

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



Université A/Mira de Béjaïa  
Faculté de Technologie  
Département d'Electrotechnique



# Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Machine électrique

## THÈME

**Caractérisation physico-chimique d'un  
câble 18/30 Kv en Polyéthylène réticulé  
chimiquement à l'état vierge**

*Présenté par :*

- BOUCHAL Massinissa

- DERGAOUI Syphax

*Encadré par :*

Dr. ROUHA Nacira

**Promotion 2019**

## Remerciements

Nos plus vifs et profonds remerciements vont au Dr N.ROUHA qui fut pour nous une promotrice attentive, impliquée et disponible malgré ses responsabilités nombreuses.

Nos plus sincères remerciements s'adressent au Dr Fatiha BOUCHAL qui nous a été d'une aide précieuse dans la réalisation des expériences aux laboratoires des génies des procédés.

Nous remercions aussi l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.

## **Dédicace**

**Je dédie se modeste travaille à :**

**Mes très chères parents qui ont été toujours la source de ma réussite et de succès. Que dieu le protégés.**

**A mes deux sœurs Kahina et Rosa et mon frère Ghiles**

**A toute ma famille, BOUCHAL et CHABOUR**

**Ainsi que toute mes amis sans exception.**

**Massinissa**

**Je dédie se modeste travaille à :**

**Mes très chères parents qui ont été toujours la source de ma réussite et de succès. Que dieu le protégés.**

**A ma chère sœur Ahlam et mes deux frères Samy et**

**Bilal.**

**A toute ma famille,mes amis et a wawa**

**Syphax**

# Tables des matières

<b>TABLES DES MATIERES.....</b>	<b>I</b>
<b>TABLES DES FIGURES .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I TECHNOLOGIE DU CABLE .....</b>	<b>3</b>
<i>I.1 Introduction .....</i>	<i>4</i>
<i>I.2 Généralité sur la haute tension.....</i>	<i>4</i>
I.2.1 Définition .....	4
I.2.2 Utilité de la haute tension.....	4
I.2.3 Domaine d’application de la haute tension .....	5
I.2.4 Classification.....	5
I.2.5 Réseaux HT dans le monde.....	6
<i>I.3 Généralités sur les câbles de haute tension.....</i>	<i>7</i>
I.3.1 Définition .....	7
I.3.2 Différentes mise en place des câbles.....	7
I.3.3 Principaux types de câbles .....	8
I.3.4 Configuration d’un câble électrique isolé au PRC .....	21
I.3.4.1 Différentes constituantes du câble électrique isolé au PRC.....	22
<i>I.4 GENERALITE SUR LES POLYMERES .....</i>	<i>24</i>
I.4.1 Définition d’un polymère .....	24
I.4.2 Historique des polymères :.....	25
I.4.3 Classification des polymères :.....	26
<i>I.5 Généralités sur le PRC (polyéthylène réticulé chimiquement).....</i>	<i>30</i>
I.5.1 Définition : .....	30
I.5.2 Procédés de fabrication des câbles isolés au PRC :.....	31
I.5.3 Avantages et inconvénients de l’isolation en PRC : .....	34
<b>CHAPITRE II OUTILS DE CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET METHODES DE MESURES .....</b>	<b>35</b>
<i>II.1 Introduction .....</i>	<i>36</i>
<i>II.2 Analyses chimiques.....</i>	<i>36</i>
II.2.1 Analyses thermique (ATG, ATD, DSC) .....	36
II.2.2 La microscopie électronique à balayage (MEB) .....	40

II.2.3 La diffraction des rayons X (DRX) :.....	41
II.2.4 Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier(FTIR).....	42
II.3 Mesures électrique.....	45
II.3.1 Rigidity électrique .....	45
II.4 Conclusion :.....	53
<b>CHAPITRE III PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>54</b>
III.1 Introduction .....	55
III.2 Caractéristiques du matériau :.....	55
III.3 Mesures électriques :.....	56
III.3.1 Mesure de capacité $C_x$ et du facteur de perte $tg\delta$ .....	56
III.3.2 Mesure de la rigidité diélectrique.....	56
III.3.2.1 Mesure de la rigidité diélectrique transversale.....	57
III.3.2.2 Mesure de la rigidité diélectrique longitudinale.....	57
III.4 Analyse physico-chimiques :.....	58
III.4.1 La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	58
III.4.2 Analyse thermogravimétrique .....	59
III.4.3 La diffraction des rayons X :.....	61
III.4.4 Microscopie électronique à balayage .....	62
III.5 Conclusion :.....	64
<b>CHAPITRE IV PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS .....</b>	<b>65</b>
IV.1 Introduction .....	66
IV.2 Résultats des Mesures électriques .....	66
IV.2.1 Rigidity diélectrique transversal et longitudinale .....	66
IV.2.2 Mesure de capacité $C_x$ et du facteur de perte $tg\delta$ .....	66
IV.3 Résultats des analyses chimiques .....	67
IV.3.1 Analyse infrarouge.....	67
IV.3.2 Diffraction des rayons X.....	68
IV.3.3 Analyses thermiques ATG/DTG .....	70
IV.3.4 Microscope électronique à balayage.....	73
IV.4 Conclusion .....	74
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>76</b>

# Tables des figures

<b>FIGURE I.1</b> TRANSFORMATEUR ELEVATEUR. ....	4
<b>FIGURE I.2</b> ÉVOLUTION DE LA LONGUEUR DU RESEAU TRANSPORT ELECTRICITE EN KM PERIODE : 2000-2011.....	6
<b>FIGURE I.3</b> CABLE UNIPOLAIRE (A) SANS MANTEAU (CETTE SOLUTION ET A PROHIBER CAR LA REPARTITION DU CHAMP ELECTRIQUES EST EN FONCTION DU MODE DE POSE), (B) AVEC MANTEAU . ....	7
<b>FIGURE I.4</b> CABLE ISOLE AU GAZ, A GAUCHE STRUCTURE SOUPLE, A DROITE STRUCTURE TRIPOLAIRE [6]. ....	8
<b>FIGURE I.5</b> COUPE D'UN CABLE UNIPOLAIRE, ISOLE AU PAPIER IMPREGNE. ....	9
<b>FIGURE I.6</b> (A) SCHEMA DE LA SECTION D'UN CABLE HV A ISOLATION PAR HUILE SOUS PRESSION INTERNE, (B) A GAUCHE UNE PHOTOGRAPHIE D'UN CABLE A HUILE IMPREGNEE EN MASSE 450 kV ET (C) A DROITE UNE PHOTOGRAPHIE D'UN CABLE 150 kV DE 1954.....	10
<b>FIGURE I.7</b> CABLE HYPER CONDUCTEUR TRIPHASE.....	11
<b>FIGURE I.8</b> CABLE SUPRACONDUCTEUR TRIPHASE .....	11
<b>FIGURE I.9</b> CRYOCABLE SUPRACONDUCTEUR A COURANT ALTERNATIF TRIPHASE. ....	13
<b>FIGURE I.10</b> CABLES HAUTE TENSION A ISOLATION SYNTHETIQUE. ....	15
<b>FIGURE I.11</b> SECTION D'UN CABLE DE PUISSANCE A ISOLATION SYNTHETIQUE (XLPE) DE 420 kV.....	15
<b>FIGURE I.12</b> INFLUENCE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE SUR LE COURANT NOMINAL. ....	17
<b>FIGURE I.13</b> DIFFERENTES STRUCTURES DE L'AME CONDUCTRICES. ....	17
<b>FIGURE I.14</b> COUPE TRANSVERSALE D'UN CABLE D'ENERGIE ELECTRIQUE 18/30 kV ISOLE AU PRC. ....	22
<b>FIGURE I.15</b> PRINCIPALES CONSTITUANTES D'UN CABLE.....	22
<b>FIGURE I.16</b> LA FORMATION DE POLYETHYLENE PAR POLYMERISATION DES MONOMERES DE L'ETHYLENE .....	25
<b>FIGURE I.17</b> POLYMERISATION : REACTION ENTRE MONOMERES POUR FORMER UN PRODUIT FINAL APPELE POLYMERE. ....	25
<b>FIGURE I.18</b> STRUCTURE MOLECULAIRE D'UN COPOLYMERE STATISTIQUE. ....	26
<b>FIGURE I.19</b> STRUCTURE MOLECULAIRE D'UN COPOLYMERE ALTERNE. ....	27
<b>FIGURE I.20</b> STRUCTURE MOLECULAIRE D'UN COPOLYMERE SEQUENCE .....	27
<b>FIGURE I.21</b> STRUCTURE MOLECULAIRE D'UN COPOLYMERE GREFFE.....	27
<b>FIGURE I.22</b> CLASSIFICATION DES ARCHITECTURES MACROMOLECULAIRES SELON TAMOLIA..	29
<b>FIGURE II.1</b> REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU DISPOSITIF DE L'ATG.....	37
<b>FIGURE II.2</b> PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ATD.....	38
<b>FIGURE II.3</b> PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA DSC. ....	39
<b>FIGURE II.4</b> SCHEMA DE PRINCIPE D'UN MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.....	40

<b>FIGURE II.5</b> SCHEMA DE LA LOI DE BRAGG DONNANT LES DIRECTIONS OU LES INTERFERENCES SONT CONSTRUCTRICES. ....	41
<b>FIGURE II.6</b> DOMAINE DE LA LUMIERE INFRAROUGE. ....	42
<b>FIGURE II.7</b> SPECTROMETRE IRTF. ....	45
<b>FIGURE II.8</b> CIRCUIT DE MESURE DE LA TENSION DE CONTOURNEMENT D'UNE SURFACE ISOLANTE. ....	47
<b>FIGURE II.9</b> CIRCUIT DE MESURE DE LA TENSION DE CLAQUAGE D'UN MATERIAU ISOLANT. ....	47
<b>FIGURE II.10</b> SCHEMA DE PRINCIPE DU PONT DE SCHERING. ....	48
<b>FIGURE II.11</b> SCHEMA DE PRINCIPE DU PONT DE SCHERING A TRANSFORMATEUR DIFFERENTIEL. .....	50
<b>FIGURE II.12</b> EXEMPLE DE REGLAGE DU PONT DE SCHERING A TRANSFORMATEUR DIFFERENTIEL. ....	51
<b>FIGURE II.13</b> SCHEMA DE MESURE DE LA RESISTANCE TRANSVERSALE.....	51
<b>FIGURE II.14</b> SCHEMA DE MESURE DE LA RESISTANCE SUPERFICIELLE. ....	52
<b>FIGURE III.1</b> CONSTITUANTS D'UN CABLE A HAUTE TENSION. ....	57
<b>FIGURE III.2</b> ECHANTILLON PRELEVE DE L'ISOLANT DU CABLE EN PRC.....	58
<b>FIGURE III.3</b> L' APPAREIL DE MESURE, LE AGILENT TECHNOLOGIE CARY 630 FTIR. ....	59
<b>FIGURE III.4</b> ECHANTILLON PRELEVE ET MIS DANS LE CREUSET. ....	60
<b>FIGURE III.5</b> APPAREIL STA PT 1600, LINSEIS. ....	61
<b>FIGURE III.6</b> APPAREIL RIGAKU MINIFLEX 600 X RAY DIFFRACTOMETER. ....	62
<b>FIGURE III.7</b> ECHANTILLON EN PRC POUR L'ANALYSE MEB. ....	63
<b>FIGURE III.8</b> MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE MEB. ....	63
<b>FIGURE IV.1</b> SPECTRE INFRAROUGE DU POLYMERE PRC ISOLANT A L'ETAT VIERGE. ....	67
<b>FIGURE IV.2</b> LE DIAGRAMME DE DIFFRACTION DES RAYONS X DE L'ECHANTILLON PRC A L'ETAT VIERGE. ....	69
<b>FIGURE IV.3</b> LE THERMOGRAMME ATG DE L'ECHANTILLON PRC A L'ETAT VIERGE.....	71
<b>FIGURE IV.4</b> THERMOGRAMME DE LA DTG DU PRC VIERGE.....	72
<b>FIGURE IV.5</b> LES PHOTOS MEB DE L'ECHANTILLON PRC A L'ETAT VIERGE.....	73

# Liste des tableaux

<b>TABLEAU I.1</b> MATERIAUX CONDUCTEURS UTILISES POUR LES CABLES DE TRANSMISSION DE PUISSANCE.....	16
<b>TABLEAU I.2</b> RESISTIVITE SPECIFIQUE ET SON COEFFICIENT DE TEMPERATURE.....	16
<b>TABLEAU I.3</b> PROPRIETES DES ISOLANTS.....	18
<b>TABLEAU I.4</b> PROPRIETES THERMIQUES DES ISOLANTS.....	19
<b>TABLEAU I.5</b> DIFFERENTES CONSTITUANTES D'UN CABLE DE TRANSPORT D'ENERGIE ELECTRIQUE ISOLE AU PRC.....	23
<b>TABLEAU III.1</b> PRINCIPALES PROPRIETES DU POLYETHYLENE UTILISE POUR LA FABRICATION DE PRC.....	55
<b>Tableau IV.1</b> Capacité C, facteur de perte $\text{tg}\delta$ , permittivité $\epsilon_r$ et indice de perte $\text{tg}\delta$ . $\epsilon_r$ du PRC.....	67
<b>TABLEAU IV.2</b> LES DIFERENTES BANDES D'ABSORPTION CARACTERISTIQUES DU PRC VIERGE. .....	68
<b>TABLEAU IV.3</b> CARACTERISTIQUES DES PICS DU SPECTRE DRX DE L'ECHANTILLON DE PRC VIERGE.....	69
<b>TABLEAU IV.4</b> TAUX DE CRISTALLINITE DE L'ECHANTILLON ANALYSE DE PRC VIERGE.....	70

## Liste des abréviations

**ATD:** Analyse thermique différentielle

**ATG:** Analyse thermogravimétrique

**BT:** Basse tension

**DRX:** Diffraction a rayon X

**FTIR:** La spectroscopie infrarouge a transformé de fourrière

**HDPE:** Polyéthylène haute densité

**HT:** haute tension

**LDPE:** Polyéthylène basse densité

**MEB:** Microscope électronique à balayage

**MT:** Moyenne tension

**PE:** Polyethylene

**PRC:** Polyethylene réticulé chimiquement

**PRS:** Polyethylene réticulé au silane

**PVC:** Polychlorure de vinyle

**THT:** Tres haute tension

**XLPE:** Crosse-linked polyethylene

**C0:** Capacité du vide [F]

**CX:** Capacité du branche [F]

**d:** Distance inter électrode [mm]

**EL:** Rigidité diélectrique longitudinale [V/m]

**ET:** Rigidité diélectrique transversal [V/m]

**Rs:** Resistance superficiel

**Rt:** Resistance transversal

**Rx:** Resistance de branche

**Uc:** Tension de contournement

**Up:** Tension de perforation

**Zx:** impédance de branche

**$\theta$  :** Angle de diffraction des rayons X

**$\lambda$  :** Longueur d'onde

**$\epsilon_0$ :** Permittivité vide

**$\epsilon_r$  :** Permittivité relative

**$\rho_s$  :** Résistivité superficielle

**$\rho_t$  :** Résistivité transversal

**n:** Ordre de réfraction

**$\text{tg}\delta_x$ :** Facteur de perte diélectrique

# Introduction générale

Il est vrai que le progrès technique et social est directement lié au développement du processus de production, de transport, de distribution et de consommation de l'énergie électrique. Mais, il est vrai aussi que la consommation de l'énergie électrique croît avec le progrès technique. C'est pour cela que le domaine du génie électrique demeure l'un des principaux domaines scientifiques qui réclame actuellement de plus en plus d'investigations. On conçoit alors que tous systèmes électriques, quelles que soient les contraintes auxquelles ils sont soumis, fasse l'objet de nombreux travaux de recherche.

A l'ère du « tout électrique » que nous vivons, la continuité de service est exigée par le client dont la consommation en énergie électrique ne cesse de croître. Cette exigence ne peut être satisfaite sans la continuité de distribution d'énergie électrique qui, à son tour, exige un dimensionnement correct de chaque élément du réseau : lignes de haute tension, transformateurs et câbles électriques.

Le fonctionnement d'un site de production d'électricité implique la mise en œuvre de différents réseaux constitués de câbles isolés. La diversité des câbles employés est très grande car les solutions techniques ayant conduit à leur fabrication sont adaptées aux différentes fonctions (communication, transit d'énergie, ...) et conditions d'exploitation (niveau de tension, environnement, niveau de sûreté,...).

L'utilisation des matériaux polymères nous offre de grands avantages, à l'exemple des câbles haute tension, où ces matériaux utilisés pour leur isolation, sont moins polluants et plus économiques par rapport aux papiers imprégnés. Leur principal avantage réside surtout dans leur facilité de production. Le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC), grâce à sa structure, à ses excellentes qualités diélectriques et mécaniques et par suite de son bon comportement aux contraintes thermiques, est devenu un produit de remplacement du Polyéthylène (PE) dans la fabrication des câbles de transport d'énergie électrique. Cependant et malgré toutes les précautions prises lors de leur mise en œuvre, les câbles isolés au PRC connaissent, à travers le monde, certaines difficultés en termes de durée de vie. Les principales causes de leur vieillissement prématuré sont souvent associées au processus de fabrication.

Le but de notre étude est de prendre connaissance de la technologie du câble haute tension, de manière générale, et de faire une caractérisation physico-chimique du câble 18/30 kV en PRC, de manière particulière, afin de répertorier ses avantages, mais surtout de dévoiler

ses défaillances. Ceci en vue de comprendre le pourquoi des fins de vie parfois prématurées du câble en PRC, ce qui n'est pas sans conséquences, qui sont souvent des répercussions techniques, mais aussi économiques.

Pour répondre à ces attentes, nous avons reparti notre travail sur quatre chapitres.

Le premier chapitre sera, en particulier, consacré à la technologie du câble. Nous parlerons des polymères utilisés pour l'isolation des câbles haute tension et nous focaliserons toute notre attention sur le câble isolé au PRC.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les multiples techniques et outils qui nous permettront de caractériser le câble isolé au PRC à l'état vierge.

Nous présenterons, dans le troisième chapitre, les protocoles expérimentaux de réalisation des mesures électriques et des analyses chimiques en vue de la caractérisation du câble en PRC.

Le quatrième chapitre illustrera l'ensemble des résultats de mesures électriques et des analyses chimiques ainsi que leurs interprétations.

Et nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

---

# **CHAPITRE I**

# **TECHNOLOGIE DU CÂBLE**

---

### I.1 Introduction

Le transport et la distribution de l'énergie électrique sont assurés par des lignes électriques dont la technologie diffère suivant le mode de pose : aérien, sous terrain, sous-marin ou à la surface de la terre.

Le mode souterrain utilise différents types de câbles spécifiques, et adapté à la zone de distribution et de transport, mais aussi au niveau de tension sous lequel il doivent fonctionner.

Dans ce chapitre, nous parlerons de la technologie du câble haute tension, et en particulier du câble isolé au PRC.

#### I.1.1 Définition

Une haute tension est toute tension qui engendre, dans les composants d'un système, des champs électriques suffisamment intenses pour modifier, de manière significative, les propriétés de la matière, en particulier des matériaux isolants. Alors, l'étude de la haute tension aboutit à la conception et à la réalisation de produits, appareils et systèmes aptes à générer et à supporter des champs électriques élevés.

Les systèmes à haute tension sont souvent le siège de phénomènes non linéaires et complexes, où se produisant à partir d'un seuil. Exemple : l'arc électrique, l'effet couronne, le claquage des matériaux isolants (solides, liquide), etc. [1]

#### I.1.2 Utilité de la haute tension

L'énergie électrique sort des centrales avec une tension de quelques kV (5 à 10 kV), le transport se fait avec une haute tension (220 kV et plus) pour minimiser les pertes Joule dans la ligne et de pouvoir transiter de grandes puissances. Transformateur idéal :

$$P_{\text{entrée}} = P_{\text{sortie}} \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow I_2 = I_1 U_1 / U_2$$

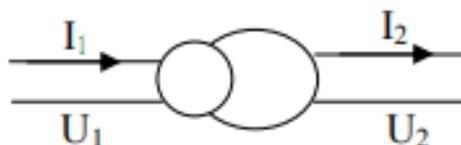


Figure I.1 Transformateur élévateur.

D'après l'expression ci-dessus, l'élévation de la tension ( $U_2 > U_1$ ) permet de limiter les pertes en diminuant le courant et permet également de faire transiter de plus grandes puissances. Par exemple, pour évacuer l'énergie d'un groupe de 100 MVA, le courant sera de 260 A sous 220 kV mais de 4 000 A sous 15 kV. Le transport de 4 000 A sous 15 kV entraînerait des coûts d'équipement et surtout de pertes par effet Joule inadmissibles. Les courants de court-circuit et leurs effets seraient aussi considérablement augmentés. Or, il existe maintenant des groupes de 1 300 MVA ! Donc on est conduit à augmenter la tension des réseaux de transport. Evidemment, il y a une limite supérieure principalement constituée par le coût des isolements [2].

### I.1.3 Domaine d'application de la haute tension

- Réseaux électriques
- Electrostatique
- Médecine
- Electronique
- Foudre
- Impulsions électromagnétiques d'origines nucléaires (NEMP)

### I.1.4 Classification

On peut classer la tension d'un réseau de :

**Très basse tension (abréviation T.B.T.)** lorsque la tension ne dépasse pas 50 volts en courant alternatif ou 120 volts en courant continu lisse.

**Basse tension A (abréviation B.T.A.)** lorsque la tension excède 50 volts sans dépasser 500 volts en courant alternatif ou excède 120 volts sans dépasser 750 volts en courant continu lisse.

