillons analysés de PRC.....76

**Tableau IV.5** : variation des temps de pertes de masses a 5 et 10 % pour les différents échantillons de PRC .....78

**Tableau IV.6** : Rigidité longitudinale du PRC en fonction du temps de vieillissement électrique .....81

**Tableau IV.7** : Capacité C et facteur de perte tgδ du PRC en fonction du temps de vieillissement électrique .....82

# Liste des symboles

## Liste des symboles

**ATD** : Analyse thermique différentielle

**ATG** : Analyse thermogravimétrique

**BT** : basse tension

**DP** : Degré de polymérisation

**DRX** : Diffraction des rayons X

**EPR** : Éthylène propylène rubber

**FTIR** : La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

**HDPE** : Polyéthylène haute densité

**HT** : haute tension

**LDPE** : Polyéthylène basse densité

**MEB** : Microscopie électronique à balayage

**MT** : moyenne tension

**PE** : Polyéthylène

**PRC** : polyéthylène réticulé chimiquement

**PRS** : Polyéthylène réticulé au silane

**PVC** : Polychlorure de vinyle

**THT** : très haute tension

**XLPE** : cross-linked polyethylene

**C<sub>0</sub>** :capacité du vide [F]

**C<sub>x</sub>** : capacité de branche [F]

**d** : Distance inter électrode [mm]

**E<sub>L</sub>** : Rigidité diélectrique longitudinal [V/m]

**E<sub>t</sub>** : Rigidité diélectrique transversal [V /m]

**$R_s$**  : Résistance superficielle [ $\Omega$ ]  
 **$R_t$**  : Résistance transversal [ $\Omega$ ]  
 **$R_x$**  : Résistance de branche [ $\Omega$ ]  
 **$U_C$**  : Tension de contournement [V]  
 **$U_P$**  : Tension de perforation [V]  
 **$Z_x$**  : impédance de branche [Ohm]  
 **$\theta$**  : Angle de diffraction des rayons X [rad]  
 **$\lambda$**  : Longueur d'onde [ $\text{cm}^{-1}$ ]  
 **$\epsilon_0$**  : permittivité du vide [F /m]  
 **$\epsilon_r$**  : permittivité relative [F /m]  
 **$\rho_s$**  : Résistivité superficielle [ $\Omega.m$ ]  
 **$\rho_t$**  : Résistivité transversale [ $\Omega.m$ ]  
 **$n$**  : Ordre de réfraction  
 **$\text{tg}\delta_x$**  : Facteur de perte diélectrique

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le transport d'énergie électrique se fait en haute tension (HT) parfois même en très haute tension (THT), cela dépend de la longueur à parcourir. Elle est acheminée par l'intermédiaire des câbles et des lignes électriques, depuis les stations de productions vers les consommateurs.

L'enterrement des câbles électriques est un gain en maintenance par rapport aux lignes aériennes, qui sont exposées directement aux conditions climatiques parfois rudes dans certaines régions, et aussi, ils offrent un niveau de sécurité plus important par rapport aux lignes, mais reste toujours plus coûteux, car ils sont disposés d'une ou de plusieurs couches d'isolation.

Les technologies d'isolation des câbles de transport électrique souterrains n'ont cessé d'évoluer depuis la fin des années 30. C'est dans les années 60 que l'emploi des matériaux synthétiques extrudés, thermoplastiques ou réticulés, prit son essor. Un matériau, surtout, a occupé le devant de la scène : le polyéthylène utilisé pur ou réticulé, car les isolants synthétiques offrent des avantages vis-à-vis des techniques traditionnelles. Ils sont moins polluants, plus facilement recyclables, et moins de maintenance. C'est pour ces raisons qu'ils sont de plus en plus employés dans l'isolation des câbles électriques.

Cependant, ces matériaux présentent également des défaillances, souvent associées à des phénomènes de rupture diélectrique. Ces phénomènes peuvent se manifester pour des champs électriques nettement inférieurs au champ de rupture propre aux matériaux. Ainsi sous l'action d'un champ appliqué, les impuretés présentes dans les matériaux isolants solides, provoquent sa concentration locale, conduisant à la rupture diélectrique du matériau par un phénomène appelé « Arborescence ». Ce fait évolue d'une proportionnelle jusqu'à provoquer une perforation complète de l'isolation.

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée. Il est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale du matériau.

Dans notre travail, nous allons provoquer le vieillissement accéléré d'un câble 18/30kV isolé au PRC. Le câble est constitué d'un fuseau en aluminium de 16 brins et de

plusieurs couches d'isolations, parmi elles, on trouve une en polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) qui est le matériau à vieillir. Ce manuscrit sera reparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les câbles de haute tension, et décrirons les différents câbles existant et leurs technologies de construction, comme nous définirons les différents types d'isolation utilisé dans les câbles de haute tension, pour enfin présenter en détails les éléments constituant un câble en PRC.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les types de polymères (polyéthylène réticulé chimiquement) utilisés dans l'isolation des câbles haute tension, et leurs mécanismes de vieillissement (arborescence), ainsi que les différentes méthodes de mesures et de caractérisation physico-chimiques.

Dans le troisième chapitre, nous exposerons le Protocol expérimental et les appareillages utilisés aux laboratoires afin de réaliser le vieillissement électrique et les différentes mesures électriques et analyses chimiques.

Le quatrième chapitre sera réservé à l'illustration des résultats expérimentaux obtenus par les mesures électriques et les analyses physico-chimiques ainsi que leurs interprétations.

Pour finir, une conclusion générale clôturera ce travail.

**CHAPITRE I :**  
**Généralité sur les**  
**câbles haute tension**

### I.1 Introduction

Les câbles isolés souterrains sont principalement employés, au moins jusqu'à présent, pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées aux abords ou à l'intérieur des grandes villes, parfois pour résoudre des problèmes locaux particuliers, techniques ou d'environnement, pour lesquels la mise en œuvre de lignes aériennes est difficile ou impossible. La technologie des câbles date de 1830, cependant la mise en service de l'installation à lieu en 1880 à Berlin, en raison de la nécessité d'avoir un matériau diélectrique capable de résister à la chaleur du conducteur et au champ électrique intense. Cela n'a été possible que par l'invention de Ferranti en 1880 d'un diélectrique multicouche en utilisant du papier double bande afin de répondre aux exigences. Cette technologie a ensuite été améliorée par Emanuelli en 1917, par le papier imprégné d'huile à faible viscosité sous pression permanente afin de conserver la stabilité thermique du câble qui a permis pour la première fois d'utiliser des câbles pour des tensions supérieures à 100 kV. Le prochain grand pas en avant dans la technologie des câbles d'énergie a eu lieu dans les années 1960 avec l'introduction du polyéthylène réticulé (XLPE) comme diélectrique destiné à une température de fonctionnement plus élevée (environ 90° C). Une autre technologie est de remplir le câble avec un gaz à haute pression (HPFF), on utilise généralement le SF<sub>6</sub>. Ces câbles sont de courtes longueurs (< 3000 m) et le conducteur se compose d'un tube rigide en aluminium à l'intérieur d'un tube, l'espace entre le conducteur et le tube est rempli du SF<sub>6</sub> sous une pression de 5.3 bar, afin d'augmenter la rigidité diélectrique.

Ce chapitre tente de rapporter l'essentiel concernant les câbles haute tension. Il présente en détails les éléments constituant les câbles et les principaux matériaux utilisés. Il aborde aussi les types de matériaux utilisés pour assurer l'isolation des conducteurs.

### I.2 Définition

Les câbles se composent d'un (ou de plusieurs) conducteur centrale, d'une isolation dont la rigidité diélectrique est élevée, la permittivité et les pertes diélectriques les plus faibles possibles et d'un manteau conducteur en général mis à la terre.

La présence du manteau permet d'homogénéiser la répartition radiale du champ électrique E rendant les caractéristiques électriques du câble indépendantes du mode de pose.

Les câbles se distinguent des lignes aériennes par le fait qu'ils comportent une isolation interne dont on peut contrôler les paramètres (1).

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

### I.3 Mode de pose

Les câbles sont posés (1) :

- De façon souterraine ;
- De façon sous-marine ;
- Sur le sol ;
- Suspendus à des câbles d'acier (traversée de rivière).

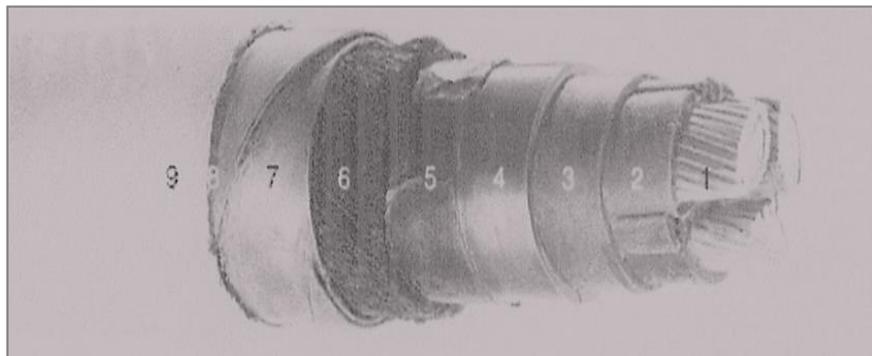
### I.4 Catégories de câbles

On rencontre actuellement trois catégories principales de câble à haute tension :

- Les câbles isolés au papier et imprégnés ;
- Les câbles à isolations synthétiques ;
- Les câbles à isolation gazeuse.

#### I.4.1 Câbles isolés au papier et imprégnés

Ce type de câble est constitué d'un conducteur central en cuivre ou en aluminium, formé par une corde, ou d'un conducteur tubulaire qui peut, dans ce cas, être parcouru par un flux d'huile de refroidissement. L'isolation est formée par un guipage de papier imprégné de masse isolante (huile + résine) pour des tensions jusqu'à 60KV ou d'huile fluide pour des tensions plus élevées. Le manteau est constitué par une gaine de plomb protégée par une gaine de PVC (1).



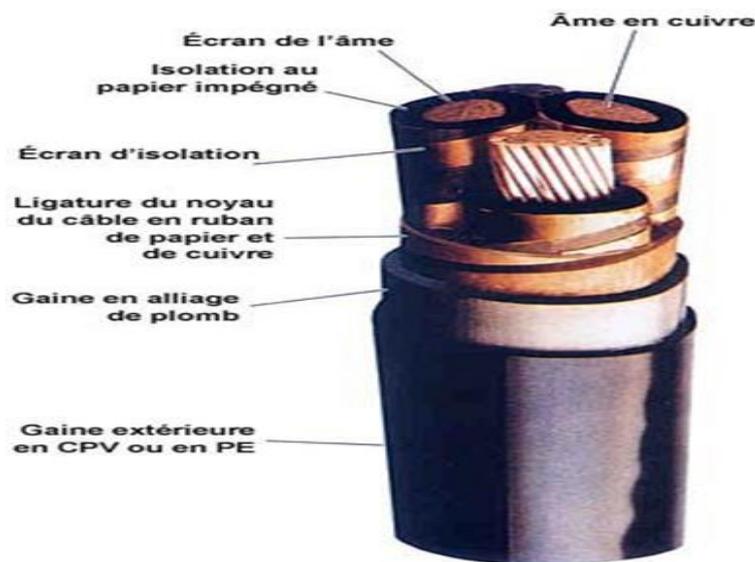
1 : conducteurs de phase torsadés    2 : enroulement de ruban en papier    3 : couche isolante composée de huile de cire et de résine    4 : le blindage en plomb    5 : le papier bitumé    6 : le jute asphalté    7 : la bande de blindage en acier    8 : le jute bitumée    9 : la craie

**Figure I.1** : câble isolé au papier imprégné avec blindage en plomb et acier sans écran de l'âme

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

Le bitume est appliqué pour la conservation et la craie pour éviter le collage du câble à l'enroulement.

La figure 1.2 montre un câble isolé au papier imprégné avec écran de l'âme ou chacun des conducteurs a son propre écran semi-conducteur qui l'entoure, ce qui assure une distribution radiale du champ électrique dans l'isolation du conducteur. Une gaine de polymère remplace le jute pour donner une meilleure protection contre la corrosion due aux courants de fuite.



**Figure I.2 :** câble isolé au papier imprégné avec gaine de plomb et écran de l'âme

### I.4.2 Câbles à isolation gazeuse

Les câbles à isolation gazeuse, comprennent deux tubes coaxiaux, le tube intérieur étant centré au moyen de viroles en résine époxy.

L'isolation est obtenue par un gaz possédant de bonnes caractéristiques diélectriques comme l'hexafluorure de soufre. La rigidité diélectrique du SF<sub>6</sub> est de l'ordre de 10kV/mm, c'est-à-dire environ 3fois la rigidité diélectrique de l'air aux conditions normales (1)

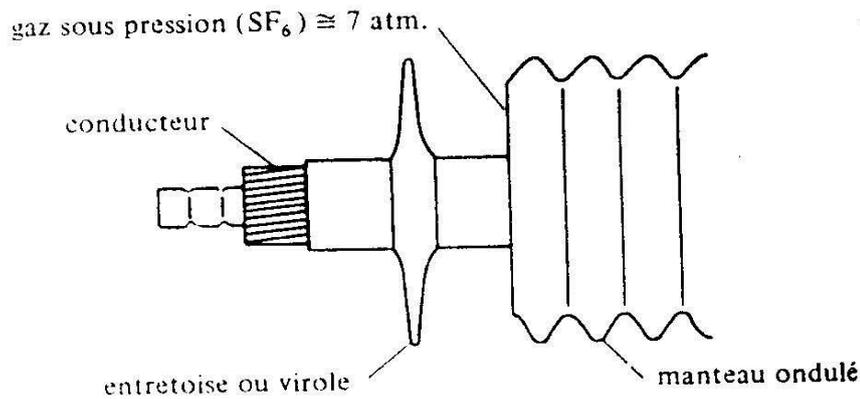


Figure I.3(a) : câble monophasé, isolé au gaz, en version flexible

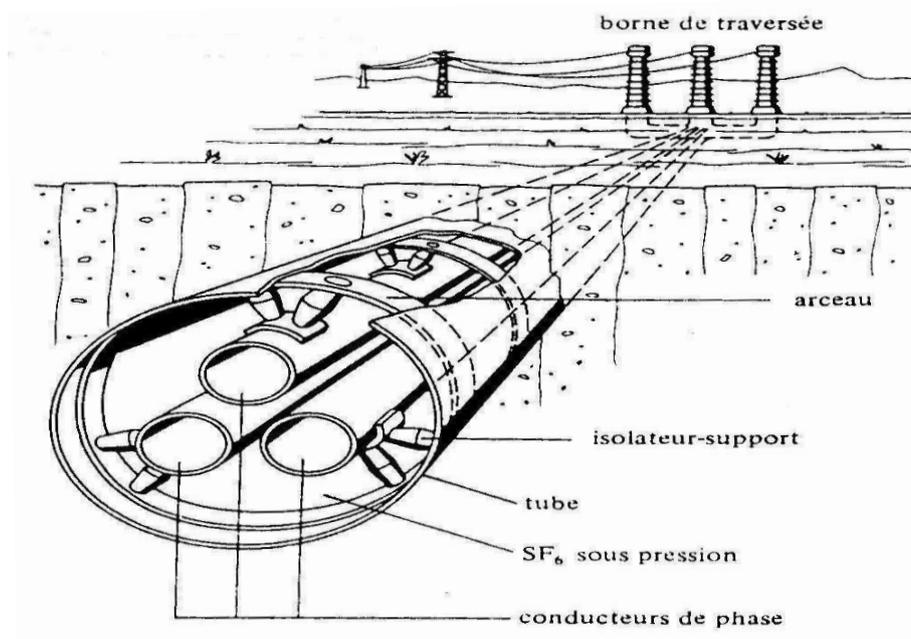


Figure I.3(b) : câble triphasé isolé au gaz

### I.4.3 Câbles hyper conducteurs

L'hyper conductibilité se manifeste par une diminution progressive de la résistivité de matériaux conducteurs classique (cuivre, aluminium) très purs.

Un câble hyper conducteur triphasé est constitué par quatre tube en aluminium ou en cuivre, les trois tube (de phase) étant parcourus par de l'azote ou de l'hydrogène liquide. Ces conducteurs sont ensuite respectivement munis d'une isolation électrique et d'un écran d'équilibrage du champ électrique.

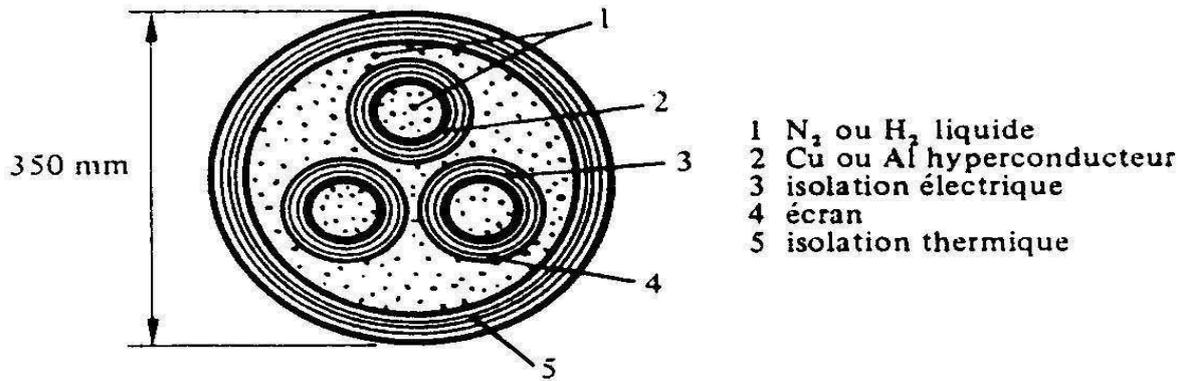


Figure I.4 : Câble hyper conducteur triphasé

#### I.4.4 Câble supraconducteurs

La conception d'un câble supraconducteur triphasé et identique à celle des câbles hyperconducteurs, à l'exception des points suivants :

- Les conducteurs de phases sont constitués par des fils de niobium enchâssés dans un substrat de cuivre
- Le fluide de refroidissement est l'hélium ( $T < 10K$ )
- L'isolation thermique du manteau parcourue par des tubes contenant de l'azote liquide ( $T < 70K$ )

Un câble tripolaire possède une puissance naturelle de l'ordre de 4 GVA

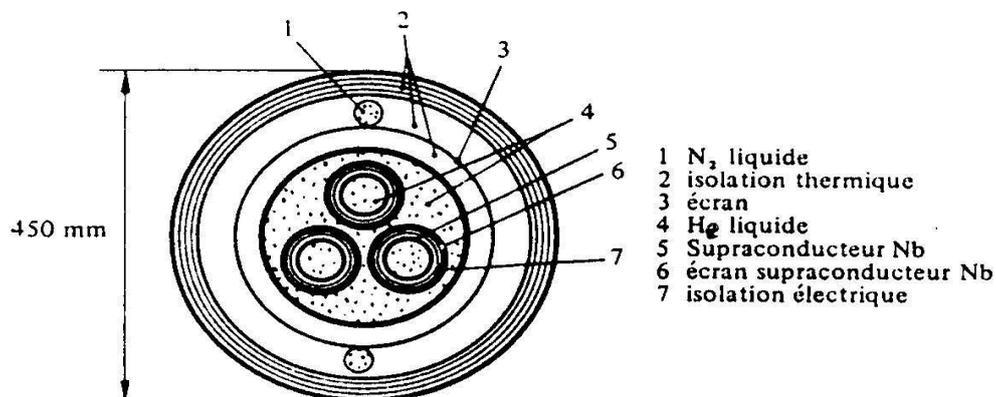


Figure I.5 : câble supraconducteur triphasé

#### I.4.5 Câble à isolation synthétique

Les câbles haute tension à isolation synthétique est constituée de plusieurs couches en matériau métallique ou polymère autour d'une âme conductrice (figure I.6). Les composants

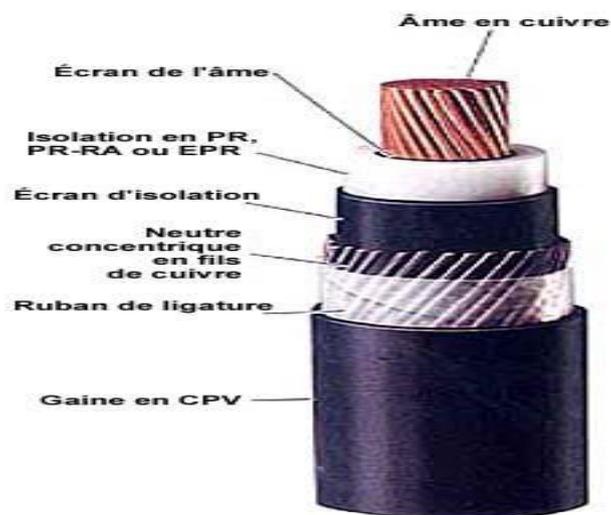
## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

polymères jouent un rôle dans l'isolation et la stabilité électrique du câble. En périphérie, on retrouve des enveloppes métalliques pour le maintien mécanique et le retour de courant.



**Figure I.6 (a) :** Câble XLPE monophasé moyenne tension

En fonction du domaine pour lequel il est destiné et la qualité du matériau isolant utilisé, les revêtements du câble à isolation synthétique peuvent être allégés, comme le montre la photo illustrée en figure I.6(b)



**Figure I.6(b) :** Constitution d'un câble en EPR

Le câble triphasé à isolation synthétique intègre trois conducteurs dans un même câble, comme le montrent les exemples donnés en (figure I.7) Les différentes couches et les matériaux dans cette structure sont similaires à ceux de la conception du câble à isolation

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

synthétique monophasé. Sauf que, chaque conducteur de phase et leurs couches d'isolations ont leurs propres écrans semi-conducteurs qui les entourent, ce qui assure une distribution radiale du champ électrique dans l'isolation du conducteur



**Figure I.7 :** câble triphasé à isolation synthétique

### I.4.5.1 Type d'isolations synthétiques

On distingue plusieurs matériaux en matières synthétiques utilisés pour l'isolation des câbles, qui sont des thermoplastiques et des élastomères.

#### I.4.5.1.1 thermoplastique

Les composés thermoplastiques sont des matériaux qui deviennent mous lorsqu'ils sont chauffés et durcissent lorsqu'ils sont refroidis:

- PVC (polychlorure de vinyle)
- PE (polyéthylène)

#### I.4.5.1.2 élastomère

Les composés élastomères sont des matériaux présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation. Il supporte de très grandes déformations avant rupture.

- XLPE (polyéthylène réticulé)
- EPR (éthylène propylène rubber)

## I.5 structure d'un câble à isolation synthétique

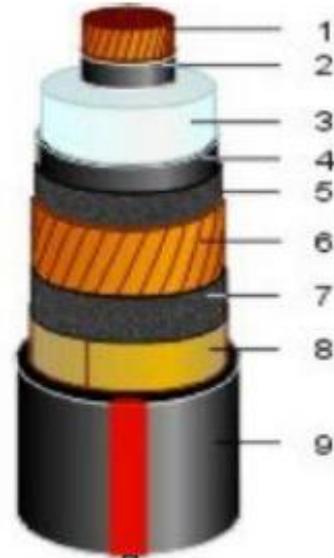
La structure d'un câble d'énergie haute tension influe grandement sur son rendement.

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

Les techniques de structure et de fabrication des câbles XLPE se sont grandement améliorées depuis les premiers câbles de production qui avaient de vastes problèmes avec les arborescences d'eau.

La figure (I.8) présente la structure d'un câble haute tension (HT) mono polaire à isolation XLPE et écran en cuivre méplats avec étanchéité radiale et longitudinale (2).

1. Conducteur en cuivre (ou aluminium)
  2. Semi-conducteur intérieur
  3. Isolation PE réticulée ( XLPE )
  4. Semi-conducteur extérieur
  5. Ruban gonflant semi-conducteur
  6. Ecran en fils de cuivre méplats
  7. Ruban gonflant semi-conducteurs
  8. Ruban CuPE longitudinal, collé
  9. Gaine PE extérieure
- Niveaux de tension : 45 kV à 400 kV. Sections : de 240 mm<sup>2</sup> à 2000 mm<sup>2</sup>



**Figure I.8 :** câble d'énergie HT

Les principales caractéristiques qui figurent dans la construction des câbles HT sont le conducteur, l'isolant, la gaine métallique et l'enveloppe protectrice.

### I.5.1 Ame conductrice

L'âme conductrice ou tout simplement le conducteur est la partie principale d'un câble. Son objectif est de transmettre le courant nécessaire avec une faible perte d'énergie. Les deux matériaux largement utilisés sont le cuivre et l'aluminium.

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

### I.5.1.1 Caractéristiques électriques

Le tableau 1.1 montre les propriétés électriques des métaux couramment utilisés dans les câbles. Prenant en considération le prix, le cuivre et l'aluminium sont clairement le meilleur choix pour les conducteurs, mais il y a eu une certaine expérience pratique avec le sodium (3).

**Tableau 1.1** matériaux conducteurs utilisés pour les câbles de transmission de puissance

Matériaux	Avantage	Inconvénient
<b>Aluminium</b>	Peu coûteux	Conductivité électrique et thermique est d'environ 60% que celle du cuivre.
<b>Cuivre</b>	Haute conductivité électrique et thermique	Coûteux
<b>Argent</b>	Légèrement supérieur à celui du cuivre	Extrêmement coûteux
<b>Sodium</b>	Extrêmement bon marché	Les questions de sécurité sur la manipulation et l'entretien. conductivité électrique et thermique médiocres

La résistivité spécifique et le coefficient de température du cuivre et de l'aluminium sont donnés dans le tableau 1.2.

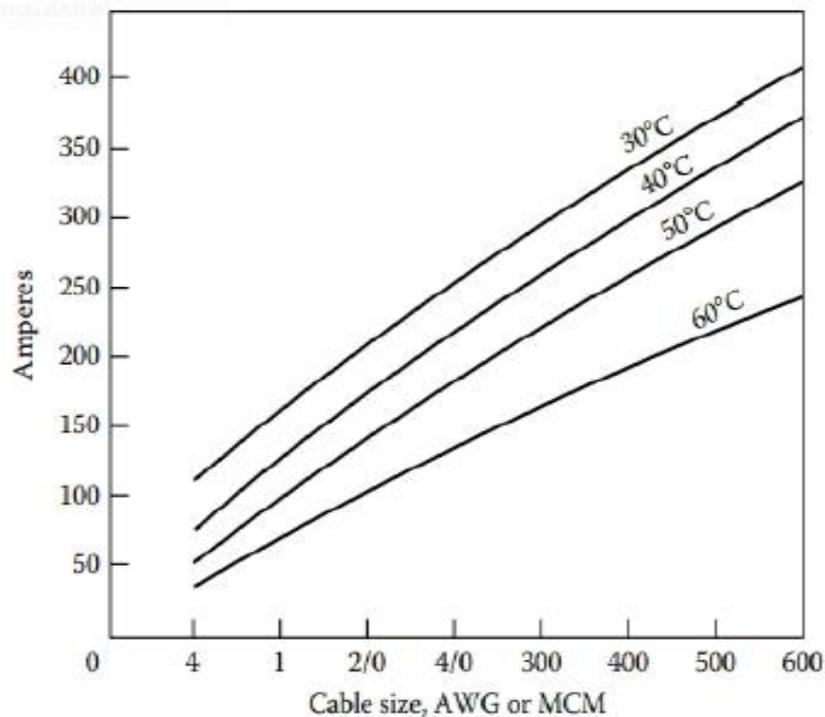
**Tableau 1.2** résistivité spécifique et son coefficient de température

	Cuivre	Aluminium
$R_{20}$ : résistivité électrique spécifique 20°C, $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	<b>0.01786</b>	<b>0.02874</b>
$\alpha$ : coefficient thermique de la résistivité électrique spécifique 20°C, 1/K	<b>0.00392</b>	<b>0.0042</b>

La température maximale du conducteur est déterminée par la température qu'il peut supporter pendant de longues périodes de temps sans dommages. La température maximale, peut être affectée par la capacité à dissiper, la chaleur et la température ambiante du milieu dans lequel le câble sera installé. Pour un fonctionnement en toute sécurité, la somme de la

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

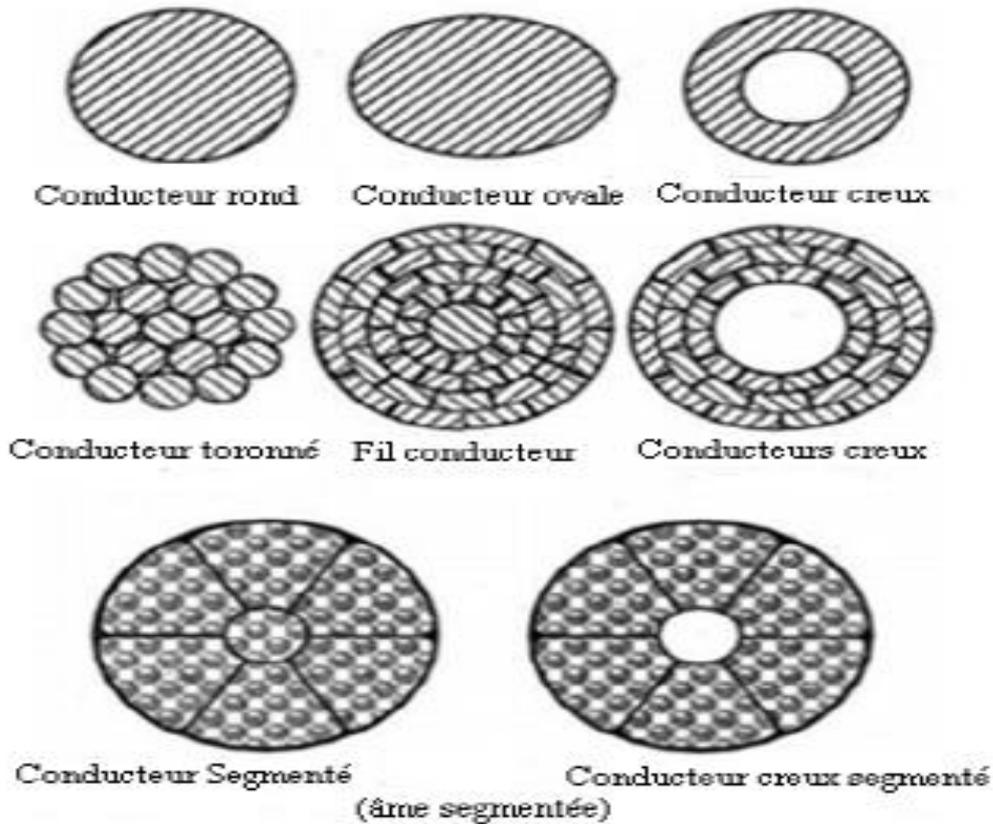
température ambiante et l'élévation de la température dans le système d'isolation ne doit pas dépasser la température totale admissible du conducteur. L'effet de la température est indiqué à la figure (I.9) La perte totale du câble est fonction de la résistance du conducteur à un degré inférieur à la température maximale permise (4).



**Figure I.9 :** Influence de la température ambiante sur le courant nominal

### I.5.1.2 Formes de l'âme conductrice

Différents types de conception du conducteur peuvent être vus dans la figure I.10 . Des conducteurs creux sont généralement utilisés afin de permettre la circulation de l'huile pour refroidir le conducteur. Tressé et Segmenté offrent plus de flexibilité et réduisent le courant de déplacement raison de l'effet de peau (5).



**Figure I.10** : Différentes structures de l'âme conductrice

### I.5.1.3 Supraconducteurs

Depuis la découverte de la supraconductivité à haute température, en 1986, un certain nombre de compositions d'oxyde ont été trouvées avec une température critique ( $T_c$ ) de supraconductivité au-dessus de 77K, qui est la température la plus basse du nitrogène liquide (6).

Très vite, des échantillons de câbles supraconducteurs cryogéniques ont été conçus et produits par des laboratoires, mais le paramètre le plus compliqué à réaliser dans ce type de câble est l'isolation diélectrique. L'un des inconvénients majeurs : la puissance nécessaire pour le processus de refroidissement est seulement peu inférieure aux pertes enregistrées.

Concernant les performances par rapport au câble conventionnel, les pertes devaient être réduites de moitié en utilisant un câble de transport supraconducteur pour la même puissance transitée (7).

### I.5.2 Ecran semi-conducteur

Des couches semi-conductrices sont utilisées des deux côtés de l'isolation. La couche interne est appelée l'écran du conducteur et son but est de créer une surface en forme de cylindre lisse sur le dessus du conducteur. Ceci permet de fluidifier le champ électrique radial

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

et d'éviter la formation de cavités entre le conducteur et l'isolant, ce qui conduirait à des décharges partielles qui pourraient endommager l'isolation. Le matériau semi-conducteur est habituellement basé sur le même matériau que l'isolant.

La couche externe est appelée écran d'isolation. Sa fonction est d'homogénéiser le champ électrique radial et de fournir un chemin sûr aux courants de fuite. L'écran d'isolation empêche également les décharges partielles au-dessus de l'isolant. Il est généralement fabriqué à partir du même matériau que l'écran conducteur (8).

Les écrans semi-conducteurs sont l'un des aspects les plus complexes dans la technologie du câble. L'atténuation des impulsions de décharges partielles hautes fréquences dans des câbles est due à la couche semi-conductrice. Ceci impose une limitation majeure de la longueur du câble qui peut être surveillée par un système de mesure de décharges partielles.

### I.5.3 Blindage métallique

Le blindage métallique est un facteur de sécurité important dans les câbles haute tension. En cas de dommage mécanique causé au câble, un commutateur rapide offre un accès à faible impédance au courant de défaut. Le courant de charge est produit par le condensateur formé entre le conducteur et le blindage métallique (8). Le cuivre et l'aluminium sont des matériaux typiques pour le blindage métallique du fait de leur bonne conductibilité électrique et de la résistance contre la corrosion, ils résistent ainsi mieux aux décharges partielles qui se propagent à travers le blindage métallique ce qui rend cette partie de câble particulièrement intéressante.

Cet écran métallique relié à la terre a une fonction comme un blindage électrique afin de produire un champ électrique libre autour du câble. De plus, cette composante a d'autres fonctions telles que (9) :

- Fournir un trajet de retour pour le courant de charge capacitive dans les conditions d'exploitation.
- Réalisation de mise à la terre qui permet d'écouler les courants de défaut jusqu'à ce que le système soit hors tension.
- Protection contre les contacts accidentels.
- Protection mécanique de l'isolant, ils servent comme armure.
- Rôle d'étanchéité : grâce à leur technologie (écran massif, écran rubané...), les écrans métalliques peuvent assurer l'étanchéité radiale du câble.

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

### I.5.4 Gaine de protection

Ce composant a pour fonction de protéger le câble d'éventuelles possibilités de dommages mécaniques et de la corrosion provoquée par l'eau. Le polyéthylène haute densité (HDPE) est couramment utilisé comme matériau pour cette gaine de protection car il offre une bonne protection mécanique et une excellente résistance à l'abrasion avec une faible pénétration de l'humidité (9).

### I.5.5 Isolation

L'isolation (diélectrique) est la partie la plus cruciale d'un câble puisqu'elle permet une séparation suffisante entre le conducteur et la masse électrique la plus proche afin d'empêcher la rupture diélectrique. Les matériaux d'isolation les plus couramment utilisés dans les câbles extrudés sont le polyéthylène réticulé (XLPE), le caoutchouc éthylène-propylène (EPR) et polyéthylène réticulé avec retardateur d'arborescence (TR-XLPE) (10).

Les câbles à isolation synthétique (PE ou XLPE) sont utilisés dans la gamme moyenne tension, tandis que les isolants en PVC ne sont utilisés que pour des tensions allant jusqu'à 5kV à cause du facteur de dissipation élevé. L'isolation XLPE est utilisée pour des tensions plus élevées (110 kV et plus). Les principaux paramètres électriques des matériaux d'isolations sont présentés dans le tableau I.3

**Tableau 1.3** propriétés des isolants

	<b>Huile</b>	<b>PVC</b>	<b>XLPE</b>	<b>papier</b>
<b>Imprégné</b>				
<b>Facteur de dissipation <math>\tan\delta\%</math></b>	<b>3</b>	<b>100</b>	<b>0.55</b>	<b>10</b>
<b>Température maximale (°C)</b>	<b>85</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>65-85</b>
<b>Résistance spécifique (M<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>5 \cdot 10^{12}</math></b>	<b><math>7 \cdot 10^{11}</math></b>	<b><math>10^{14}</math></b>	<b><math>5 \cdot 10^{14}</math></b>
<b>Champ électrique maximal kV/mm</b>	<b>15-25</b>	<b>40</b>	<b>95</b>	<b>15-40</b>
<b>Permittivité <math>\epsilon_r</math> à 20°C</b>	<b>2.2-2.8</b>	<b>3-4</b>	<b>2.4</b>	<b>3.3-4.2</b>

Dans le cas de l'isolation par papier imprégné, l'isolation feuilletée, est représentée exclusivement par du papier à isolation plomb (PILC). Des couches de papier imprégné sont placées les unes sur les autres pour créer l'isolation du câble. Le papier imprégné est le plus ancien et le matériau le plus utilisé. En général, le papier est imprégné d'huile ou de gel qui a

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

des propriétés diélectriques appropriées pour des applications d'isolation. Comme l'imprégnation doit être contenue dans l'isolation, le câble a généralement une gaine en plomb. Ce type de câble est utilisé depuis plus de 100 ans ainsi les procédures d'essai et d'évaluation développées sont matures. Même avec ces procédures en place, la fabrication et l'installation du câble en papier nécessite encore une habileté importante. Cependant l'utilisation de câbles PILC est en baisse. Cette situation est principalement due à des préoccupations environnementales avec le couvercle de plomb et les imprégnateurs (11). En outre, les câbles en papier ont des pertes plus élevées en isolation et les coûts d'installation et d'entretien sont supérieurs à ceux des câbles à isolation extrudée (12). En fait, il y a eu une fermeture des usines de fabrication du papier imprégné au cours des dernières décennies, ce qui rend le câble PILC difficile même à trouver pour les nouvelles installations, l'entretien ou les réparations dans certaines situations (11).

L'isolation extrudée, peut être classée comme isolant thermoplastique ou thermodurcissable. Un thermoplastique fond à une certaine température et se fige à un état fragile et vitreux lorsque la température diminue suffisamment.

L'isolation thermoplastique comprend du polyéthylène (PE), qui est divisé en bas poids moléculaire PE (LDPE), également connu sous le nom de PE basse densité (LDPE) et de haut poids moléculaire PE (HMWPE) également connu sous le nom de PE haute densité (HDPE). D'autre part, une résine thermodurcissable est un polymère qui durcit en une forme plus résistante en raison de durcissement. Le durcissement convertit la résine en une matière plastique ou en caoutchouc. À l'aide d'un processus de réticulation, on obtient une structure moléculaire tridimensionnelle rigide. Le procédé de réticulation crée une molécule ayant une masse moléculaire plus grande, ce qui entraîne dans un matériau un point de fusion plus élevé. D'une manière générale, une matière thermodurcissable est plus forte que le thermoplastique en raison de la structure moléculaire tridimensionnelle. Les matériaux thermodurcissables peuvent résister à des températures plus élevées et ne sont pas recyclables comme les thermoplastiques (13). L'isolation thermodurcissable comprend le PE réticulé (XLPE), le retardateur d'arborescence XLPE (WTR XLPE) aussi connu pour XLPE (TR XLPE) et le caoutchouc éthylène-propylène (EPR). Ce sont des isolants en usage populaire. Les principaux paramètres thermiques des matériaux d'isolation sont présentés dans le tableau I.4.

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

Tableau 1.4 propriétés thermiques des isolants

	Température de Fonctionnement	température de court-circuit
LDPE	70°C	125°C
XLPE	90°C	250°C
EPR	90°C	250°C
Papier	50-55°C	
Papier-huile	85-90°C	

### I.6 mise en œuvre du câble isolé en PRC

#### I.6.1 introduction

Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) ou cross-linked polyethylene (XLPE) est devenu un matériau de choix dans l'isolation des câbles haute tension (HT) de nouvelle génération grâce à sa performance diélectrique, physico-chimique, mécanique et thermique. Les câbles en PRC sont utilisés dans le domaine du transport d'énergie pour des tensions allant jusqu'à 500 kV et la température tolérée en service avoisine des 90°C (14). Cependant, malgré les progrès réalisés dans le domaine des procédés de construction de tels câbles et le soin porté lors de leur mise en œuvre, certaines difficultés en termes de durées de vie se posent encore à travers le monde.

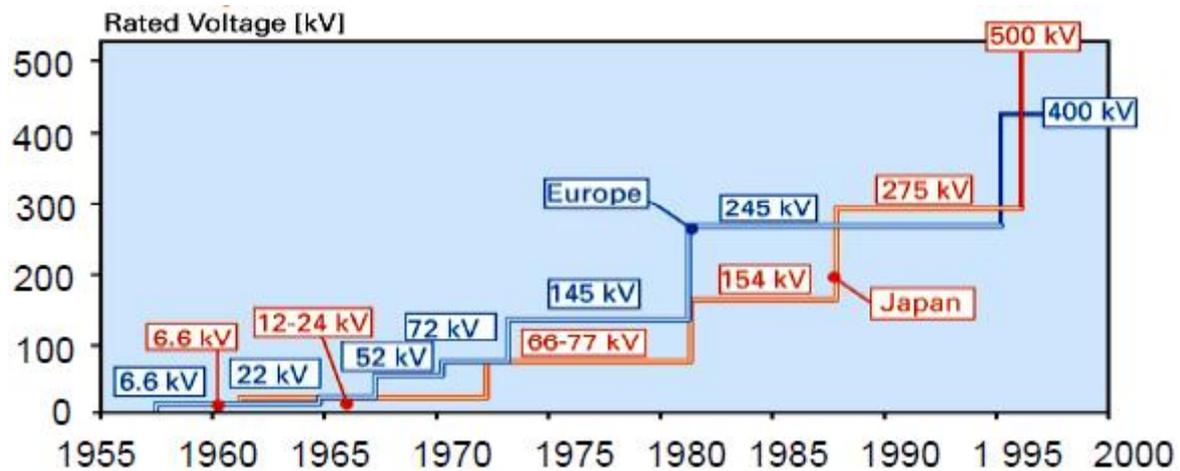


Figure I.11 historique des câbles PRC

#### I.6.2 Composants d'un câble en PRC

La figure ci-dessous nous illustre d'une manière générale des principaux composants d'un câble en PRC

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension



**Figure I.12** câble en PRC 18/30 KV

Avec :

- 1 : âme conductrice en aluminium
- 2 : écran semi-conducteur interne extrudé sur l'âme
- 3 : enveloppe isolante en PRC
- 4 : écran semi-conducteur externe extrudé sur isolant
- 5 : matelas de protection
- 6 : écran métallique en cuivre
- 7 : étanchéité gonflable
- 8 : gaine de protection en PVC

Nos essais de vieillissement ont porté sur des échantillons de câble 30 kV isolés au PRC. Ce câble présente les caractéristiques suivantes :

- Câble à champ radial.
- Tension nominale  $U_n$  : 30 kV
- Tension spécifiée  $U_0$  : 18 kV
- Section de lame :  $120\text{mm}^2$  (en aluminium)
- Epaisseur de l'isolation : 8mm
- Température assignée maximale de l'âme en service normal :  $90^\circ\text{C}$
- Température assignée maximale en régime de court-circuit :  $250^\circ\text{C}$

### **I.6.3 avantages et inconvénients de l'isolation en PRC**

Le PRC présente les avantages suivants :

- Pertes diélectriques extrêmement faibles et quasi indépendantes de la température.
- Bonne étanchéité à l'eau
- Forte résistance d'isolement
- Bonne conductivité thermique
- Haute rigidité diélectrique

## Chapitre I : Généralité sur les câbles haute tension

- Température de fonctionnement élevée
- Bonne tenue en court-circuit

Toutefois le PRC présente certains inconvénients :

- Filtrage plus difficile

Au cours de la fabrication, on impose un filtrage permettant d'éviter les inclusions et les protubérances et d'éliminer certaines particules telles que les fibres de verres.

- Porosité et teneur en eau plus importantes

Avec le meilleur procédé de réticulation sèche, la teneur en eau dans le PRC dépasse largement les normes exigées dans les câbles HT

### I.7 Conclusion

Les câbles de haute et moyenne tension diffèrent selon leurs domaines d'application et aussi selon leurs matériaux de fabrication.

L'isolation des conducteurs reste le plus grand défi de réalisation des câbles performants ; capables de supporter des contraintes physiques, chimiques et thermiques parfois rudes. Les câbles à isolations synthétiques sont de plus en plus exploités dans le domaine de la haute tension car ils offrent de bonnes performances, et le PRC figure parmi les meilleurs isolants.

# **CHAPITRE II :**

## **Les polymères et leurs mécanismes de vieillessement**

### II.1 Introduction

Les matériaux polymères appelés aussi matières plastiques sont généralement utilisés pour leurs propriétés électriques, mécaniques et thermique particulières et leurs aptitudes à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leurs structures qui sont des composés constitués d'un assemblage de macromolécules, obtenus eux-mêmes par les liaisons covalentes d'un grand nombre d'entités, appelé monomères.

### II.2 Notions sur les polymères

Le mot polymère vient du grec «pollus » plusieurs, et « meros » partie, constitué de longues molécules appelées macro molécules. Ce n'est que dans les années 1920 que la notion de macromolécule a commencé à être largement acceptée par la communauté scientifique (15). Le chimiste allemand, a reçu le prix Nobel de chimie en 1953 pour ses travaux constituant la base de la science des polymères et il a ouvert la voie à une recherche plus systématique, tant chimique que physique, sur la synthèse, la structure et le comportement des polymères solides (16).

### II.3 Définition d'un polymère

Un polymère regroupe tout matériau formé par la répétition d'un très grand nombre  $n$  de petites molécules de base de faible masse moléculaire appelées monomères qui sont liées entre elles par des liaisons primaires de types covalentes. L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation (17).

Le degré de polymérisation est le nombre total de monomère contenus dans une macromolécule. Lorsque ce degré de polymérisation (DP) est inférieur à 30, on parle d'oligomère et lorsqu'il est supérieur à 30, c'est un polymère (17).

### II.4 Classification des polymères

Plusieurs classifications des composés macromoléculaires peuvent être proposées selon que l'on choisisse l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le types de polymérisation. Nous indiquons ci-dessous les classifications les plus courantes :

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

### II.4.1 Selon leurs origines

Nous pouvons les classer en trois catégories

- **Les polymères naturels** : ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose, la chitine ...
- **Les polymères obtenus par modification chimique d'un polymère naturel**
- **Les polymères synthétiques** : sont obtenus par la polymérisation de molécules monomères tel que les polyesters, le polyéthylène, le PVC ... (18).

### II.4.2 Selon leurs structures chimiques

La structure chimique des motifs permet une classification des composantes macromoléculaires, On distingue deux types :

- **Les homopolymères** : sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère. Leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, et optique sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes. Il en découle trois familles différentes: les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.
- **Les copolymères** : sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, et comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons: le mode statistique, alterné, séquencé et greffé (19).

### II.4.3 Selon leurs comportements thermiques

Les polymères sont classés d'après leurs propriétés thermodynamiques en trois types:

- **Les thermoplastiques**: ramollissent sous l'effet de la chaleur, ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes, elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leurs nouvelles formes (20).

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

- **Les thermodurcissables** : un polymère thermodurcissable est un polymère qui a été moulé à chaud et a été réticulé à cette température. Il devient plus résistant à la température et il ne pourra jamais changer d'état après sa réticulation.
- **Les élastomères**: ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer (20) (21).

### II.4.4 Selon la structure physique

La structure physique des plastiques est surtout dépendante des liaisons intermoléculaires.

- **Les polymères amorphes** : Dans la structure amorphe, les macromolécules sont flexibles et disposées d'une façon aléatoire. En général, les polymères amorphes sont transparents.
- **Les polymères cristallins** : Dans les zones cristallines, les chaînes resteront parallèles les unes aux autres. Les facteurs favorisant l'apparition des zones cristallines sont, outre la possibilité d'interaction relativement intense entre les chaînes : la rigidité de celles-ci et la régularité de la répartition des substituants le long de la chaîne. Elle est largement présente dans les polymères thermoplastiques.
- **Les polymères semi-cristallins** : Ce type de polymères se présente lorsque la répartition des chaînes n'est pas parfaitement alignée et parallèles, ils sont constitués de cristallites enrobées de matière amorphe. Autrement dit, les polymères semi-cristallins se caractérisent par la présence des deux phases cristalline et amorphe (22).

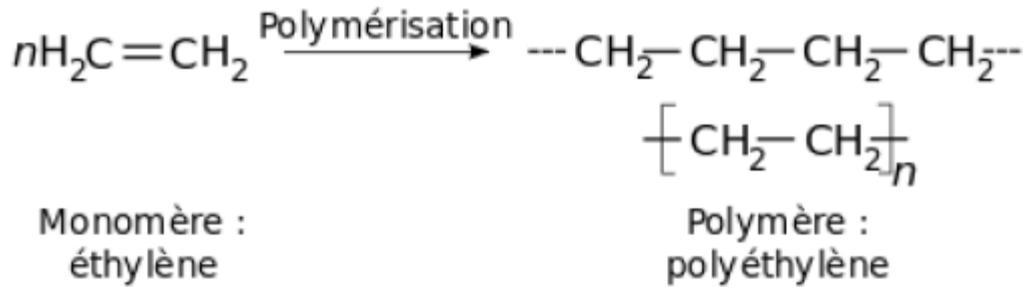
### II.5 Réaction de polymérisation

Selon le comportement cinétique et le type de réaction qui a pour but la formation des composés macromoléculaires, on distingue deux types de réactions de polymérisations ; la polycondensation et la polymérisation en chaîne.

La polymérisation est par définition la réaction chimique ou le procédé permettant la synthèse d'un polymère à partir de monomère, et le produit obtenu est un polymère synthétique. La polymérisation permet aussi de transformer un mélange liquide, plus ou moins visqueux en un matériau solide

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

La polycondensation est une réaction chimique entre molécules de base possédant des groupements fonctionnels différents, cette réaction mène à l'élaboration des macromolécules nommés polycondensats. Au cours de la polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes (23).



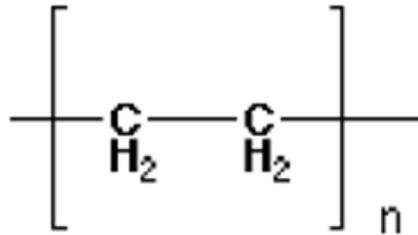
**Figure II.1** : la réaction de polymérisation

### II.6 Le polyéthylène dans l'isolation des câbles de haute tension

La technique d'isolation des câbles de puissance à base de papier imprégné d'huile sous pression, a permis à partir des années soixante-dix de transporter de l'électricité sous haute tension. Cependant des inconvénients propres au matériel employé, comme le coût d'entretien et la surveillance des lignes, a toujours entravé son utilisation à grande échelle. Les progrès dans la fabrication des polymères, pouvant supporter des champs électriques intenses associés à une méthode d'extrusion des câbles par une combinaison de polymère et d'écran semi-conducteur, a permis de remplacer définitivement le procédé à papier imprégné (24). Le polyéthylène est le polymère par excellence utilisé pour l'isolation des câbles de transport d'énergie en haute tension.

#### II.6.1 Le Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique de la famille de polyoléfines contenant uniquement des carbones hybrides de type  $sp^3$  (25). Sa molécule se présente sous forme de chaînes contenant 1000 à 2000 monomères. La formule chimique du polyéthylène est :



**Figure II.2 :** molécule du polyéthylène

Le polyéthylène est le matériau le plus utilisé dans l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique, en raison de ses propriétés diélectriques, combinées à son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et la bonne résistance aux agressions chimiques. Le PE est un polymère vinylique et représente la plus grande famille de polymères en termes de volume de production (26).

### II.6.2 Types de polyéthylènes

Il existe trois catégories de polyéthylène présentant des caractéristiques différentes, selon le degré de ramification dans leurs structures moléculaires, ce qui peut être contrôlé par des catalyseurs sélectifs.

- Le polyéthylène à basse densité (LDPE) possède un très grand nombre de ramifications, ce qui produit une structure moléculaire moins compacte.
- Le polyéthylène à haute densité (HDPE) qui possède peu de ramifications, ce qui le rend plus rigide et moins perméable que le LDPE.
- Le polyéthylène à haute densité réticulé (XLPE) est une forme de polyéthylène à haute densité dans laquelle les chaînes moléculaires individuelles sont liées les unes aux autres pour former un polymère tridimensionnel.

### II.6.3 Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)

Le matériau (PRC) est en grande partie utilisé comme enveloppe isolante des câbles électriques moyenne et haute tension. Il est chargé d'un antioxydant de stabilisation thermique et de peroxyde de dicumyl, l'agent réticulant.

Le polyéthylène réticulé chimiquement est obtenu depuis la réticulation du polyéthylène basse densité (PEBD), qui est un matériau semi-cristallin avec un taux de cristallinité de 35 à 40% et une température de fusion cristalline de 100 à 105°C (27). La réticulation subite au PEBD offre des propriétés thermique et mécanique plus performantes. En effet, le PRC se carbonise

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

sans même fondre à des températures comprises entre 250 à 300°C (28). Le PRC se comporte également comme un élastomère du point de vue du fluage à chaud est donc de la résistance de court-circuit. Du fait de la réticulation, la température d'utilisation à la corde est de 90°C et la température tolérée en court-circuit est de 250°C.

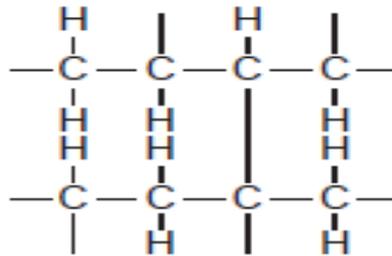


Figure II.3 : structure chimique du PRC

### II.6.4 Procédés de fabrication des câbles au PRC

La réticulation est la réaction conduisant à la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines. Elle se traduit par une diminution de la mobilité moléculaire. Dans le cas des polymères linéaires de taux de réticulation modérés (figure II.4), la réticulation se traduit par l'apparition de chaînes plus ramifiées et de masse moléculaire plus élevée que ce qui existe dans les chaînes initiales. Ceci provoque une modification du matériau sous l'influence de l'environnement. Plusieurs procédés de réticulation du PRC sont utilisés, offrant chacun des avantages mais aussi des inconvénients pour le câble HT en PRC.

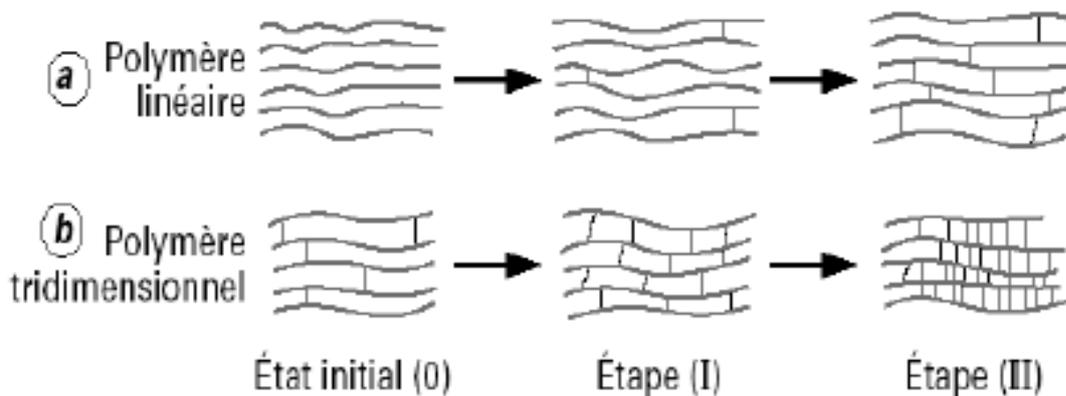


Figure II.4 : Représentation schématique des processus de la réticulation dans le polymère initialement linéaire et dans un polymère tridimensionnel

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

## **Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement**

des années 1980 sont apparus de nouveaux procédés dont certains s'affranchissent du peroxyde (29).

### **II.6.4.1 Réticulation à la vapeur d'eau**

La ligne à vulcanisation continue, utilisée pour la mise en œuvre des câbles au PRC, est constituée de l'association d'une extrudeuse suivie d'une ligne tubulaire divisée en deux sections l'une correspondant à la zone de chauffage où la mise en température du matériau est obtenue en utilisant de la vapeur d'eau sous pression (10 à 15 kg /cm<sup>2</sup>), la deuxième étant la zone de refroidissement, par l'eau également sous pression. Ce procédé le plus fréquemment mis en œuvre industriellement, est appelé " Steam Curing Process" (S.C.P). Pendant la réaction de réticulation, des produits de décomposition gazeux sont libérés, donnant lieu à des microcavités dont le nombre est de l'ordre de 10<sup>6</sup>/mm<sup>3</sup> et la taille varie de 1 à 20 μm, ce qui laisse introduire de l'eau en quantité notable dans l'isolant (jusqu'à 200ppm en masse). Afin d'empêcher qu'il ne se forme des occlusions dans l'isolation, il est nécessaire de maintenir une haute pression de vapeur sur tout le cycle de réticulation (30) (31).