**Basse tension B (abréviation B.T.B.)** lorsque la tension excède 500 volts sans dépasser 1 000 volts en courant alternatif ou excède 750 volts sans dépasser 1 500 volts en courant continu lisse.

**Haute tension A (abréviation H.T.A.)** lorsque la tension excède 1 000 volts en courant alternatif sans dépasser 50 000 volts, ou excède 1 500 volts sans dépasser 75 000 volts en courant continu lisse.

**Haute tension B (abréviation H.T.B.)** lorsque la tension excède 50 000 volts en courant alternatif ou excède 75 000 volts en courant continu lisse [3].

### I.1.5 Réseaux HT dans le monde

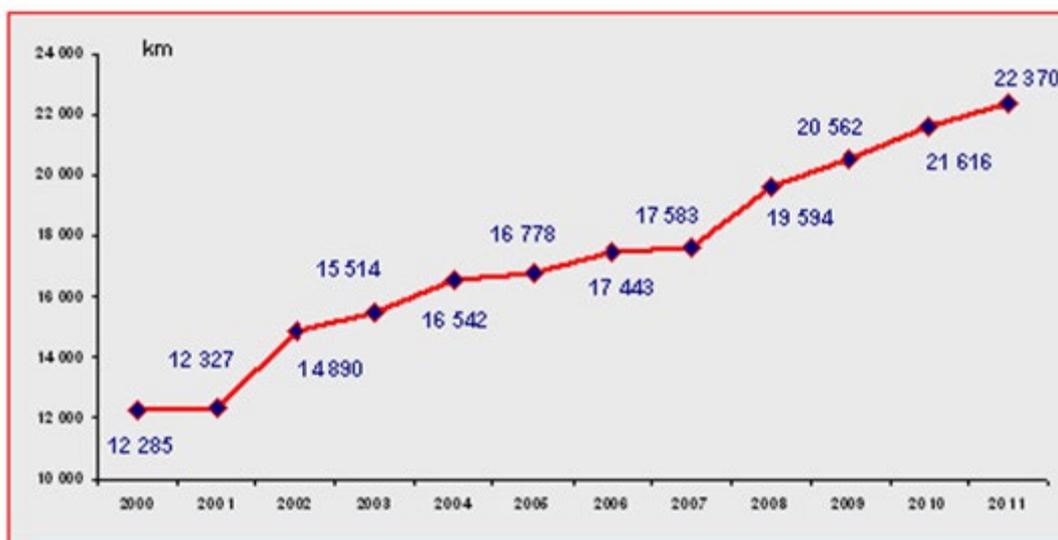
Dans la plupart des pays la tension maximale varie entre 220 et 500 kV, à l'exemple de l'EUROPE DE L'OUEST qui a une tension maximale de 400 kV.

Quelques pays industrialisés font l'exception, comme :

- ✓ Les USA où la tension maximale de transport est de 765 kV.
- ✓ Le CANADA, où celle-ci est de 735 kV.
- ✓ Le JAPON possède une ligne de 1000 kV.

Quant au Réseau Interconnecté National, s'étalant sur le nord du pays et couvrant les régions de Béchar, Hassi Messaoud, Hassi R'Mel et Ghardaia, est alimenté par une quarantaine de centrales de production d'électricité, reliées entre elles à travers un réseau de transport en 220 kV et 400 kV, permettant le transfert d'énergie des sites de production vers les centres de consommation.

La longueur totale du réseau national de transport de l'électricité, tous niveaux de tensions confondus (60 à 400 kV), est estimée à fin 2011 à 22 370 km, soit un accroissement de 21.3 % par rapport à 2007.



**Figure I.2 :** Évolution de la longueur du réseau transport électricité en km Période : 2000-2011.

Le réseau électrique national a été renforcé par une dorsale électrique THT 400 kV allant de l'Est jusqu'à l'Ouest du pays. L'interconnexion du système électrique national avec celui du Maroc en 400 kV a été achevée et mise en service en 2010, l'interconnexion avec la Tunisie est en cours de finalisation.

La consistance globale de la dorsale nord en cours de réalisation s'élève à 3 572 km. La dorsale électrique Nord – Sud est complémentaire à celle du Nord, elle est de consistance globale qui s'élèvent à 1912 km, permettra de :

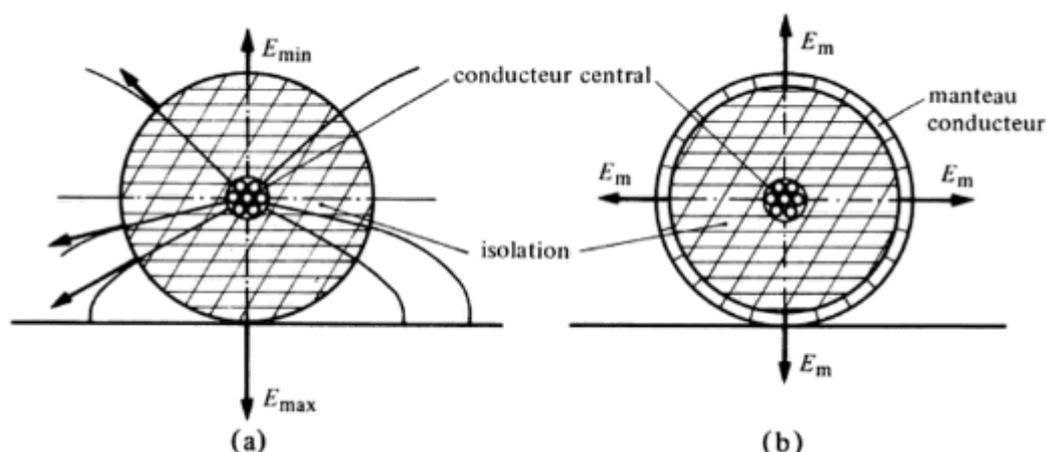
- Renforcer la sécurité globale du réseau,

- Renforcer le réseau entre les pôles de Hassi Messaoud et Hassi R'Mel.

## I.2 Généralités sur les câbles de haute tension

### I.2.1 Définition

Un câble électrique peut se définir comme étant constitué par un ou plusieurs conducteurs recouverts chacun de couches isolantes appropriées, l'ensemble étant revêtu d'une gaine de protection commune, d'où on retrouve les câbles de transmissions de l'énergie électrique d'un point à un autre en de très grande quantités, dite câbles électrique à haute tension [4].



**Figure I.3 :** Câble unipolaire (a) sans manteau (cette solution est à proscrire car la répartition du champ électrique est en fonction du mode de pose), (b) avec manteau [5].

### I.2.2 Différentes mise en place des câbles

L'énergie électrique est transportée par des câbles qui sont mis en place de quatre différentes façons, on trouve des câbles :

- Aérien
- Souterrain
- Sur la surface de la terre
- sous-marin

Il existe, toutefois, trois options pour l'installation des câbles souterrains :

- en tunnel.
- en fourreaux avec disposition en trèfle.
- en fourreaux avec les câbles simplement déroulés sur une surface plane, en nappe.

Quand le câble est directement enfoui, une tranchée est creusée, le câble installé sur une semelle dure et ensuite couvert d'un sable spécial à basse résistance thermique (ou de ciment maigre) puis la tranchée est rebouchée. Cette solution est plus économique que la construction d'un tunnel. Par contre dans ce dernier cas, la section des câbles est moins importante et on envisage de passer le câble dans un tuyau rigide.

L'installation des câbles sous-marins est quelque peu différente, des navires spéciaux transportent et installent le câble. Si le courant marin est important ou que l'on veut placer le câble avec précision, un robot est utilisé au fond de la mer pour mettre le câble en place. Il creuse une tranchée afin de protéger le câble contre les dommages potentiels, provenant des ancrs des navires ou des équipements de pêche par exemple. Pour les très grandes profondeurs, ces risques n'existant pas, l'enfouissement n'est pas nécessaire.

### I.2.3 Principaux types de câbles

#### a) 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 10 kV/mm, c'est-à-dire environ 3fois la rigidité diélectrique de l'air aux conditions normales [5].

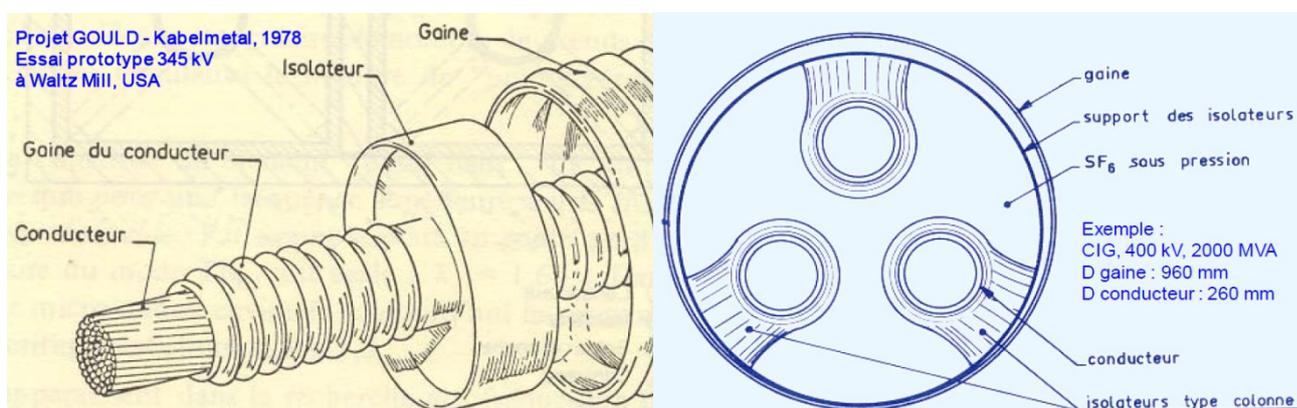


Figure I.4 : Câble isolé au gaz, à gauche structure souple, à droite structure tripolaire [6].

### Avantages

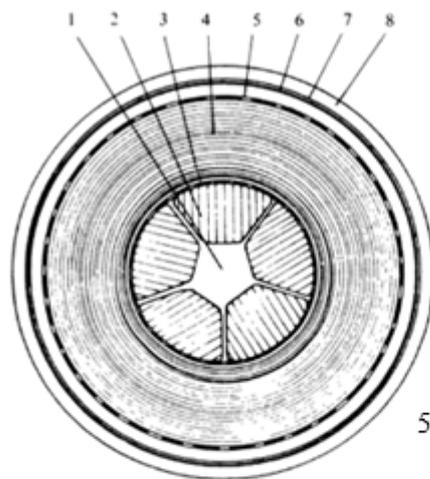
- Capacités de transport élevées,
- Possibilité technique de transport à grande distance,
- Matériel statique,
- Pertes réduites,
- Rayonnement électromagnétique très faible dans son environnement.

### Inconvénients :

- Longues durées de réparation,
- Cout élevé,
- Encombrement important,
- Nécessite d'un contrôle de pression,
- Difficulté de mise en œuvre : mise sous vide ...
- Longue durée de réparation [6].

### b) Câbles isolés au papier imprégné :

Il 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 [5].



1- Conduit d'huile.

2- Conducteurs sectoriels.

3- Papier semi-conducteur et écran magnétique

4- isolation.

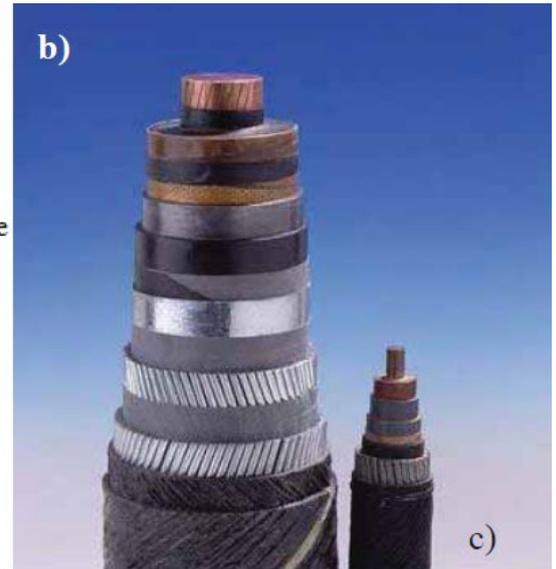
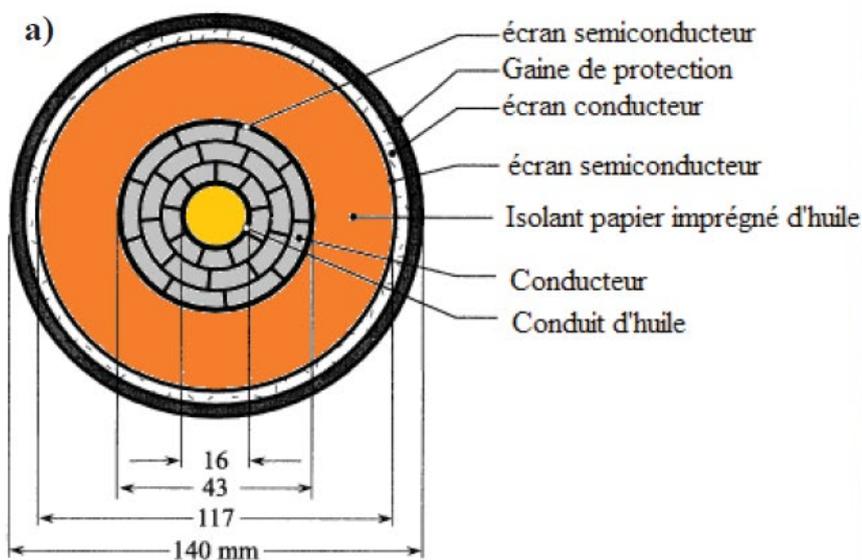
5- écran Hochstadter et papier semi-conducteur.

6- manteau de plomb.

7- armure de pression.

8- manteau synthétique.

**Figure I.5 :** Coupe d'un câble unipolaire, isolé au papier imprégné [5].



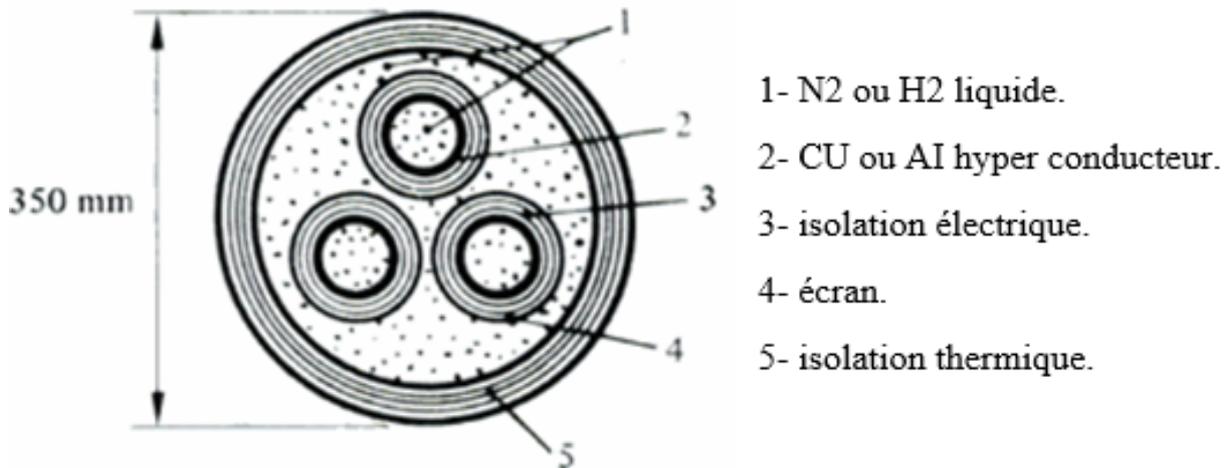
**Figure I.6 :** (a) Schéma de la section d'un câble HV à isolation par huile sous pression interne, (b) à gauche une photographie d'un câble à huile imprégnée en masse 450 kV et (c) à droite une photographie d'un câble 150 kV de 1954 [7].

Dans le cas de l'isolation par papier imprègne, l'isolation feuilletée, est représentée exclusivement par du papier à isolation plomb (PILC). Des couches de papier imprègne sont placées les unes sur les autres pour créer l'isolation du câble. Le papier imprègne est le plus ancien et le matériau le plus utilisé. En général, le papier est imprègne d'huile ou de gel qui a 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 [30].

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 [31]. En fait, il y a eu une fermeture des usines de fabrication du papier imprègne 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 [32].

**c) Câble hyperconducteur :**

Un câble hyperconducteur 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 [5].



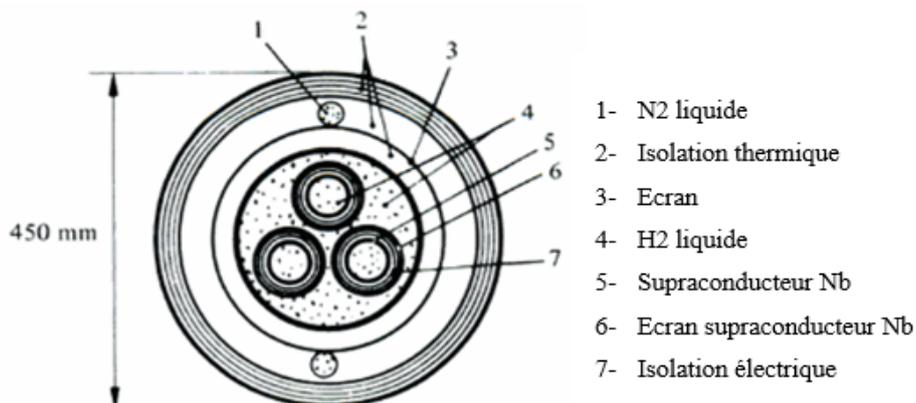
**Figure I.7 :** Câble hyper conducteur triphasé [5].

**d) Câble supraconducteur**

La conception d'un câble supraconducteur triphasé est identique à celle des câbles hyper conducteurs, 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 ( $T < 10\text{ K}$ ),
- L'isolation thermique du manteau parcourue par des tubes contenant de l'azote liquide ( $T < 70\text{ K}$ ).

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



**Figure I.8 :** Câble supraconducteur triphasé [5].

### e) Cryocâbles :

Le principe des cryocâbles est fondé sur leur capacité à conduire le courant électrique de très forte densité pour des températures assez élevées par rapport aux supraconducteurs à basse température critique [20]. L'abaissement de la température d'un conducteur engendre, en effet, soit une diminution de sa résistivité, soit pour certains matériaux une transition vers l'état supraconducteur obtenue pour une température dite *critique*. L'utilisation de ces deux propriétés a été envisagée dans des cryocâbles respectivement conducteurs et supraconducteurs.

#### • Cryocâbles conducteurs

Ils pourraient être d'une conception inspirée de celle des câbles classiques avec des conducteurs en aluminium raffiné et une isolation électrique au papier synthétique imprégné d'azote liquide. Le refroidissement à l'azote liquide (77 K) apparaît en effet plus favorable, en particulier pour des raisons techniques, économiques et de sécurité, que le refroidissement à l'hydrogène liquide (20 K) qui avait été envisagé à l'origine.

L'intérêt de ce type de cryocâble reste toutefois limité en raison du facteur de mérite des réfrigérateurs (de 7 à 10), c'est-à-dire que la compensation de 1 W de pertes à 77 K nécessite la fourniture de 7 à 10 W à la température ambiante] qui compense partiellement la réduction de la résistivité électrique du conducteur : ( $\rho_{300\text{ K}} \approx 10 \cdot \rho_{77\text{ K}}$ ).

#### • Cryocâbles supraconducteurs

Divers projets de cryocâbles supraconducteurs à courant continu et à courant alternatif (figure I.9) ont été étudiés dans les années 1970 avec des conducteurs à base de niobium.

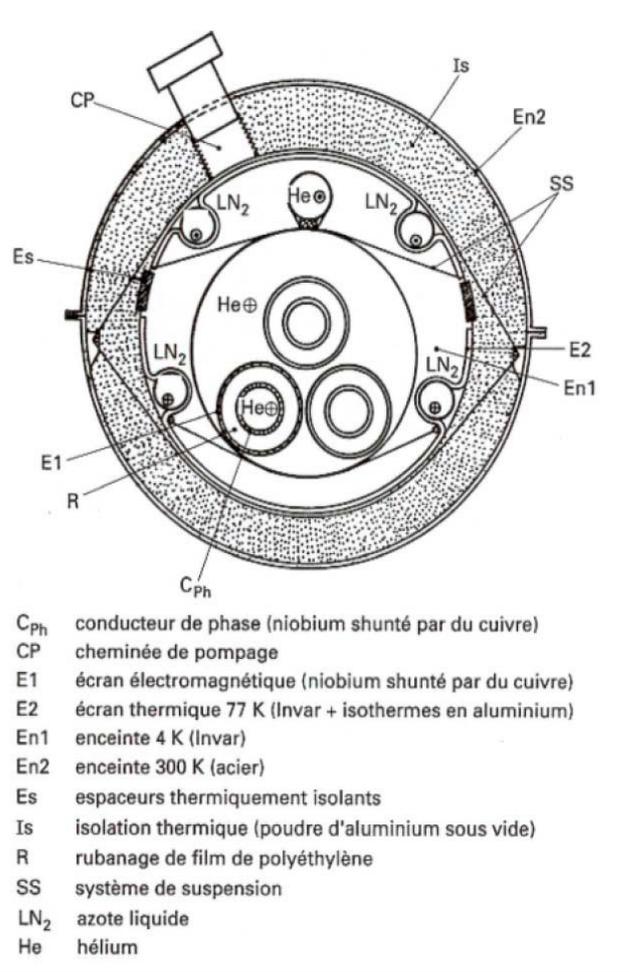
Ces câbles devaient fonctionner à une température voisine de celle de l'hélium liquide (4,2 K). Ces études ont montré que ces matériels posaient des problèmes d'exploitation difficiles (indisponibilité sur défaut de 3 à 5 mois) et que leur seuil

d'intérêt économique n'apparaissait que pour des puissances unitaires supérieures à 3 000 à 5 000 MVA. L'étude de ces matériels fut en conséquence suspendue.