### **II.6.4.2 Réticulation en gaz inerte chauffé**

Le principe est le même que précédemment, seulement la vapeur d'eau est remplacée par un gaz inerte, l'azote porté à 300°C sous une pression de 10kg/cm<sup>3</sup>. Ce procédé permet d'atteindre des températures de réticulation plus élevées que dans le procédé S.C.P. L'inconvénient de cette méthode, est qu'elle entraîne plus de contamination que celle de la vapeur. Certains auteurs ont montré 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. Ce procédé permet de réticuler une épaisseur importante d'isolant presque aussi rapidement que dans le cas où l'on utiliserait la vapeur d'eau, si l'on dispose d'une vitesse de gaz convenable. L'utilisation du chauffage par gaz sous pression élimine le risque d'inclusion d'humidité dans l'isolant et du fait que le gaz est porté à haute pression, le nombre et la grosseur des vacuoles diminuent sensiblement, ce qui est très important pour les câbles MT et HT (30) (32).

## **Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement**

### **II.6.4.3 Réticulation par radiation**

Le procédé désigné sous les termes de “ Radiant Curing Process” (R.C.P) utilise un chauffage par infrarouge d’un gaz inerte ( $N_2$  ou  $SF_6$ ) sous pression, de sorte que la réticulation se produise à une température voisine de  $300^\circ C$ , alors que dans le procédé S.C.P, la température que l’on atteint pour scinder le peroxyde dépend de la pression de la vapeur et se trouve limitée à  $200^\circ C$  environ par la tenue mécanique du tube de réticulation. Le refroidissement s’opère ici par l’eau à une pression égale à celle du gaz inerte. Les vitesses de réticulation du procédé sont supérieures à celles du procédé S.C.P. L’avantage de ce procédé réside d’une part dans l’absence de vapeur qui a pour conséquence une diminution importante du taux d’humidité et des microcavités (vacuoles) dans l’isolation, d’autre part, le chauffage et la pressurisation étant indépendants, la température et la pression peuvent être réglées séparément (30).

### **II.6.4.4 Réticulation aux ultrasons**

L’idée de base de la méthode est de réduire le temps de réticulation en utilisant un chauffage par mise en vibration du milieu. Elle met à profit les propriétés viscoélastiques du polyéthylène conduisant à la production de chaleur lorsque ce matériau est soumis à des vibrations dynamiques telles que les ondes sonores ou ultrasonores. On utilise l’eau comme milieu d’irradiation de sorte que l’onde sonore soit transmise en quasi-totalité. Les fréquences utilisées sont comprises entre 400 et 500 kHz. Cependant, si l’on ne met en œuvre que les ultrasons comme moyen de chauffage, la température est plus importante près du conducteur et la réticulation se trouve plus complète au centre, c’est pourquoi, pour la partie extérieure du câble, on est conduit à adjoindre un chauffage classique par vapeur d’eau. Les avantages de ce procédé sont doubles : d’une part la longueur du tube de réticulation peut être réduite de moitié, 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  $15\mu m$  (30).

### **II.6.4.5 Procédé de réticulation SIOPLAS**

Ce procédé se distingue totalement des précédents car il ne fait pas intervenir la décomposition d’un peroxyde. Ici, une première réaction chimique a pour effet de greffer des groupes polyfonctionnels du type organosilanes (dérivé organique du Silicium) sur la chaîne du polyéthylène. Dans une deuxième réaction les pontages sont établis après condensation de groupes Alkoxy. La caractéristique de ce procédé est telle qu’après la première étape,

## **Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement**

l'isolation est toujours thermoplastique et peut être extrudée sur un conducteur. L'extrusion sur le conducteur est réalisée à partir d'une ligne classique alimentée par le mélange composé d'une part des granulés de polyéthylène greffé, de silicone et de l'initiateur de greffage, d'autre part des granulés formés par le mélange de polyéthylène, d'antioxydant et d'un catalyseur. Les pontages entre chaînes de polyéthylène se font lors d'une opération ultérieure. Le câble est mis sur le touret après extrusion et stocké dans un lieu humide à la pression atmosphérique ou immergé dans l'eau chaude à environ 90°C. La durée de réticulation dépend de l'épaisseur de l'isolant, et est de 1 à 4 heures pour les câbles BT. La réticulation en une seule étape (procédure MONOSIL) est comparable à la précédente, mais les réactions de greffage et de pontage sont faites 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 (30) (31).

### **II.6.5 Propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)**

#### **II.6.5.1 Propriété électrique**

Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celle du polyéthylène, il est caractérisé par une permittivité relative faible limitant ainsi le courant de déplacement, un facteur de pertes diélectriques relativement faible, et une rigidité diélectrique élevée.

La réticulation fait disparaître complètement la tendance qu'avait la résine mère à se fissurer au contact d'atmosphères agressives du type oxydante, elle offre aussi une bonne résistance à la propagation des arborescences électriques (28).

#### **II.6.5.2 Propriété chimique**

En générale, le PRC présente une bonne résistance chimique, il est (33) :

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

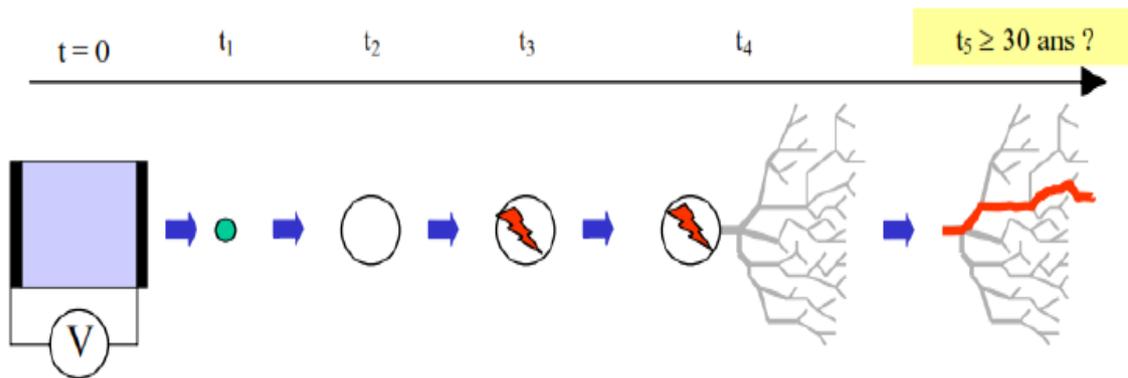
### II.6.5.3 Propriété mécanique

Les propriétés mécaniques du PRC dépendent de sa masse molaire et de sa cristallinité. Nous pouvons citer (33):

- La résistance à la traction variant de 9 à 23 MPa
- L'allongement à la rupture variant de 150 % à 1000%
- Le module d'élasticité en traction variant de 200 à 500 MPa

### II.6.6 Vieillissement électrique et rupture des câbles (PRC)

Le scénario le plus connu est celui illustré sur la figure II.5, ce scénario s'appuie sur des théories de plusieurs travaux. Ces théories seront d'appui pour illustrer les différentes étapes de ce processus à la fois lent et compliqué.



**Figure II.5** : schéma représentant le scénario standard de vieillissement (34)

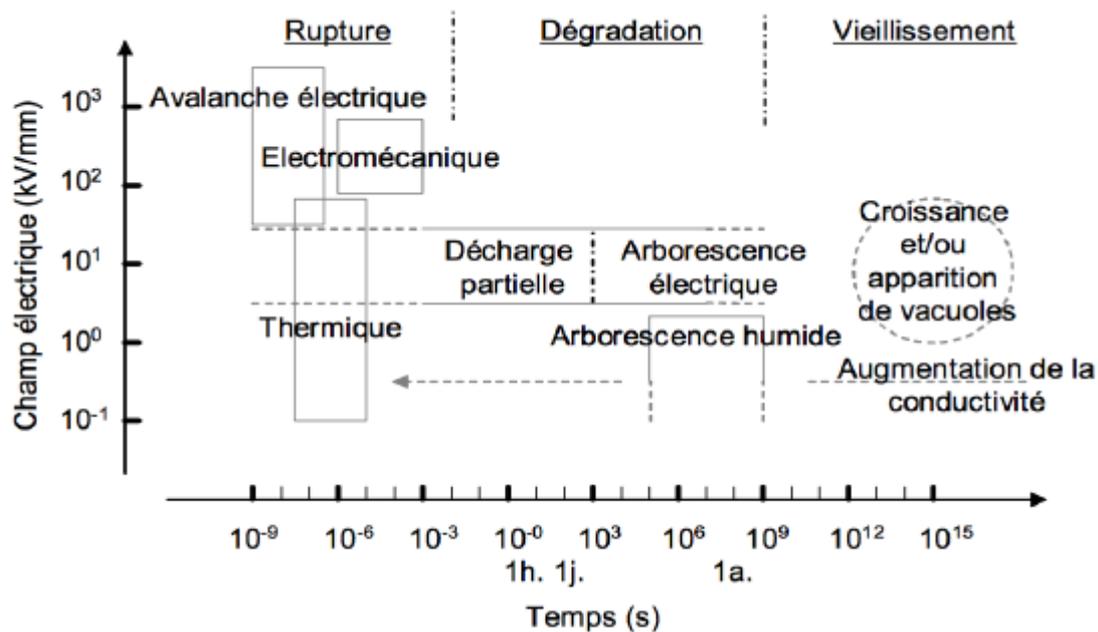
Selon le scénario standard, la rupture diélectrique fait suite à un processus lent dans l'évolution des propriétés physico-chimiques du matériau polymère. Initialement et en début de service le matériau peut être avec ou sans défauts ( $t=0$ ). L'application d'un champ électrique a pour conséquence une apparition ou une croissance de cavités ( $t=t_1$  jusqu'à  $t_2$ ), cette étape n'est autre que le vieillissement électrique. La création ou la croissance de vacuoles peut conduire à son tour à la dégradation électrique si des décharges électriques prennent naissance, ( $t=t_3$ ).

Les électrons générés dans ces décharges ont suffisamment d'énergie pour briser des chaînes macromoléculaires sur les surfaces internes de la vacuole. Les modifications structurales (chimique et physique) du matériau et le cumul des différents phénomènes vont finir par constituer des segments ionisés préférentiels pour la croissance d'une arborescence électrique ( $t=t_4$ ), qui est la dernière phase de la dégradation électrique. Cette dégradation est susceptible

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

à son tour de conduire l'isolant à la fin de sa vie c'est-à-dire à une rupture dès que les conditions défavorables sont remplies (champ fort, instabilité thermique,...), des conditions qui ne sont pas rencontrées sur un objet normalement isolé, mais elles peuvent résulter de l'évolution préalable du matériau.

Les trois mécanismes fondamentaux décrivent l'endommagement général d'un isolant sous champ électrique à savoir: le vieillissement électrique, la dégradation et la rupture diélectrique sont représentés sur la figure II.6 selon le temps et le champ électrique auxquels ils peuvent avoir lieu.



**Figure II.6 :** Vieillessement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et de champs électriques auxquels ces mécanismes ont lieu (35).

### II.6.6.1 Mécanismes de vieillissement électriques des polymères

Plusieurs phénomènes sont générés sous l'application d'une contrainte électrique et ils ont une contribution directe au vieillissement électrique (34) (35). Dans ce qui suit on portera une clarification et les caractéristiques principales de chaque mécanisme:

#### II.6.6.1.1 La rupture thermique

Elle se produit par un effet d'emballage du courant non compensé par la diffusion de la chaleur ; lorsque l'énergie électrique est transférée au matériau solide, celui-ci chauffe (36),

## **Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement**

ce qui augmente sa conductivité, donc le courant, etc... Compte tenu de la forte dépendance de la conductivité électrique de la température, lorsque cette chaleur n'est pas bien dissipée par diffusion dans le diélectrique, l'équilibre thermique est rompu et un phénomène d'emballage thermique se produit. Ce processus évolue jusqu'à générer à terme une avalanche électronique et la rupture thermique du matériau advient.

### **II.6.6.1.2 La rupture électromécanique**

Elle est due à l'apparition d'une force de compression impliquant une diminution de l'épaisseur du matériau et donc une augmentation du champ électrique ; Les forces électrostatiques générées par l'attraction mutuelle des électrodes peuvent provoquer la propagation d'une fissure jusqu'au moment où le champ provoque la rupture par avalanche (rupture électromécanique) (36).

### **II.6.6.1.3 La rupture électrique (ou électronique)**

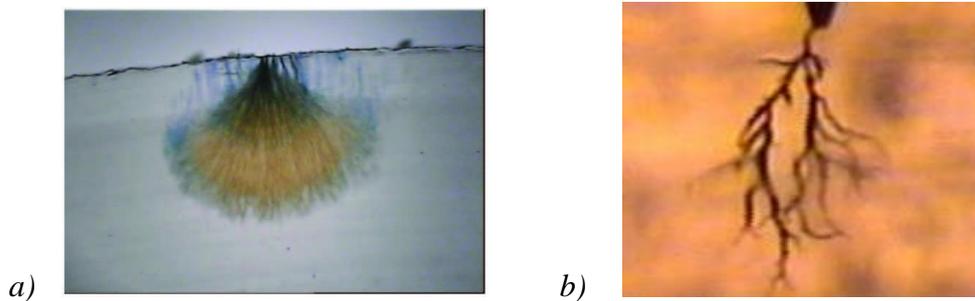
Elle est la plus évoquée et fait référence aux porteurs de charge impliqués, qui développent une instabilité électrique très rapide ; Le claquage électronique est dû aux électrons accélérés par le champ dans la bande de conduction qui acquièrent suffisamment d'énergie cinétique pour induire des ionisations par collisions et conduire à la rupture de l'isolant. En d'autres termes, si un premier électron (injecté à la cathode par exemple) reçoit suffisamment d'énergie, il pourra libérer un autre électron par ionisation d'un radical anion. Si chacun d'eux reçoit la même énergie, les électrons secondaires peuvent à leur tour provoquer d'autres ionisations et déclencher une rupture diélectrique par avalanche (37).

La rupture électrique à long terme fait suite à un processus lent dans l'évolution des propriétés physico-chimiques du diélectrique. Sous l'action combinée du champ électrique et de l'environnement, deux autres mécanismes interviennent pour expliquer à plus long terme les défaillances des isolants solides, en particulier les polymères.

D'une part, l'oxydation progressive du matériau et la diminution de la masse moléculaire des chaînes de polymères, ce qui augmente en général la conductivité ionique. Cette évolution peut introduire des ruptures thermiques sur des isolants âgés. D'autre part et en présence, soit de défauts internes à l'isolation, soit d'humidité ou de vapeur d'eau dans l'environnement de fonctionnement du câble, sous des champs électriques, même relativement faibles, des arborescences électrique ou d'eau, respectivement, apparaissent et croissent jusqu'à la rupture (38).

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

Dans tous les cas, l'arborescence est la dernière phase du vieillissement électrique. C'est un phénomène lent qui se propage à partir d'un point faible du matériau ou bien d'une électrode jusqu'à l'électrode opposée, en suivant des chemins sinueux électriquement faibles, formés de canaux creux, sièges de décharges électriques (figure II.7).



**Figure II.7 :** Exemple de points faibles de propagation de l'arborescence, a) à partir de l'écran (39) et b) à partir de l'électrode (40)

### II.6.6.2 Les Arborescences

#### II.6.6.2.1 Définition

Les matériaux isolants utilisés dans l'isolation des câbles de haute (HT) et moyenne tension présentent toujours des impuretés et des défauts microscopiques (microcavités, occlusion gazeuses, et hétérogénéités à l'interface isolant conducteur), et ce quelles que soit les précautions prises lors de leurs mise en œuvre. Par conséquent, il se produit une distorsion et concentration locale du champ électrique pouvant atteindre des valeurs élevées, parfois supérieures à la rigidité diélectrique intrinsèque du matériau. Une dégradation de l'isolant peut alors se traduire par un mécanisme appelé (arborescence) (41). En effet, ces défauts peuvent constituer des sites de renforcement locaux du champ électrique.

L'arborescence dans l'isolation des câbles électriques polyoléfine sont liés non seulement à la technique de fabrication du câble, la fréquence de mise sous tension, mais aussi au contenu des impuretés, à la contrainte interne résiduelle et à la morphologie physique du matériau d'isolation.

### II.6.6.2.2 Les Arborescences électrochimiques

Dans lesquelles on distingue les arborescences chimiques qui se développent en présence de produits chimiques et les arborescences d'eau qui se développent en milieu humide.

- **Les Arborescences chimiques** Leur formation nécessite la présence d'une certaine quantité de Sulfure dans l'environnement du câble, sous formes de  $H_2S$  ou  $S(NH_4)_2$ , qui est diffusée sous forme moléculaire ou hydratée, dans l'isolation jusqu'à l'âme conductrice où seront alors formées des cristaux de  $Cu_2S$  (cas où l'âme du câble est en cuivre) qui sont à l'origine de l'initiation des arborescences chimiques. Ces dernières sont d'aspects très particuliers et sont généralement accompagnées d'arborescence d'eau (42) (43).
- **Les Arborescences d'eau** qui Sont constituées de microcavités remplies d'eau reliées entre elles par des canaux très fins (de l'ordre microns). Elles apparaissent dans les régions où les champs électriques sont intenses, tel que au niveau des interfaces isolant / conducteur où se développent les arborescences ouvertes en forme d'éventail ou dans le voisinage des cavités et des impuretés internes où évoluent les arborescences en nœud papillon. Celles-ci se propagent dans la direction du champ électrique (44).

### II.6.6.2.3 Les Arborescences électrique

Les arborescences électriques sont des structures filamenteuses ramifiées constituées de micro-canaux creux susceptibles de se propager sur des distances de plusieurs millimètres en volume et en sub-surface d'isolants. Elles apparaissent surtout dans des régions où le champ électrique est élevé ( $\approx 100kV/mm$ ) et ont pour l'origine des cavités, des aspérités métalliques ou des éléments polluants.

Le développement d'une arborescence ne constitue pas un mécanisme de rupture par emballement mais participe à la dégradation progressive de l'isolant et à une augmentation de la probabilité de rupture (45) (46).



**Figure II.8 :** Exemple d'une arborescence électrique

De nombreux mécanismes ont été proposés pour tenter d'expliquer l'initiation et la propagation des arborescences électrique et électrochimiques. Les plus évoqués sont résumés là-dessous.

### **II.6.6.2.4 Les mécanismes d'évolution des arborescences**

#### **II.6.6.2.4.1 Les décharges partielles et cavités**

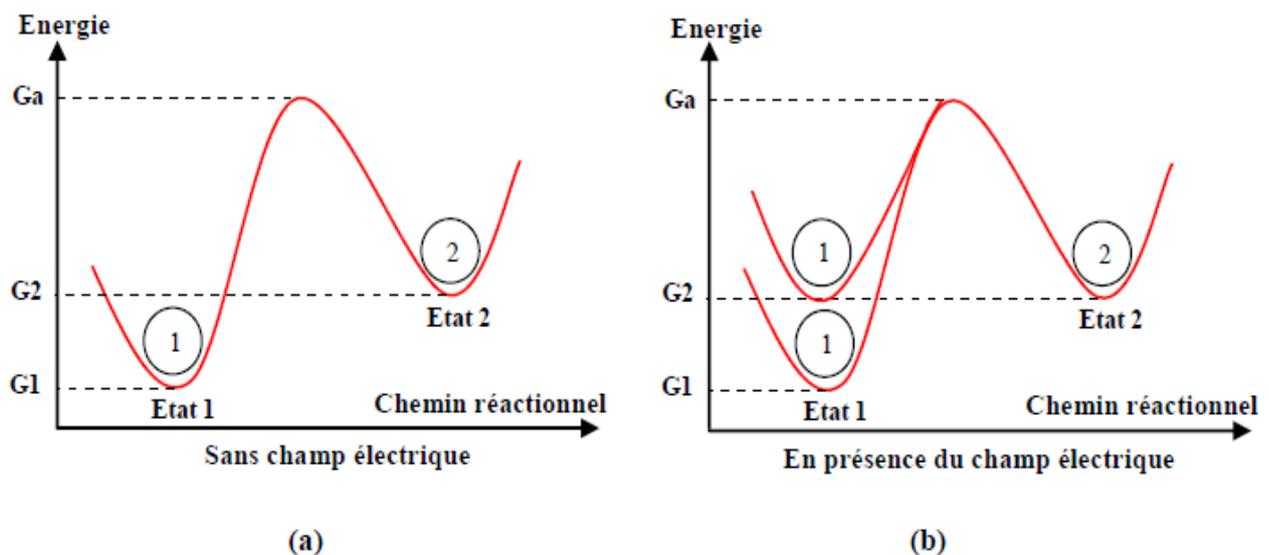
L'isolation à base de polymère contient typiquement des microcavités lors de la fabrication (défaut). Sous un champ électrique appliqué, une décharge prend naissance dans le gaz emprisonné dans la cavité suffisamment grande (quelques dizaines de micromètre aux champs et température de service typiques) (47). La décharge partielle ne court-circuite pas l'ensemble de l'isolation, l'extension de la décharge est limitée à cause du champ électrique qui n'est pas suffisant pour provoquer sa propagation totale, elle se trouve de ce fait bloquée par le matériau isolant qui nécessite un champ de claquage plus élevé. La différence des permittivités entre le gaz et le polymère fait augmenter le champ dans le gaz avec une présence d'un électron pour amorcer la décharge (48). La source préférentielle des charges sont les porteurs (électrons primaires) transportés à l'intérieur du polymère par conduction et piégés comme charge d'espace à l'interface polymère – cavité.

L'activité de décharge partielle à partir de vacuoles produit également une érosion des parois de la cavité, une croissance de la cavité et éventuellement le développement d'arborescence si les contraintes électriques sont suffisantes. Ainsi pour s'affranchir des arborescences, il faut donc ne pas avoir de vacuoles initiatrices de décharges partielles. La question de l'origine et de la croissance éventuelle des vacuoles est donc posée : préexistence ou formation sous contrainte électromécanique.

### II.6.6.2.4.2 Charges d'espace

Les études effectuées ces dernières années ont montré la contribution directe de la charge d'espace au phénomène de vieillissement électrique du matériau polymère (49). Mazzanti et Montanari décrivent l'influence des charges d'espace sur le vieillissement comme suit (50)

En considérant qu'un matériau polymère est constitué de sites réactionnels, chimiques ou morphologiques, soumis à une réaction locale, l'isolant arrive en fin de vie lorsqu'une quantité critique de sites est passée de l'état initial à l'état final. Ces états sont représentés respectivement en 1 et 2 sur la figure (II.9 a). A l'issue de la fabrication, la quasi-totalité des sites est dans l'état 1 puis l'équilibre thermodynamique tend à s'établir. Si, à l'équilibre, la quantité critique de sites à l'état 2 n'est pas atteinte, l'isolant a une durée de vie qui n'est pas affectée par la contrainte.



**Figure II.9** : diagramme d'énergie des sites réactionnels (51)

Lorsque le matériau est soumis à un champ électrique, des charges électriques sont injectées dans le matériau, atteignant à plus ou moins long terme une densité stationnaire. L'effet des charges d'espace sur ce modèle est de deux natures :

- L'énergie électrostatique générée par la présence des charges augmente l'énergie des sites réactionnels. Cependant, l'ensemble des états (1 et 2) est affecté par ce gain en énergie et l'équilibre n'est pas modifié. Un processus de vieillissement peut toutefois intervenir par réaction chimique avec les charges injectées.

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

- la présence des charges d'espace induit une contrainte mécanique dans le matériau. L'énergie mécanique mise en jeu peut alors être absorbée par les sites réactionnels à l'état 1, facilitant alors la transition vers l'état 2 (figure II.9.b). Les contraintes mécaniques résiduelles peuvent être à l'origine de défauts dont la présence est fatale à l'isolant (fissures, vacuoles).

### II.6.6.2.4.3 Décharges de surface

En ce qui concerne les phénomènes de surface de l'isolant, les décharges ou les contournements résultant de la pollution de celle-ci provoquent une augmentation de la conductivité de surface, et donc une diminution de la résistance superficielle.

## II.7 Les méthodes de caractérisation physico-chimiques des matériaux isolants

### II.7.1 Introduction

La détermination des caractéristiques physico-chimiques d'un matériau à isolation synthétique permet de suivre in situ l'évolution de son vieillissement électrique. Les méthodes utilisées pour la caractérisation de l'isolation en PRC du Câble 30 kV étudié dans le cadre de notre travail, sont présentées dans ce qui suit.

### II.7.2 Caractéristiques physiques

#### II.7.2.1 La rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant, représente la valeur maximum du champ électrique qu'il faut lui appliquer pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction.

De façon pratique, la rigidité électrique est le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre deux électrodes planes auxquelles est appliquée la tension.

Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux on distingue :

- La rigidité diélectrique transversale, pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire à la surface principale du matériau.
- La rigidité diélectrique longitudinale, obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de l'isolant.

II.7.2.1.1 La rigidité diélectrique longitudinale

La rigidité diélectrique longitudinale dépend de la nature de l'isolant, mais beaucoup plus de son état de sécheresse et de propriété. En effet, dans la plupart des cas, l'amorçage entre les conducteurs se produit d'abord dans le milieu ambiant au voisinage de la surface du matériau.

La tension de contournement d'une surface isolante est mesurée pour une distance inter électrode « d » entre deux électrodes, par la méthode de la montée de la tension jusqu'à contournement de l'isolant. Donc la rigidité longitudinale est donnée par la relation suivante (53) :

$$E_L = \frac{U_{\text{contournement}}}{d} \quad (\text{II.1})$$

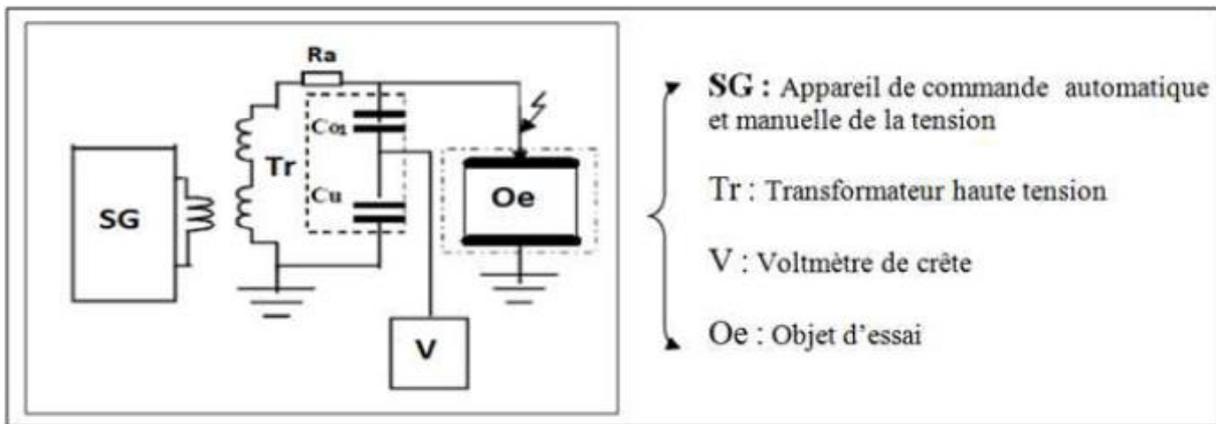


Figure II.10 : Schéma de la mesure de la tension de contournement d'une surface isolante

II.7.2.1.2 Rigidité transversale

La rigidité diélectrique transversale d'un matériau isolant est obtenue entre deux conducteurs plans situés de part et d'autre des surfaces de cet isolant. La rigidité diélectrique transversale dépend de la nature de l'isolant. La tension de perforation de l'épaisseur de l'isolant est mesurée pour une distance « d » inter électrodes (épaisseur de la plaque isolante), par la montée rapide de la tension jusqu'à perforation de l'isolant. La rigidité diélectrique transversale est déterminée par la relation suivante (53) :

$$E_t = \frac{U_{\text{perforation}}}{d} \quad (\text{II.2})$$

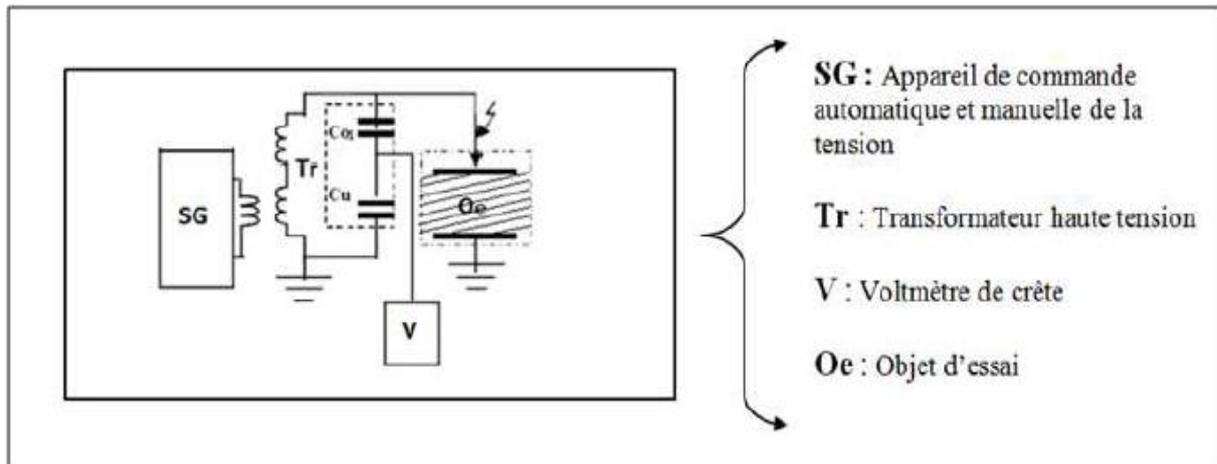


Figure II.11 : Schéma de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolante

## II .7.2.2 Mesure de résistance

### II.7.2.2.1 La résistance transversale

La résistance transversale  $R_t$  mesurée entre deux électrodes appliquées sur deux faces opposées d'un échantillon est le quotient de la tension continue appliquée aux électrodes par la partie du courant qui traverse l'isolant entre ces électrodes (52) (53).

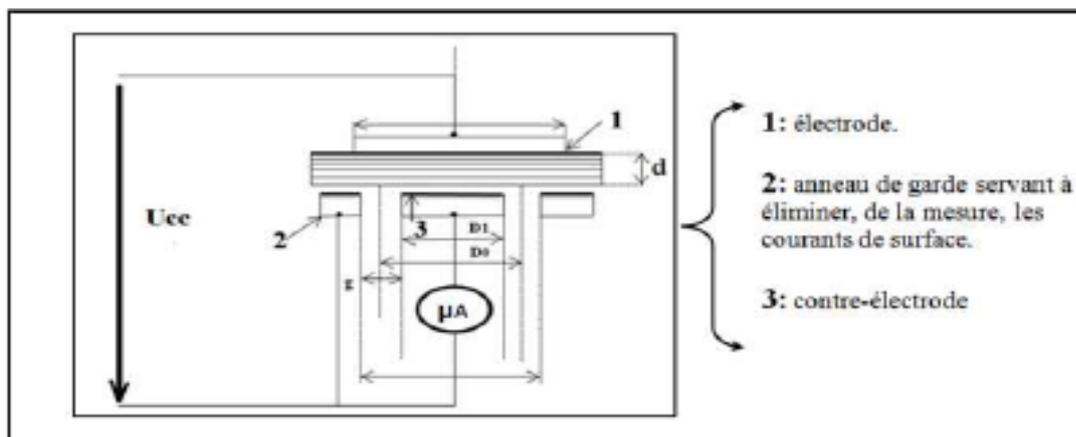


Figure II.12 : schéma de mesure de la résistance transversale

### II.7. 2.2.2 La résistance superficielle

La résistance superficielle  $R_s$  mesurée entre deux électrodes appliquées sur la même face d'un échantillon est le quotient de la tension continue appliquée aux électrodes par la partie du courant à travers la mince couche d'humidité (pollution) qui pourrait exister à la surface de l'isolant et dans les couches superficielles de ce dernier (53) (54)

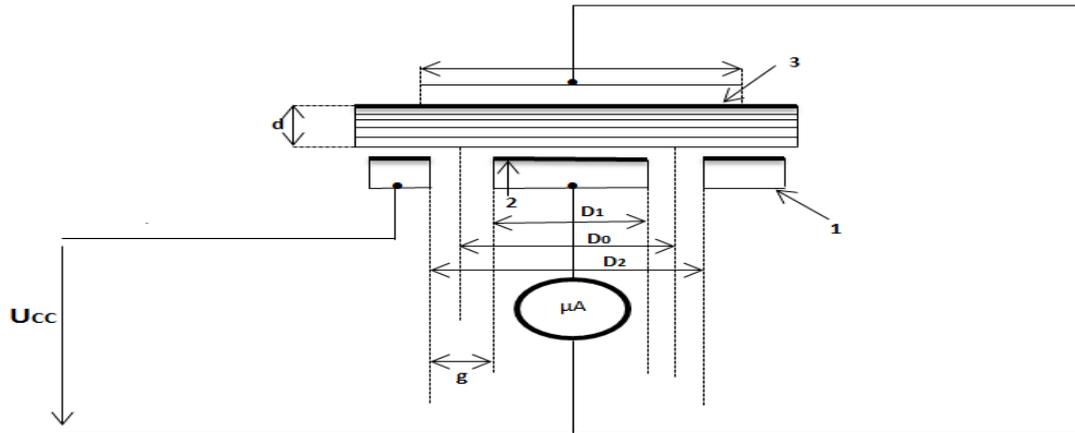


Figure II.13 : Schéma de mesure de la résistance superficielle

1: électrode

2 : contre-électrode

3: anneau de garde servant à éliminer de la mesure les courants transversaux.

### II .7.2.3 Mesure de résistivité

#### II .7.2.3.1 La résistivité transversale

La résistivité transversale d'un matériau  $\rho_t$  est le quotient du gradient de potentiel par densité de courant qui le traverse, elle est donnée par la relation suivant (55) (56) :

$$\rho_t = S_t \cdot \frac{R_t}{d} \quad (\text{II} .3)$$

Où  $S_t = \frac{\pi D}{4} \quad (\text{II}.4)$

et  $D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (\text{II} .5)$

#### II.7.2.3.2 La résistivité superficielle

La résistivité superficielle d'un matériau  $\rho_s$  est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur, elle est définie par:

$$\rho_s = \frac{P \cdot R_s}{g} \quad (\text{II} .6)$$

$$P = \pi \cdot D_0 \quad (\text{II}.7)$$

Est le périmètre moyen entre l'électrode et la contre- électrode, avec :

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

$$D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad \text{et} \quad g = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad (\text{II.8})$$

### II.7.2.4 Mesure du facteur de pertes $\text{tg}\delta$ par la méthode du pont de Schering

Le pont de Schering permet la mesure de la capacité et du facteur de perte d'isolation (condensateur, câbles, isolateurs....) en haute tension alternative (57) (58).

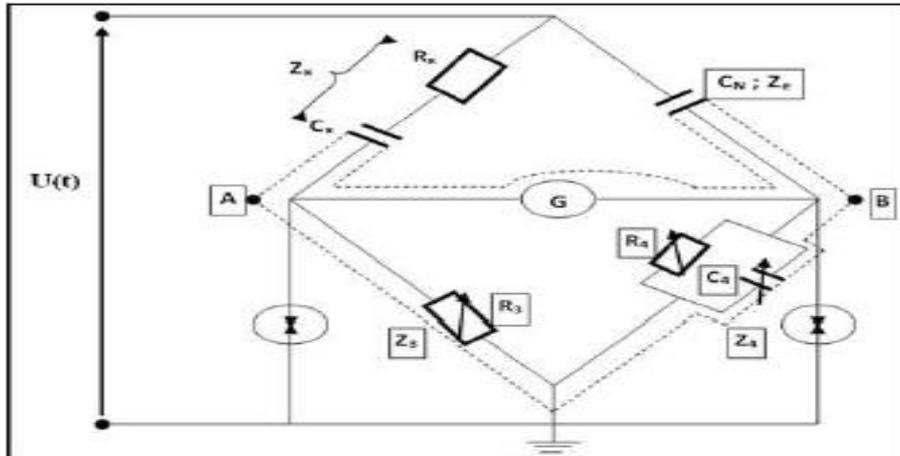


Figure II .14 : Schéma de principe du pont de Schering

Impédance de branche : l'impédance de l'objet d'essais

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \quad (\text{II.9})$$

$$Z_x = \frac{1}{j\omega C_x} (1 + j\text{tg}\delta_x) \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Avec : } \text{tg}\delta_x = \omega \cdot R_x \cdot C_x \quad (\text{II.11})$$

$$Z_N = \frac{1}{j\omega C_N} \quad (\text{II.12})$$

$Z_N$  : Impédance de la capacité étalon de facteur de perte faible.

$$Z_3 = R_3 \quad (\text{II.13})$$

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

$$Z_4 = \frac{R_4 \cdot \left(\frac{1}{j\omega C_4}\right)}{R_4 + \left(\frac{1}{j\omega C_4}\right)} \quad (\text{II.14})$$

Et à l'équilibre :  $I_G = 0$

$$D'où : Z_x \cdot Z_4 = Z_4 \cdot Z_3 \quad (\text{II.15})$$

En remplaçant les expressions des impédances et en égalant les parties réelles et imaginaires, on trouve :

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \quad (\text{II.16})$$

$$\text{tg} \delta_x = \omega \cdot R_x \cdot C_x = \frac{\omega R_3 \cdot C_x \cdot C_4}{C_N} \quad (\text{II.17})$$

$$\text{Avec : } \text{tg} \delta = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (\text{II.18})$$

### II.7.2.4.1 Mesure de la constante diélectrique

$$C_x = \epsilon_r \cdot C_0 \quad \text{et} \quad \epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{II.19}) \quad ; \quad \text{Avec} \quad C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{S}{a} \quad (\text{II.20})$$

D'où :

$$\epsilon_r = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \cdot \frac{a}{\epsilon_0 S} \quad (\text{II.21})$$

### II.7.2.4.2 Le pont à transformateur différentiel

La capacité  $C_x$  et  $C_N$  sont placés dans la branche HT. La branche basse tension est remplacée par les bobinages  $w_1$  et  $w_2$  du transformateur, le troisième bobinage du transformateur est connecté à l'indicateur zéro (58)

$$\text{Le pont est en équilibre si} \quad C_x = \frac{w_1}{w_2} \cdot C_N \quad (\text{II.22})$$

Le nombre de spire du bobinage  $w_1$  est fixé à 4 positions de sorte que le rapport à choisir soit de

0,1 ; 1 ; 10 ou 100.

Le bobinage  $w_2$  donne des positions de réglage variables

### II.7.3 Les méthodes d'analyses

#### II.7.3.1 La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge est une technique expérimentale permettant l'identification de matériaux par la nature des fonctions chimiques qui les constituent. Son principe repose sur l'interaction entre une source poly-chromatique, émettant des photons dont la longueur d'onde se situe dans le domaine de l'infrarouge (entre 2,5 et 25  $\mu\text{m}$ ), et le matériau permettant la détection des différents modes (ou fréquence) de vibration des liaisons chimiques présentes dans le matériau (59).

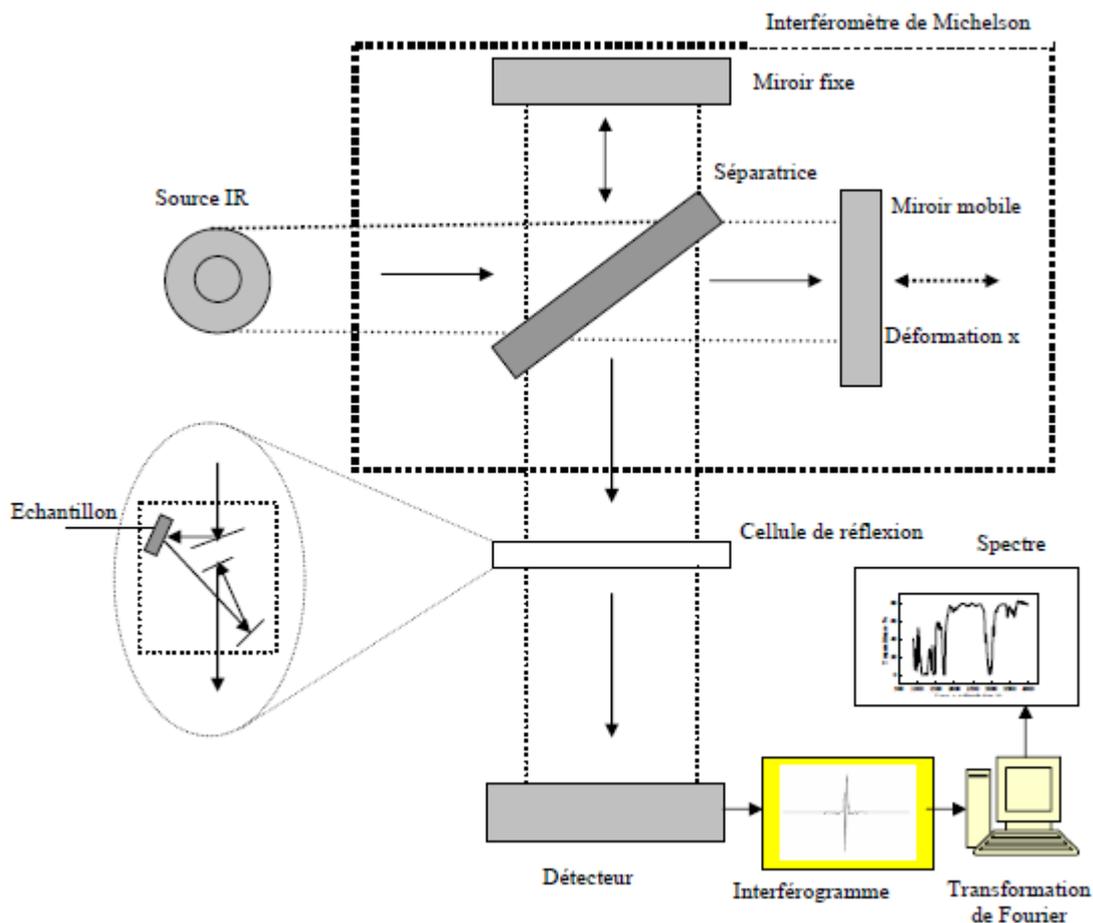


Figure II.15 : Principe de base de la spectroscopie FTIR

#### II.7.3.2 La diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique utilisée pour l'identification des phases cristallines et de façon générale, cette méthode s'applique aux matières présentant les caractéristiques de l'état cristallin : un arrangement périodique,

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs. Cette méthode permet ainsi clairement de distinguer les produits amorphes des produits cristallisés (60).

### II.7.3.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage MEB ou SEM (Scanning Electron Microscopy) est une technique de microscopie électronique qui permet d'obtenir des images de la surface d'échantillon avec une grande résolution, et de fournir des informations sur la morphologie et la composition d'un matériau. Cette méthode d'analyses utilise le principe des interactions électrons-matière. De plus le MEB se trouve généralement associé à d'autres équipements, entre autres, la microscopie (EDX), analyses élémentaire locale (61).

Le principe du MEB consiste en un faisceau très fin d'électrons, monocinétique qui balaie la surface d'un échantillon où se produisent des interactions détectées par un capteur qui contrôle la brillance d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons.

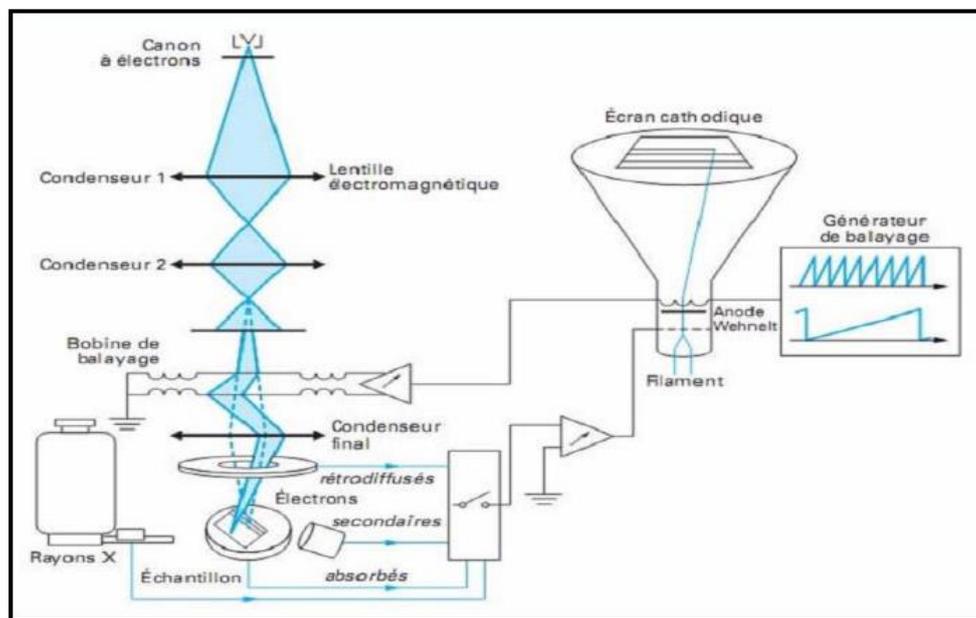


Figure II .16 : Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage (MEB)

### II.7.3.4 Analyse thermogravimétrique ATG

L'analyse thermo-gravimétrique (ATG), en anglais thermogravimétric analysis (TGA), est une technique d'analyse qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température. Une telle analyse suppose une bonne précision pour les trois mesures: poids, température et variation de température. Cette analyse il suppose une très bonne précision pour les trois mesures : poids, température et la variation de température.

## Chapitre II : Les polymères et leurs mécanismes de vieillissement

Comme les courbes de variations afin de pouvoir les interpréter .la dérivée de ces courbes montre à quels points ces variations sont les plus importantes.

L'ATG est souvent employée dans la recherche et les essais pour déterminer la caractéristique de matériaux tels que les polymères, ainsi que pour estimer la cinétique d'oxydation en corrosion à haute température.

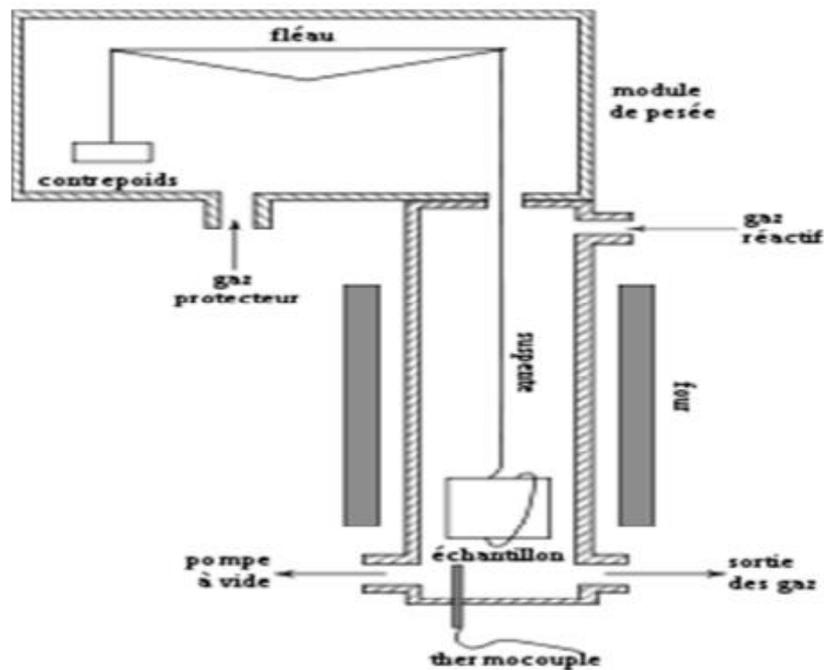
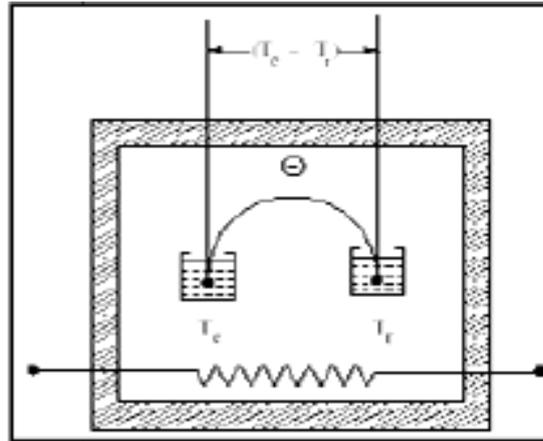


Figure .II.17 : Représentation schématique d'une ATG

### II.7.3.5 Analyse thermique différentielle ATD

L'analyse thermique différentielle (ATD) est une méthode utilisée pour déterminer les températures correspondant à des modifications du matériau en fonction de traitement thermique. Elle consiste à mesurer la différence de température entre un échantillon ( $T_e$ ) et une référence ( $T_r$ ) (matériau inerte thermiquement) en fonction du temps et de la température, lorsqu'ils sont soumis à une variation programmée de température, sous atmosphère contrôlée.

D'une manière générale, les transitions de phase et l'évaporation de solvant se traduisent par des pics endothermiques. Par contre la cristallisation, l'oxydation et certaines de décompositions se caractérisant par des pics exothermique.



**Figure II.18** : Principe du fonctionnement d'un système ATD

### II.7.3.6 Analyses calorimétrique différentielle (DSC)

La DSC (Differential Scanning Calorimetry) est une technique qui mesure le flux de chaleur absorbé ou dégagé par un spécimen en fonction de la température ou du temps quand il est soumis à un programme de température contrôlé dans une atmosphère contrôlée.

Cette technique sert à étudier les transitions thermiques d'un polymère. Les transitions thermiques sont les changements qui interviennent dans un polymère quand on le chauffe.

## II.8 Conclusion

La classification des polymères permet de distinguer plusieurs types, le polyéthylène et le PRC en sont des exemples.

Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) est le polymère le plus utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension, cela est directement lié à ses bonnes propriétés physico-chimiques ainsi que ses propriétés mécaniques, mais faute de plusieurs facteurs (charges d'espace, microcavités...) plusieurs phénomènes sont générés sous l'application une contrainte électrique (arborescences, rupture thermique...) qui mènent vers la fin de vie du câble.



**Chapitre III :**

**Protocole  
expérimental**

## Chapitre III : Protocol Expérimental

### III.1 Introduction

Le but de ce travail expérimental est d'étudier le vieillissement électrique du câble en PRC 18/30 kV et ce en suivant l'évolution de l'arborescence électrique qui sera générée au niveau de l'électrode haute tension.

Dans ce chapitre, nous exposerons le protocole expérimental suivi lors de cette étude de vieillissement du câble en PRC 18/30kV Fabriqué par la câblerie ENICAB (Algérie).

Il sera, d'abord, question de présenter l'échantillon de câble sur lequel sont effectués les essais de vieillissement, l'illustration de l'objet d'essai et l'explication du choix du système d'électrodes (pointe-cylindre), ainsi que la cellule de mesure, comme nous présenterons la méthode adoptée pour la mesure du rayon de courbure de l'électrode pointe, ainsi que celle suivie pour réaliser les essais de vieillissements sur le câble en PRC et le choix des paramètres fixés et mesurés. Les techniques suivies de caractérisation de l'isolation en PRC avant et après vieillissent (FTIR, DRX, ATG/ATD, DSC, MEB) seront également exposées. Nos essais et mesures électriques sont réalisés au laboratoire de Haute Tension et les analyses chimiques sont effectuées aux laboratoires de Génie des Procédés de l'université de Béjaia.

### III.2 Préparation des échantillons

Les essais de vieillissement sont réalisés sur des échantillons de câble à isolation en PRC 18/30 kV, fabriqués par la société algérienne ENICAB de Biskra (filiale de General câble), qui est une câblerie de fabrication du câble moyenne et haut tension. Les granulés du polyéthylène reticulable proviennent de la firme autrichienne BOREALIS commercialisée sous l'appellation LE4201R. Les caractéristiques du matériau données dans le tableau (I.1) sont fournies par le fabricant sur la fiche technique donnée en annexe (voir annexe.1).

**Tableau III .1:** Principales propriétés du polyéthylène utilisé pour la fabrication de plaques de PRC

Propriété	Norme	Valeur
Constant diélectrique	IEC60250	2.3
Facteur de pertes (50Hz)	IEC60250	0.0003
Résistivité volumique sous DC	IEC60093	$10^{15}$ Ohm.cm

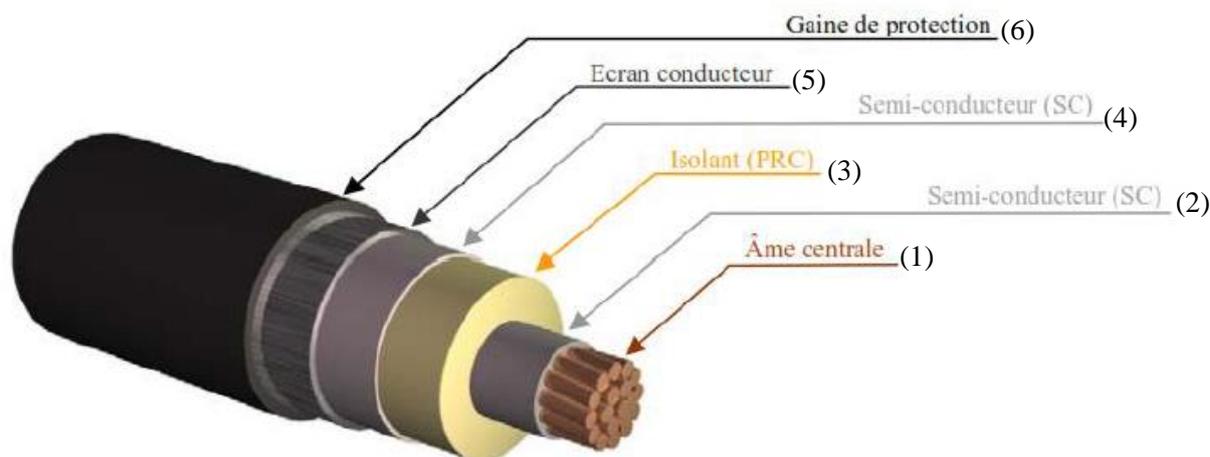
### Chapitre III : Protocol Expérimental

Résistance à la traction (250mm/min) <sup>2</sup>	ISO527	>17 %
Allongement à la rupture (250 mm/min) <sup>2</sup>	ISO527	>450%

Les échantillons de câble de longueur 20 cm, sont découpés d'un long câble monté sur touret, ayant les caractéristiques suivantes :

- Tension nominale  $U_n$  : 30 kV
- Tension spécifiée  $U_0$  : 18 kV
- Section de l'âme : 120mm<sup>2</sup> (en aluminium)
- Epaisseur de l'isolation : 8mm
- Température assignée maximale de l'âme en service normal : 90°C
- Température assignée maximale en régime de court-circuit : 250°C

Avant de les soumettre à la contrainte de tension, les échantillons de câbles sont dénudés de leur gaine de protection externe en PVC (6), de l'écran conducteur externe en cuivre (5) et de l'enveloppe semi-conductrice (4), pour n'en laisser que l'âme conductrice en aluminium (1), l'écran semi-conducteur interne extrudé sur l'âme (2) et l'enveloppe isolante en PRC (3).



**Figure III.1** : Constituants d'un câble à haute tension

Les essais de vieillissement, sous une tension alternative de 30 kV, sont accélérés en imposant un champ électrique divergent suffisamment élevé pour provoquer la perforation de l'isolation d'épaisseur 8 mm en un temps court de l'ordre de quelques dizaines d'heures. Pour ce faire, les essais sont réalisés dans une géométrie d'électrodes pointe – cylindre. L'électrode pointe en acier ou aluminium de rayon de courbure de 35  $\mu$ m est insérée en

## Chapitre III : Protocol Expérimental

surface de l'enveloppe isolante en PRC et portées à la tension 30kV, alors que l'âme conductrice en aluminium est mise à la terre (figure III.2).

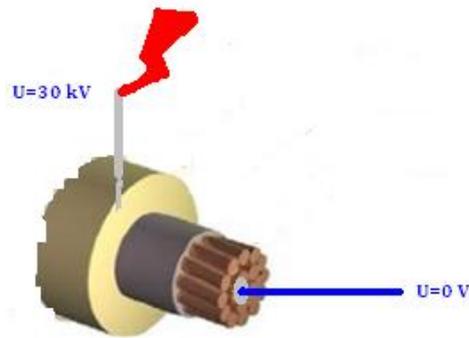


Figure III.2 : Objet d'essais

### III.3 Mesure des rayons de courbures des aiguilles

La mesure des rayons de courbure des électrodes pointe a été réalisée au sein du laboratoire de recherche du Génie Electrique de université de Bejaia, au moyen d'un microscope optique avec caméra incorporée reliée directement à un ordinateur (figure III.3).