La découverte récente de nouvelles céramiques supraconductrices à hautes températures critiques conduit aujourd'hui à réévaluer les perspectives des cryocâbles supraconducteurs.

Trois familles de céramiques ont, à ce jour, des températures critiques suffisamment élevées pour permettre d'envisager un refroidissement à l'azote liquide (77 K) :

- YBaCuO  $T_c = 95$  K
- BiSrCaCuO  $T_c = 115$  K



**Figure I.9 :** Cryocâble supraconducteur à courant alternatif triphasé.

- TIBaCaCuO  $T_c = 125$  K

Très vite, des échantillons de câbles supraconducteurs cryogéniques ont été conçus et produits par des laboratoires. Un grand effort de recherche sur les matériaux diélectrique cryogénique est fait. Pourtant, le paramètre le plus compliqué à réaliser dans ce type de câble est l'isolation diélectrique. Cette isolation, qui est un paramètre important en haute tension, devient difficile à réaliser en milieu cryogénique. 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 aux câbles conventionnels, les pertes devraient être réduites de moitié en utilisant un câble de transport supraconducteur pour la même puissance transitée [6]. En Chine, un programme ambitieux concerne l'introduction des lignes supraconductrices pour le réseau de transport Est-Ouest. Actuellement, une ligne en supraconducteur à haute température critique de 33,5 m de longueur, de 35 kV et 2 kA fonctionne déjà [7].

### **f) Câble à isolation synthétique :**

La découverte et la maîtrise de la fabrication de polymères synthétiques fut une avancée majeure dans la conception de l'isolation pour les câbles électriques haute tension. Ces câbles composés de XLPE sont largement utilisés en HVAC car ils présentent de nombreux avantages :

- légèreté ;
- connexion, raccords du réseau plus simples à installer ;
- entretien et réparations simples ;
- pas de risque d'inflammation ;
- faibles coût de production et de maintenance.

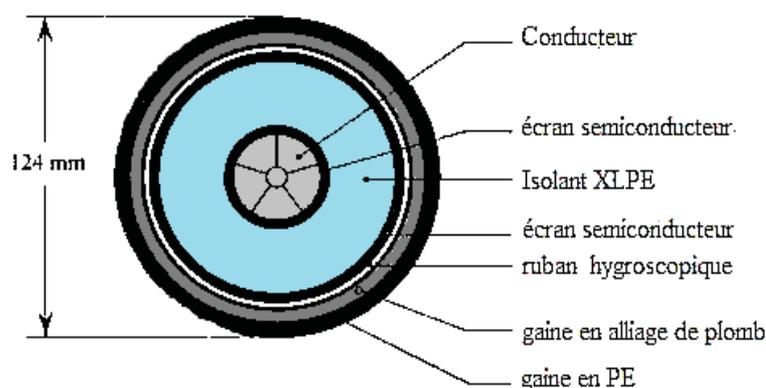
Cependant, les câbles en XLPE comportent de nombreux défauts et ils admettent des conditions d'exploitations inférieures aux estimations théoriques. Par exemple, le XLPE ne supporte pas les inversions de polarité des stations. Nous développerons ces limites ultérieurement. Depuis les années 1990, un câble en polyéthylène basse densité est exploité avec succès au Canada. Il supporte une tension de 500 kV DC [8].



**Figure I.10 :** câbles haute tension à isolation synthétique.

**f.1 Structure d'un câble haut tension à isolation synthétique :**

La structure d'un câble haute tension à isolation synthétique est constituée de plusieurs couches en matériau métallique ou polymère autour d'une âme conductrice. Les composants polymères jouent un rôle dans l'isolation et la stabilité électrique du câble. En périphérique, on retrouve des enveloppes métalliques pour le maintien mécanique et le retour de courant [8].



**Figure I. 11 :** Section d'un câble de puissance à isolation synthétique (XLPE) de 420 kV.

### f.1.1 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 [10].

#### f.1.1.1 Caractéristiques électriques

Le tableau (I.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 [11].

**Tableau I.1** : Matériaux conducteurs utilisés pour les câbles de transmission de puissance [10].

Matériaux	Avantage	Inconvénients
Aluminium	Peu couteux	Conductivité électrique et thermique est d'environ 60 % que celle du cuivre.
Cuivre	Haute conductivité électrique et thermique	Couteux
Argent	Légèrement supérieur à celui du cuivre	extrêmement couteux
Sodium	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 (I.2).

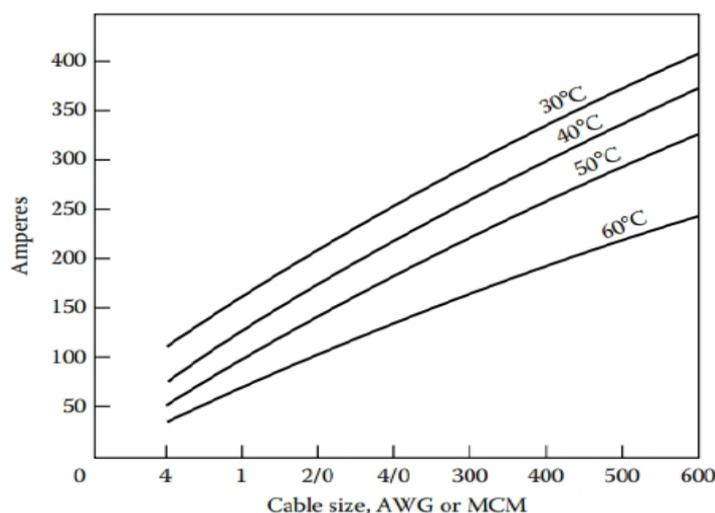
**Tableau I.2** résistivité spécifique et son coefficient de température.

	Cuivre	Aluminium
R20 : 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 température ambiante et l'élévation de température dans le système d'isolation ne doit pas dépasser la température totale admissible du conducteur.

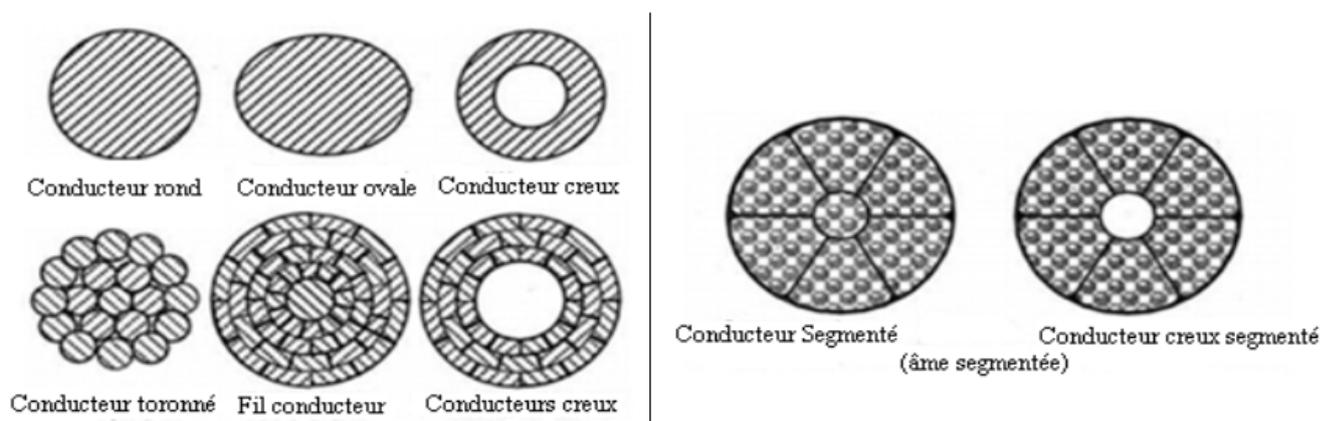
L'effet de la température est indiqué à la figure (I.13). La perte totale du câble est fonction de la résistance du conducteur à un degré inférieur à la température maximale permise. [12]



**Figure I.12 :** Influence de la température ambiante sur le courant nominal.

### f.1.1.2 Formes de l'âme conductrice :

Différents types de conception du conducteur peuvent être vus dans la Figure (I.14). Des conducteurs creux sont généralement utilisés afin de permettre la circulation de l'huile pour refroidir le conducteur. Tressé et Segmenté, ils offrent plus de flexibilité et réduisent le courant de déplacement en raison de l'effet de peau [13].



**Figure I.13 :** Différentes structures de l'âme conductrices.

### f.1.2 Isolation :

L'isolation électrique (diélectrique) est la partie la plus cruciale d'un câble puisqu'elle permet une séparation succincte 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) [14].

La température, le champ électrique et l'humidité sont les principaux facteurs qui influent sur le vieillissement de l'isolation. L'humidité avec le champ électrique renforcent l'apparition des arborescences électriques à l'intérieur de l'isolation. Les arborescences électriques sont très nocives pour l'isolation solide et peuvent même entraîner l'exondement partiel du diélectrique solide, qui mènera à la défaillance du câble. Pour prévenir et ralentir la croissance d'arborescences d'eau, différents additifs sont ajoutés dans le matériau d'isolation. Parmi les matériaux d'isolation mentionnés précédemment, le matériau TR-XLPE a montré qu'il est le plus résistant à l'arborescence d'eau [15]. Le taux d'une arborescence électrique à la croissance est typiquement  $<1$  mm / an, ce qui signifie qu'il faut environ cinq à dix ans à partir d'une arborescence électrique pour croître sur toute la couche isolante [16].

Aujourd'hui les câbles à isolation synthétique (PVC, 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 5 kV à cause du facteur de dissipation élevé (type de câble NYSEY). L'isolant XLPE (type de câble N2XS2Y) est utilisé pour des tensions plus élevées (110 kV et plus).

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

	<b>Huile</b>	<b>PVC</b>	<b>XLPE</b>	<b>P.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>	85	70	90	65-85
<b>résistance spécifique (M<math>\Omega</math>)</b>	$5 \times 10^{12}$	$7 \times 10^{11}$	$10^{14}$	$5 \times 10^{14}$
<b>champ électrique maximale kV.mm<sup>-1</sup></b>	15-25	40	95	15-40
<b>Permittivité <math>\epsilon_r</math> à 20°C</b>	2.2-2.8	3-4	2.4	3.3-4.2

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. A 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 [17]. 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.

**Tableau I.4 :** Propriétés thermiques des isolants.

	<b>Température de fonctionnement</b>	<b>Température de court-circuit</b>
<b>LDPE</b>	<b>75°C</b>	<b>125°C</b>
<b>XLPE</b>	<b>90°C</b>	<b>250°C</b>
<b>EPR</b>	<b>90°C</b>	<b>250°C</b>
<b>Papier</b>	<b>50-55°C</b>	
<b>Papier-huile</b>	<b>85-90°C</b>	

### **f.1.3 Ecran semi-conducteur sur âme :**

Des couches semi-conductrices sont utilisées des deux côtes 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 d'utiliser le champ électrique radial 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 [18].

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.

### **f.1.4 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 [18]. 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 [19]:

- Fournir un trajet de retour pour le courant de charge capacitive dans des 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.

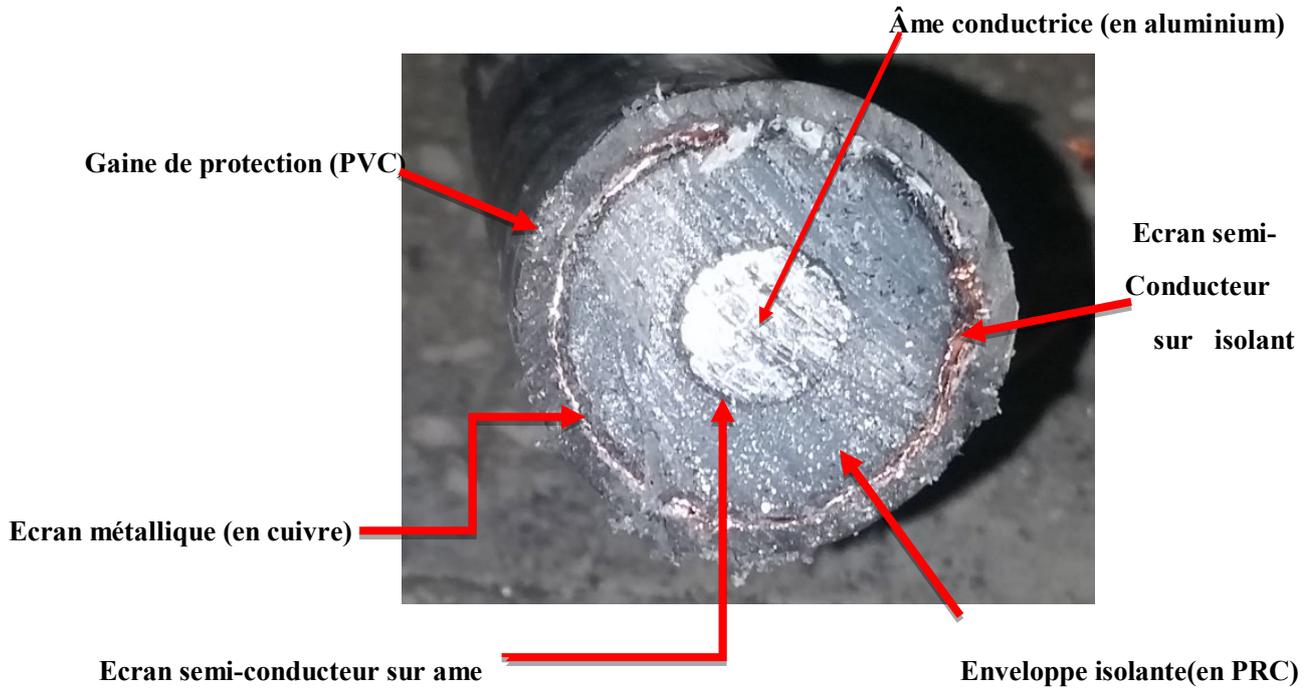
- Rôle d'étanchéité : grâce à leur technologie (écran massif, écran rubané, contrecollé ou souder...), les écrans métalliques peuvent assurer l'étanchéité radiale du câble.

### **f.1.5 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 [19].

### **I.2.4 Configuration d'un câble électrique isolé au PRC**

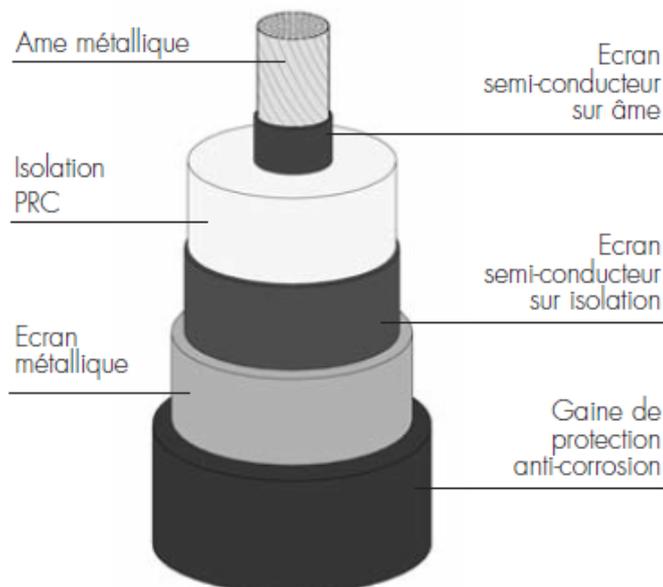
La figure (I.15) représente un schéma de configuration d'un câble haut tension en PRC 18kv/30. L'âme formée par des brins d'aluminium est entourée d'une couche semi-conductrice constituée par du noir de carbone. Cet écran semi-conducteur permet de limiter et homogénéiser le champ électrique à l'interface semi-conducteur/isolant. L'isolant est ordinairement en polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) dénommé également XLPE en anglais, entouré d'une couche semi-conductrice le tout et ensuite entouré par une gaine métallique en cuivre et une couche extérieure en PVC.



**Figure I.14 :** Coupe transversale d'un câble d'énergie électrique 18/30 kV isolé au PRC.

#### ***1.2.4.1 Différentes constituantes du câble électrique isolé au PRC***

La figure (I.16) représente les différentes constituantes d'un câble de transport d'énergie électrique isolé au PRC.



**Figure I.15 :** Principales constituantes d'un câble [20].

**Tableau I.5:** Différentes constituantes d'un câble de transport d'énergie électrique isolé au PRC [20].

<b>Élément</b>	<b>Fonction</b>	<b>Composition</b>
<b>Ame conductrice</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporter le courant</li> <li>- en service normal,</li> <li>- en surcharge</li> <li>- en court-circuit.</li> <li>• Supporter les contraintes mécaniques durant la pose</li> </ul>	<p><math>S &gt; 1000 \text{mm}^2</math> (cuivre)</p> <p><math>S &lt; 1200 \text{mm}^2</math> (aluminium)</p> <p>Câblé rond rétreint avec des fils de cuivre ou aluminium</p> <p><math>S &gt; 1000 \text{mm}^2</math> (cuivre) segmenté</p> <p><math>S &gt; 1200 \text{mm}^2</math> (aluminium) segmenté</p>
<b>Semi-conducteur interne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prévenir la concentration du champ électrique à l'interface isolant/semi-conducteur interne.</li> <li>• Assurer une liaison équipotentielle entre le conducteur et l'isolant. Lisser le champ électrique au niveau du conducteur.</li> </ul>	Semi-conducteur PRC
<b>Isolant</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Supporter les différents gradients de tension électrique pendant la vie du câble :</li> <li>- Tension simple,</li> <li>- Choc de foudre,</li> <li>- Choc de manœuvre.</li> </ul>	<p>Isolant PRC</p> <p>Les semi-conducteurs interne et externe ainsi que l'isolant même, sont co-extrudés dans une tête d'extrusion.</p>
<b>Semi-conducteur externe</b>	Assurer une liaison équipotentielle entre l'isolant et l'écran. Eviter la concentration du champ électrique à l'interface entre	Semi-conducteur PRC

	l'isolant et le semi-conducteur externe.	
<b>Ecran métallique</b>	<p>Réaliser</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un écran électrique (confiner le champ électrique à l'intérieur du câble),</li> <li>• Une étanchéité radiale (éviter le contact de l'isolant avec l'eau),</li> <li>• Un conducteur de retour des courants capacitifs et de court-circuit homopolaire,</li> <li>• Une contribution à la protection mécanique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plomb allié extrudé ou</li> <li>• Ecran de fils de cuivre, et aluminium contre-collé à une gaine PE ou</li> <li>• Ecran en aluminium soudé et contre-collé à une gaine PE</li> <li>• Combinaison fils de cuivre et gaine de plomb</li> </ul>
<b>Gaine extérieure</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Isoler l'écran métallique de l'environnement direct</li> <li>• Protéger l'écran métallique de la corrosion</li> <li>• Contribuer à la protection mécanique</li> <li>• Réduire la contribution des câbles à la propagation de l'incendie</li> </ul>	<p>Gainage isolant</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité de déposer une couche semi-conductrice pour réaliser les essais diélectriques de la gaine après la pose,</li> <li>• Gainage polyéthylène</li> <li>• Gainage HFFR</li> </ul>

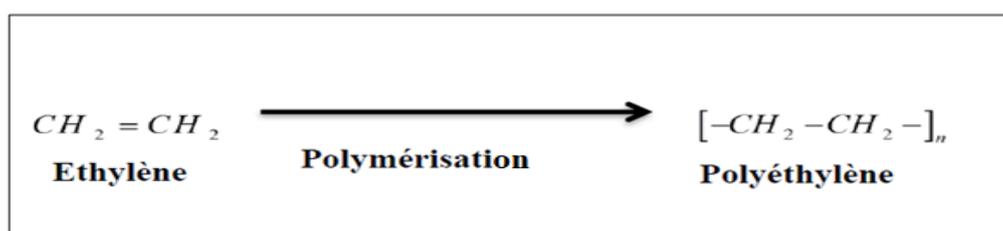
## I.3 GENERALITE SUR LES POLYMERES

### I.3.1 Définition d'un polymère

Le terme polymère (du grec polus qui signifie « nombreux, plusieurs » et mēros qui signifie « unité, partie ») ; regroupe toutes matières formées par la répétition d'un très grand nombre **n** de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui sont liés

entre eux par des liaisons primaires (liaisons covalentes). Le monomère est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactives à ses extrémités [21]).

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



**Figure I.16:** La formation de polyéthylène par polymérisation des monomères de l'éthylène [21].



**Figure I.17:** Polymérisation : réaction entre monomères pour former un produit final appelé polymère[22].

### I.3.2 Historique des polymères :

Il s'agit d'un terme utilisé dès 1866 par Berthelot qui, dans un article publié dans le Bulletin de la Société Chimique de France, notait que « le styrolène (le styrène), chauffé à 200° pendant quelques heures, se transforme en un polymère résineux ». Il désignait ainsi probablement le premier polymère synthétique reconnu. Mais c'est Hermann Staudinger, dans les années 1920, qui fut le premier à proposer la notion de polymère dans le sens que nous lui donnons aujourd'hui. Il obtint le prix Nobel en 1953 pour ses travaux qui sont à la base de toute la science des macromolécules. Ce n'est cependant qu'au cours de la décennie suivante que la théorie « macromoléculaire » a définitivement remplacé la théorie « micellaire » à laquelle elle était opposée [23].