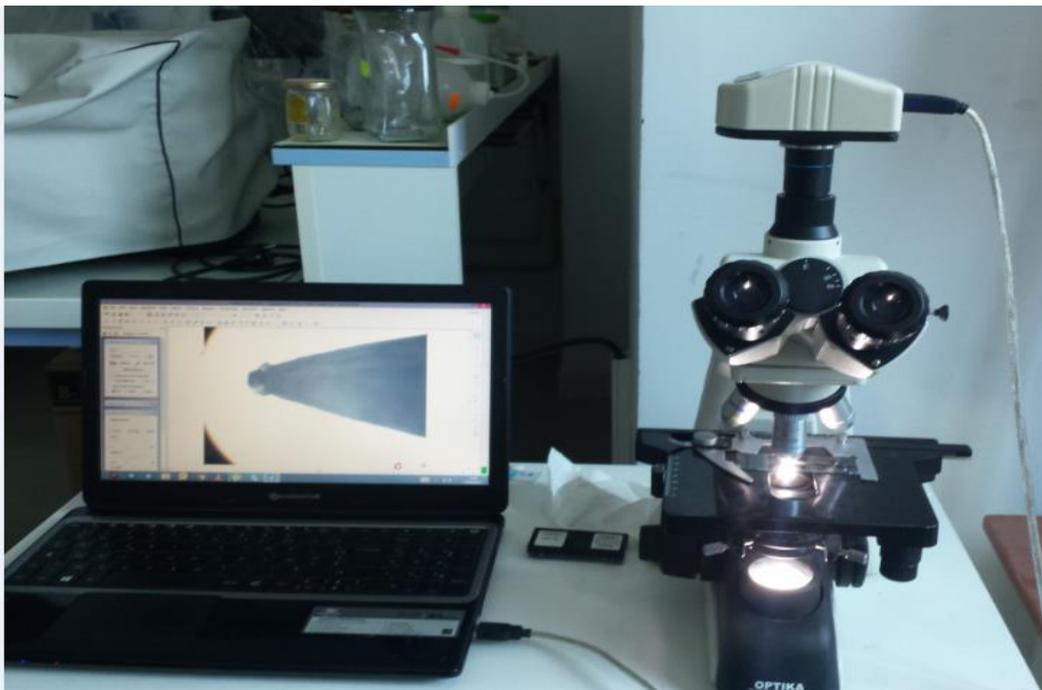
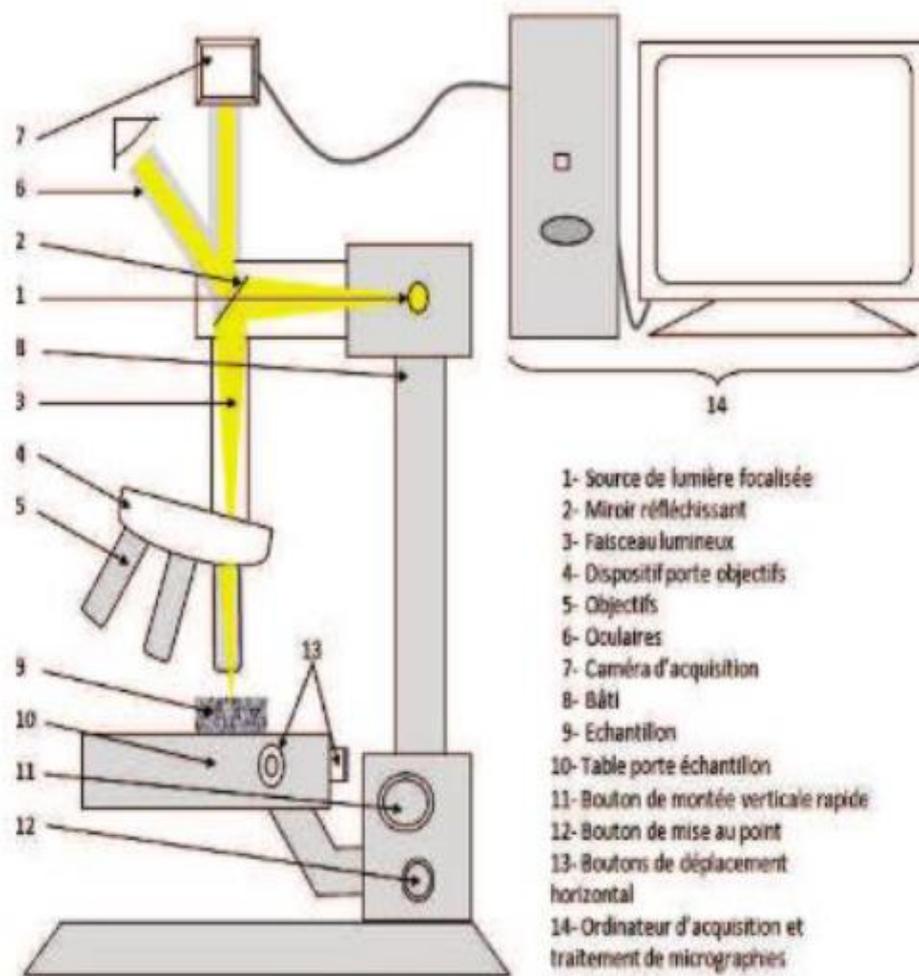


Figure III.3 : Photo du microscope optique utilisé pour la détermination des rayons de courbures.

### Chapitre III : Protocol Expérimental

D'abord, l'aiguille est posée sur la table porte échantillon du microscope optique (9) (figure III.4) pour rechercher une image de la pointe agrandie nette par réglage de l'objectif (5), de la position verticale (11) et horizontale (13) de l'échantillon et la mise au point (12), puis à l'aide de la camera d'acquisition (7) des photos numériques de la pointe sont prises et traitées par l'ordinateur d'acquisition et de traitement de micrographies (14).



**Figure III.4:** schéma de principe du microscope optique

Ensuite le rayon de courbure de la pointe est déterminé à l'aide du logiciel « optika vision pro » en suivant la méthode suivante (figure III.5) :

On trace les tangentes à la pointe (les deux latérales et la frontale), puis à l'aide de la fonction « mesure » on désigne trois points sur la pointe correspondant aux trois points de tangence, et par la fonction « circle from 3 points » le logiciel trace un cercle inscrit dans les trois points

## Chapitre III : Protocol Expérimental

pré-désignés, de rayon égal au rayon de courbure de la pointe de l'aiguille  $R_p$ , dont la valeur est automatiquement affichée sur l'écran de l'ordinateur comme illustré à la figure (III.5).

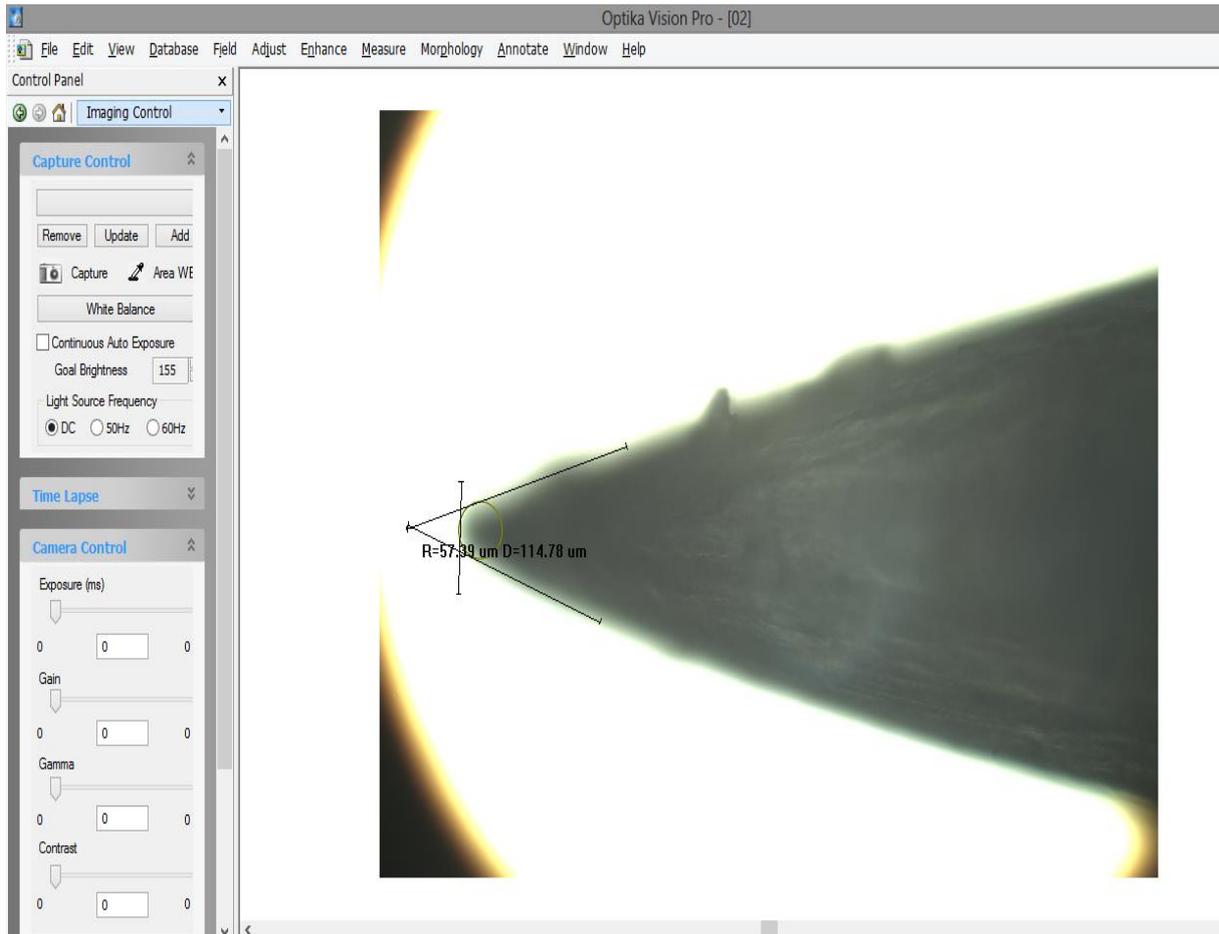


Figure III.5 : Méthode de détermination du rayon de courbure

### III.3 Technique expérimentale

Une fois le système échantillon de câble- électrodes prêt, ce dernier est plongé dans une huile minérale Borak22 pour éviter d'éventuels contournements dans l'air lors des essais de vieillissement électrique. L'objet d'essais est alors soumis à des essais de vieillissement accéléré au laboratoire de haute tension, ce qui consiste à lui appliquer une contrainte de champ électrique alternatif (50hz) constante jusqu'à ce que le claquage advienne. Pour avoir des temps de claquage moyennement courts, un champ électrique suffisamment grand capable de perforer l'épaisseur de 8mm de PRC est appliquée à notre objet d'essai. Une géométrie d'électrode pointe-cylindre est choisie pour cette fin. Cette géométrie d'électrode nous permet d'autre part de générer l'arborescence électrique et de la localiser à la pointe de l'électrode aiguille.

### Chapitre III : Protocol Expérimental

Une tension alternative efficace  $U = 30\text{kV}$  constante est appliquée à l'électrode pointe, l'âme conductrice du câble est mise à la terre. Un chronomètre est déclenché automatiquement à la mise sous tension de l'échantillon de câble et arrêté automatiquement à la perforation de ce dernier. Le temps de vieillissement électrique est ainsi enregistré. Une série de cinq (05) essais est réalisée pour déterminer le temps moyen de claquage  $t_d$ .

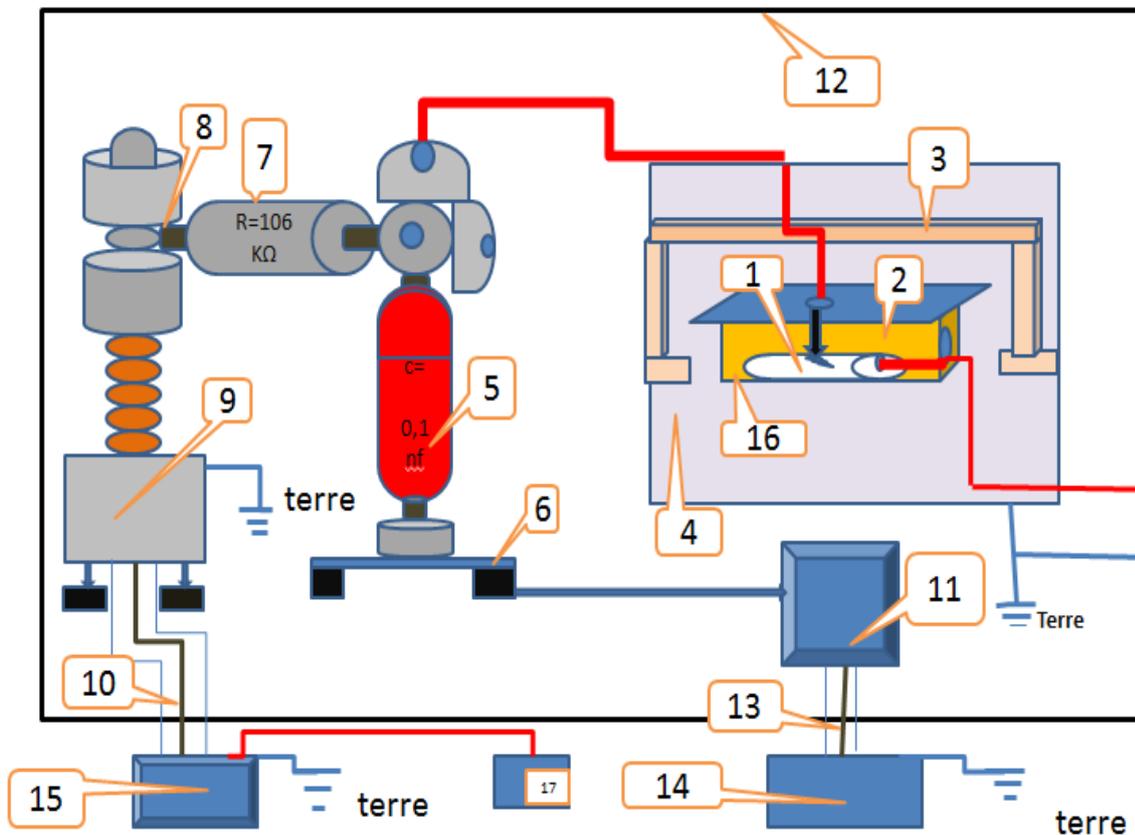
Cinq temps de vieillissement intermédiaires sont alors définis ( $t_0 = 0t_d$  (état vierge),  $t_1 = t_d/5$ ,  $t_2 = 2t_d/5$ ,  $t_3 = 3t_d/5$ ,  $t_4 = 4t_d/5$  et  $t_5 = t_d$  (perforation)). Des essais de vieillissement électrique à  $U = 30\text{ kV}$  et  $R_p = 35\ \mu\text{m}$  sont réalisés jusqu'aux temps intermédiaires  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  et  $t_4$ . Cinq essais sont effectués pour chacun des cas.

Après vieillissement jusqu'aux temps prédéfinis, l'arborescence électrique est localisée, observée et sa longueur  $L$  mesurée au moyen du microscope électronique à balayage MEB. L'évolution du défaut (arborescence) est ainsi décrite par la caractéristique cinétique  $L(t)$ . La caractérisation physico-chimique du matériau PRC est également menée par les mesures électriques des pertes diélectriques  $\text{tg}\delta$ , de la capacité  $C$  du matériau et de sa permittivité  $\epsilon_r$ , ainsi que par les analyses chimiques MEB, FTIR, ATG/DTG/ATD, DSC et DRX.

#### III.4 Dispositifs expérimentaux

La figure (III.6) représente le dispositif expérimental utilisé pour les essais de vieillissement accéléré du matériau PRC et la mesure de la tension et du temps de vieillissement. Ce dispositif est constitué des éléments suivants :

- Un transformateurs HT (T100) 0.8/135kV
- Un appareil de commande automatique et manuelle de tension SG, à vitesse de montée variable
- Un diviseur de tension capacitive ( $C = 0.1\text{ nF}$ )
- Un voltmètre de crête AC/DC de type MU1, à affichage digital permettant la mesure, selon le montage électrique, des hautes tensions alternatives ou contenues
- Une résistance de protection  $R = 106\text{ K}\Omega$  qui joue le rôle d'amortisseur des courants de court-circuit
- Une table servant de support à l'objet d'essai (échantillons de PRC)
- Enfin, l'ensemble dispositif HT et échantillon est entouré par une cage de protection.



**Figure III.6 :** Dispositif expérimental de vieillissement électrique et la mesure de la tension et du temps de vieillissement électrique

1 : Câble en PRC. 2 : huile minérale isolante. 3 : Support en bois. 4 : Table. 5 : Capacité.  
6 : Support d'élément. 7 : Résistance. 8 : Nœuds de liaison. 9 : Transformateur haut Tension. 10 : Grille de protection. 11 : boîte de connexion. 12 : Cage de protection.  
13 : Câble coaxial. 14 : (MU11) Voltmètre de crête. 15 : (SG1BT) Système de commande Manuel et automatique. 16 : cavette d'huile. 17 : dispositif chronométrique.

### Chapitre III : Protocol Expérimental

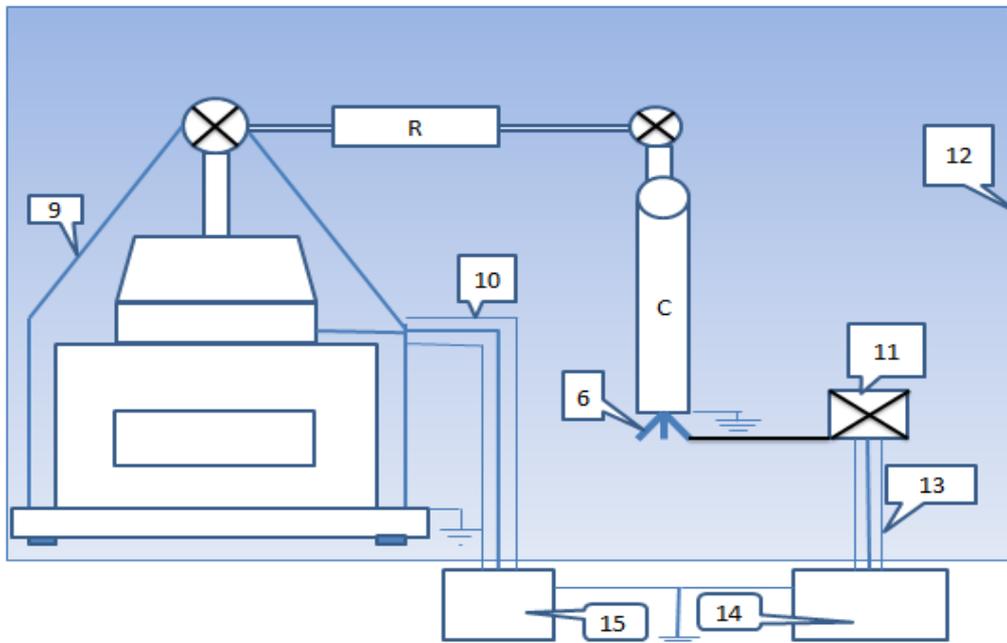


Figure III.7 : Schéma électrique du dispositif

### Représentation des éléments du laboratoire

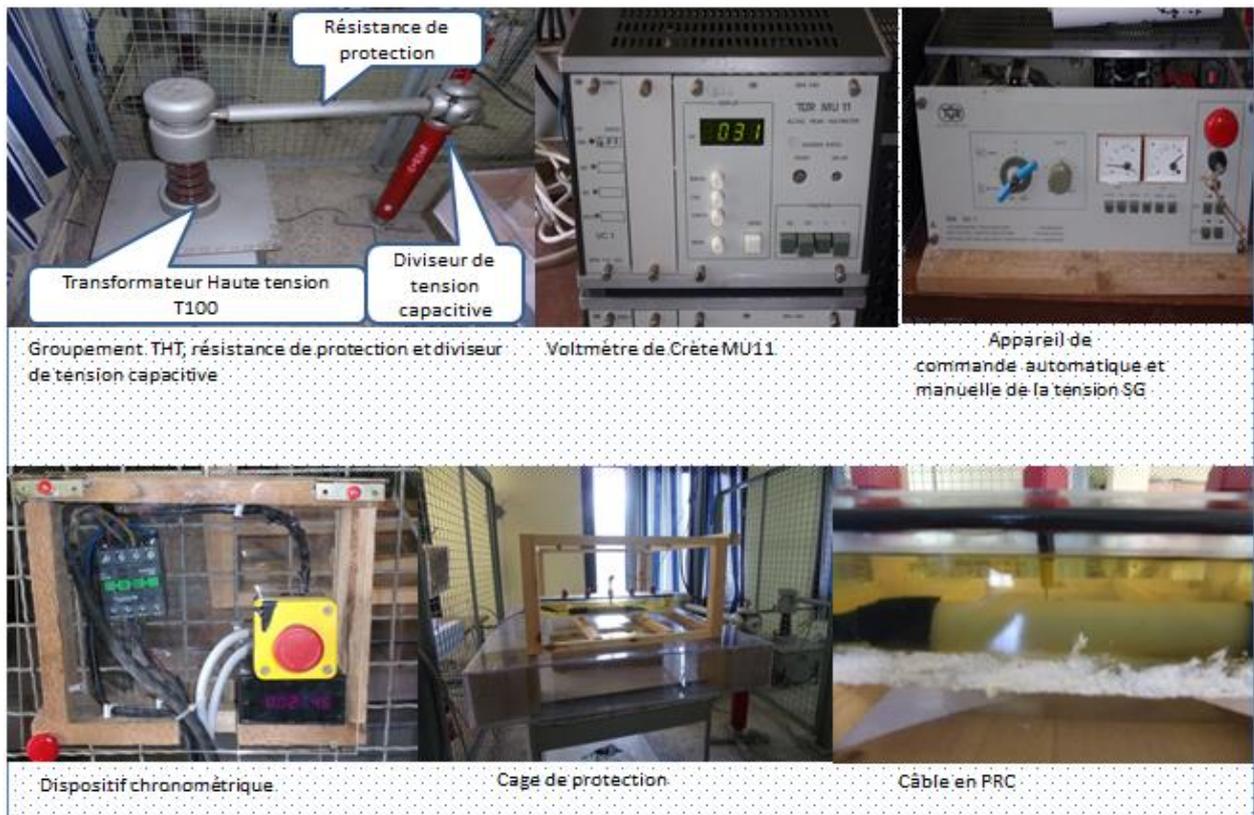
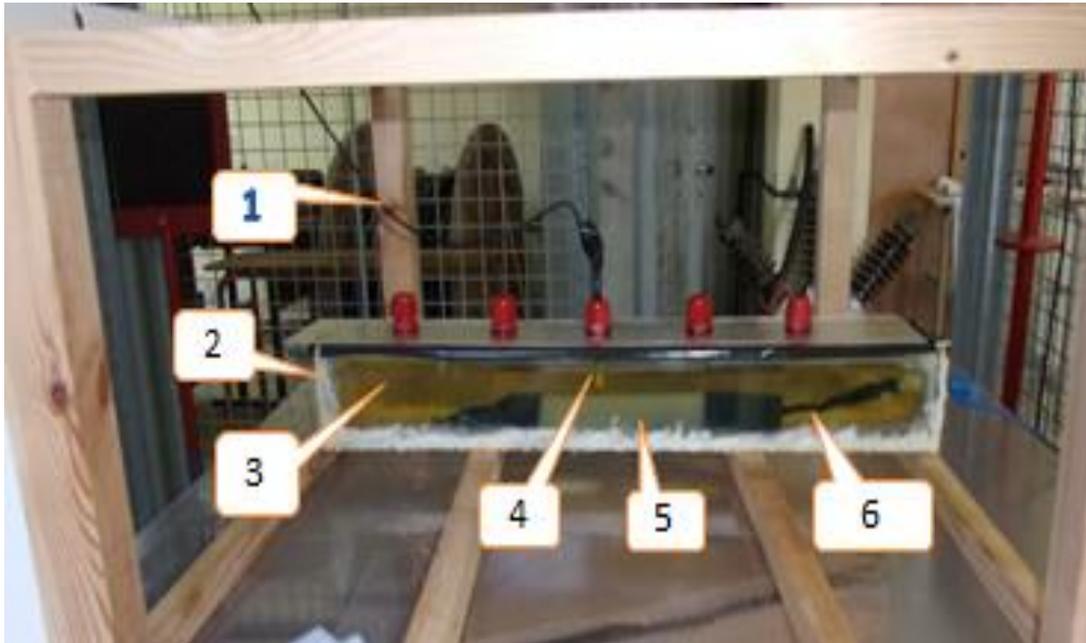


Figure III.8 : Photo des éléments du dispositif d'essais et de mesure de la haute tension du laboratoire HT G.E. Univ. de Bejaia.



**Figure III.9** photographies de l'objet d'essai

Avec :

- 1 : fil d'alimentation en haute tension
- 2 : cellule en verre étanche
- 3 : huile minérale isolante (borak 22)
- 4 : support d'aiguille
- 5 : échantillon de câble
- 6 : fil de mise à la terre

### III .5 Microscopie optique

#### III.5.1 principe de fonctionnement

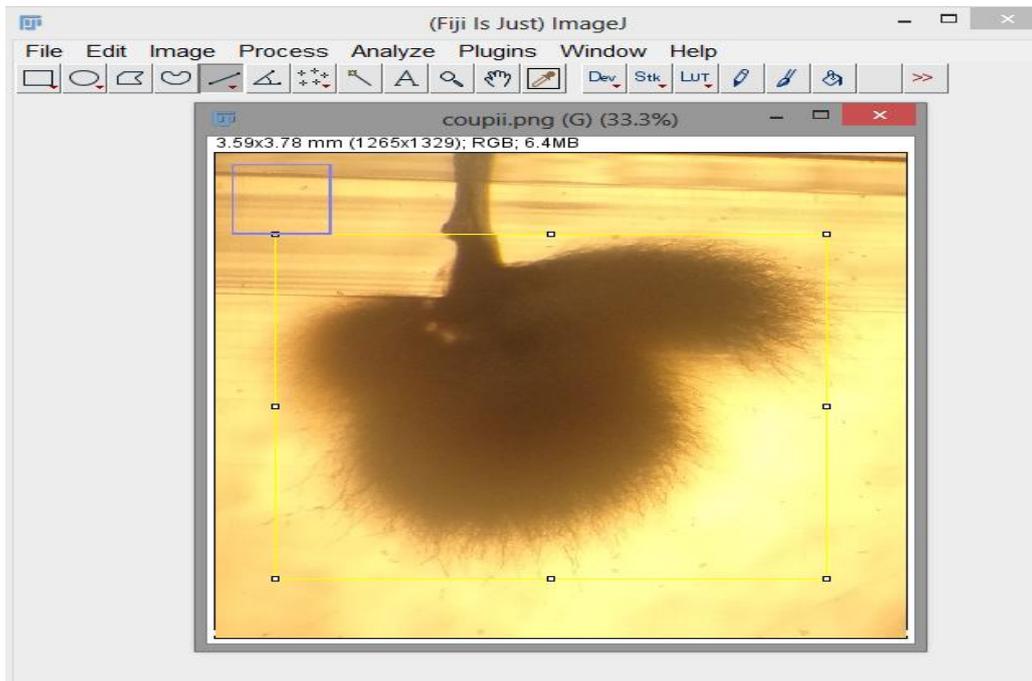
Le principe du microscope optique repose sur la réflexion de la lumière par les matériaux et l'agrandissement des images est effectué par un jeu de lentilles disposées dans les objectifs et les oculaires. Une source lumineuse émet une lumière focalisée grâce à un condenseur et éclaire l'échantillon pour donner une image agrandie grâce à la lentille objectif. Un miroir permet de transformer l'image sur l'oculaire et sur la camera.

#### III.5.2 Mesures des longueurs d'arborescences

Sous l'effet de la contrainte de champ électrique HT, une arborescence est générée à l'extrémité de l'électrode pointe haute tension. Celle-ci évolue durant le vieillissement du

### Chapitre III : Protocol Expérimental

câble pendant le temps  $t$  prédéfini. Après le temps  $t$  de vieillissement électrique, le câble est retiré de la cellule d'essais, et la zone portant l'empreinte de l'arborescence est prélevée de l'isolation du câble pour procéder à la mesure de la longueur du défaut généré (arborescence). Le fragment de matériau ainsi prélevé est coupé dans l'axe de l'arborescence et une fine lamelle translucide portant l'empreinte de l'arborescence est récupérée. Celle-ci est posée délicatement sous la lunette d'un microscope optique muni d'un appareil photo de haute définition pour une prise de photos de l'arborescence avec un agrandissement de 10 fois. A l'aide du logiciel « imagej », les photos de l'arborescence sont traitées après calibrage et les longueurs de cette dernière sont déterminées. Ces mesures ont été effectuées au laboratoire de génie environnement de l'université A. Mira de Béjaia.



**Figure III.10** : principe de mesures des longueurs d'arborescences

#### III.5.3 Analyse microstructurale de surface

Afin de mettre en évidence la microstructure du PRC soumis à un vieillissement électrique, nous avons effectué l'examen des surfaces vieilles. Nous avons utilisé, pour cet effet, un microscope optique de type OPTIKA, équipé de 4 objectifs de grossissements 100, 200, 500, 100 fois. Les échantillons de PRC précédemment découpés sont analysés et l'acquisition des micrographies de surface de l'arborescence est effectuée au moyen d'une caméra solidaire au microscope et reliée à un ordinateur contenant le logiciel d'acquisition

## Chapitre III : Protocol Expérimental

(optika true vision). La microscopie optique a été effectuée au laboratoire de science des matériaux de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.



**Figure III.11** : photographie du microscope optique utilisé

### III.6 analyses chimiques

Afin de voir, à l'échelle microscopique, l'impact du vieillissement électrique sur la morphologie et la structure moléculaire du matériau PRC, différentes analyses chimiques sont réalisées, à savoir : l'analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), l'analyse par la diffraction des rayons X (DRX), les analyses ATG/DTG.

Pour cette fin, des éprouvettes de dimensions bien définies sont découpées des zones de l'échantillon vieilli.

#### III.6.1 la diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique de caractérisation des matériaux cristallisés, qu'ils soient massif, sous forme de poudre ou de dépôts. Son principe de fonctionnement est résumé comme suit : les faisceaux de rayons X produits par le tube sont envoyés sur l'échantillon dans lequel ils sont déviés par les atomes. Ces faisceaux diffractés interfèrent entre eux, et conduisent à la production d'un signal intense dans certaines zones précises de l'espace. C'est ce signal qui est collecté par le détecteur, et tracé sous forme d'une courbe (diffractogramme) qui présente des pics à des angles bien spécifiques de diffraction.

### Chapitre III : Protocol Expérimental

La position de ces pics est une véritable signature de l'arrangement des atomes à l'intérieur d'un cristal. La relation empirique qui relie les angles auxquels sont observés les pics et les distances entre plans atomiques est la loi de Bragg.

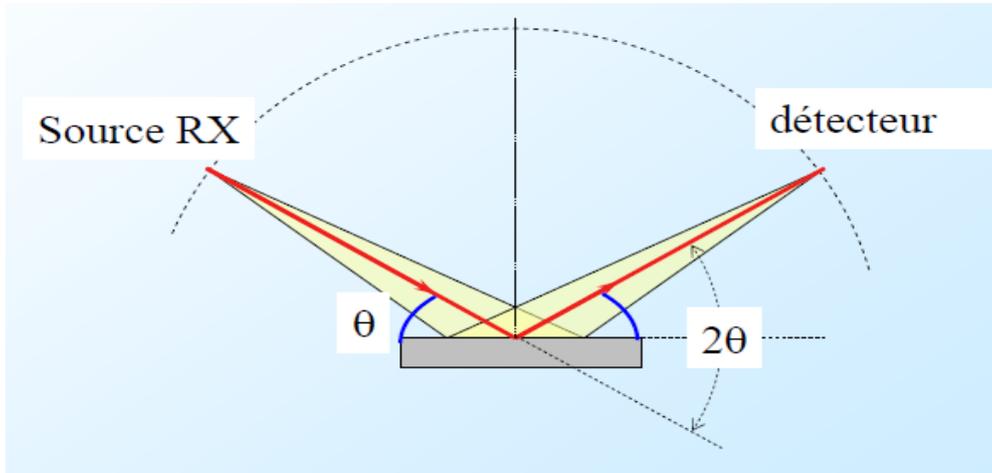


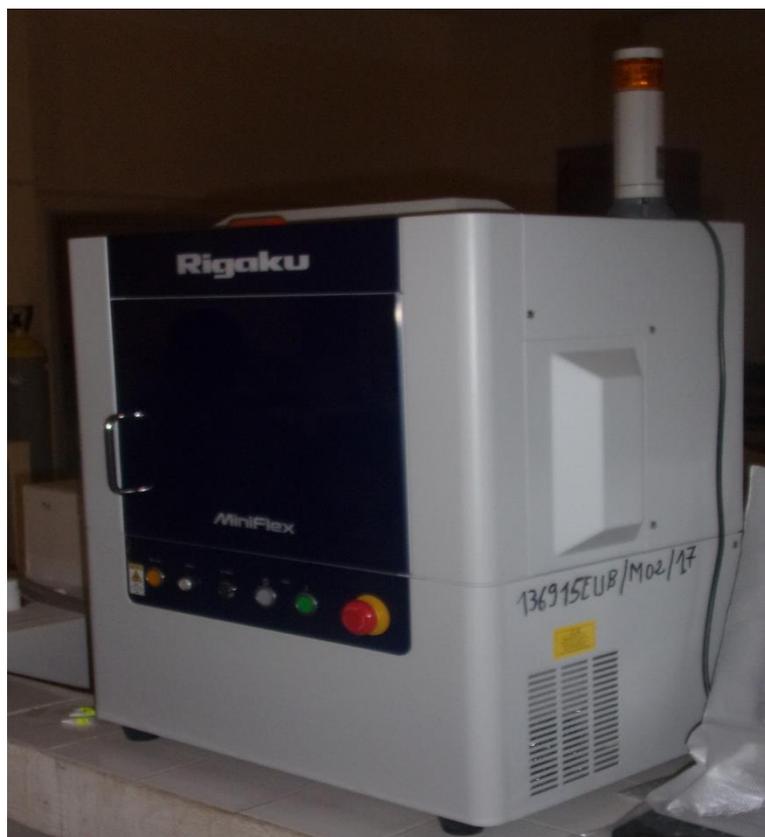
Figure III.12 : Schéma de principe du diffractomètre de rayons X

$$2d_{nkl} \sin \theta = n\lambda \quad (\text{III .1})$$

Avec :

- $d$  : Distance inter réticulaire, c'est-à-dire distance séparant deux plans consécutifs.
- $\theta$  : Angle de diffraction des rayons X sur la surface du matériau étudié.
- $n$  : Ordre de la réflexion.
- $\lambda$  : Longueur d'onde du faisceau de rayons X.

Nos essais ont été réalisés au laboratoire de Génie des Procédés de l'université A. MIRA de Bejaia où un diffractomètre de table « RIGAKU MINIFLEX 600 XRAY » est utilisé pour réaliser cette analyse. Des échantillons de dimension  $(20*20*2) \text{ mm}^3$ , délicatement découpés des zones dégradés (arborescence) de l'isolation du câble, à différents niveaux de vieillissement, sont alors soumis aux rayons X, après un bon polissage de leur surface.



**Figure III.13** : appareil utilisé pour l'analyse DRX

### III.6.2 analyse FTIR

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier IRTF (ou FTIR : Fourier transformed infrared spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau. Leur principe est basé sur la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux qui est voisine de l'énergie de vibration de la molécule. Cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité réfléchie ou transmise. Le domaine infrarouge entre  $4000\text{ cm}^{-1}$  et  $400\text{ cm}^{-1}$  ( $2.5 - 25\text{ }\mu\text{m}$ ) correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules. Toutes les vibrations ne donnent pas lieu à une absorption, cela va dépendre aussi de la géométrie de la molécule et en particulier de sa symétrie. Pour une géométrie donnée, on peut déterminer les modes de vibration actifs en infrarouge grâce à la théorie des groupes.

La position de ces bandes d'absorption va dépendre en particulier de la différence d'électronégativité des atomes et de leur masse. Par conséquent à un matériau de composition

### Chapitre III : Protocol Expérimental

chimique et de structure donnée va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier le matériau.

Cette analyses s'effectue à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier qui envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'onde auxquelles le matériau absorbe et les intensités de l'absorption.

Les analyses infrarouge sont réalisées au laboratoire de Génie des Procédés de l'université A. MIRA de Bejaia, où six échantillons en forme de petites pastilles translucides, précédemment découpés de l'isolation du câble (zone d'arborescence), à différents niveaux de vieillissement, sont analysés.



**Figure III.14 :** appareil d'analyse FTIR utilisé

#### III.6.3 Analyses thermogravimétrique (ATG/ATD)

L'ATG est une technique d'analyse qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon, et la DTG (dérivée de l'ATG) donne la vitesse de la perte de masse par rapport à un état de référence, en fonction de la variation de la température.

L'appareil utilisé se compose essentiellement d'une enceinte étanche permettant de contrôler l'atmosphère de l'échantillon, d'un four permettant de gérer la température, d'un module de pesée (microbalance), d'un thermocouple pour mesurer la température et d'un ordinateur permettant de contrôler l'ensemble et d'enregistrer les données.

Nos analyses ont été effectuées sur des échantillons de PRC (vierge, vieilli à 6, 18 et 30 heures) avec un appareil de type « LINSEIS STA-PT1600 ». Dans le cas des échantillons

## Chapitre III : Protocol Expérimental

vieillis, des pastilles translucides de dimensions ( $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ ) sont prélevées de la zone dégradée portant l’empreinte de l’arborescence.

Ces analyses thermiques sont réalisées sous atmosphère contrôlée inerte et dans une gamme de température allant de 0 à 700 °C programmée à 90 °C/mn.



Figure III.15 : Appareil d’analyse ATG utilisé

### III.8 Mesures électriques

#### III.8.1 Mesures des pertes diélectriques et de la capacité

La capacité  $C_x$  et le facteur de pertes  $tg\delta$  sont déterminés à l’état vierge et vieilli du câble en PRC.

Pour ce faire, nous avons adopté la méthode du pont de Schering à transformateur différentiel, et  $C_x$  et  $tg\delta$  sont alors mesurés sous une tension électrique appliquée ( $V = 100 \text{ V}$ ) à la fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$ .

La permittivité électrique  $\epsilon_r$  est calculée moyennant les équations (II.19) et (II.20) exposée au (§ II.7.2.4) et par là, l’indice de pertes défini par  $\epsilon_r \cdot tg\delta$  est déterminé.

## Chapitre III : Protocol Expérimental

### III.8.2 Mesures de la rigidité diélectrique longitudinale et transversale

Avant de soumettre l'échantillon de câble à la contrainte de tension, celui-ci est dénudé de sa gaine de protection externe en PVC (6), et de l'enveloppe semi-conductrice (4), pour n'en laisser que l'âme conductrice en aluminium (1), l'écran semi-conducteur interne extrudé sur l'âme (2), l'enveloppe isolante en PRC (3) et l'écran conducteur externe en cuivre (5), voir figure (III.15).

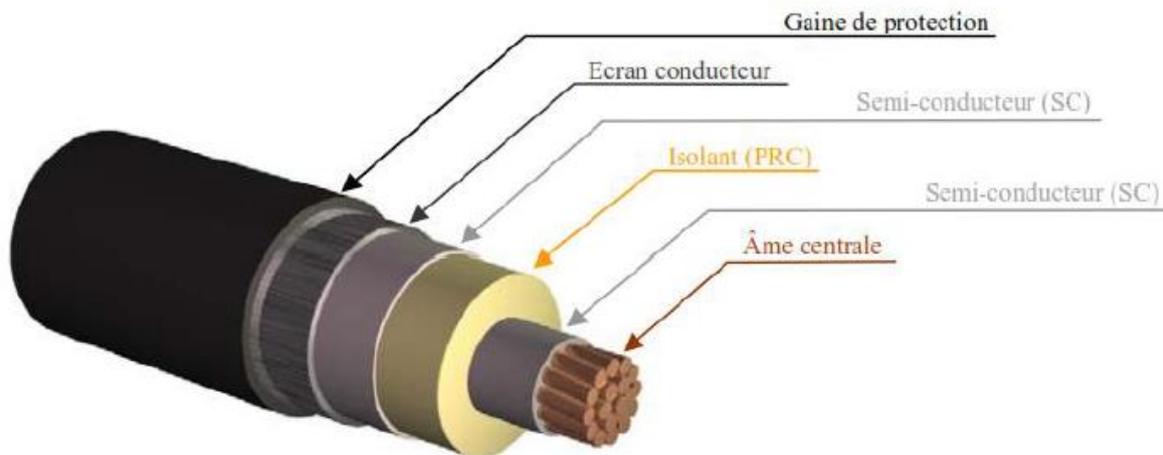


Figure III.16 : Constituants d'un câble à haute tension

#### III.8.2.1 Mesure de la rigidité diélectrique transversale

La rigidité diélectrique transversale  $E_t$  du PRC vierge et vieilli est déterminée par la méthode de la montée rapide de la tension jusqu'à perforation de l'isolant.

En appliquant une tension croissante  $V$  entre l'âme conductrice du câble (1) et l'écran conducteur (5), nous mesurons la tension de perforation  $V_d$  de l'épaisseur de l'isolation ( $d=8$  mm), dans le cas de l'état vierge et des états vieillis du matériau. La rigidité diélectrique transversale est alors déterminée par la relation (II.2) exposée au (§ II.7.2.1.2).

#### III.8.2.2 Mesure de la rigidité diélectrique longitudinale

Avant de soumettre l'échantillon de câble à la contrainte de tension, celui-ci est encore dénudé de son écran conducteur externe en cuivre (5) pour n'en laisser que l'âme conductrice en aluminium (1), l'écran semi-conducteur interne extrudé sur l'âme (2) et l'enveloppe isolante en PRC (3), voir figure (III.15).

Nous avons, alors, mesuré la tension disruptive  $V_d$ , appliquée à la surface de l'isolation du câble en PRC, pour différentes distances inter électrodes " $d$ " égale à 1, 2 et 3 cm, dans le cas de l'état vierge et des états vieillis du matériau.

## **Chapitre III : Protocol Expérimental**

La rigidité diélectrique longitudinale  $E_l$  du PRC vierge est déterminée par la pente de la caractéristique  $V(d)$  établie selon la loi donnée par l'équation (II.1) exposée au (§ II.7.2.1.1).

### **III .9 Conclusion**

En vue de réaliser le vieillissement électrique d'un câble en PRC, un protocole expérimental a été conçu et réalisé. Plusieurs essais ont été effectués afin de suivre l'évolution de l'arborescence électrique dans le temps. Cette étude a été complétée par une série d'analyses et de mesures physico-chimiques pour voir le comportement physique, chimique et thermiques avant et après vieillissement du matériau, dont les résultats seront présentés dans le chapitre IV.

# **Chapitre IV :**

## **Résultats et**

### **discussions**

### IV.1 Introduction

Dans cette partie, seront présentés les résultats des essais accélérés de dégradation électriques du câble en PRC 18/30 kV l'EPDM, où une arborescence électrique est initiée à l'extrémité de l'électrode pointe mise sous haute tension, faisant face à l'âme conductrice cylindrique du câble, mise à la terre. La propagation de l'arborescence est suivie dans le temps, par la mesure de sa longueur, le facteur de pertes diélectriques et la capacité du matériau. L'évolution de l'arborescence et des grandeurs électriques mesurées sous l'effet de la contrainte de champ électrique appliquée correspondant au palier constant de tension ( $U=30$  kV), au rayon de courbure de l'électrode active pointe ( $r=35$   $\mu\text{m}$ ) et à la distance inter électrode ( $d=8$  mm) égale à l'épaisseur de l'isolation en PRC du câble, seront présentées.

### IV.2 Résultats du vieillissement électrique - Microscopie optique

Le câble à isolation en PRC 18/30 kV de 8 mm d'épaisseur est soumis à un vieillissement électrique accéléré, sous une contrainte de tension alternative (50 Hz)  $U=30$  kV, dans une géométrie d'électrodes Pointe-Cylindre. La pointe, de rayon de courbure  $r=0,035$  mm, est insérée à fleur dans l'épaisseur  $d=8$  mm de l'isolation. Cette électrode, portée à une haute tension de 30 kV, permet d'intensifier le champ et de localiser la génération de l'arborescence.

Pour les mêmes conditions d'essais ( $U$ ,  $r$  et  $d$ ), une série de 03 essais de vieillissement électrique du câble en PRC a été réalisée. On a obtenu des temps de perforation de l'isolation en PRC qui convergent vers une valeur moyenne (Voir annexe IV.1)

Le temps moyen ayant conduit à la perforation de l'isolation est égal à :

$$td=31\text{h } 33 \text{ mn.}$$

Sur la base de ce temps de claquage moyen de l'épaisseur d'isolation de 8mm, quatre (04) temps intermédiaires de vieillissement électrique de cette isolation sont alors prédéfinis :

Les temps intermédiaires de vieillissement  $t_i$  sont définis par:

$$t_i = \frac{td_{moy}}{5}$$

## Chapitre IV résultats et discussions

Donc les temps intermédiaires de vieillissement varient de instants zéro heure, correspondant à l'état vierge du câble, jusqu'au claquage avec un pas de 6h et 18mn.

Pour les mêmes conditions d'essais que précédemment, une série de trois (03) essais par temps intermédiaires  $t_i$  a été réalisée pour suivre l'évolution de l'arborescence électrique dans le temps.

Après chaque temps de vieillissement  $t_i$ , des observations au microscope optique sur de minces lamelles de PRC découpés à l'endroit de la dégradation (arborescence), ont permis de mesurer la longueur  $l$  des arborescences et de déterminer leurs formes. Pour une meilleure prise de photos de l'arborescence, un facteur d'agrandissement allant de 10 à 100 est utilisé. Les longueurs sont tolérées à  $\pm 0,1 \cdot 10^{-5}$ m. La longueur de l'arborescence est mesurée selon la technique présentée en §III.5.2. Le tableau (IV.1) résume les résultats de ces essais.

**Tableau IV.1 :** Evolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement

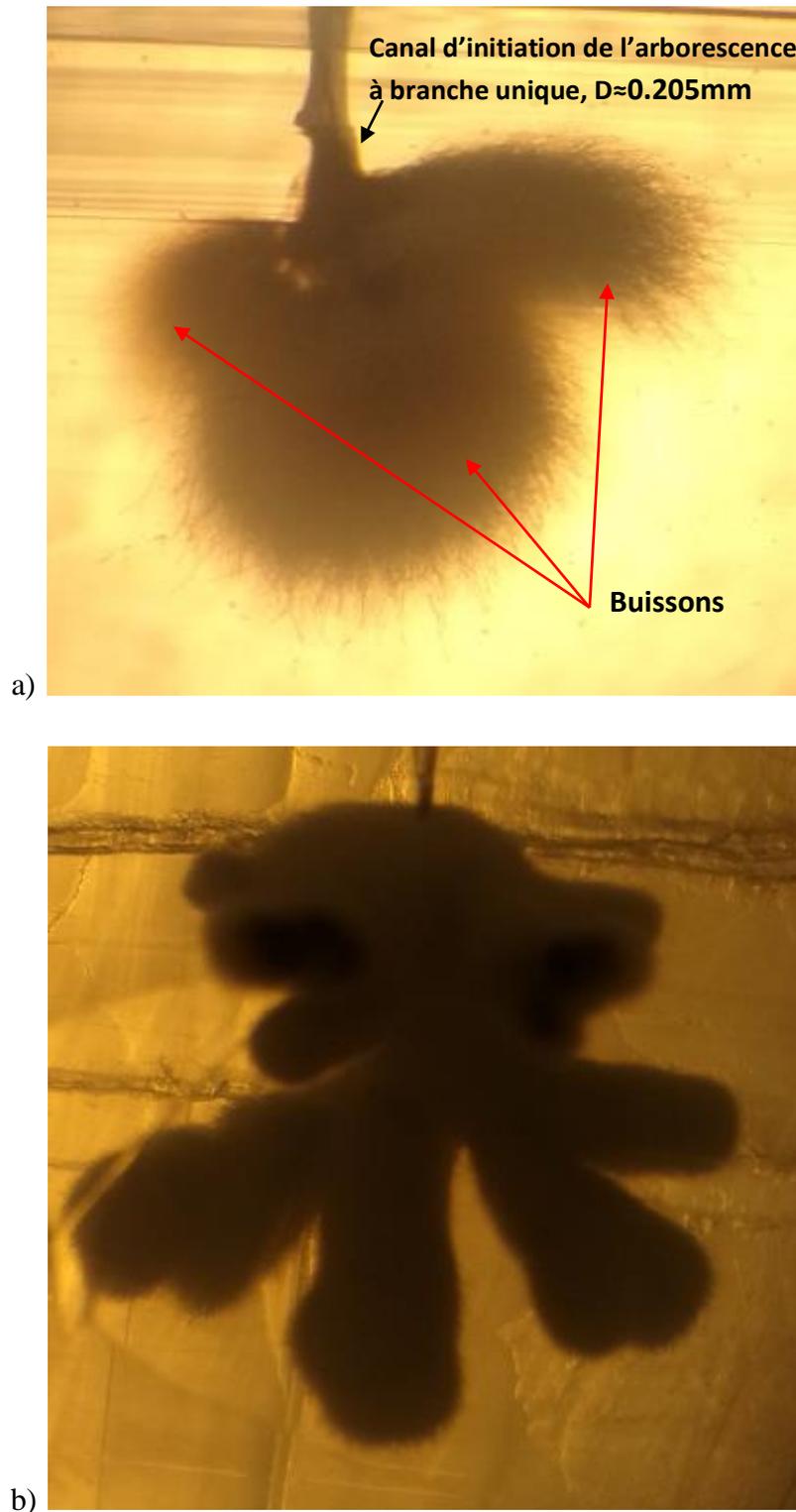
Temps de vieillissement	Tension U (kV)	Rayon de courbure ( $\mu\text{m}$ )	Nombre d'essais	Longueur d'arborescence (mm)
$t_0=0$	0	/	/	0
$t_1=6\text{h } 18\text{mn}$	30	35	3	2.02
$t_2=12\text{ h } 38\text{mn}$	30	35	3	2.97
$t_3=18\text{h } 56\text{mn}$	30	35	3	4.54
$t_4=25\text{h } 14\text{ mn}$	30	35	3	5.95
$t_5=t_d=31\text{h } 32\text{mn}$	30	35	3	8

L'observation au microscope optique des lamelles de PRC dégradées a révélé la forme distincte de l'arborescence, initiée à l'extrémité de l'électrode pointe, qui est en buissons multiples (figure IV.1 b et b), pour les conditions d'essais : niveau de tension appliqué U, distance inter électrodes d, rayon de courbure de l'électrode pointe r et temps de vieillissement électrique t des échantillons, dument citées.

L'arborescence se propage de l'aiguille vers l'électrode opposée reliée à la masse, suivant la direction du champ électrique, donc dans le plan de la direction de la contrainte de pression électrostatique qui représente l'ultime faiblesse mécanique provoquant l'augmentation

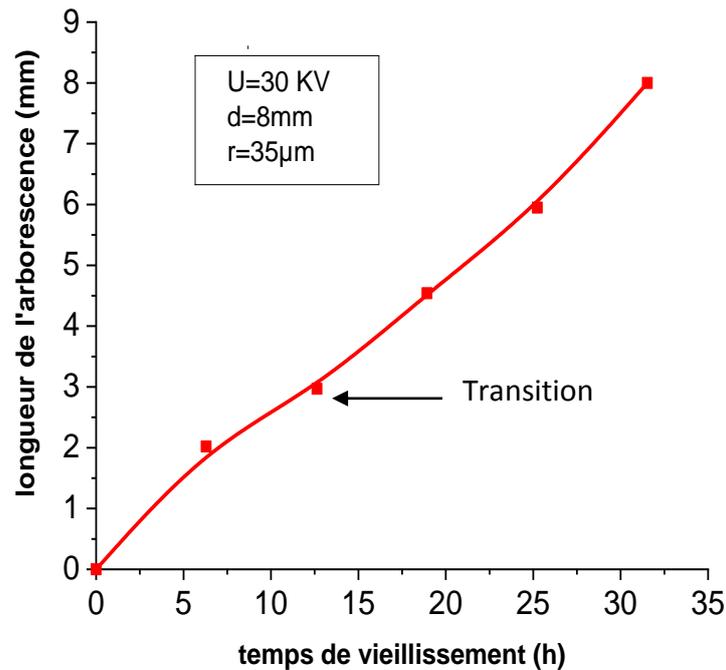
## Chapitre IV résultats et discussions

de la vitesse de propagation des canaux d'arborescence. La figure (IV.2) illustre la cinétique de propagation de l'arborescence sous ces conditions.



**Figure IV.1 :** Forme buissons multiples de l'arborescence observée (x10)

pour :  $U = 30 \text{ kV}$ ,  $d = 8 \text{ mm}$ ,  $r = 35 \text{ }\mu\text{m}$   
a) : à  $t = 6 \text{ h}$ , b) : à  $t = 25 \text{ h}$



**Figure IV.2 :** Cinétique de propagation de l'arborescence électrique  $l(t)$  dans l'isolation de PRC en fonction du temps de vieillissement électrique, pour  $U=30$  kV,  $d=8$  mm et  $r=35$   $\mu$ m

L'arborescence évolue en trois étapes: l'initiation, la propagation et le claquage. Pour la géométrie d'électrodes choisie ( $d$  et  $r$  fixés), son initiation a lieu à des temps de vieillissement  $t$  courts ( $t \sim$  secondes). Elle devient visible après quelques minutes et provoque le claquage du matériau après quelques heures.

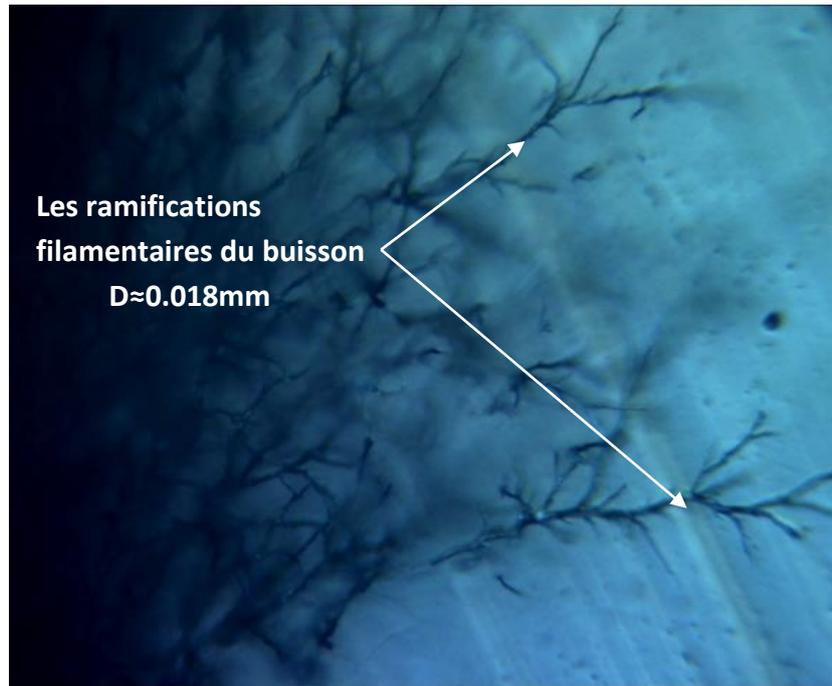
Ces observations ont également montré que l'initiation de l'arborescence est caractérisée par la formation d'une arborescence à branche unique (figure IV.1.a) de diamètre  $D$  d'environ 0.205mm.

Le claquage est provoqué par la remontée d'un filament de l'électrode reliée à la terre vers l'électrode haute tension appelé "canal de retour" (figure IV.3). Le filament prend naissance à partir d'un micro-canal pontant l'isolation, puis se propage indépendamment du canal qui lui a donné naissance. La perforation a lieu lorsque, sous l'action des décharges partielles qui s'allument entre l'électrode mise à la terre et l'extrémité du canal de retour, le diamètre du filament aura grossi et son extrémité aura progressé jusqu'à interagir avec les canaux proches de l'électrode haute tension. Le diamètre du canal principal de claquage est de l'ordre de quelques 0.265 mm (figure IV.3).



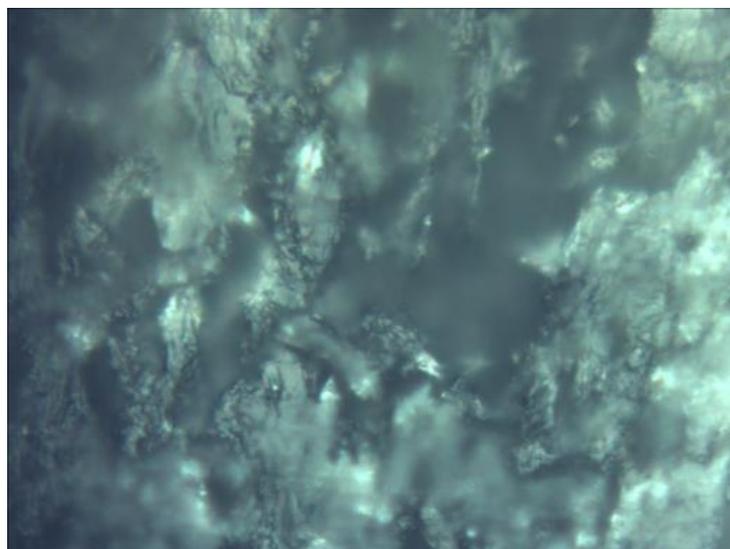
**Figure IV.3 :** Photo de l'arborescence montrant le canal de retour (x10)

Le diamètre des canaux dépend fortement de la valeur du champ électrique sur le front de l'arborescence (report du potentiel électrique de l'électrode pointe haute tension). Plus la contrainte de champ est intense avec l'avancement de l'arborescence (car "d" diminue), plus les canaux sont étroits ( $D \approx 0.018 \text{ mm}$ , voir figure IV.4) et l'arborescence est moins touffue. Ainsi, l'arborescence se conforme d'un buisson touffu, à un buissons multiples moins touffus, à un filament, et celle-ci acquiert, de plus en plus, une grande facilité à pénétrer l'isolation, donc une vitesse de propagation plus grande. Ceci explique l'allure de la caractéristique  $I(t)$  qui croit sur deux phases distinctes, liées par un coude d'inflexion de pentes, marquant la transition de la forme buisson touffu à la forme buissons multiples fins, à branche, traduite par la pente plus raide de la caractéristique  $I(t)$  à la fin du parcours de l'arborescence (figure IV.2).