### I.3.3 Classification des polymères :

Les polymères peuvent être classés selon divers critères qui ne s'excluent pas les uns des autres. On peut classer les polymères en quatre groupes :

#### 1. Selon l'origine

a) **Les polymères naturels** : on est entouré de polymères naturels, tels que la cellulose le caoutchouc et les résines.

b) **Les polymères artificiels** : dérivés des polymères naturels : nitrate et acétate de cellulose, ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre) [24].

c) **Les polymères synthétiques** : produits dans des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation [24].

#### 2. Selon les types de polymères :

Il existe deux types de polymères :

- Les homopolymères.
- Les copolymères.

##### a. Homopolymères

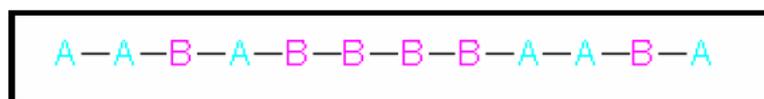
Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité (monomères). Si seulement un type de monomère est utilisé, le polymère résultant est appelé un homopolymère [25].

##### b. Copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se présenter en plusieurs structures différentes qui sont les suivantes [25] :

##### b.1 Copolymères statistiques

Ils sont caractérisés par l'alternance aléatoire des monomères A et B (figure I.19)



**Figure I.18** Structure moléculaire d'un copolymère statistique.

## b.2 Copolymères alternés

C'est un cas limite du copolymère statistique est le copolymère alterné qui est également un matériau homogène à une phase (figure I.20) :

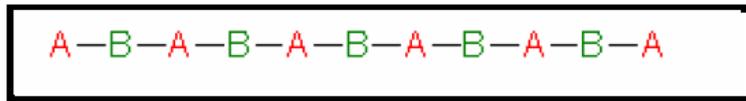


Figure I.19 Structure moléculaire d'un copolymère alterné.

## b.3 Copolymères séquencés

Ce sont des molécules linéaires ou radiales, constituées d'une alternance de longues séquences homogènes (figure I.21).



Figure I.20 Structure moléculaire d'un copolymère séquencé [26].

## b.4 Copolymères greffés

Les copolymères greffés sont des copolymères dans lesquels les branches ont une structure chimique différente de celle de la chaîne principale (figure I.22) :

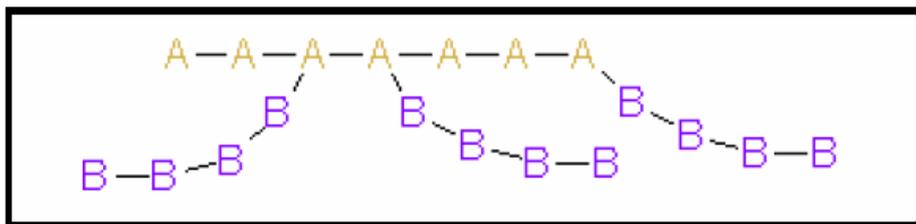


Figure I.22 Structure moléculaire d'un copolymère greffé.

Parmi ces différents types de polymères, on peut trouver des polymères polaires et d'autres non polaires.

### ➤ Les polymères polaires

Les polymères polaires sont généralement des matériaux isolants possèdent dans leur molécules en plus du carbone et de l'hydrogène, des atomes généralement électronégatifs tels que : le fluor, le chlore, l'oxygène, l'azote, qui fournissent des dipôles. Ils ont à un degré plus ou moins grand, une permittivité élevée (3,5 à 10) et un indice de pertes élevé de  $10^{-2}$  à 10.

Parmi ces polymères on peut citer :

- ✓ le poly (chlorure de vinyle) PVC.
- ✓ le poly (fluorure de vinylidène) PVDF.
- ✓ le poly (méthacrylate de méthyle) PMMA.
- ✓ les polycondensats tels que : les polyamides.
- ✓ les polystères.

### ➤ Les polymères apolaires

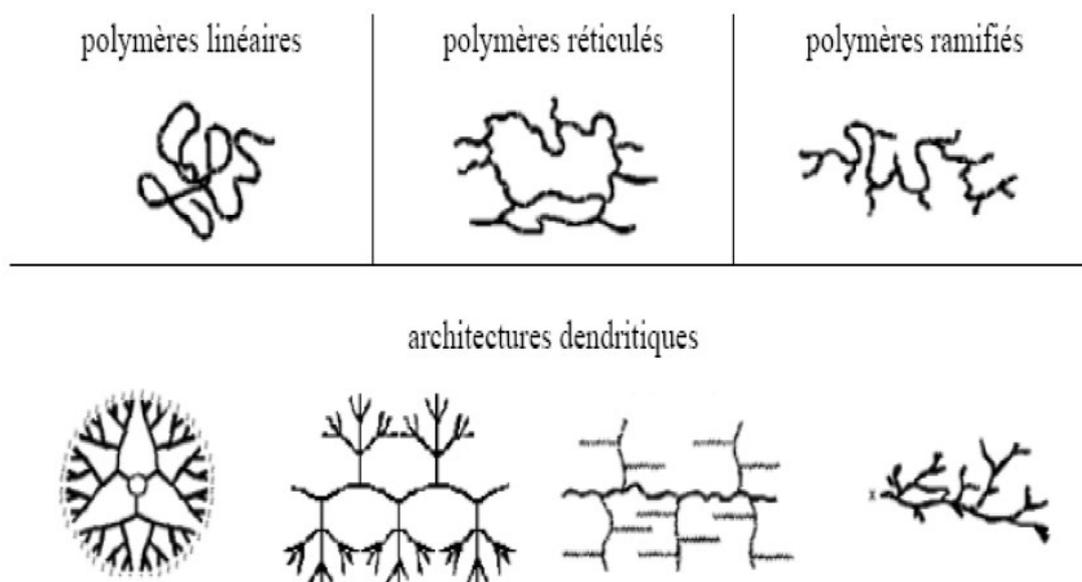
Contrairement aux polymères polaires, ces polymères présentent un indice de pertes diélectriques faibles, de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-3}$  et une permittivité quasi constante (2,5 à 3) dans un large domaine de température et de fréquence. Leur formule chimique ne contient que du carbone et de l'hydrogène et s'ils contiennent des atomes électronégatifs tels que le fluor, ces atomes sont placés symétriquement le long de la chaîne carbonée.

Parmi ces polymères on peut citer :

- ✓ le polyéthylène PE.
- ✓ le polypropylène PP.
- ✓ le poly (tétrafluoréthylène) PTFE.

### 3. Selon l'architecture :

Selon Tomalia [27], les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles : les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques.



**Figure I.23** Classification des architectures macromoléculaires selon Tamolia.

➤ **Les polymères d'architecture linéaire** sont essentiellement obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne (« vivante », depuis de nombreuses années, ou radicalaire contrôlée, plus récemment) ou des réactions de polymérisation par étapes ou polycondensation (entre monomères strictement di fonctionnels).

➤ **Les architectures ramifiées** découlent de réactions de transfert de chaîne, ou bien sont générées par des réactions de greffage. Dans tous les cas, ces architectures linéaires ou ramifiées définissent le domaine des thermoplastiques. Le Nylon, le Plexiglas (polymères linéaires), dont la production a débuté dans les années 1930, ou bien le polyéthylène basse densité (polymère branché), produit à partir des années 1960, sont des exemples de thermoplastiques.

L'introduction de liaisons covalentes entre chaînes de polymères linéaires ou ramifiés aboutit la troisième famille, **les polymères réticulés** ou « crosslinked polymers ». Paul Flory a étudié le premier ces nouvelles architectures dès le début des années 1940. Elles définissent aujourd'hui le domaine communément appelé des thermodurcissables. Les résines époxy et les caoutchoucs sont des exemples de systèmes polymères réticulés.

Les systèmes dendritiques constituent la quatrième famille d'architecture macromoléculaire.

C'est Paul Flory en 1953 qui a le premier évoqué la possibilité de synthétiser des **dendrimères** à partir de monomères multifonctionnels, dans son célèbre livre "Principles of Polymer Chemistry" [28]. Mais ce n'est qu'à la fin des années 1970 que Vögtle a décrit la première synthèse de dendrimères (qu'il a appelé « arborols »), suivi par Tomalia [29] et Newkome [30].

### 4. Selon le comportement thermique :

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

**a. 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 [31].

**b. Les thermodurcissables:** les matières thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermodurcies ou thermorigides. Dans ce cas les chaînes de départ sont beaucoup plus courtes et plus réactives, ces chaînes vont se lier ensemble chimiquement, cette réaction conduit à des liens chimiques rigides et met en jeu toutes les molécules présentes pour former un réseau tridimensionnel [32].

**c. 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 mêmes, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer [33].

## I.4 Généralités sur le PRC (polyéthylène réticulé chimiquement)

### I.4.1 Définition :

Le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC) est obtenu par la réticulation du Polyéthylène basse densité (PEbd), qui résulte à son tour, de la polymérisation du gaz éthylène  $C_2H_4$  suivant un procédé à haute pression en présence de traces d'oxygène comme catalyseur.

Le PRC est un matériau semi-cristallin avec un taux de cristallinité de 35 à 40% ; il est formé d'une phase amorphe hétérogène, de structure non ordonnée et d'une phase cristalline de structure ordonnée, ces deux phases étant fortement imbriquées l'une dans l'autre. Sa température de fusion cristalline est environ 100 à 105°C. La réticulation confère au PEbd des propriétés thermiques et mécaniques améliorées. En effet le PRC carbonise sans fondre à des températures comprise entre 250 et 300°C. Il se comporte comme élastomère du point de vue fluage à chaud et donc de la résistance aux courts-circuits. 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. La réticulation fait disparaître complètement la tendance qu'avait la résine mère à se fissurer au contact d'atmosphères agressives du type oxydante. Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celles du polyéthylène. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques et au stress-cracking qu'un polyéthylène [34].

Dans ce qui va suivre nous présentons les différents procédés de fabrication du câble isolé au PRC par diverses méthodes de réticulation.

### **I.4.2 Procédés de fabrication des câbles isolés au PRC :**

Jusqu'à la fin des années 1970, le seul procédé utilisé industriellement était la réticulation par voie chimique en présence de peroxyde et sous pression de vapeur d'eau. Depuis le début des années 1980 sont apparus de nouveaux procédés dont certains s'affranchissent du peroxyde [35].

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

La ligne à vulcanisation continue, utilisée pour la mise en œuvre des câbles isolés 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 [36]. 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 200 ppm en masse) [37]. 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.

### **b. 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 [38]. 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 [38]. 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 [36]. 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.

### **c. 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<sub>2</sub> ou SF<sub>6</sub>) sous pression, de sorte que la réticulation se produise à une température voisine de 300°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°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 [36]. 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.

### **d. 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 500kHz. 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 $\mu\text{m}$  [36]

### **e. 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 [36]. La caractéristique de ce procédé est telle qu'après la première étape, 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 [35]. 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.

### I.4.3 Avantages et inconvénients de l'isolation en PRC :

#### Avantages :

- 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
- Température de fonctionnement élevée (90°C en service normal)
- Bonne tenue en court-circuit (à 250°C).

#### 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 atteint dans le PRC plus de 100 ppm, alors que la quantité d'eau maximale admise dans les câbles HT à isolation PE est de 10 ppm.[39]

---

**CHAPITRE II**  
**OUTILS DE**  
**CARACTERISATIONS**  
**PHYSICO-CHIMIQUES**  
**ET METHODES DE MESURES**

---

### II.1 Introduction

La caractérisation d'un matériau polymère isolant électrique demande de multiples outils et techniques. Les méthodes classiques de caractérisations (physiques, chimiques et mécaniques) ne sont plus suffisantes pour analyser et interpréter correctement le comportement de ces matériaux.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un ensemble de techniques de mesures électriques et d'analyses chimiques en vue d'une caractérisation physico-chimiques du matériau PRC. Ces dernières demandent pour la plupart une maîtrise parfaite des équipements de laboratoires.

### II.2 Analyses chimiques

#### II.2.1 Analyses thermique (ATG, ATD, DSC)

##### a. Analyse thermographique ATG

L'analyse thermographique ATG (thermogravimetric analysis) est une technique mesurant la variation de masse d'un échantillon lorsqu'il est soumis à une programmation de température, sous atmosphère contrôlée. Cette variation de masse peut être une perte de masse (émission de vapeur) ou gain de masse. Elle permet de déterminer la température de dégradation td.

Une telle analyse suppose une bonne précision pour les trois mesures: poids, température et variation de température, permettant de construire les courbes de variations, afin d'assurer une justesse de leurs interprétations. 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 les températures de dégradation des matériaux tels que les polymères, ainsi que pour estimer la cinétique d'oxydation en corrosion à haute température.

- **Principe de fonctionnement :**

La technique de la thermogravimétrie repose sur les variations de masse d'un matériau soumis soit à une loi de chauffe définie par des paliers de température en fonction du temps (mode isotherme), soit à une loi déterminée par élévation constante de la vitesse de chauffe. Le dispositif est constitué d'une microbalance et d'un système de chauffage qui mesure les gains

ou les pertes enregistrées, et également doté d'un système d'acquisition. La thermogravimétrie permet, ainsi, d'obtenir une quantification de la perte d'éléments constituant les matériaux (polymères, huiles, plastifiants...) et de surveiller leurs stabilités thermiques.

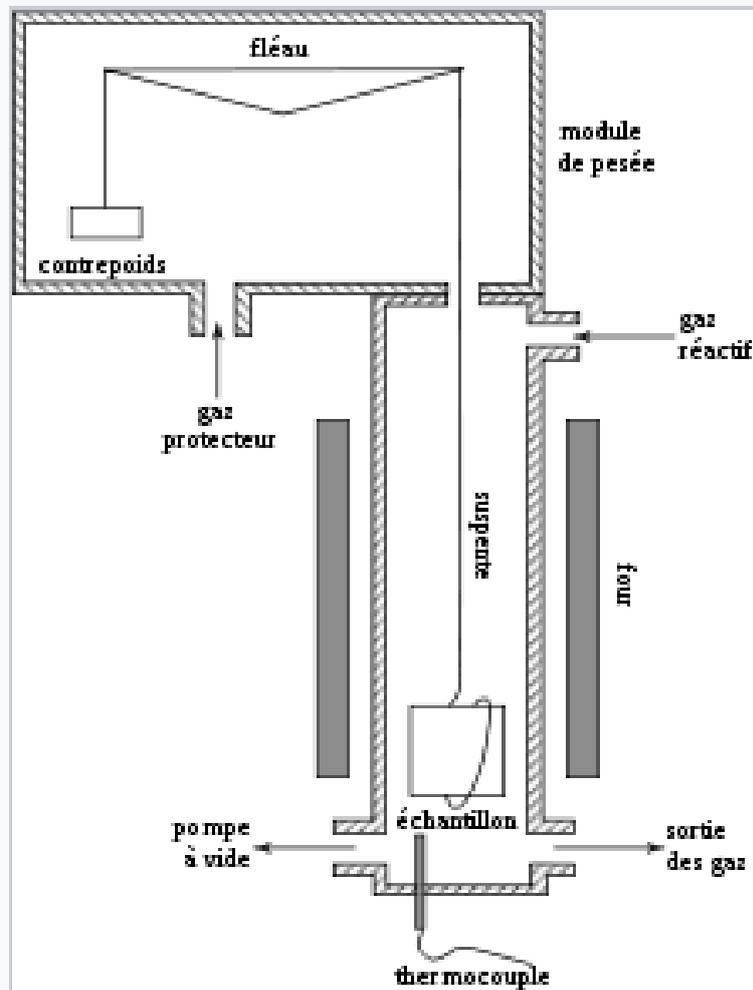


Figure II.1 : Représentation schématique du dispositif de l'ATG.

## b. Analyse thermique différentielle (ATD)

L'Analyse thermique différentielle ATD (differential thermal analysis) est une technique d'évaluation des effets thermiques d'un échantillon soumis à une programmation en température, tout comme la DSC. La différence majeure est qu'elle n'est pas quantitative. Toutefois à haute température elle donne des informations plus pertinentes.

- **Principe de fonctionnement de l'ATD** : L'ATD est une technique mesurant la différence de température entre un échantillon et une référence matériau inerte thermiquement en fonction du temps ou de la température lorsqu'ils sont soumis à une augmentation de température, sous atmosphère contrôlée. La figure II.2.II illustre la cellule expérimentale utilisée.

Type d'Analyse :

- Détermination des températures de décomposition,
- Evolution des matériaux soumis à une élévation de température,
- Détermination des températures de transformation de phases des matériaux.

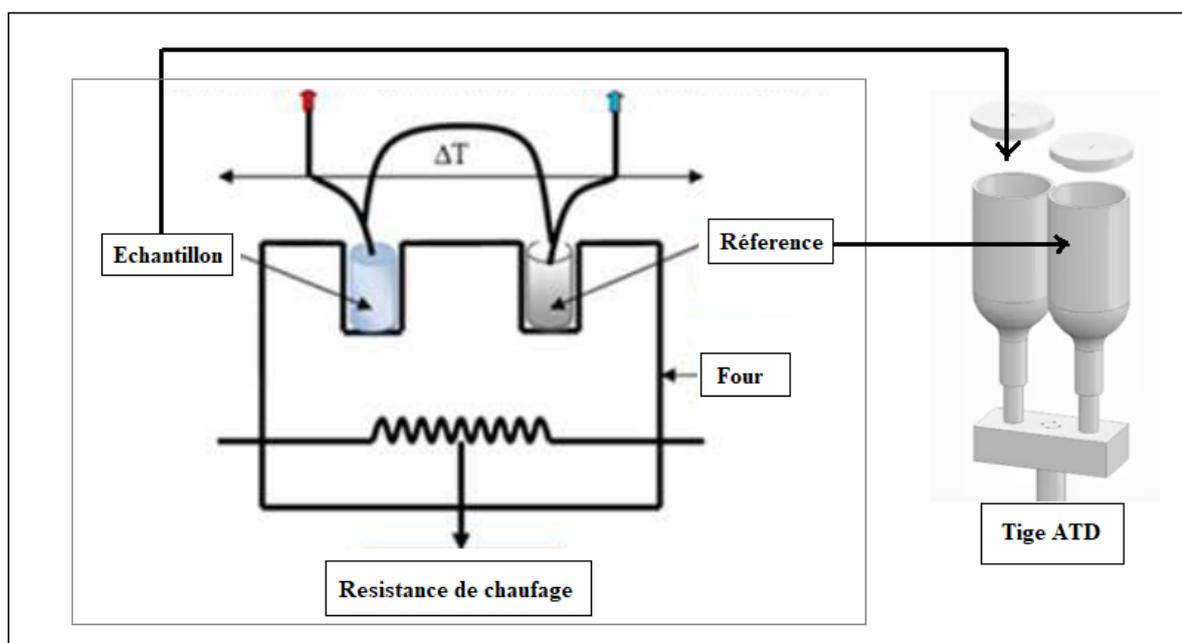


Figure II.2 : Principe de fonctionnement de l'ATD.

## Calorimétrie à balayage différentiel (DSC)

La calorimétrie à balayage différentielle *DSC* (*Differential Scanning Calorimetry*) est une technique utilisée pour étudier le comportement thermique d'un matériau. Elle permet de déterminer des transitions de phase comme:

- la température de transition vitreuse (*T<sub>g</sub>* en anglais pour *Glass transition*);
- la température de fusion et de cristallisation;
- l'enthalpie de réaction.

### • Principe de fonctionnement d'une DSC:

Une cellule de mesure DSC se compose d'un four et d'un capteur intégré avec des positions définies pour les creusets d'échantillon et de référence. Les surfaces du capteur sont connectées à des thermocouples ou peuvent faire partie du thermocouple. Cela permet d'enregistrer aussi bien la différence de température entre l'échantillon et la référence (signal DSC) ainsi que la température absolue de l'échantillon ou de la référence.

Les instruments analytiques servent à déterminer les effets thermiques caractéristiques du matériau : par exemple la température de fusion/cristallisation des thermoplastiques, les transitions vitreuses, la stabilité thermique, la composition des mélanges de caoutchouc et la réticulation des matériaux thermodurcissables.

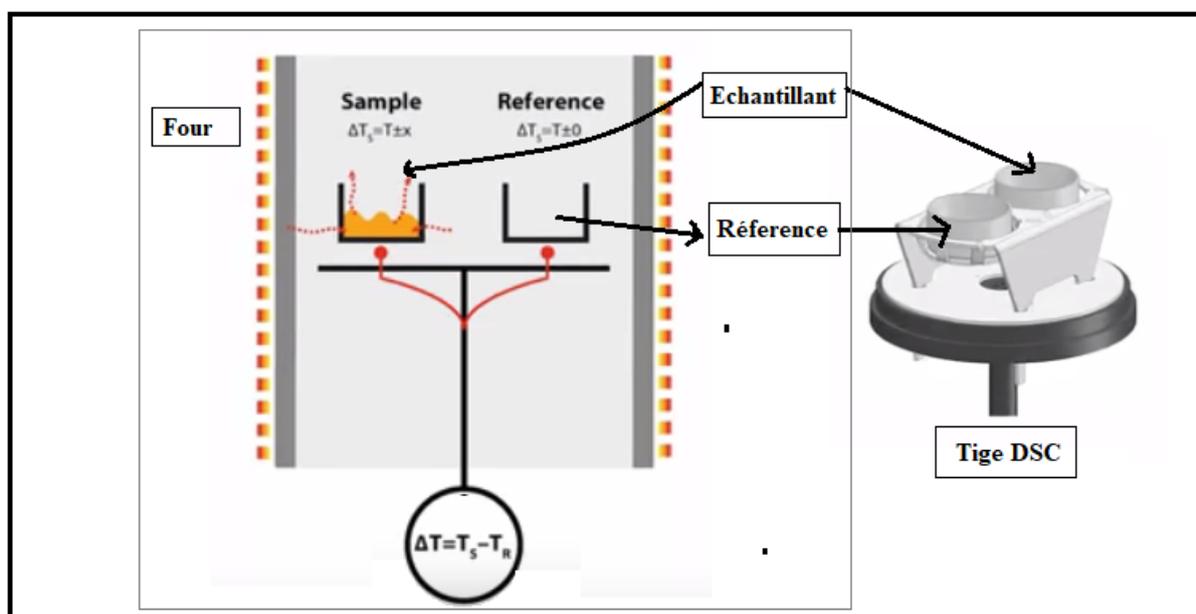


Figure II.3 Principe de fonctionnement de la DSC.

## II.2.2 La microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique de microscopie utilisée dans des domaines allant de la biologie à la science des matériaux.

En général, elle est utilisée pour une visualisation de la morphologie. Cette technique permet d'obtenir des images de surfaces en haute résolution de pratiquement tous les matériaux solides et à des échelles allant de celle de la loupe ( $\times 10$ ) à celle du microscope électronique en transmission ( $\times 500.000$  ou plus).

Son principe de base est décrit comme suite :

Un faisceau très fin d'électrons, monocinétique, balaie la surface d'un échantillon ou 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, il a peu de contrainte pour la préparation de l'échantillon, cependant ce dernier doit être conducteur électrique (ou rendu conducteur par dépôt d'une couche mince d'or ou de graphite) afin d'éviter l'accumulation de charge.

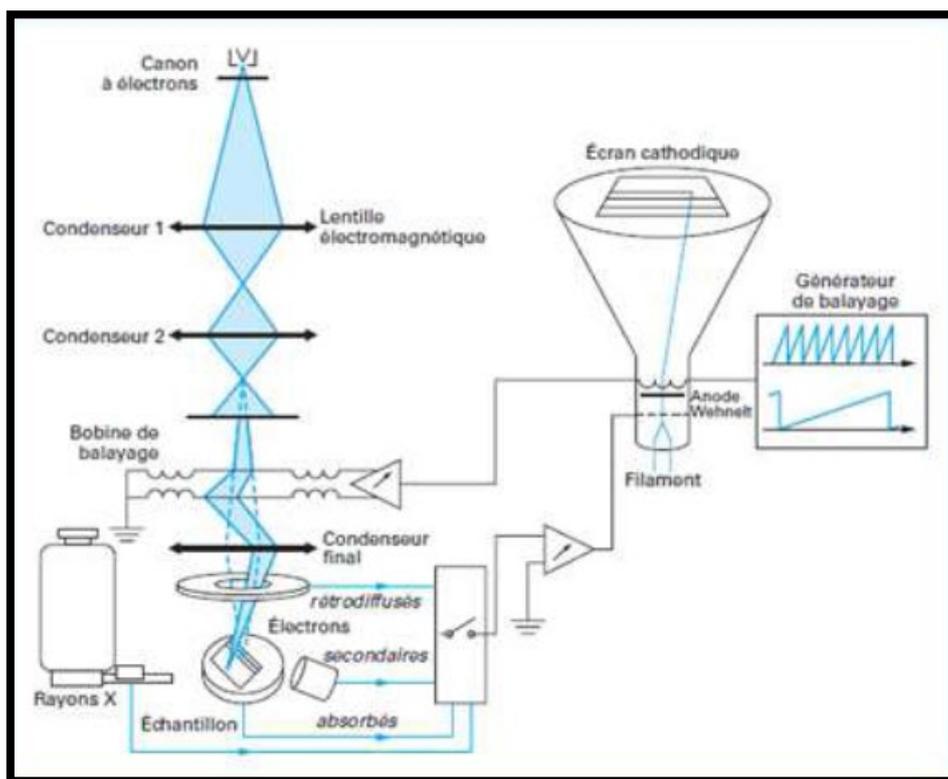


Figure II.4 : Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage.

### II.2.3 La diffraction des rayons X (DRX) :

L'identification des phases cristallines par les Rayons X est rendue possible grâce aux périodicités de l'arrangement atomique (structure) des cristaux qui sont uniques d'une phase à l'autre. Ces périodicités sont dues à un empilement de plans identiques dans un cristal et sont décrites par des longueurs correspondant aux distances entre les plans d'empilement. Cette distance entre les plans réticulaires est nommée distance réticulaire. Sur le plan pratique, un faisceau de rayons X monochromatiques et parallèles qui frappe un échantillon est diffracté dans une direction donnée par chacune des familles de plans réticulaires à chaque fois que la loi de Bragg est respectée.

La loi de Bragg est donnée par : [40]

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

Avec :

$n$  : ordre de diffraction.

$d$  : distance entre deux plans réticulaires.

$\lambda$  : longueur d'onde du faisceau de rayons X.

$\theta$  : angle d'incidence des rayons X.

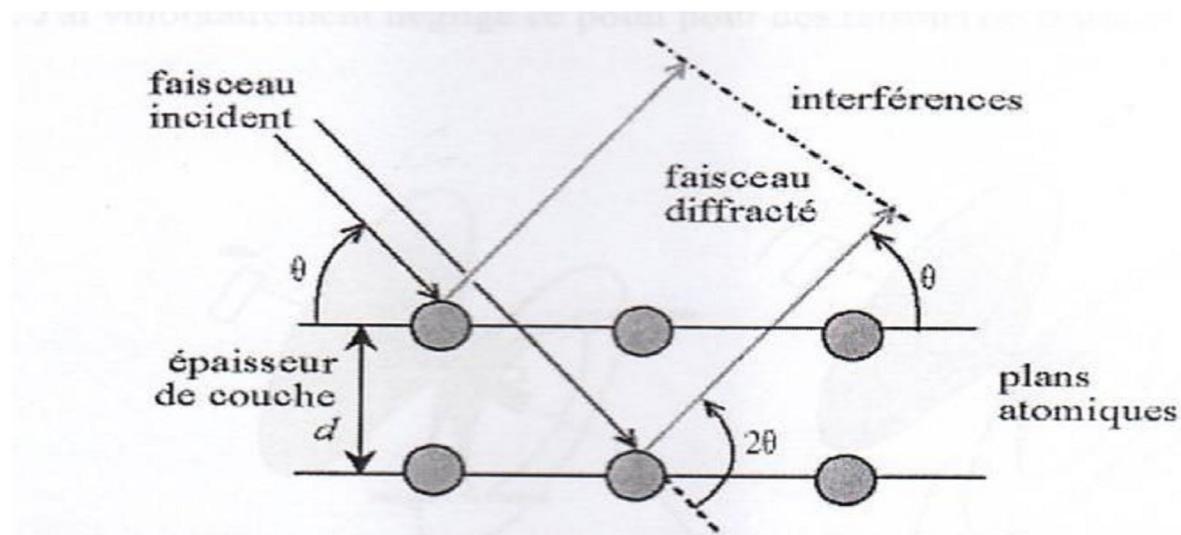


Figure II.5 : Schéma de la loi de Bragg donnant les directions où les interférences sont constructives.

Le polyéthylène et le polyéthylène réticulé sont des polymères semi-cristallins dont les distances inter-réticulaires sont également mesurables par cette technique. Ces distances sont représentatives de chaque plan cristallin, mais aussi de chaque structure cristalline.

### II.2.4 Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier(FTIR)

La lumière infrarouge (IR) est une radiation de nature électromagnétique située dans le domaine des nombres d'onde ( $\nu$ ) inférieurs à  $12500 \text{ cm}^{-1}$ . Ce domaine est sous divisé en trois catégories :

- $12500 \text{ cm}^{-1}$  -  $4000 \text{ cm}^{-1}$  : Proche IR
- $4000 \text{ cm}^{-1}$  -  $400 \text{ cm}^{-1}$  : IR Moyen
- Inférieur à  $400 \text{ cm}^{-1}$  : IR Lointain

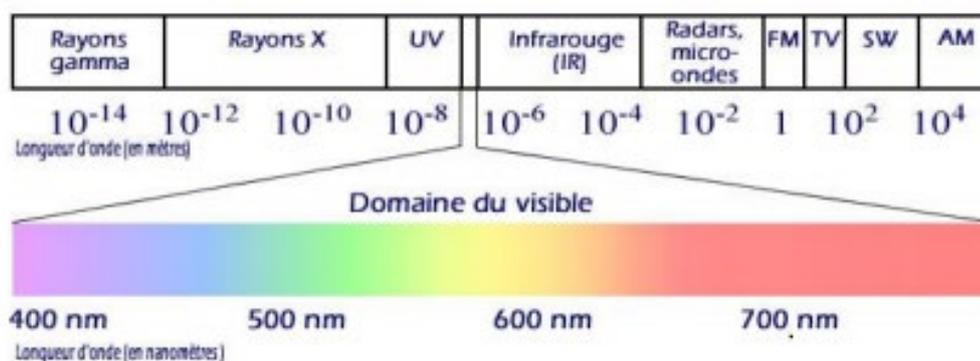


Figure II.6 : Domaine de la lumière Infrarouge.

### Principe de la FTIR :

Une molécule illuminée par des radiations dans l'infrarouge peut absorber certaines d'entre elles à des longueurs d'onde qui correspondent aux fréquences de vibration des groupements chimiques qui la constituent. La mesure de l'intensité de lumière absorbée à chaque longueur d'onde  $\lambda$  conduit à un spectre caractéristique du produit étudié. Les analyses sont le plus souvent effectuées en transmission. Le spectre obtenu représente  $I/I_0 = f(\nu)$  avec  $I$  = intensité absorbée,  $I_0$  = intensité initiale, nombre d'onde =  $1/\lambda$  exprimé en  $\text{cm}^{-1}$ .

Un spectre infrarouge est traditionnellement présenté en transmittance (fraction de l'intensité transmise par rapport à l'intensité incidente) exprimée en pourcentage et l'axe des abscisses en fonction du nombre d'onde (inverse de la longueur d'onde), sur un axe dirigé vers la gauche. Pour rappel, les relations entre les diverses grandeurs sont présentées par

$$X = 1/\lambda = \nu / c$$

Où : X est le nombre d'onde (exprime en  $\text{cm}^{-1}$ )

$\lambda$  est la longueur d'onde (exprimée en  $\mu\text{m}$ )

$\nu$  est la fréquence (exprimée en  $\text{Hz}$  ou  $\text{s}^{-1}$ )

c est la vitesse de la lumière ( $3.108 \text{ ms}^{-1}$ )

Ces techniques sont basées sur le fait que chaque liaison chimique dans un échantillon absorbe les radiations infrarouges à des fréquences Caractéristiques. L'analyse chimique quantitative repose sur la loi de **Beer-Lambert** :

$$A_i = \epsilon_i \cdot l \cdot C_i$$

Cette loi exprime la relation de proportionnalité existant entre l'absorbance  $A_i$  (déterminée grâce à la hauteur ou à l'aire du pic) et les trois paramètres que sont l'absorptivité  $\epsilon_i$  de la solution absorbant la lumière, l'épaisseur  $l$  de la cellule de mesure et la concentration  $C_i$  de l'espèce chimique analysée [41].

Pour interpréter le spectre infrarouge, on utilise des tables indiquant les plages d'absorption caractéristiques des différentes fonctions chimiques. Pour le domaine IR, les transitions d'énergie observées sont de types vibrationnels ou rotationnels. On peut en fait distinguer trois régions principales:

- **Zone des fonctions ( $4000\text{-}1500 \text{ cm}^{-1}$ )** : C'est dans cette région que se trouvent les pics correspondant aux transitions vibrationnelles d'élongation.
- **Empreinte digitale ( $1500\text{-}1000 \text{ cm}^{-1}$ )**: Il s'agit d'une région complexe comportant de nombreux petits pics correspondant notamment aux transitions vibrationnelles de déformation, ainsi qu'au couplage de différentes autres transitions vibrationnelles. Ces pics sont très difficilement interprétables, mais cette région est totalement caractéristique de la molécule. Il est donc possible d'identifier cette dernière par comparaison directe de son empreinte digitale.

- **Région de faible énergie (1000-400  $\text{cm}^{-1}$ ):** A ces énergies, on observe surtout des transitions vibrationnelles de déformation hors du plan. Il s'agit en fait d'une région moins importante que les deux précédentes.

### **Description d'un spectromètre IRTF :**

Un spectromètre comporte quatre parties essentielles.

- une source lumineuse : le global est utilisé pour le moyen IR. Il est constitué d'un bâtonnet en carbure de silicium (SiC) et fonctionne à des températures de l'ordre de 1500°C. Il rayonne un spectre continu entre 1000 et 250  $\text{cm}^{-1}$  [42].
- Un dispositif permettant de générer les interférences : l'interféromètre de Michelson pour l'IRTF.
- Un système de présentation de l'échantillon : ce système dépend de la technique spectroscopique employée. Pour l'étude, des accessoires de transmission et de réflexion totale atténuée (ATR) ont été utilisés.
- Un ou plusieurs capteurs photosensibles : le spectromètre utilisé comporte un détecteur MCT(principalement en tellure de mercure-cadmium). Il est constitué d'un monocristal en alliage de mercure cadmium tellure déposé sur un support inerte. Pour une plus grande sensibilité, ce détecteur est maintenu à la température de l'azote liquide (77 °K) [43].

Suite à cette description succincte du spectromètre IRTF, il semble intéressant de donner un schéma du spectromètre et de l'interféromètre de Michelson.

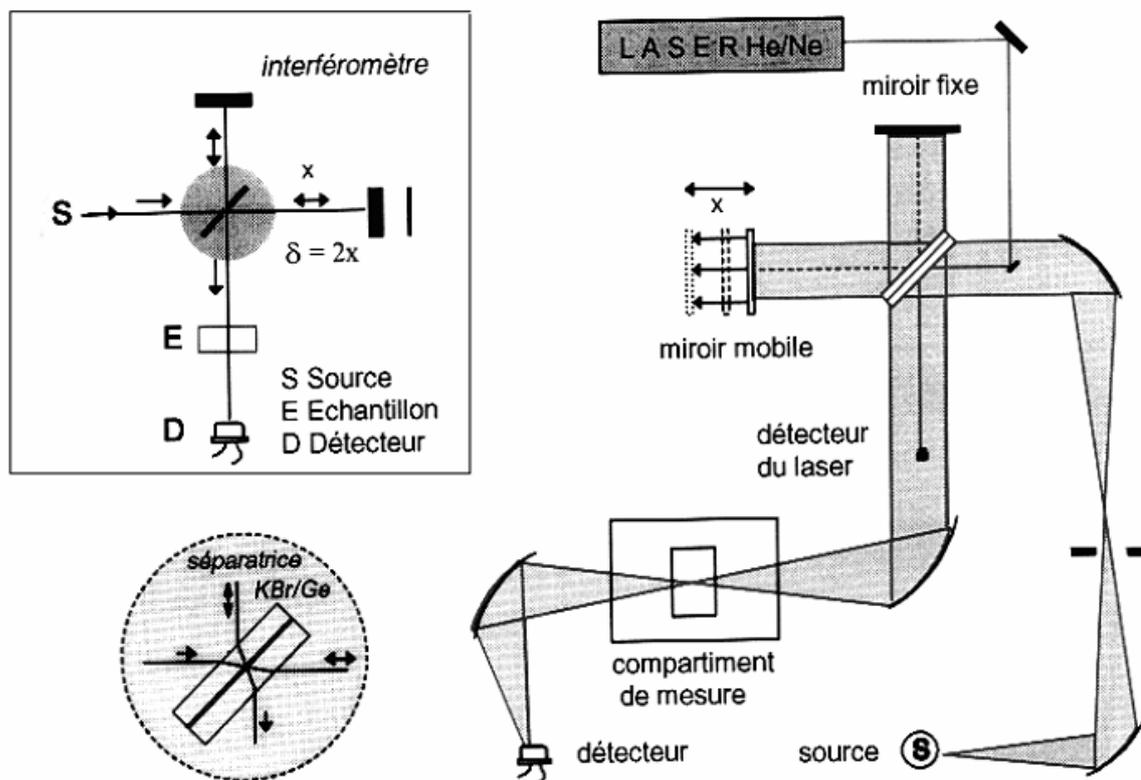


Figure II.7 : Spectromètre IRTF.

## II.3 Mesures électrique

### II.3.1 Rigidité électrique

Toute tension qui provoque la perforation d'un centimètre d'épaisseur de l'isolant est dite rigidité électrique. La rigidité électrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité électrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

**a. Mesure de la rigidité électrique** [44,45] : L'essai de rigidité électrique est destiné à éprouver les éléments isolants des composants et des différents sous-ensembles constituant un équipement électrique, et à vérifier que les lignes de fuite entre points et entre points et la masse sont convenablement dimensionnées suivant la technologie employée. L'essai de rigidité électrique consiste à appliquer une tension (continue ou alternative) entre deux points du système (ex : l'air ou autres matériaux isolants) et vérifier qu'il n'y a pas un

courant de fuite supérieur à la valeur nominale admissible dû à des phénomènes de claquage ou de décharges disruptives. La sanction de défaut est déterminée par l'analyse de la forme, de l'amplitude et du temps de maintien du courant fourni par le générateur à l'élément en teste et par comparaison avec une consigne déterminée. Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux, nous distinguons :

❖ **Rigidité longitudinale** : La rigidité électrique longitudinale d'un matériau isolant est obtenue entre deux conducteurs plans (électrodes planes) situés sur une même surface de cet isolant. La rigidité électrique longitudinale dépend peu de la nature de l'isolant, mais beaucoup plus de son état de sécheresse et de propreté. 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.

Ce n'est que dans certains cas, par exemple celui des matériaux ayant subi une immersion prolongée dans l'eau ou essayés à température élevée, que l'amorçage intéresse réellement l'isolant et provoque une destruction nette de sa surface (carbonisation) le rendant inapte à supporter de nouvelles contraintes. La tension de contournement d'une surface isolante est mesurée, pour une distance inter électrode 'd' entre les deux électrodes, par la méthode de la montée rapide de la tension jusqu'à contournement de l'isolant (plaque). La rigidité longitudinale est alors déterminée par la relation (2.1).

$$E1 = U \text{ contournemnt} / d$$

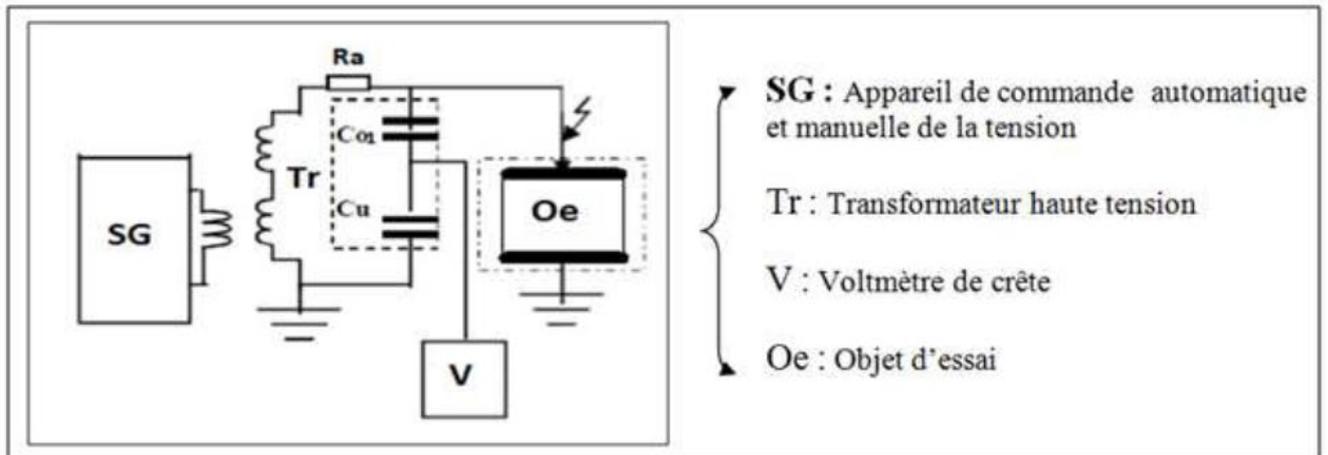


Figure II.8 Circuit de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante.

❖ **Rigidité transversale** : La rigidité diélectrique transversale d'un matériau isolant est obtenue entre deux conducteurs plans (électrodes planes) situées 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 alors déterminée par la relation (2.2)

$$E_t = U_{\text{perforation}} / d \quad (2.2)$$

La Figure (III.3.II) illustre le schéma de principe de la mesure de la tension de perforation de l'isolant.