**Figure IV.4 :** Photo montrant les ramifications filamenteuses de l'arborescence buisson (x500)

La surface interne des canaux d'arborescences est de couleur noirâtre et présente un aspect spongieux (figure IV.5). La faible résistivité des parois des filaments induit le report du potentiel de la pointe HT à l'extrémité du canal d'arborescence, ceci contribue à créer un champ suffisamment élevé à la pointe du canal qui causera le claquage intrinsèque de l'isolant et fera progresser le canal. Aussi, sous l'effet des décharges partielles initiées à l'intérieur des canaux d'arborescences, des micros canaux naissent ce qui fait progresser l'arborescence (figure IV.4).



**Figure IV.5:** Photo de la surface interne de l'arborescence (x1000)

### IV.3 Caractérisation physico-chimique

Dans cette partie, nous présentons les résultats relatifs aux mesures électriques (rigidité, facteur de perte, capacité, permittivité, résistance et résistivité), aux analyses chimiques (FTIR, DRX et ATG/ATD) effectuées sur le câble en PRC vierge et vieilli, en vue d'une caractérisation physico chimique de ce système, comme nous tenterons de corrélérer ces résultats avec l'évolution de l'arborescence.

#### IV.3.1 résultats des analyses chimiques

##### IV.3.1.1 Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

En vue d'identifier les changements structuraux éventuels pouvant apparaître à l'échelle moléculaire suite au vieillissement du câble 18/30 kV en PRC, nous avons procédé à l'analyse de ce dernier à l'état vierge et vieilli par spectroscopie FTIR. Cette analyse a permis de déterminer les spectres de variation d'absorbance  $A$  (unité arbitraire de la quantité de lumière réfléchiée par le matériau) en fonction de la fréquence de bombardement des matériaux par le rayonnement infrarouge, soit du nombre d'onde  $\nu$  ( $cm^{-1}$ ).

L'absorbance  $A$  met en évidence les types de liaisons existants dans le matériau, caractérisés par un ou plusieurs pics apparaissant sur une plage de fréquence (nombre d'onde  $\nu$  ( $cm^{-1}$ )) bien définie.

La figure (IV.6) illustre la variation de l'absorbance  $A$  en fonction du nombre d'onde  $\nu$  ( $cm^{-1}$ ) s'étalant sur une plage allant de 500 à 4000  $cm^{-1}$ , pour les différents échantillons analysés de PRC (vierge et vieillis à 6, 16, 18, 25 et 30 heures).

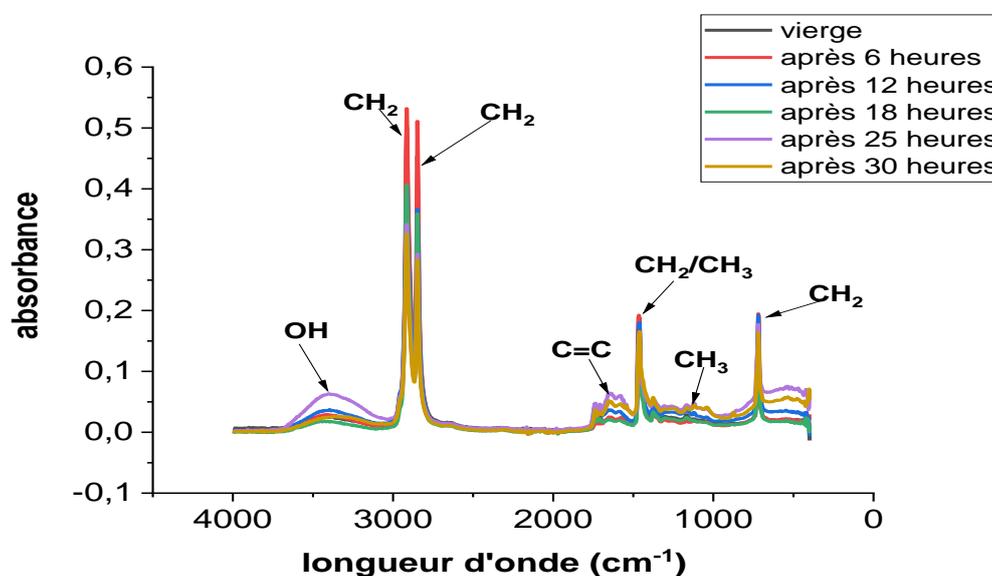


Figure IV.6.a : spectres infrarouge des différents états d'évolution de l'arborescence

## Chapitre IV résultats et discussions

Le spectre FTIR présente la même allure pour l'ensemble des échantillons analysés (vierge, vieillis durant 6, 12, 18, 25 et 30 heures), indiquant l'apparition des mêmes bandes d'absorption avec la même évolution des spectres chimique en présence.

En se basant sur la littérature, les principales bandes détectées caractéristiques des différents groupements chimiques et leurs longueurs d'onde correspondant sont les suivantes :

- la bande qui se manifeste à la longueur d'onde  $720\text{ cm}^{-1}$  correspond au balancement (rocking) des groupes méthylènes ( $-\text{CH}_2$ ) ; cette bande est confirmée par des bandes à  $715\text{ cm}^{-1}$ ,  $2840\text{ cm}^{-1}$ ,  $2913\text{ cm}^{-1}$ , correspondant aux vibrations de valence, aux vibrations symétriques et ou vibration asymétriques du groupe ( $\text{CH}_2$ ).
- Le groupe ( $\text{C-H}_3$ ) est caractérisé par des bandes d'absorption à  $1375\text{ cm}^{-1}$  (vibration de déformation symétrique) et de  $1466\text{ cm}^{-1}$  (vibration de valence symétrique).
- La région entre  $3290\text{ cm}^{-1}$  et  $3550\text{ cm}^{-1}$  présente une zone d'absorption de la fonction ( $-\text{OH}$ ) des groupes hydroxyles.

Après 30 heures de vieillissement électrique, les changements enregistrés sont les suivants :

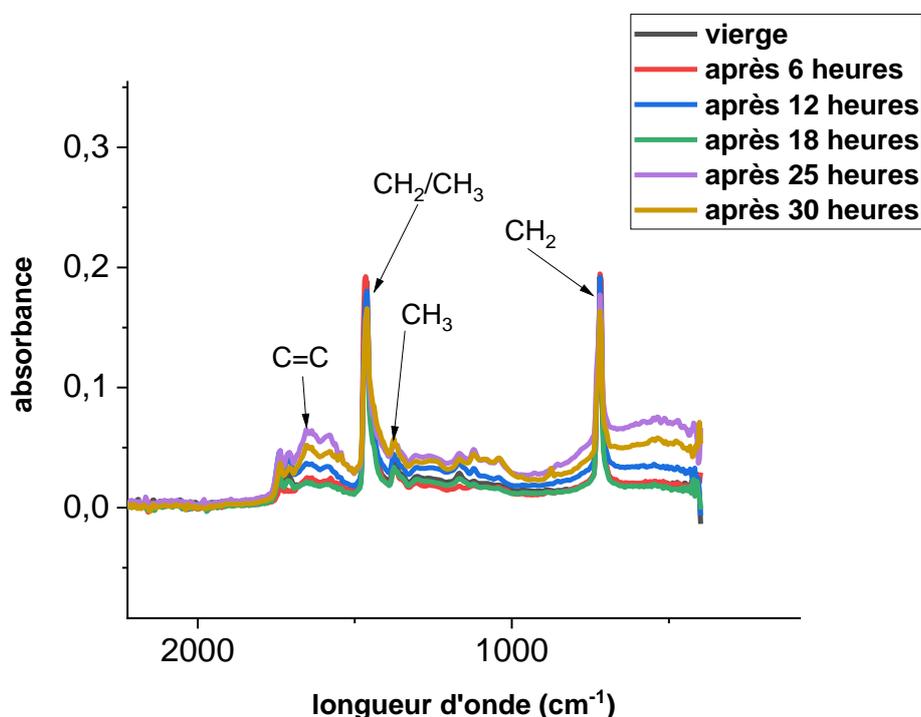
- Apparition d'une bande d'absorption à  $3550\text{ cm}^{-1}$  qui correspond à l'absorption de la phase amorphe de PRC.
- Augmentation de l'absorption dans la région  $1600\text{ cm}^{-1}$  à  $1660\text{ cm}^{-1}$  est attribuée aux groupes insaturés  $\text{C}=\text{C}$  des alcènes.
- Diminution de l'intensité des bandes ( $3000\text{ cm}^{-1}$  à  $2970\text{ cm}^{-1}$ ) caractérisant le balancement des groupes méthylènes ( $-\text{CH}_2$ ). Ce résultat indique que le champ électrique réduit les forces de cohésion entre les chaînes et conduit à l'augmentation de la mobilité de la chaîne.

Les bandes d'absorption caractéristique du PRC sont regroupées dans le tableau (IV.2)

## Chapitre IV résultats et discussions

**Tableau IV.2 :** Bandes d'absorption caractéristique du PRC

Bande d'absorption ( $\text{cm}^{-1}$ )	Attribution
715, 2840, 2913	vibrations de valence de groupe $\text{CH}_2$
1375	Vibration de déformation symétrique de $(\text{CH}_2)$
1466	vibration de valence symétrique de $(\text{CH}_3)$
1600 à 1660	Vibration de valence l'axe de la liaison $(\text{C}=\text{C})$
3550	l'absorption de la phase amorphe de PRC
3000 à 2970	balancement des groupes méthylènes $(-\text{CH}_2)$
3290 à 3550	Absorption de la fonction $(\text{OH})$

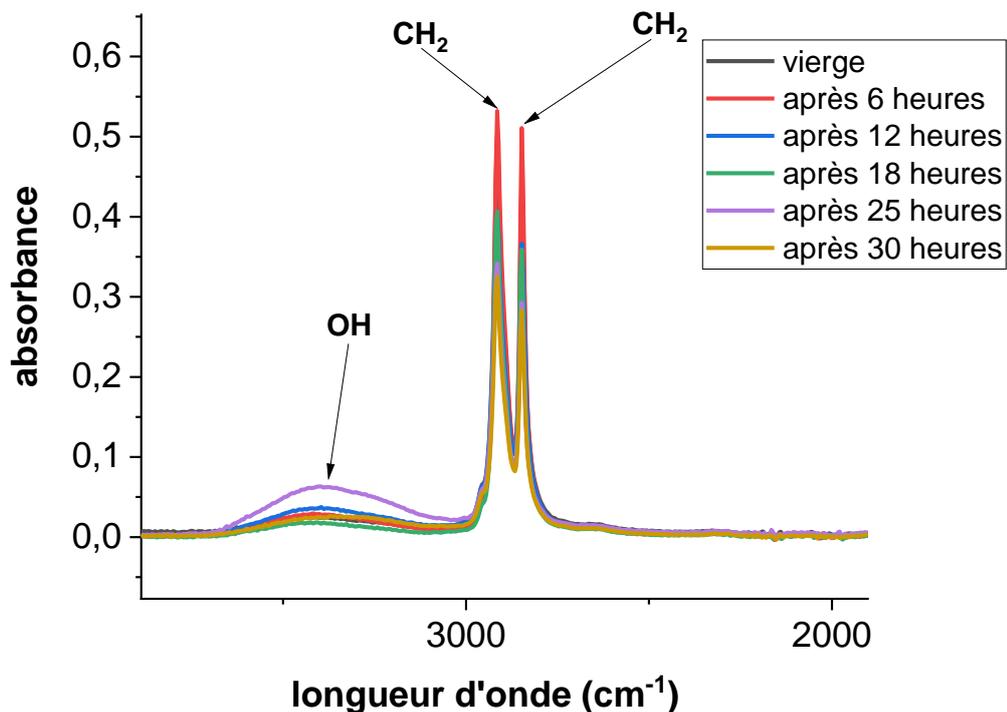


**Figure IV.6.b :** spectres infrarouge des différents états d'évolution de l'arborescence (500 à 2000  $\text{cm}^{-1}$ )

Dans le cas du PRC vieilli durant 6, 12, 18, 25 et 30 heures, le matériau est d'abord sujet à des déformations dans sa structure moléculaire, révélée par la diminution des bandes

## Chapitre IV résultats et discussions

(CH<sub>2</sub>), qui signifie que les forces de cohésion entre les chaînes sont réduites, ce qui engendre une augmentation de la mobilité.



**Figure IV.6.c :** spectres infrarouge des différents états d'évolution de l'arborescence (2000 à 4000 cm<sup>-1</sup>)

La formation des liaisons (O-H) spécifique des acides visible dans l'intervalle (3290 à 3500 cm<sup>-1</sup>) relève une déformation dans la structure moléculaire du matériau après les différents temps de vieillissement.

Au cours du vieillissement électrique, le matériau a subi des déformations moléculaire, cela est confirmé par la diminution de l'absorption des groupes (CH<sub>2</sub>), et aussi l'apparition d'autres groupes à savoir (OH et C=C) qui ne sont pas enregistrés dans le cas du PRC vierge, et impliquant un processus d'oxydation et de scission de chaînes moléculaires.

### IV.3.1.2 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

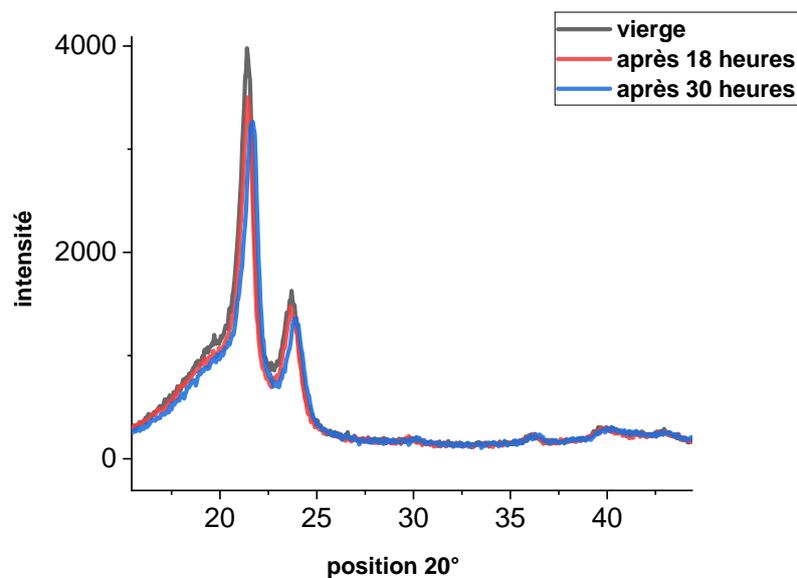
Afin d'identifier les phases (cristalline ou amorphe) du matériau PRC, nous l'avons soumis à un rayonnement de rayon X de la longueur d'onde ( $0.1 < \lambda < 10$  nm). La diffraction de ces rayons X sur un réseau de plan cristallin, selon la loi de Bragg, induit des radiations émises par ces plans atomiques qui sont en phase, engendrant un faisceau cohérent qui pourra être détecté;

## Chapitre IV résultats et discussions

Les positions des raies de diffraction, leurs intensités et leurs distances réticulaires permettent d'identifier chaque substance ou phase du mélange.

Les films du matériau, placés sur une plateforme ou "Spener", sont exposés à un faisceau de rayons X dont l'intensité est mesurée au moyen d'un détecteur rotatif directionnel.

Les diagrammes de diffraction des rayons X aux faibles angles  $2\theta$  allant de  $10^\circ$  à  $60^\circ$ , de PRC vierge, vieillis durant 18 et 30 heures ont été déterminés. Les spectres obtenus sont tracés sur un même système d'axes illustré sur la figure (IV.7). Ils relèvent une structure semi-cristalline, la phase amorphe se manifeste par des régions larges et dispersées, alors que la phase cristalline exhibe des pics de diffraction typiques intenses et nettement aigus.



**Figure IV.7 :** Spectre DRX des échantillons de PRC  
(vierge, vieillis durant 18 et 30 heures)

En termes de nombre de pics, les spectres DRX des trois échantillons de PRC (vierge et vieillis électriquement durant 18 et 30 heures) sont quasi-identiques. Nous retrouvons, sur chacun des spectres, un pic de diffraction principal correspondant à une position  $2\theta$ , une distance basale ( $D_b$ ) et une intensité ( $I_{ob}$ ) respectives, témoignant de la présence d'une phase cristalline importante dans ces plans. Cependant, sur le plan intensité, position et largeur des pics mesurée à mi-amplitude, une différence notable est relevée entre ces derniers. Le tableau (IV.3) résume les caractéristiques relatives à chacun des pics principaux des trois spectres.

## Chapitre IV résultats et discussions

**Tableau IV.3 :** Caractéristiques des pics principaux des spectres DRX des échantillons de PRC

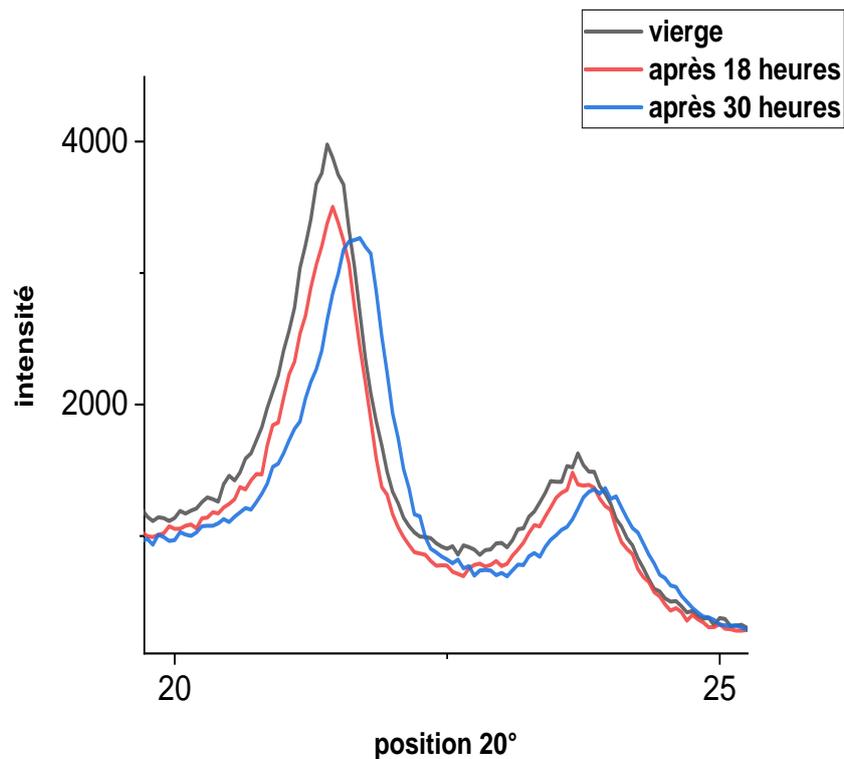
Echantillons de PRC	Position $2\theta(^{\circ})$	Intensité Lobs (cts)	Distance basale Db ( $^{\circ}$ )	Largeur du pic à mi-amplitude ( $^{\circ}$ )	Décalage $\Delta 2\theta (^{\circ})$ A droite
vierge	21.395	3996	4.1499	0.639	0
	23.702	1630	3.7509	0.638	0
Vieilli durant 18 hs	21.451	3511	4.1391	0.737	0.0491
	23.652	1482	3.7586	0.644	0.0531
Vieilli durant 30 hs	21.701	3263	4.0920	0.707	0.2853
	23.949	1369	3.7217	0.735	0.2450

A l'angle  $2\theta = 21.395^{\circ}$  correspondant à un plan basal de distance  $4.1499\text{Å}$ , un pic de diffraction d'intensité très importante est détecté dans le cas du PRC vierge, démontrant un grand taux de cristallinité dans ce plan. Ce pic diminue d'intensité suite à l'exposition du PRC au vieillissement électrique durant 18 et 30 heures. Les variations des intensités et des largeurs des pics traduisent une différence des taux de cristallinité des trois cas d'échantillons analysés. Le pic relatif à l'état vierge du matériau est plus étroit et plus intense, par rapport aux pics relatifs aux états vieillis du matériau. Le pic relatif à l'échantillon vieilli durant 30 hs est plus large et moins intense que son homologue vieilli durant 18 hs (figure IV.8). Ceci explique que la structure cristalline du PRC a été affectée par ce vieillissement, renforçant ainsi sa phase amorphe comme l'illustre la figure (IV.8).

Par référence à la position angulaire  $2\theta = 21.395^{\circ}$ , du pic principal relatif à l'échantillon de PRC vierge, les décalages angulaires des pics principaux relatifs aux échantillons vieillis durant 18 hs de  $\Delta 2\theta = 0,0491^{\circ}$  et vieillis durant 30 hs de  $\Delta 2\theta = 0,2853^{\circ}$  vers les grands angles, témoignent d'une déformation de la structure du matériau (figure IV.8). Ces constats peuvent s'expliquer après détermination des taux de cristallinités des trois différents échantillons analysés, dressés dans le tableau (IV.4) ci-dessous.

## Chapitre IV résultats et discussions

A l'angle  $2\theta = 23.702^\circ$  qui correspond à un plan basal de distance  $3.7509 \text{ \AA}$ , un pic de diffraction d'intensité moins importante est détecté, démontrant la présence d'un taux de cristallinité dans ce plan. Ce pic diminue d'intensité, est décalé vers les grands angles et s'élargit suite à l'exposition du PRC aux différentes conditions de vieillissement. Ceci explique, encore une fois, que la structure cristalline du PRC a été affectée par le vieillissement électrique, renforçant ainsi sa phase amorphe. Ce constat est accentué dans le cas d'un vieillissement durant 30 heures ayant conduit au claquage du matériau PRC (figure IV.8).



**Figure IV.8 :** Spectre DRX des échantillons vierge et vieillis durant 18 et 30 heures à  $2\theta$  compris entre  $20^\circ$  et  $25^\circ$

La fraction massique d'unités structurales présentes dans la zone cristalline des polymères semi cristallin définit le taux de cristallinité  $X_c$  donné par l'équation (IV.2), telle que :

$$\chi_c(\%) = \frac{x_1}{x_1 - x_2} \times 100 \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

## Chapitre IV résultats et discussions

- $x_1$  : Surface de pic ( $mm^2$ )
- $x_2$  : Surface totale ( $mm^2$ )

Le tableau IV.4 résume les taux de cristallinité des trois différents échantillons analysés, calculés selon l'équation (IV.1), moyennant le logiciel "X'Pert Highscore".

**Tableau. IV.4 :** Taux de cristallinité des différents échantillons analysés de PRC.

Echantillon de PRC	$\chi_c(\%)$
Vierge	39.50
Vieilli durant 18 hs	34.10
Vieilli durant 30 hs	30.01

Les résultats obtenus dans le tableau (IV.4) montrent que le vieillissement électrique du PRC, aussi bien durant 18 hs que 30 hs, induit une perte en taux de cristallinité, relativement à l'état vierge de ce matériau. Cette perte se produit au profit de la phase amorphe qui est ainsi renforcée et qui constitue une zone du matériau électriquement faible.

Nous remarquons également que la perte en taux de cristallinité est plus accentuée dans le cas d'un vieillissement électrique durant 30 hs qui a conduit au claquage du matériau que le cas d'un vieillissement durant un temps intermédiaire de 18 hs. La durée prolongée du vieillissement favorise la destruction des cristallites, ce qui accélère la dégradation du matériau.

### IV.3.1.3 analyse ATG/DTG

Ces analyses nous ont permis de voir l'impact de la température sur la stabilité thermique des échantillons de PRC avant et après le vieillissement électrique.

Les thermo grammes de l'ATG et de la DTG (dérivée de l'ATG), relatifs aux échantillons de PRC vierge et vieillis électriquement durant 18 hs et 30hs, donnent l'évolution du pourcentage de la perte de masse et la vitesse de la perte de masse par rapport à un état de référence, respectivement, en fonction de la variation de la température.

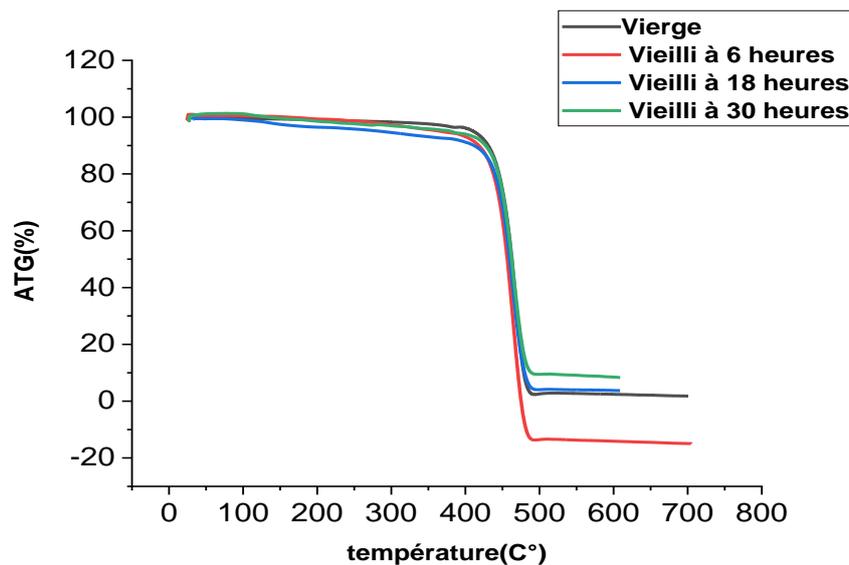
Les thermo grammes des analyses ATG/DTG nous ont permis de déterminer les températures de dégradation thermique (la température initiale de décomposition ( $T_i$ ), la température du maximum de dégradation ( $T_m$ ), la température de fin de dégradation ( $T_{fd}$ ),

## Chapitre IV résultats et discussions

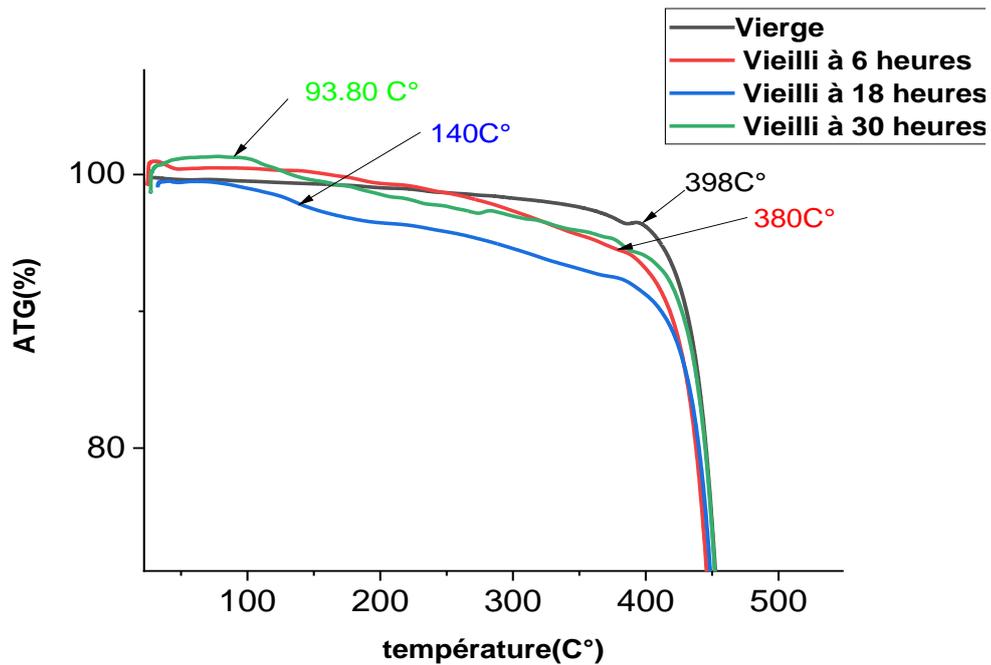
ainsi que la perte de masse (%) et le taux de résidu (%), des échantillons de PRC. Ces résultats sont illustrés sur les figures (IV.9 et IV.10).

Les thermo-grammes de l'ATG (figure IV.9.b), montrent une bonne tenue thermique du matériau vierge qui affiche une température de tenue ( $T_i$ ) de l'ordre de  $398\text{ C}^\circ$ . Cette température diminue avec le vieillissement électrique des échantillons de PRC, où nous avons enregistré des températures inférieures à cette précédente, à mesure que la durée du vieillissement électrique est prolongé, jusqu'à atteindre la température la plus défavorable  $T_i(30\text{ hs}) = 93,80^\circ$  dans le cas de l'échantillon où le claquage s'est opéré après 30 heures d'exposition à la contrainte du champ électrique.