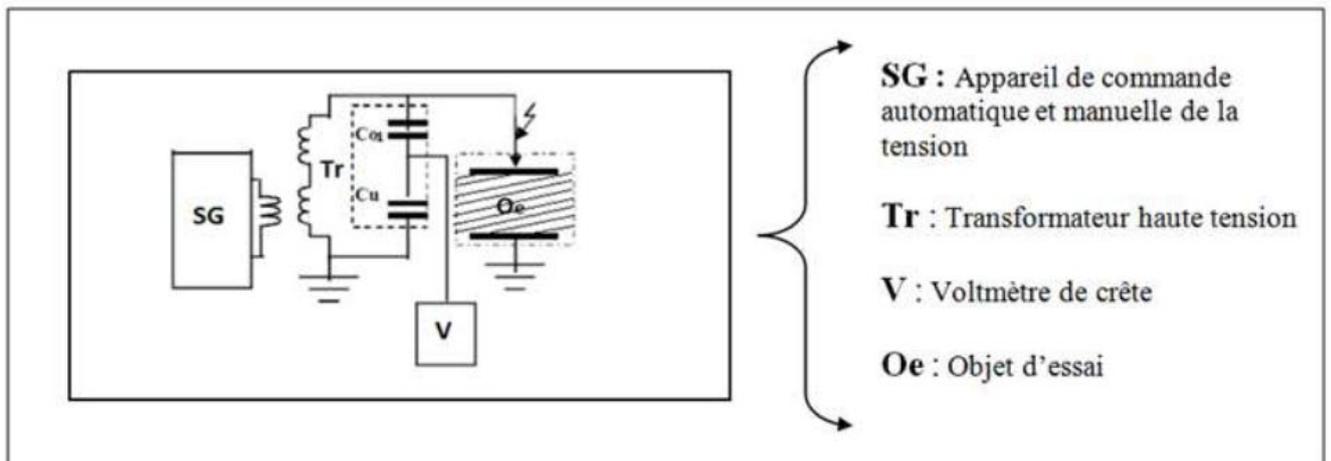


Figure II.9 Circuit de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolant.

### b. Facteur de perte, Capacité et Permittivité

❖ **Mesure du facteur de pertes  $tg\delta$  par la méthode du pont de Schering :** [46,47,48,49]

Le pont de SCHERING (Figure II.3.III) permet la mesure de la capacité et du facteur de perte d'isolation (condensateur, cables, isolateurs, bornes de traversées, isolants, etc.) en tension alternative.

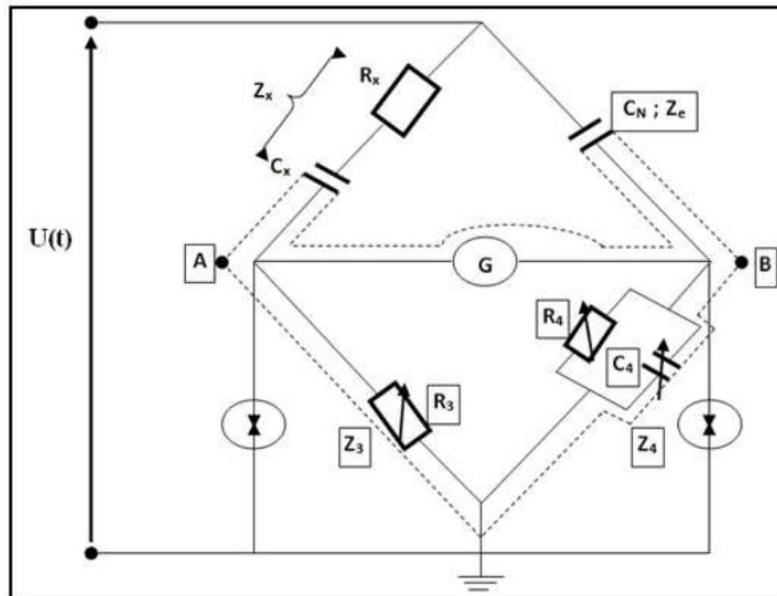


Figure II.10 Schéma de principe du pont de Schering.

- **Impédance de branche :** L'impédance de l'objet d'essais

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x}$$

$$Z_x = \frac{1}{j\omega C_x}(1 + jtg\delta_x)$$

avec :

$$tg\delta_x = \omega \cdot R_x \cdot C_x$$

$$Z_N = \frac{1}{j\omega C_N}$$

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

$$Z_3 = R_3$$
$$Z_4 = \frac{R_4 \left( \frac{1}{j\omega C_4} \right)}{R_4 + \left( \frac{1}{j\omega C_4} \right)}$$

A l'équilibre :  $I_G = 0$

D'où

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_N \cdot Z_3$$

En remplaçant les expressions des impédances et en égalant les parties réelles et imaginaires, nous trouvons :

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N$$
$$\operatorname{tg} \delta_x = W \cdot R_x \cdot C_x = \frac{W \cdot R_3 C_x C_4}{C_N}$$
$$\operatorname{tg} \delta = W \cdot R_4 C_4$$

Mesure de la constante diélectrique  $\epsilon_r$  :

$$C_x = \epsilon_r C_0 \Rightarrow \epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$$
$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{a}$$

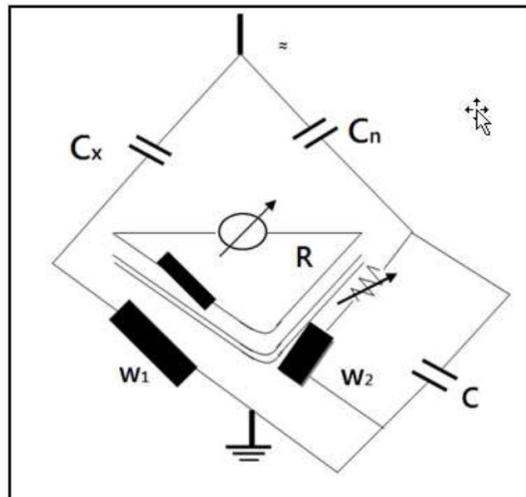
D'où

$$\varepsilon_r = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \cdot \frac{a}{\varepsilon_0 \cdot S}$$

**Le pont à transformateur différentiel** [50] : La capacité  $C_x$  et  $C_N$  sont placés dans la branche H.T. 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. Le pont est en équilibre si :

$$C_x = \frac{W_1}{W_2} \cdot C_N$$

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.



**Figure II.11** Schéma de principe du pont de Schering à transformateur différentiel.

Pour déterminer  $tg\delta$ , des résistances et des capacités variables sont ajoutées au pont. Le facteur de perte est donnée par :  $tg\delta = W.C.R$ . Le réglage de  $C$  et  $R$  donne la valeur de  $tg\delta$  à 50 ou 60Hz. Trois positions donnent  $Wc = 0,1$  ou 1 ou 10,  $R$  permet l'ajustage fin.

**Exemple :**  $tg\delta = 47,5 \times 10^{-4}$

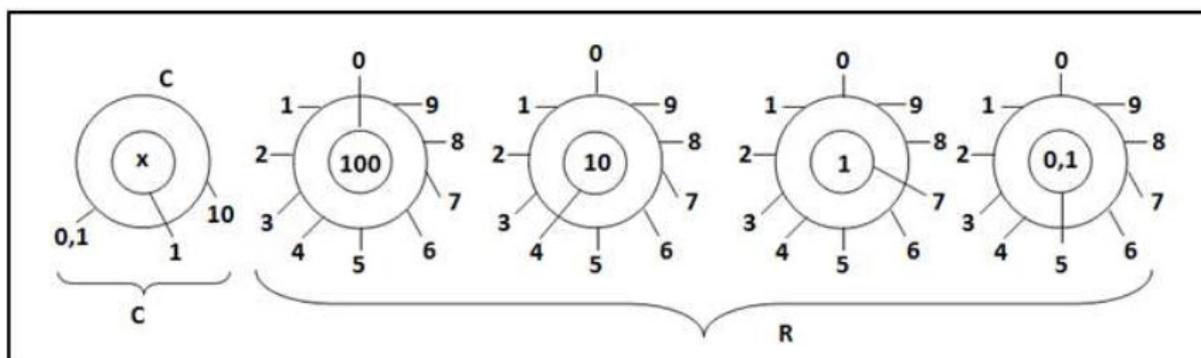


Figure II.12 : Exemple de réglage du pont de Schering à transformateur différentiel.

### c. Résistance et Résistivité

- **Mesure de 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.

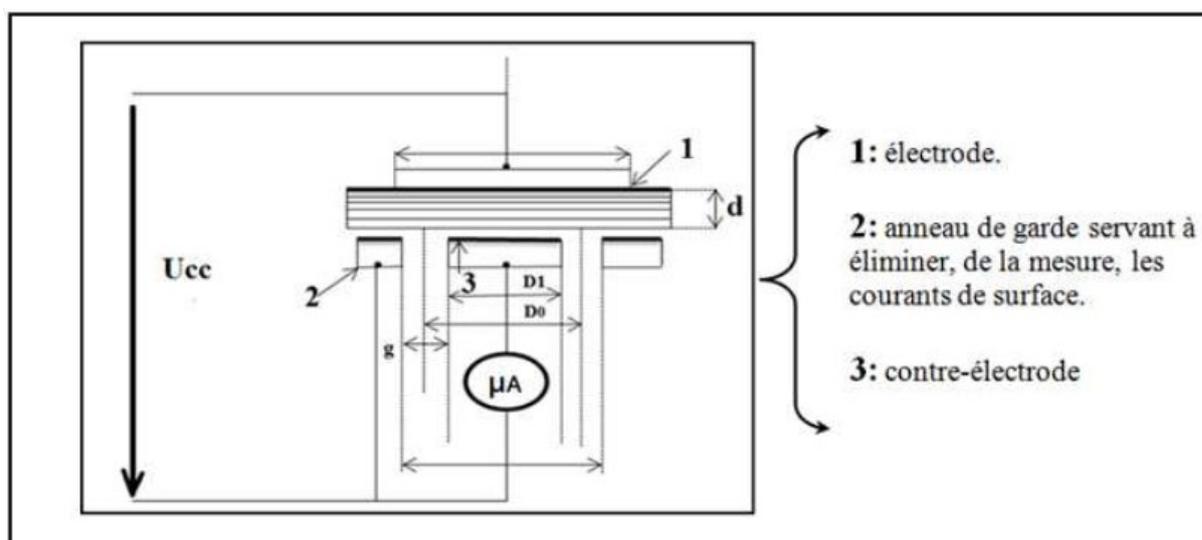


Figure II.13 : Schéma de mesure de la résistance transversale.

- **Mesure de la résistivité transversale** [44] : La résistance transversale d'un matériau  $\rho_t$  est le quotient du gradient de potentiel par la densité de courant qui le traverse, ce qui donne :

$$\rho_t = S_t \frac{R_t}{d}$$

D'où

$$S_t = \frac{\pi D_0^2}{4}$$

$$D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

• **Mesure de 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 superficielle de ce dernier.

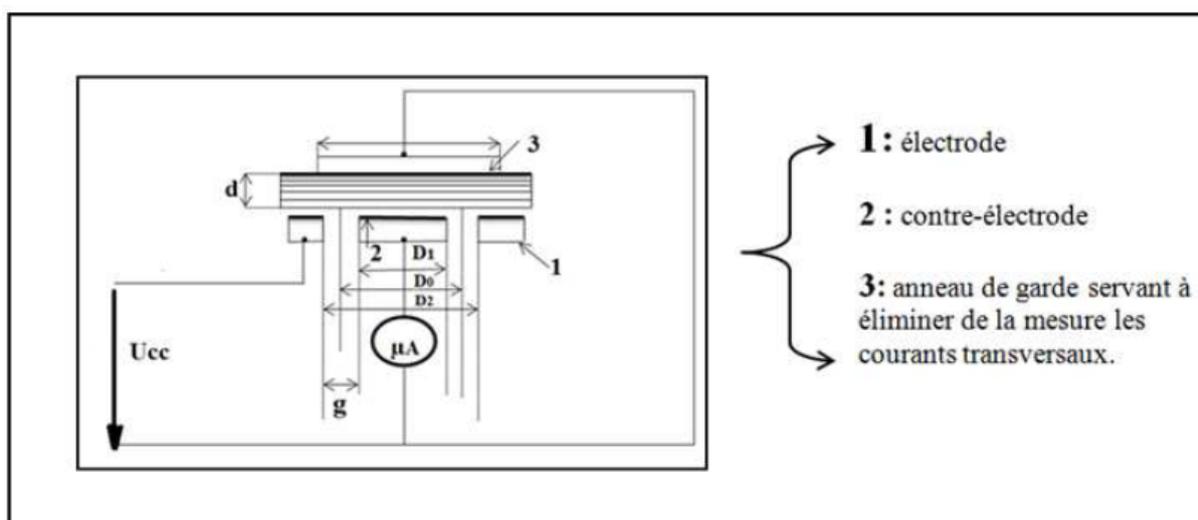


Figure II.14 : Schéma de mesure de la résistance superficielle.

• **Mesure de la résistivité superficielle** [44] : La Résistivité superficielle d'un matériau  $\rho_s$  est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur, soit :

$$\rho_s = \frac{P \cdot R_s}{g}$$

$$P = \pi D_0$$

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

$$D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (2.22) \quad \text{et} \quad g = \frac{D_1 - D_2}{2}$$

#### **II.4 Conclusion :**

Les outils de caractérisation sont indispensables dans le domaine de la recherche scientifique. Pour caractériser notre polymère, nous avons passé en revue plusieurs techniques de mesures électriques et d'analyses chimiques afin de comprendre leurs principes de fonctionnement, dans le but de mieux interpréter les résultats et ainsi mieux comprendre le comportement du matériau.

---

# **CHAPITRE III**

# **PROTOCOLE EXPERIMENTAL**

---

### III.1 Introduction

Afin de caractériser le câble 18/30 kV à isolation en polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), différentes techniques d'analyse chimiques (IR, ATG/ DTG, DRX ET MEB), et de mesures électriques (Rigidité électrique transversale et longitudinale, pertes diélectriques, capacité et permittivité) seront entreprises dans plusieurs laboratoires des universités algériennes, soient les laboratoires de Haute Tension de Génie Electrique et de chimie de Génie des procédés de l'université A. MIRA de Béjaia et le laboratoire de Génie des procédés de l'université SAAD DAHLEB DE BLIDA 1.

Il sera alors question, dans ce chapitre, de présenter les protocoles expérimentaux des mesures électriques effectuées sur le câble en PRC (18/30 kV), ainsi que des différentes analyses chimique réalisées sur le matériau d'isolation de ce câble (PRC), à son état vierge. L'appareillage et matériel utilisé, les techniques et méthodes adoptées, les paramètres fixés et mesurés y seront exposés.

### III.2 Caractéristiques du matériau :

Le matériau d'étude est le PRC utilisé par la société ENICAB de Biskra (filiale de General cabel) pour l'isolation des câbles moyenne et haute tension (figure III.1). Les granulés du polyéthylène reticulable proviennent de la firme autrichienne BOREALIS commercialisé sous l'appellation LE4201R. Les caractéristiques du matériau sont données par le tableau III.1.

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

Propriété	Normes	Valeurs
Constante diélectrique	IEC 60250	2.3
Facteur de perte (50hz)	IEC 60250	0.0003
Résistivité volumique sous DC	IEC 60093	$10^{15}$ Ohm.cm
Résistance à la traction (250mm / min) <sup>2</sup>	ISO 527	>17 MPa
Allongement à la rupture ( 250mm / min) <sup>2</sup>	ISO 527	> 450 %

Les échantillons de câble de longueur 10 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 :  $120\text{mm}^2$  (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 :  $250^\circ\text{C}$

### III.3 Mesures électriques :

#### III.3.1 Mesure de capacité $C_x$ et du facteur de perte $tg\delta$

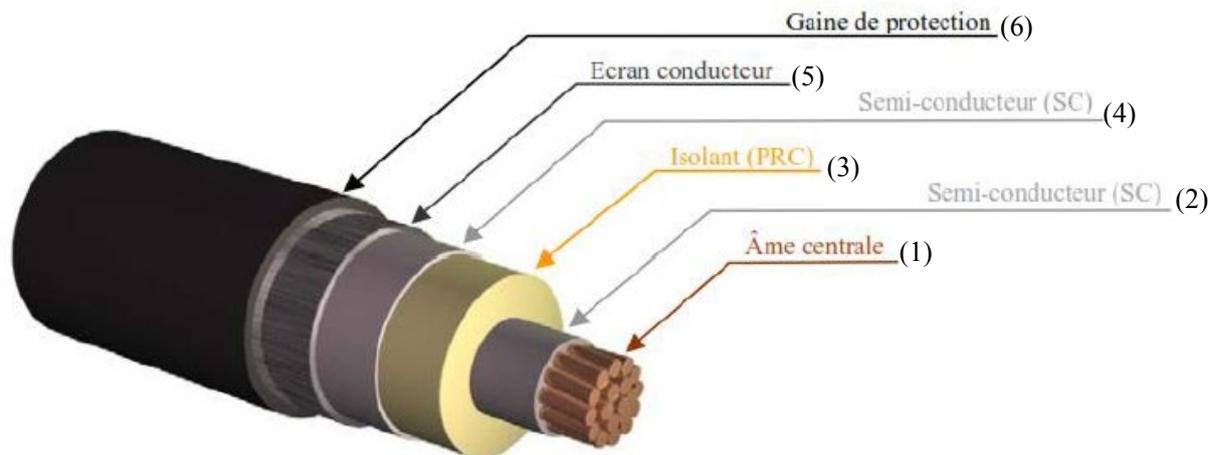
La capacité  $C_x$  et le facteur de pertes  $tg\delta$  sont déterminés à l'état vierge du câble en PRC.

Pour ce faire, nous avons adopté la méthode du pont de Schering à transformateur différentiel (Figure II.14), 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 (2.13), (2.14) et (2.15) et par là, l'indice de pertes défini par  $\epsilon_r \cdot tg\delta$  est déterminé.

#### III.3.2 Mesure de la rigidité diélectrique

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.1).



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

### ***III.3.2.1 Mesure de la rigidité diélectrique transversale***

La rigidité diélectrique transversale  $E_t$  du PRC vierge 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 du matériau.

La rigidité diélectrique transversale est alors déterminée par la relation (2.2) exposée au (§ II.3.1.a).

### ***III.3.2.2 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.1).

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 du matériau.

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 (2.1) exposée au (§ II.3.1.a).

## III.4 Analyse physico-chimiques :

### III.4.1 La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

#### a) Présentation :

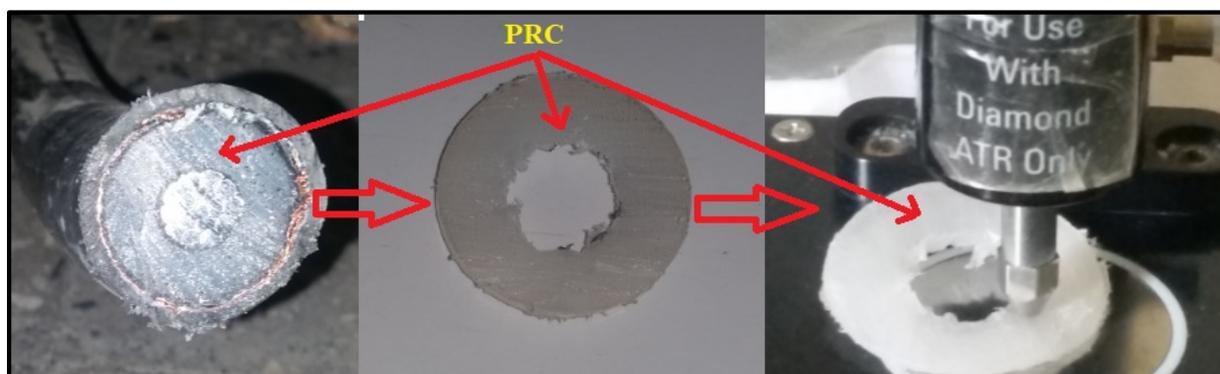
La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ou spectroscopie IRTF (ou encore FTIR), est une technique utilisée pour obtenir le spectre d'absorption, d'émission, la photoconductivité ou la diffusion Raman dans l'infrarouge d'un échantillon solide, liquide ou gazeux.

Un spectromètre FTIR permet de collecter simultanément les données spectrales sur un spectre large. Ceci lui confère un avantage significatif sur les spectromètres à dispersion qui ne peuvent mesurer l'intensité que dans une gamme réduite de longueurs d'onde à un instant donné.

Le terme « spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier » vient du fait qu'il est nécessaire de passer par une transformation de Fourier pour convertir les données brutes en réel résultat spectral.

#### b) Préparation de l'échantillon et mesure :

L'échantillon a été prélevé d'un câble de haute tension 18/30 KV isolé au PRC (polyéthylène réticulé chimiquement), à l'état vierge, ce dernier a été découpé en rondelle très fine d'une épaisseur ne dépassant pas les 2 mm, tel que représenté dans la figure (III.2) ci-dessous.



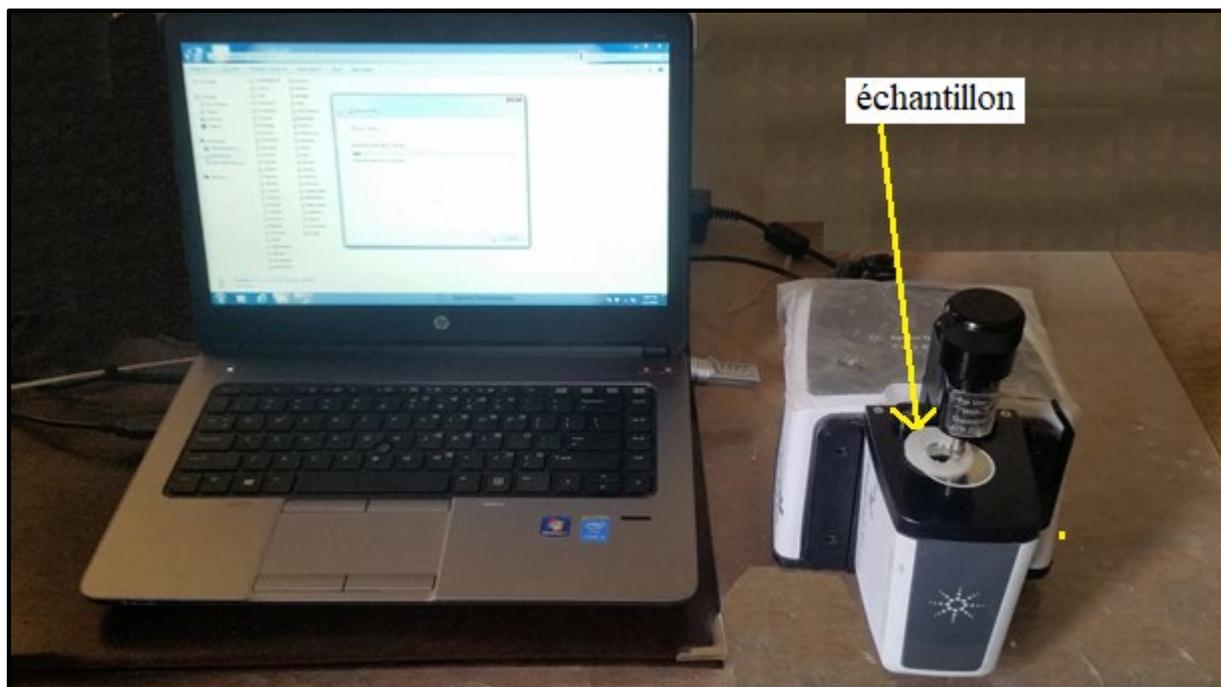
**Figure III.2** Echantillon prélevé de l'isolant du câble en PRC.

## Chapitre III : Protocole expérimental.

---

La mesure à réflexion totale atténuée –IR-TF a été effectuée sur l'échantillon. Ce dernier a été placé dans le système de mesure (cristal de Ge-ATR) et pressé avec une force de 80N.

Le spectre a été enregistré en utilisant l'appareil « Agilent Technologies Cary 630 FTIR » figure (III .3).Un cristal fraîchement nettoyé a été utilisé comme référence. L'analyse a été réalisée avec 20 balayages dans la gamme de fréquence comprise entre  $400\text{cm}^{-1}$  et  $4000\text{cm}^{-1}$  à une résolution de  $8\text{ cm}^{-1}$ .



**Figure III.3** L'Appareil de mesure, le Agilent technologie cary 630 FTIR.

### III.4.2 Analyse thermogravimétrique

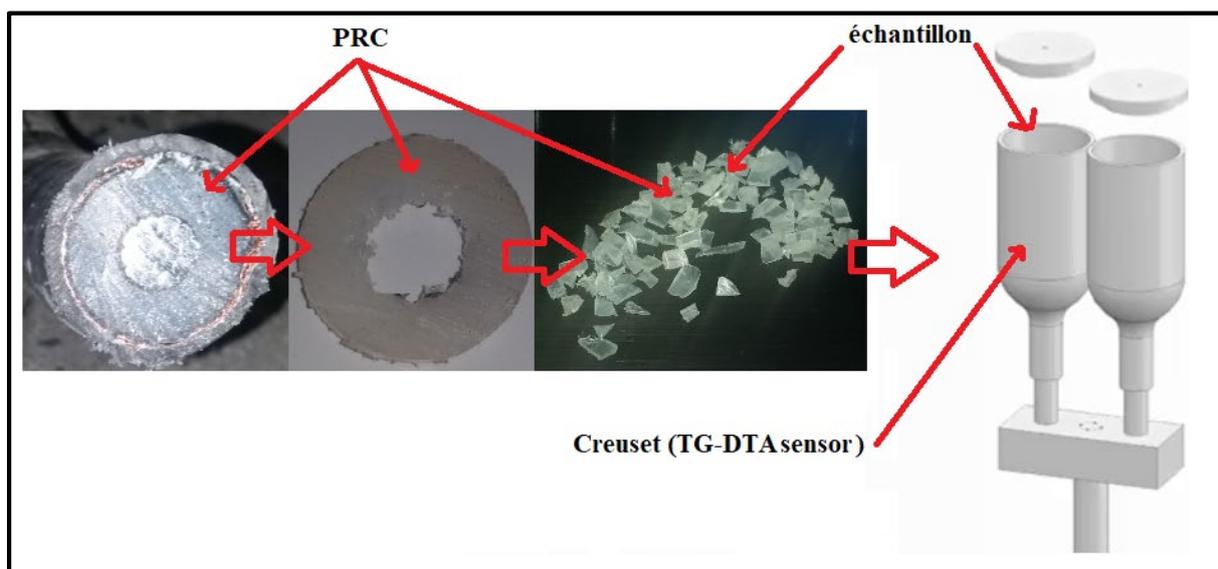
#### a) Présentation :

L'analyse thermogravimétrique est une technique d'analyse thermique qui consiste à mesurer la masse d'un échantillon lorsque celui-ci est soumis à des variations de température. L'ATG permet d'observer les effets de décomposition thermique, d'évaporation, de réduction, de désorption, de sublimation, d'oxydation, d'absorption, etc. L'ATG permet de qualifier la stabilité thermique de composés. Elle permet également de déterminer les températures auxquelles ont lieu des réactions chimiques. Elle permet aussi de doser certains composés volatils dans un échantillon solide.

L'ATD est une technique mesurant la différence de température entre un échantillon et une référence (matériau inerte thermiquement) en fonction du temps ou de la température lorsqu'ils sont soumis à une augmentation de température, sous atmosphère contrôlée.

### b) Préparation de l'échantillon et mesure :

L'échantillon a été prélevé d'un câble de haute tension 18/30 KV isolé au PRC à l'état vierge, il a été coupé en petites graines. Ce dernier a été pesé sur une balance très sensible et a été mis dans le creuset de l'appareil comme le montre la figure (III.4.) :



**Figure III.4** : Echantillon prélevé et mis dans le creuset.

La perte de masse a été enregistrée à l'aide de l'appareil (STA PT 1600, LINSEIS) sur un échantillon de 5mg placé dans une capsule ouverte.

L'analyse a été réalisée dans la gamme de température de 30 °C à 700 °C à l'aide d'un pas de chauffage de 10 °C sous un flux d'azote gazeux (20ml/min).



**Figure III.5 :** Appareil STA PT 1600, LINSEIS.

### III.4.3 La diffraction des rayons X :

#### a) Présentation :

La diffraction des rayons X est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. Cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles...) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement des atomes constitutifs de façon périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels.

Le polyéthylène et le polyéthylène réticulé sont des polymères semi-cristallins dont les distances inter-réticulaires sont également mesurables par cette technique. Ces distances sont représentatives de chaque plan cristallin, mais aussi de chaque structure cristalline.

### **b) Préparation de l'échantillon et mesure :**

Les spectres de la diffraction des rayons X ont été enregistrés à l'aide d'un diffractomètre « RIGAKU MINIFLEX 600 X RAY DIFFRACTOMETER », figure (III.6).



**Figure III.6 :** Appareil RIGAKU MINIFLEX 600 X RAY DIFFRACTOMETER.

L'échantillon a été analysé dans la plage d'angle  $2\theta$  de  $5^\circ$  à  $65^\circ$ , et les paramètres du procédé ont été fixés comme suit : vitesse de balayage à 0.30%, taille de pas à  $0.02^\circ$  ( $2\theta$ ) et le temps de l'étape de balayage à 1.9 secondes. Les données de l'analyse ont été traitées par le logiciel PDXL-2 et X'Pert HighScore.

### **III.4.4 Microscopie électronique à balayage**

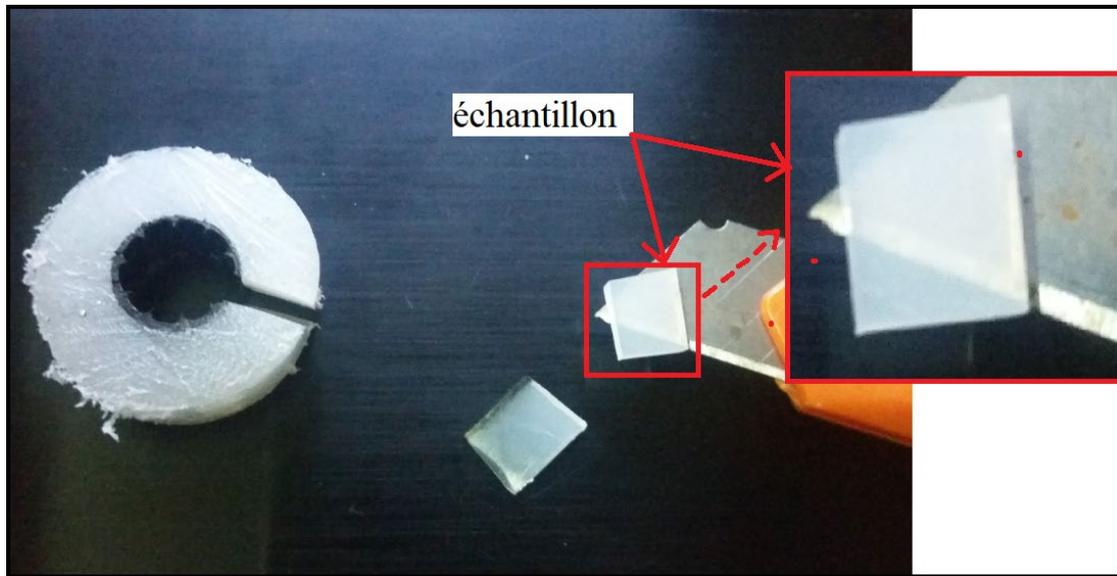
#### **a. Présentation**

Le microscope électronique à balayage utilise un fin faisceau d'électrons, émis par un canon à électrons. Des lentilles électromagnétiques permettent de focaliser le faisceau d'électrons sur l'échantillon. L'interaction entre les électrons et l'échantillon provoque la formation d'électrons secondaires de plus faible énergie. Ils sont amplifiés puis détectés et convertis en un signal électrique. Ce processus est réalisé en chaque point de l'échantillon par un balayage du microscope. L'ensemble des signaux permet de reconstruire la typographie de l'échantillon et de fournir une image en relief.

Grâce au microscope électronique à balayage, il est possible de voir la surface d'objets, de bactéries, de matériaux... La grande profondeur de champ est un atout de ce microscope.

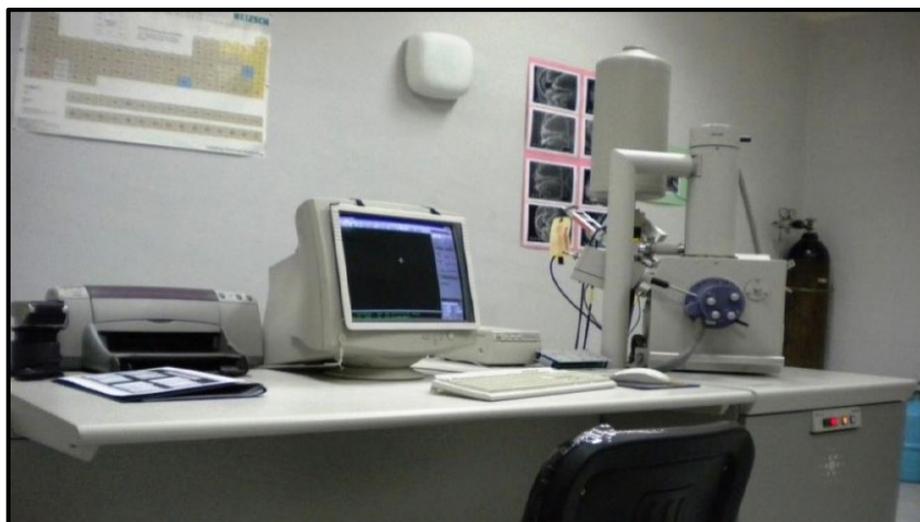
### b. Préparation de l'échantillon et mesure :

Notre échantillon a été prélevé de l'isolant en PRC à l'aide d'un cutter en petits morceaux carré d'environ  $1\text{ cm}^2$  et d'épaisseur de 1mm comme le montre la figure (III.7).



**Figure III.7** Echantillon en PRC pour l'analyse MEB.

L'échantillon a été ensuite placé sur un support à l'aide d'une bande adhésive de carbone conducteur. La mesure est effectuée sous vide à l'aide du microscope électronique à balayage au sein du labo de génie déprocédé de l'université SAAD DAHLEB DE BLIDA 1.



**Figure III.8** : Microscope électronique à balayage MEB.

### **III.5 Conclusion :**

Dans cette partie de notre étude, nous avons mis en pratique les techniques de diagnostique (mesures électriques et analyses chimiques sur les différents appareils appropriés), pour une caractérisation physico-chimique du câble 18/30 kV en PRC. L'ensemble des résultats obtenus seront traités pour permettre une meilleure maîtrise de ce système de câble, et seront présentés, interprétés et discutés dans le prochain chapitre.

---

**CHAPITRE IV**  
**PRESENTATION ET**  
**INTERPRETATION DES**  
**RESULTATS**

---

## IV.1 Introduction

Les mesures électriques que nous avons menées au sein du laboratoire de e haut tension et les analyses chimiques (IR, ATD/ATG/DTG, DRX, MEB) aux laboratoires de génie des procédés ont abouti à des résultats de caractérisation électrique et des spectres d'analyse très intéressants.

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats de caractérisation physico-chimique du câble 18/30 kV en PRC obtenus, comme nous tenterons de les interpréter et de les discuter afin de mieux comprendre le comportement de ce système de câble en général et du matériau PRC en particulier.

## IV.2 Résultats des Mesures électriques

### IV.2.1 Rigidity électrique longitudinale et transversale

La rigidité diélectrique longitudinale  $E_l$  de l'échantillon de câble en PRC vierge, déterminée selon le protocole expérimental tracé dans (§III.3.2.2), est égale à :

$$E_l = 32 \text{ kV/cm}$$

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, pour éviter des éventuels contournements, lors des essais électriques de détermination de la rigidité diélectrique transversale  $E_t$ , selon le protocole expérimental tracé dans (§III.3.2.1), nous enregistrons des claquage dans l'huile avant d'atteindre la perforation de l'isolation du câble, ce qui rend cette mesure impossible, faute de moyen technique plus performant.

### IV.2.2 Pertes diélectriques, capacité et permittivité

La capacité  $C_x$  et le facteur de pertes  $\text{tg}\delta$  sont déterminés à l'état vierge du câble en PRC, sous une tension appliqué  $v=100\text{V}$  et  $f=50\text{hz}$  avec la méthode du pont de Schering à transformateur différentiel. La permittivité  $\epsilon_r$  et l'indice de perte  $\text{tg}\delta$ .  $\epsilon_r$  sont alors calculé (voir §3.1.b).

Le tableau (IV.1) ci-dessous résume les résultats obtenus de capacité  $C$ , de la permittivité  $\epsilon_r$ , du facteur de perte  $\text{tg}\delta$  et de l'indice de perte  $\text{tg}\delta$ .  $\epsilon_r$  du câble en PRC vierge.

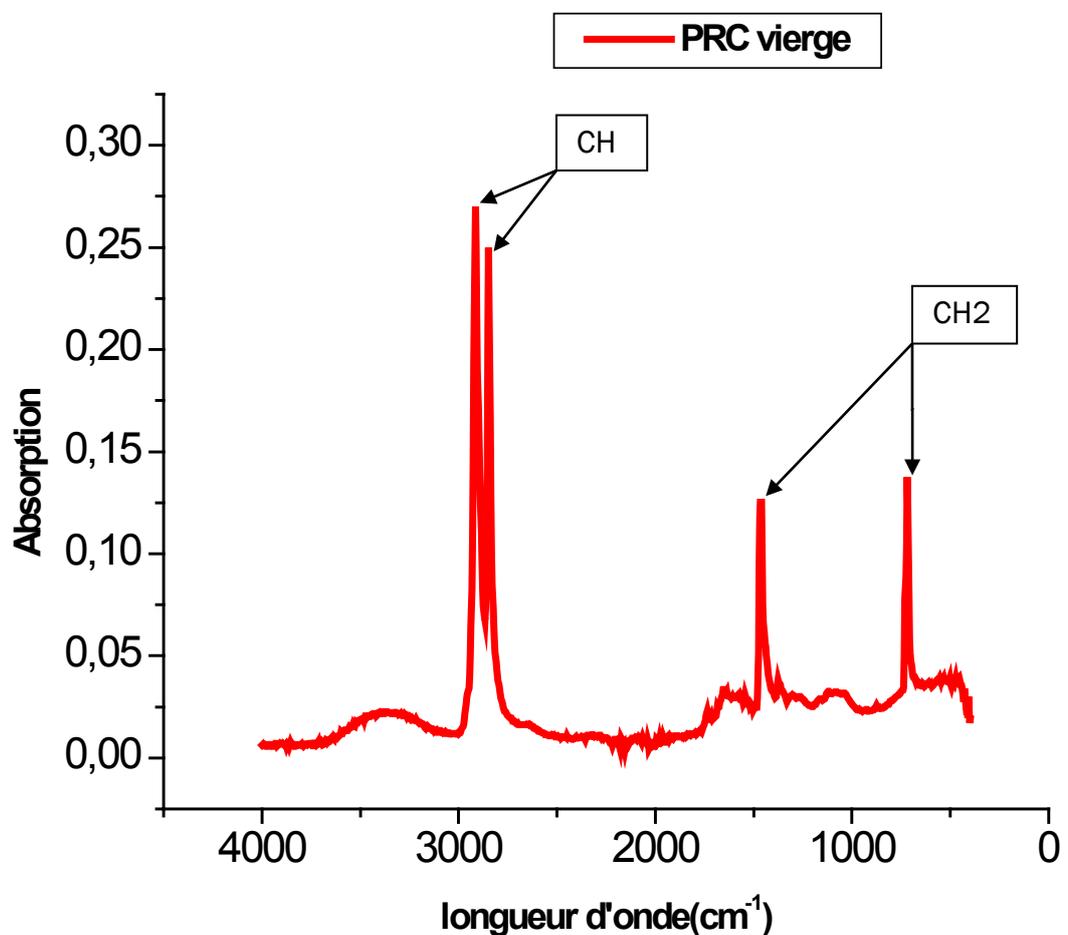
**Tableau IV.1** : Capacité C, facteur de perte  $\text{tg}\delta$ , permittivité  $\epsilon_r$  et indice de perte  $\text{tg}\delta \cdot \epsilon_r$  du PRC

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	$3,7 \cdot 10^{-2}$

## IV.3 Résultats des analyses chimiques

### IV.3.1 Analyse infrarouge

La spectroscopie IR est une analyse de caractérisation structurale, basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysée. Elle permet de caractériser la composition chimique de notre polymère. La figure (IV.3.I) montre le spectre FTIR mesuré en mode ATR qui comporte quatre principaux pics.



**Figure IV.1** Spectre infrarouge du polymère PRC à l'état vierge.

Les principaux pics sont assignés dans le tableau (IV.2).

**Tableau IV.2** Les différentes bandes d'absorption caractéristiques du PRC vierge.

Nombre d'onde, $\text{cm}^{-1}$	Bande d'assignement
719	-CH <sub>2</sub> - (balancement)
1375	-CH <sub>2</sub> - (déformation, cisaillement)
1461	-CH- (élongation, (-C-(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -C- <sub>n</sub> ≤3))
2915	-CH- (élongation, (-C-(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -C- <sub>n</sub> ≤3))

Dans les basses fréquences, on observe les vibrations du groupement -CH<sub>2</sub>- de balancement aux valeurs du nombre d'onde 710  $\text{cm}^{-1}$  et 1460  $\text{cm}^{-1}$ . Les pics enregistrés vers 2850  $\text{cm}^{-1}$  et 2910  $\text{cm}^{-1}$ , représentent les élongations des groupements -CH- du monomère.

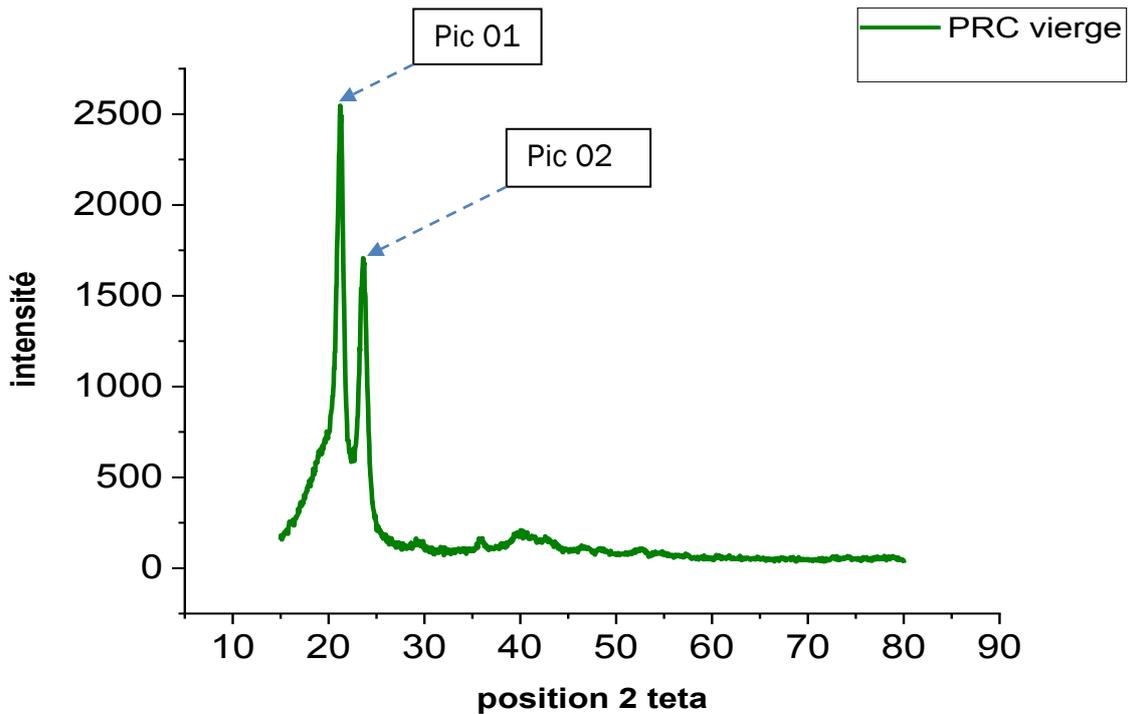
### IV.3.2 Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est une des principales techniques d'analyse utilisée afin d'identifier la cristallinité d'un matériau. Un faisceau de rayons X est diffracté sur un réseau de plans cristallins selon la loi de Bragg.