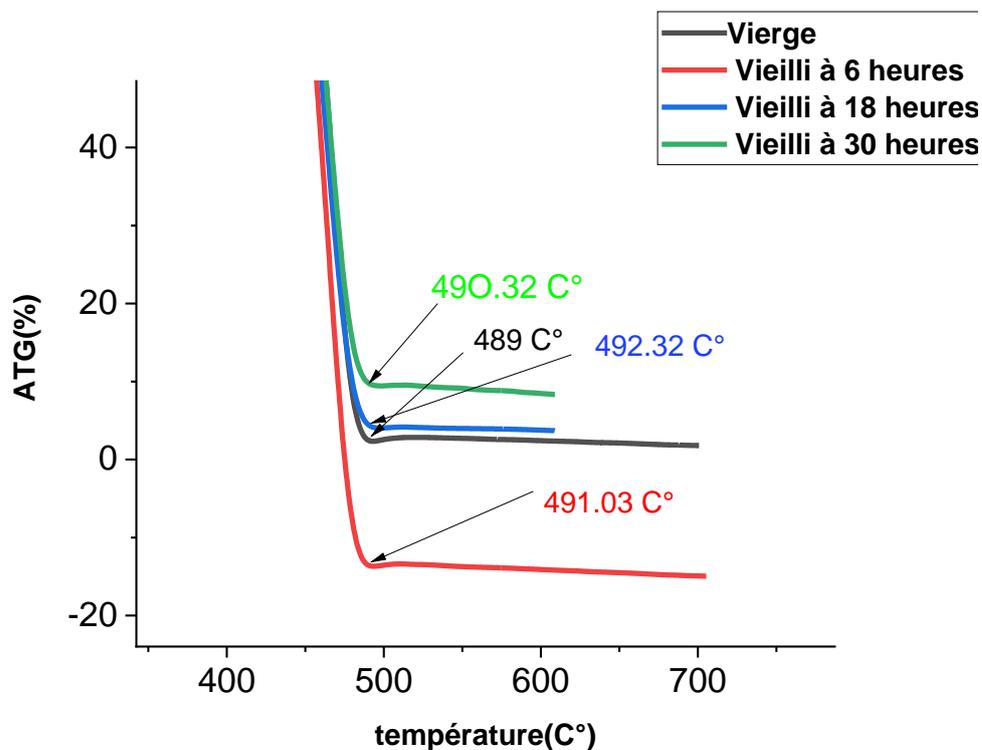
.Au-delà de ces valeurs, une chute brutale de cette propriété est enregistrée, atteignant une température  $T_{fd} \approx 489\text{C}^\circ$  dans le cas de l'échantillon vierge, et des températures voisines dans le cas des échantillons vieillis électriquement (figure IV.9.c). Ces températures correspondent aux points de rupture totale de la tenue thermique de ces échantillons qui se traduit par une perte de masse importante, et une détérioration complète du matériau. Les variations de températures de pertes de masses à 5 et 10 % pour les différents échantillons de PRC sont résumées dans le tableau (IV.5).



**Figure IV.9.a :** thermo grammes de variation du taux de perte de masse (ATG%) en fonction de la température de traitement  $T(\text{C}^\circ)$  des échantillons de PRC vierge, vieilli durant 6, 18 et 30 heures.



**Figure IV.9.b :** Thermo grammes de variation du taux de perte de masse (ATG%) en fonction de la température de traitement T(C°) des échantillons de PRC vierge, vieilli durant 6,18 et 30 heures - Zoom sur les températures de tenue thermique  $T_i$



**Figure IV.9.c :** Thermo grammes de variation du taux de perte de masse (ATG%) en fonction de la température de traitement T(C°) des échantillons de PRC vierge, vieilli durant 6,18 et 30 Heures - Zoom sur les températures de fin de dégradation  $T_{fd}$

## Chapitre IV résultats et discussions

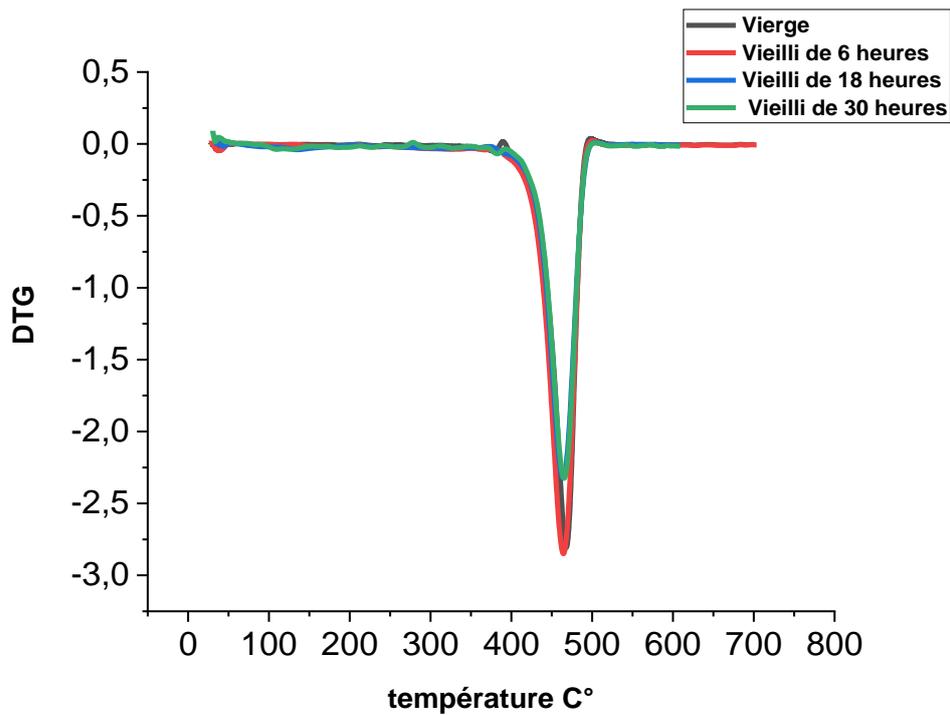
**Tableau IV.5** : Variation des températures de pertes de masses à 5 et 10 % pour les différents échantillons de PRC.

Températures de traitement	La température à 5% de pertes de masse	La température à 10% de pertes de masse
vierge	410.9	430.6
Vieilli durant 6 hs	380 .2	427
Vieilli durant 18 hs	366.9	418
Vieilli durant 30 hs	285.7	411.5

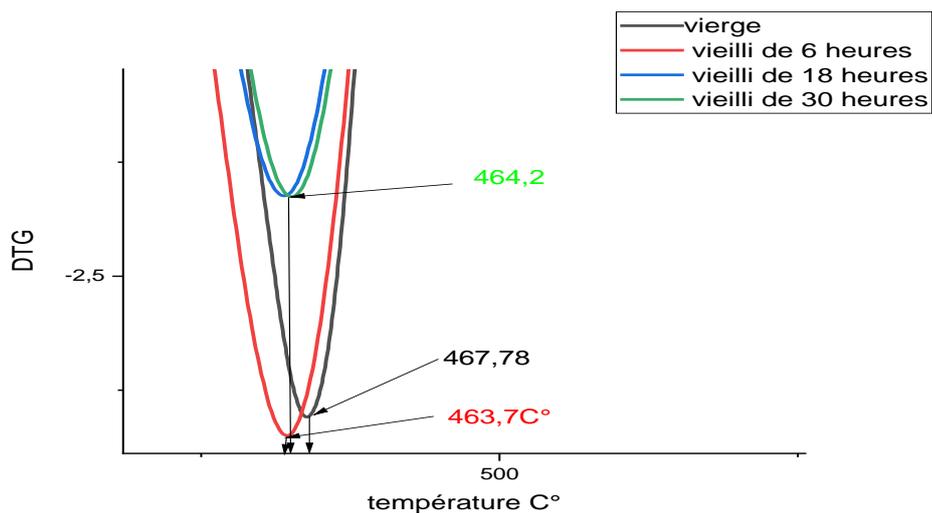
D'après les résultats portés dans le tableau (IV.5) ci- dessus, nous constatons que le PRC vierge perd 5% de sa masse initial à une température de traitement 410.9 C°. A taux de perte de masse égal (5%), cette valeur diminue à mesure que les échantillons de PRC subissent un vieillissement électrique de plus longue durée. Une constatation similaire peut être faite au taux de perte de masse 10%.

Il est également à remarquer, qu'à une température avoisinant les 411C°, le PRC vieilli durant 30 heures a perdu 10% de sa masse initial, par contre pour la même température de traitement le PRC vierge n'en a perdu que 5%. Nous en déduisons que plus le vieillissement électrique est long, plus les pertes de masse sont importantes, ce qui prouve que le vieillissement électrique affecte la structure moléculaire du matériau PRC.

La figure (IV.10) illustre les résultats de l'analyse DTG donnant la variation de la vitesse de dégradation thermique du matériau.



**Figure IV.10.a :** thermo-gramme de la variation de la vitesse de dégradation thermique du PRC (vierge, vieilli 6,18 et 30 heures)



**Figure IV.10.b :** Zoom sur le point de maximum de dégradation thermique du PRC (vierge, vieilli 6,18 et 30 heures)

On observe une première phase d'évolution de la dégradation thermique du matériau à partir de la température de tenue  $T_i=398C^\circ$  dans le cas du PRC vierge, la vitesse de dégradation maximale, caractéristique d'une grande perte de masse, est enregistrée à la température  $T_m = 467.78C^\circ$ , puis vient un changement de pente traduisant un régime de

## Chapitre IV résultats et discussions

dégradation modéré du PRC vierge qui continue jusqu'à la rupture thermique du matériau qui s'opère à la température  $T_{df}=489C^{\circ}$  marqué par une phase de stagnation. Le même comportement est suivi par l'ensemble des échantillons de PRC vieillis électriquement, tout en affichant des températures très proches (en limite inférieure) à celle du cas vierge. Remarquons, toutefois, que les vitesses de dégradation du matériau dans tous les cas envisagés restent similaires, ce qui témoigne de la stabilité thermique du PRC.

### IV.3.2 Résultats des mesures électriques

#### IV.3.2.1 Rigidité électrique transversale et longitudinale

**Tableau IV.6 :** Rigidité longitudinale du PRC en fonction du temps de vieillissement électrique

Le temps de vieillissement	la rigidité diélectrique longitudinale (kV/cm)
vierge	32
Vieilli durant 6 heures	31
Vieilli durant 12 heures	30
Vieilli durant 18 heures	30
Vieilli durant 25 heures	30
Vieilli durant 30heures	30

Les résultats obtenus, portés dans le tableau (IV.6) ci-dessus, montrent que la rigidité diélectrique longitudinale du PRC vieilli électriquement, dans une géométrie d'électrode pointe-cylindre (pointe portée au potentiel HT et cylindre mis à la terre), est quasi invariable, par rapport à la valeur obtenue à l'état vierge du matériau. Ceci était prévisible, du fait que la surface de l'isolation en PRC de l'échantillon de câble testé, n'a subi l'effet du vieillissement électrique que ponctuellement à l'empreinte microscopique de l'électrode pointe ( $r=0.35\mu m$ ), ce qui n'a pas affecté la rigidité diélectrique longitudinale.

Il est prévisible que la rigidité diélectrique transversale du PRC soit, quant à elle, affectée par le vieillissement électrique, vu la présence du défaut (arborescence). Cependant, en raison de la faible rigidité diélectrique de l'huile minérale Borak 22 (relativement à celle du PRC) dans laquelle est immergé l'échantillon de câble PRC lors des essais électriques, pour éviter des éventuels contournements, nous enregistrons des claquage dans l'huile avant

## Chapitre IV résultats et discussions

d'atteindre la perforation de l'isolation du câble, ce qui rend cette mesure impossible, faute de moyen technique plus performant.

### IV.3.2.2 Pertes diélectriques, capacité et permittivité

**Tableau IV.7 :** Capacité C et facteur de perte  $\text{tg}\delta$  du PRC en fonction du temps de vieillissement électrique

Temps de vieillissement	Capacité C (pF)	$\text{tg}\delta$	$\epsilon_r$	$\epsilon_r \cdot \text{tg}\delta$
vierge	21.0915	$1.852 \cdot 10^{-2}$	2.024	0.0374
vieilli durant 6 heures	20.4145	$2.397 \cdot 10^{-2}$	1.959	0.0469
Vieilli durant 18 heures	20.1652	$2.992 \cdot 10^{-1}$	1.935	0.5789
Vieilli durant 25 heures	20.0608	$3.612 \cdot 10^{-1}$	1.925	0.695
Vieilli durant 30 heures	19.9998	$1.351 \cdot 10^{-1}$	1.919	0.259

Les résultats obtenus, portés dans le tableau (IV.7) ci-dessus, montrent que la capacité C (respectivement  $\epsilon_r$ ) et le facteur de perte  $\text{tg}\delta$  (respectivement  $\epsilon_r \cdot \text{tg}\delta$ ) du PRC vieilli électriquement, dans une géométrie d'électrode pointe-cylindre (pointe portée au potentiel HT et cylindre mis à la terre), sont quasi invariable, par rapport aux valeurs obtenues à l'état vierge du matériau. Ceci était prévisible, du fait que le matériau n'a subi de dommage, suite au vieillissement électrique, que ponctuellement à l'empreinte microscopique du défaut généré (arborescence). La dimension de la zone d'arborescence reste négligeable devant le reste du volume du matériau qui lui demeure vierge, ce qui explique l'invariance de ces grandeurs.

## IV.5 Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons présenté les résultats relatifs au vieillissement électrique du PRC et leurs interprétations.

## Chapitre IV résultats et discussions

Les différents essais de vieillissement nous ont permis de définir le temps moyens de perforation de l'isolation du câble en PRC 18/30 kV, et de déterminer la cinétique de propagation de l'arborescence électrique.

La microscopie optique a révélé la structure et la morphologie microscopique des arborescences générées dans le matériau sous une contrainte de tension de 30 kV (50 Hz). Des arborescences de forme buissons multiples sont observées et leurs longueurs sont mesurées.

L'arborescence se propage de l'aiguille vers l'électrode opposée reliée à la masse suivant la direction du champ électrique. Son évolution suit trois étapes : l'initiation, la propagation et le claquage. L'initiation est caractérisée par une arborescence à branche unique, la propagation est provoquée par la naissance des micro-canaux sous l'effet des décharges partielles qui sont activées à l'intérieur de ses canaux, alors que le claquage est provoqué par la remonté d'un filament de l'électrode reliée à la terre vers l'électrode haute tension appelé "canal de retour".

Les analyses physico-chimique nous ont permis de voir que la contrainte électrique peut modifier l'aspect morphologique du PRC ; l'analyse du spectre infrarouge (FTIR) montre que le vieillissement électrique conduit à l'apparition de nouveaux groupes fonctionnels inexistants à l'état vierge, les résultats de la difractions des rayons X (DRX) ont révélé une modification de la micro structure du PRC où une diminution du taux de cristallinité après le vieillissement électrique est enregistrée. Ceci signifie qu'il y a un renforcement de la phase amorphe qui constitue des zones électriquement faibles du matériau au détriment de sa phase cristalline.

Les analyses thermiques montrent que le vieillissement électrique fait accélérer la dégradation thermique du matériau.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

### Conclusion générale

Ce travail a été focalisé sur le vieillissement du câble 18/30 kV en PRC utilisé pour le transport de l'énergie électrique en haute et moyenne tension alternative.

Cette étude nous a permis de mieux prendre connaissance du câble haute et moyenne tension, en particulier le câble à isolation en PRC, qui a ouvert, ici, une brèche sur le vaste monde des matériaux synthétiques. Nous avons donné un intérêt particulier au mécanisme de vieillissement de ce câble par le phénomène d'arborescence électrique, où cette dernière est générée au laboratoire de haute tension de l'université de Béjaia, dans des échantillons de câble en PRC 18/30 kV sous une tension alternative de 30 kV, et son évolution est ainsi suivie jusqu'à ce que la perforation du matériau d'isolation (PRC) advienne. A des temps intermédiaires de la propagation de l'arborescence, la longueur de celle-ci est mesurée et sa cinétique  $l(t)$  est déterminée.

L'arborescence est générée à l'extrémité d'une aiguille de rayon de courbure  $r = 35 \mu\text{m}$ , portée à la haute tension ( $U = 30 \text{ kV}$ ), dans une géométrie d'électrode pointe-cylindre. Elle évolue dans l'espace interélectrode d'épaisseur  $d = 8 \text{ mm}$ , à partir de la pointe vers l'électrode opposée mise à la terre, dans la direction du champ électrique et prend une forme buissons multiples.

L'évolution de l'arborescence suit trois étapes : l'initiation, la propagation et le claquage. L'initiation est caractérisée par une arborescence à branche unique, la propagation est provoquée par la naissance des micro-canaux sous l'effet des décharges partielles qui sont activées à l'intérieur de ses canaux, alors que le claquage est provoqué par la remontée d'un filament de l'électrode reliée à la terre vers l'électrode haute tension appelé "canal de retour".

L'analyse FTIR a révélé, après vieillissement du PRC, l'apparition de nouveaux groupes fonctionnels autres que ceux enregistrés à l'état vierge, ce qui confirme que la structure moléculaire du matériau a subi des déformations lors du vieillissement électrique. De même, la DRX confirme la modification de la micro structure du matériau due à une diminution du taux de cristallinité des échantillons de PRC vieillis, par rapport au taux obtenu à l'état vierge. Les analyses thermiques montrent que le vieillissement électrique accélère la dégradation thermique du matériau.



# **Références**

# **Bibliographiques**

# Bibliographie

## Bibliographie

1. M. Aguet, M. Ianoz, "Haute tension", édition DUNOD 1987.
2. Ossi Bergius. *Implementation of on-line Partial Discharge Measurements in Medium voltage cable network*. Tampere University of technology, 2012.
3. Chin Tze Choo. *Space charge determination in HVDC power cable and its influence on electric field*. University of Southampton, 2010.
4. Paul Gill. *Electrical power equipment maintenance and testing*. CRC press, 2008.
5. Thomas Worzyk. *Submarine power cables: design, installation, repair, environmental aspects*. Springer Science & Business Media, 2009. .
6. François Gervais. *Les nouveaux supraconducteurs*. Tec et Doc, 1991.
7. Jacob Ostergaard, Ole Tonnesen, Jorgen Kaas-Pedersen, Arne Hejde Nielsen, and Chresten Traeholt. *A new concept for superconducting dc transmission from a wind farm*. *Physica C: Superconductivity*, Elsevier, 372:1560-1563, 2002.
8. William A Thue. *Electrical power cable engineering* CRC Press, 2011.
9. E Peschke and R Von Olshausen. *Cable systems for high and extra-high voltage*. Publicis MCD Werbeagentur GmbH, 1999. .
10. Jan De Kock and Cobus Strauss. *Practical power distribution for industry*. Elsevier, 2004.
11. T. Gonen. *Electric Power Transmission System Engineering*. CRC Press, 1988.
12. John Shea. *Power and communication cables-theory and applications*. *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, 16(3):34-34, 2000. .
13. Harry Ernest Orton and Rick A Hartlein. *Long life XLPE insulated power cables*. Nancy 1, 2006. .
14. J.C. Demay, J.C. Bobo, *câbles haute tension, Matériaux pour câbles haute tension à isolation polyéthylène ou polyéthylène réticulé chimiquement*, *RGE Revue générale d'électricité*. 85(9) (1976)731-736. .
15. P. Combette, I. Ernoult, 'physique des polymères', Tome 1, "structure, fabrication, emploi". Hermann Editeurs, 2005. .
16. *La chimie des polymères*. s.l. : Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009-2010.
17. P. Weiss, "la chimie des polymères", Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2010.

18. M. Fontanille, Y. Cnanou, J. M. Lehn, "Chimie et physico-chimie des polymères", Dunod, Paris, 2002.
19. M. Medkour, "Synthèses macromoléculaires", tome 1.
20. R. Perrin, J. Pirre Scharef, "chimie industrielle", 2e édition : Dunod, Paris, 1999.
21. M. Chatain, G. Héry, J. Prévot, "Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites", Ind Plast. Mod. no 9, Nov. 1958.
22. G. Chmpetier, "Chime macromoléculaire", Tome I, HERMANN, Paris, 1970.
23. M. Medkour, Polymères : synthèse macromoléculaire, offices des publications universitaires (année). .
24. M. Schmid, M. Laurent, F. Gaille, "Use of elastomeric material of HV and EHV.
25. K. B. Nicole, A.H. Marc, "Post-polymerization functionalization of polyolefins", Chemical Society Reviews, Vol. 34, pp. 267-275, 2005.
26. A. Vonhippel, "Les diélectriques et leur application", traduit par M.Sausade, Edition Dunod, Paris, 1961.
27. R. Fourinié, les isolants en électrotechnique- Essais, Mécanisme de dégradation, Applications industrielles, Eyrolles (1990).
28. J.C. Demay, J.C. Bobo, câbles haute tension, Matériaux pour câbles haute tension à isolation polyéthylène ou polyéthylène réticulé chimiquement, RGE Revue générale d'électricité. 85(9) (1976)731-736. .
29. M. Pays, "Câble de transport d'énergie. Technologie et caractéristiques", Techniques de l'Ingénieur, Publication D4520, 1996.
30. 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.
31. 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.
32. S. Pelissou et al., "Caractérisation de câbles extrudés vieillis en service", Rapport final, IREQ-4742, Décembre 1990.
33. S. Fusesserry, "Polyéthylènes basse densité", Techniques de l'Ingénieur, Publication A3310, 1996.
34. S.W. Rowe, Electrical Ageing of Composites: An Industrial Perspective, Proceedings International Conference on Solid Dielectrics, pp. 401-406, 8-13 July 2007. Winchester, UK.

35. O. Gallot-Lavallee, *Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension*, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004.
36. N.Zebouchi, M.bendaoud, R.Essolbi, D.Malec, Bui Ai, Hoang THE Giam, "Electrical breakdown theories applied to polyethylene terephthalate films under the combined effects of pressure and temperature", *Journal of Applied physics*, Vol.79, pp.2497-2501, 1996.
37. M.Cacciari, A.Contin, G.Rabach, G.C.Montanari, "Diagnosis of Practical Insulation Systems by PD Measurements in the Presence of Multidischarge Phenomena", *Proc, USA*, pp.414-419, 1993.
38. J.F.Fauvarque, "Polymères pour isolants électriques. propriétés électrique des polymère et applications", *Groupe Francais d'etudes et d'applications des polymère, GEP*, 1993, Ch. VII, pp273-318.
39. M.S.Mashikian, ASztkowski, "Medium Voltage Cable Defects Revealed by off-Line partial Discharge Testing at Power Frequency", *IEEE Electrical Insulation Magazine DEIS*, 2 Vol.22, N°.4, pp.24-32, 2006.
40. H.R.Zeller, "Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Solid dielectrics" *Proceedings of 2nd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, pp 98-109, 1986.
41. N.ROUHA, A.BEROUAL, C.BROSSEAU, «Modeling the treeing growth in solid electrical insulation.». *IEE.conf.elec.insul.dielec.phen*, October 20-23, 1996, 750-753.
42. N.ROUHA, «Etude et modélisation de la dégradation des polymères par le phénomène d'arborescence», thèse de magister en électrotechnique, juillet 1994 E.N.P. Alger.
43. MOHAND.AMOKRANE.HANDALA «contribution à l'étude de la propagation des arborescences dans l'Ethylène-Dienne-Monomère ». Thèse de magister 1982, E.N.P. Alger.
44. Steennis, E.F., Kreuger, F.H., *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 25, 989, 1990.
45. C. Laurent, *Diélectriques solides et charge d'espace, Traité de Génie Electrique, Techniques de l'ingénieur*, Vol. D2, pp. 305-13, 1998.
46. G. Teyssedre, L. Boudou, *Polymères et composites pour l'électrotechnique, Traité de Génie Electrique, Techniques de l'ingénieur*, Vol. D2, pp. 335-19, 2010.
47. S. Serra, G.C. Montanari, and G. Mazzanti, *Theory of inception mechanism and growth of defect-induced damage in polyethylene cable insulation*, *Journal of Applied Physics*, Vol. 98, pp. 034102-034102-15, 2005.
48. G. Mazzanti, G.C. Montanari, and S. Serra, *Aging model of polyethylene based materials for HV cables founded on damage inception and growth from air-filled voids*, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 5-9 July 2004. .

49. D. Fabiani, G. C. Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre ; P.H. F. Morshuis, R. Bode-ga, L.A. Dissado, A. Campus, U.H. Nilsson, *Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. part 1: insulation/semicon interface*, *IEEE electrical insulation magazi*. Vol. 23, No. 6, pp. 11-19, November-December 2007.
50. G.C. Montanari, *Bringing insulation to failure: the role of space charge*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, No. 2, pp. 339-364, April 2011.
51. L.A. Dissado, G. Mazzanti and G.C. Montanari, *The role of trapped space charges in the electrical aging of insulating materials*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 4, No. 5, pp.496-506, 1997.
52. A. S. Bouhadjar, M. Amokrane, “*Caractérisation de l’état de surface d’un isolateur par technique d’ondelettes et modélisation*”, *Mémoire du fin de cycle, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d’Alger*, Juin 2008.
53. R. Bouzeroura, “*Etude du développement d’arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue*”, *Mémoire de magister, Université de Bejaia*, 2009.
54. “*Méthode recommandés pour la mesure des résistivités transversales et superficielles d’un matériau électrique*”, publ CEI, N°93 , Genève, 1958.
55. A.R.BLYTHE, “*Electrical properties of polymers*”, *cambridge universiyy press*, vol 1, 1979.
56. Michel Aguet et Mercea , “*Haute tension , volume XXII : traite de l’électricité*”, 1982 Editions jeorgi.
57. E. Kuffel. W.S. Zaengl. J. Kuffel, “*High Voltage Engineering*”, *Second edition 2000, published by Butterworth-Heinemann*.
58. Kind. Kärner, “*Heth-voltage, Exprimental technique*”, *VIEWEG , edition 1978 .*
59. M.Tahraoui, k.Zania, *Thèse d’ingéniorat, Option Réseaux Electriques, Département Electrotechnique, UMMTO Tizi-Ouzou*, 2011.
60. P. Combette, I. Ernoult, “*physique des polymères*”, Tome 1, “*structure, fabrication, emploi*”. *Hermann Editeurs*, 2005.
61. M. Nedjar, A. Boubakeur, A. Bérroual, M. Bournane, “*Thermal aging of Polyvinyl Chloride used in electrical insulation*”, *Annales de Chimie, Science des Matériaux*, Vol. 28, pp. 97-104, 2003.

# **Annexes**

# Annexes

## Annexe III.1



### Description

LE4201R is a crosslinkable natural polyethylene compound, specially designed for insulation applications.

### Applications

LE4201R is intended for insulation of XLPE power cables with rated voltages up to 72 kV.

### Specifications

LE4201R meets the applicable requirements as below when processed using sound extrusion practice and testing procedure:

AEIC CS8 IEC 60502  
HD 620 S1, Part 1, table 2A, DIX 3 to 14

### Physical Properties

Property	Typical Value <small>Data should not be used for specification work</small>	Test Method
Density (Base Resin)	922 kg/m <sup>3</sup>	ISO 1872-2/ISO 1183
Bulk density	500 - 600 kg/m <sup>3</sup>	
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
Retention of Tensile Properties After Ageing (168 h, 135 °C)	< 20 %	IEC 60811-1-2
Hot Set Test (200 °C, 0,20 MPa) <sup>2</sup>	75 %	IEC 60811-2-1
Monsanto ODR Göttfert Elastograph	Elongation under load	5 %
	Permanent deformation	30 - 38 dNm
Methanol Wash	0,59 - 0,74 Nm	
Moisture	< 1.200 ppm	Karl Fischer-titration
	< 200 ppm	

<sup>1</sup> Base Resin

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

### Electrical Properties

Property	Typical Value <small>Data should not be used for specification work</small>	Test Method
Dielectric constant (50 Hz)	2,3	IEC 60250
DC Volume Resistivity	> 10 POhm.cm	IEC 60093
Dielectric Strength (50 Hz)	> 22 kV/mm	IEC 60243
Dissipation Factor (50 Hz)	0,0003	IEC 60250

Borealis AG | Wagramerstrasse 17-19 | 1220 Vienna | Austria  
Telephone +43 1 224 00 0 | Fax +43 1 22 400 333  
FN 269858a | CCC Commercial Court of Vienna | Website [www.borealisgroup.com](http://www.borealisgroup.com)

## Annexe IV.1

Essai	Temps	Rayon de courbure	Tension(Un)
1	30h et 14 mn	0.035mm	30kV
2	30h et 33mn	0.035mm	30kV
3	33h et 52mn	0.035mm	30kV

Tableau IV.1 les temps de perforation complète des isolations

Calcul du temps moyen de claquage td :

$$td_{moy} = \frac{td1 + td2 + td3}{3}$$

$$td_{moy} = \frac{30h14mn + 30h33mn + 33h52mn}{3}$$

$$td_{moy} = 31h 33mn$$

Donc le temps moyen de calquage est de l'ordre de 31h et 33mn.