Cette analyse est réalisée par un Goniomètre type RIGAKU MINIFLEX 600 X RAY DIFFRACTOMETER, utilisant un logiciel de dépouillement de données "X'Pert Highscore".

Le film du matériau, placé sur une plate forme ou "Spener", est exposé à un faisceau de rayons X dont l'intensité est mesurée au moyen d'un détecteur rotatif directionnel.

Le diagramme de diffraction des rayons X aux faibles angles  $2\theta$  allant de 10 à 80°, de PRC vierge, a été déterminé. Il est présenté dans la figure (IV.3.II). Il relève 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.2** Le diagramme de diffraction des rayons X de l'échantillon PRC à l'état vierge.

Le diagramme montre deux pics à  $2\theta=22^\circ$  et à  $2\theta=24^\circ$  qui sont caractéristiques des plans de réseau 110 et 220 et témoignant de la présence d'une phase cristalline importante dans ces plans. Cependant, sur le plan intensité et largeur des pics mesurée à mi- amplitude, une différence notable est relevée entre ces derniers. Le tableau (IV.3.II) résume les caractéristiques relatives à chacun des pics.

**Tableau IV.3** Caractéristiques des pics du spectre DRX de l'échantillon de PRC vierge.

N° du pic	Position $2\theta(^{\circ})$	Intensité Lobs (cts)	Distance basale $D_b (^{\circ})$	Largeur du pic à mi-amplitude ( $^{\circ}$ )
1	21,206	2549	4,1864	0,640
2	23,617	1710	3,7641	0,638

La fraction massique d'unités structurales présentes dans la zone cristalline des polymères semi cristallin définie le taux de cristallinité  $X_c$  donné par l'équation (IV.1), telle que :

$$\chi_c(\%) = \frac{x_1}{x_1 - x_2} \times 100 \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

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

Le tableau IV.3 donne le taux de cristallinité de l'échantillon analysés, calculé selon l'équation (IV.3.III), moyennant le logiciel "X'Pert Highscore".

**Tableau IV.4** Taux de cristallinité de l'échantillon analysé de PRC vierge.

Echantillon de PRC	$\chi_c(\%)$
Vierge	39,5

Ce taux de cristallinité obtenu ( $\chi_c=39,5(\%)$ ) prouve que les deux pics de diffraction d'intensité très importantes détectés dans le PRC vierge, implique la présence d'un grand taux de cristallinité dans ces plans.

Nous avons comparé nos résultats à celle trouvées dans la littérature rapporté par *Larbi Boukezzi et Ahmed Boubakeur* (article : *Effect of artificial thermal aging on the crystallinity of XLPE insulation cables: X-ray study*) [?]. Les spectres ne semble pas montrer de changement dans la position des pics, ni dans leur division dans toute la plage de balayage, à l'exception d'une légère variation de l'intensité des pics. Cela signifie que, sous une contrainte thermique, le PRC conserve tout les plans cristallins existants, mais leurs taux de cristallinité sont légèrement affectés. Il n'y aurait donc pas de nouvelles phases amorphes formées, mais un renforcement des préexistantes au détriment des phases cristallines du matériau.

Il a été montré également par ces même auteurs, que la formation des liaisons de pontage par réticulation peut augmenter la région amorphe et diminuer la région cristalline

### IV.3.3 Analyses thermiques ATG/DTG

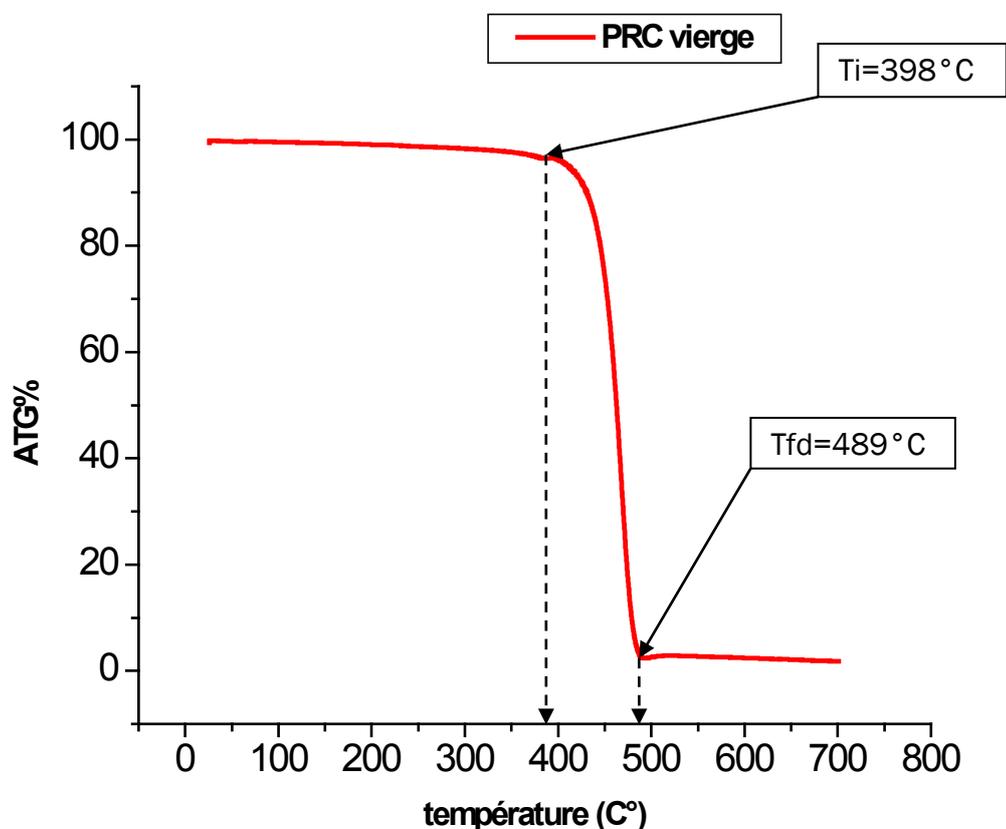
L'analyse thermogravimétrique est une méthode d'analyse thermique dans laquelle les modifications des propriétés physiques et chimiques des matériaux sont mesurées en fonction

de l'augmentation de la température (à vitesse de chauffage constante) ou en fonction du temps (à température constante et / ou à perte de masse constante).

Ces analyses nous ont permis de voir l'impact de la température sur la stabilité thermique du PRC à l'état vierge.

Les thermogrammes de l'ATG et de la DTG (dérivée de l'ATG) de l'échantillons de PRC vierge, 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 ( $T_{fd}$ ), ainsi que la perte de masse (%) et le taux de résidu (%), de l'échantillon de PRC vierge. Ces résultats sont illustrés sur les figures (IV.3.III et IV.3.IV).



**Figure IV.3** Le thermogramme ATG de l'échantillon PRC à l'état vierge.

Le thermo-gramme de l'ATG (figure IV.3.III), montre une bonne tenue thermique du matériau à l'état vierge. La température de tenue ( $T_i$ ) du PRC vierge est de l'ordre de 398 °. Au-delà de cette valeur, une chute brutale de cette propriété est enregistrée, atteignant une température  $T_{fd} \approx 489^\circ\text{C}$  correspondant à la rupture totale de la tenue thermique du matériau, ceci se traduit par une perte de masse importante, et une détérioration complète du matériau.

Le résultat de cet essai montre que le matériau ne possède pas de matières volatiles, ce qui fait qu'il ne subissait aucune perte de poids jusqu'à une température de tenue assez grande d'environ 460 °C où la destruction du matériau commence à s'opérer. Ce résultat important indique que les conditions de fonctionnement sous-normales seront sans danger pour le polymère et qu'il n'y aura pas de destruction en fonctionnement normal.

Remarquons également que la quantité du résidu est très faible ; il reste environ 2% du résidu après le test, ce qui signifie qu'il n'y a pas beaucoup de présence d'additifs minéraux.

La figure (IV.3.IV) illustre le résultat de l'analyse DTG donnant la variation de la vitesse de dégradation thermique du matériau.

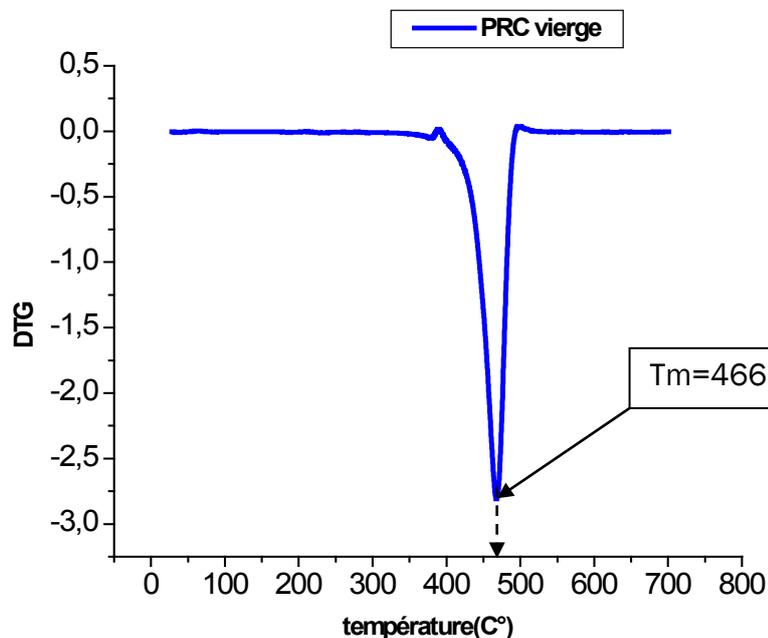


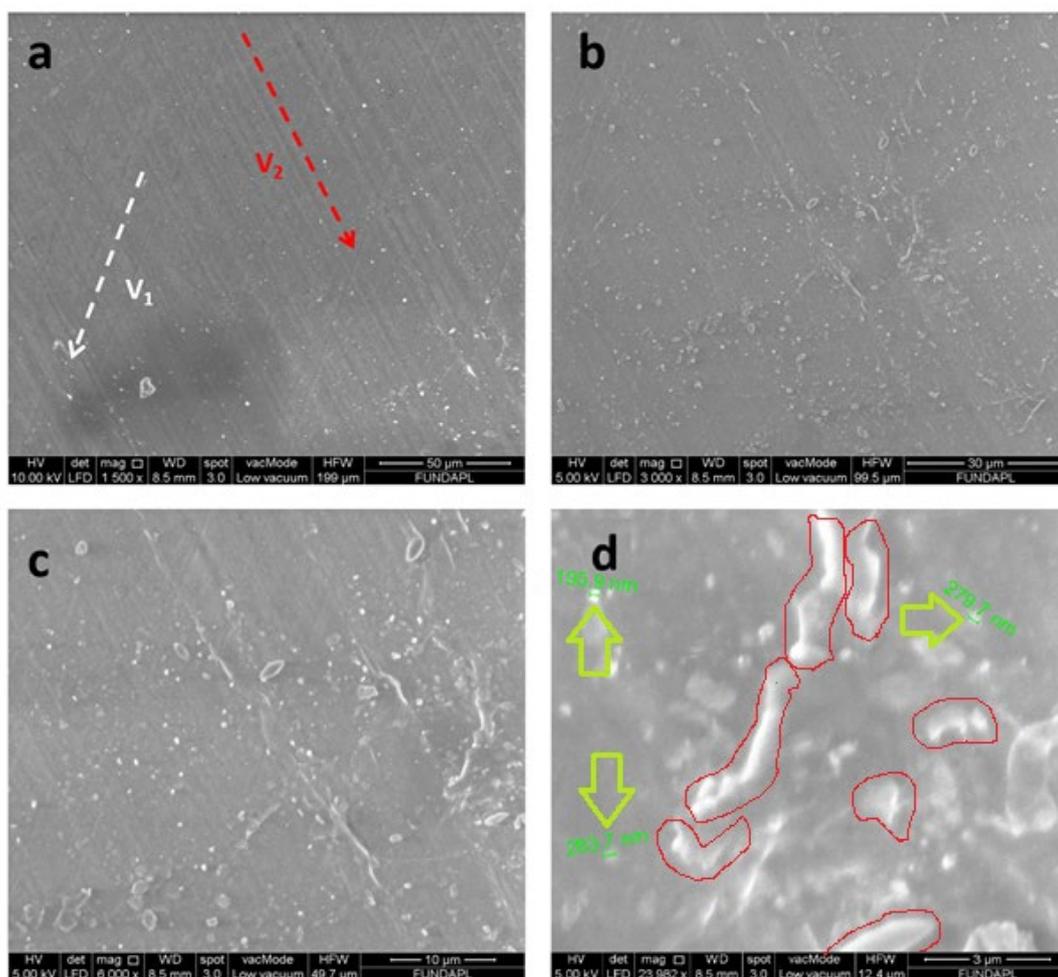
Figure IV.4 Thermogramme de la DTG du PRC vierge.

La vitesse de dégradation maximale, caractéristique d'une grande perte de masse, est enregistrée à la température  $T_m = 466^\circ$ , s'en suit une dégradation modérée du PRC qui continue jusqu'à la rupture thermique du matériau qui s'opère à la température  $T_{df}=489$ .

#### IV.3.4 Microscope électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) a été réalisée pour caractériser la morphologie et la structure de la surface du polymère.

L'étude a été réalisée sur un échantillon plat à l'état vierge. Les photos MEB sont présentées dans la figure (IV.3.V) à différents échelles (50, 30, 10 et 3  $\mu\text{m}$ ).



**Figure IV.5** Les photos MEB de l'échantillon PRC à l'état vierge.

a) :1500x, b) : 3000x, c) : 6000x et d): 23982x

Les figures **a** et **b** qui représentent les grandes échelles montrent un matériau dense avec certaines rayures parallèles. Sur la figure **a**, nous pouvons observer clairement deux directions assignées, indiquées par les vecteurs V1 et V2, respectivement en blanc et en rouge.

Les lignes de la direction du vecteur blanc correspondent aux rayures causées par le cutter durant le découpage de l'échantillon. Par contre, les lignes persistantes de directions V2, en rouge, qui sont beaucoup plus nombreuses et plus visibles correspondent à la structure du matériau. Ces derniers résultats sont appuyés par la littérature qui stipule une structure lamellaire du polymère PRC rapporté dans l'article [51].

De plus, sur la figure **d**, on observe à la surface des petits filaments de taille d'environ 3-10 $\mu$ m avec des particules de tailles très petites (200-300nm). Il est à noter que ces filaments et ces particules sont de couleur blanche à la surface, qui montre qu'ils ne sont pas conducteurs.

#### **IV.4 Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, nous avons réalisé la caractérisation physico-chimique du câble en PRC 18/30 kV vierge, par le moyen d'une série de mesures électriques et d'analyses chimiques menées dans différents laboratoires des universités A.MIRA de Béjaia et SAAD DAHLEB DE BLIDA 1.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes sur le caractère du câble en PRC 18/30 kV vierge :

- Il présente une bonne rigidité diélectrique longitudinale  $E_l=32$  kV/cm,
- Possède des pertes diélectriques moyennes  $1.852 \cdot 10^{-2}$ ,
- A une permittivité  $\epsilon_r \approx 2$ ,
- C'est un matériau semi cristallin, à structure lamellaire,
- Il est formé essentiellement de groupements  $-CH_2-$  de balancement et des groupements d'élongations  $-CH-$  du monomère.
- Possède une bonne tenue thermique  $T_i=398^\circ$  et  $T_{fd}=489^\circ$
- Présence de cavités révélées par le MEB, constituant l'ultime faiblesse du PRC vierge. Celles-ci sont souvent associées au processus de fabrication et constitueront les principales causes du vieillissement prématuré du PRC.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour but principal de caractériser le câble 18/30 kV isolé au PRC. Nous sommes parvenus à atteindre notre objectif après avoir réalisé des investigations tant sur le plan électrique que chimique, ayant abouti à des résultats intéressants.

Les polymères font partie des matériaux qui occupent une place privilégiée dans le domaine de la technologie, de manière générale, et du génie électrique, en particulier. Le matériau le plus prisé en haute et moyenne tension est le PRC, utilisé particulièrement pour l'isolation des câbles de transport et de distribution de l'énergie électrique, en raison de ces bonnes qualités techniques. Cependant, en exploitation, il manifeste des défaillances qui écourtent sa durée de vie.

Cette étude est menée pour comprendre le comportement de ce matériau, mais surtout, connaître l'origine de ses faiblesses.

Pour mieux cerner la question, nous nous sommes d'abord penché sur la technologie du câble MT/HT à isolation synthétique, et en particulier, le câble isolé au PRC, après quoi nous avons entrepris nos investigations, en menant des séries de mesures électriques (rigidité diélectrique, capacité électrique, permittivité, facteur de pertes et indice de pertes) et d'analyses chimiques (MEB, FTIR, DRX et ATG/DTG) sur le câble 18/30 kV en PRC.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer des conclusions sur le caractère de notre câble en PRC 18/30 kV vierge, et que nous pouvons résumer comme suit :

- Il présente une bonne rigidité diélectrique longitudinale  $E_l=32$  kV/cm,
- Possède des pertes diélectriques moyennes  $1.852 \cdot 10^{-2}$ ,
- A une permittivité  $\epsilon_r \approx 2$ ,
- C'est un matériau semi cristallin, à structure lamellaire,
- Il est formé essentiellement de groupements  $-CH_2-$  de balancement et des groupements d'élongations  $-CH-$  du monomère.
- Possède une bonne tenue thermique  $T_i=398^\circ$  et  $T_{fd}=489^\circ$
- Présente des cavités révélées par le MEB, constituant l'ultime faiblesse du PRC vierge. Celles-ci sont souvent associées au processus de fabrication et constitueront les principales causes du vieillissement prématuré du PRC.

# Bibliographie

- [1] Cours: Techniques de la Haute Tension, Djilali Benyoucef, Hassiba Benbouali Université de Chlef, janvier 2013.
- [2] Cour de A.Tilmatine, Techniques de la Haute Tension, Université DJILLALI LIABES.
- [3] Roger Cadiergues MémoCad, nD01.a, LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES, xpair.com.
- [4] Article, Foretay, E, Bulletin technique de la Suisse romande, Band (Jahr): 75 (1949)
- [5] LIVRE, traité d'électricité, volume XXII, HAUT TENSION, Michel Auget et Michel Lanoz, presse polytechnique et universitaire romande.
- [6] Lucien DESCHAMPS, PROSPECTIVE 2100, TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE : DES TECHNIQUES POUR DEMAIN, Mercredi 12 mai 2004 Paris, France.
- [7] Thèse de MILLIERE Laurent, Maîtrise des interfaces pour le contrôle de l'injection de charges dans les polymères isolants électriques, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Le 15 Décembre 2015.
- [8] Thèse de Mohammed Adnane DOUAR, Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques Haute Tension –Influence de la pollution sur les phénomènes de décharges partielles du contournement et de claquage, L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON, 15 décembre 2014.
- [9] Thèse de SAYAH Abdelkader, *Analyse des Terminaisons d'Eau*, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017.
- [10] Chin Tze Choo. Space charge determination in HVDC power cable and its influence on electric field. University of Southampton, 2010.
- [11] Paul Gill. Electrical power equipment maintenance and testing. CRC press, 2008.
- [12] ThomasWorzyk. Submarine power cables : design, installation, repair, environmental aspects. Springer Science & Business Media, 2009.
- [13] Jan De Kock and Cobus Strauss. Practical power distribution for industry. Elsevier, 2004.
- [14] MW Aarts, JB Kjellqvist, A Mendelsohn, and K Vaterrodt. The performance of xlpe water tree resistant insulation systems against the requirements of. In Electricity Distribution, 2005. CIRED 2005. 18th International Conference and Exhibition on, pages 1{5. IET, 2005.
- [15] AT Bulinski, SS Bamji, and RJ Densley. Factors affecting the transition from a water tree to an electrical tree. In Electrical Insulation, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on, pages 327{330. IEEE, 1988.

- [16] Harry Ernest Orton and Rick A Hartlein. Long life XLPE insulated power cables, Nancy 1, 2006.
- [17] William A Thue. Electrical power cable engineering. CRC Press, 2011.ss
- [18] E Peschke and R Von Olshausen. Cable systems for high and extra-high voltage. Publicis MCD Werbeagentur GmbH, 1999.
- [19] M.MEGHERFI Soufiane, mémoire de magister, *Caractéristiques de la propagation des décharges partielles sous contrainte thermique dans le câble moyenne tension de transport d'énergie électrique*, université de béjaia, 2013.
- [20] NEXANS France SAS, Liaisons terrestres 60-500 kV, câbles synthétiques.
- [21] MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, MASTER EN GENIE ELECTRIQUE, *Influence Du Vieillissement Electrique Sur Les Propriétés D'un Polymère Isolant Utilisé Dans Le Transport D'énergie Electrique*, Mohammed Ettayib MEGUIRECHE, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA, 2016.
- [22] Julien PINAUD, Généralités sur les polymères , IUT Nîmes – SGM
- [23] Michel Fontanille, Yves Gnanou, *Chimie et physico-chimie des polymères*, 3e édition, DUNOD, Paris, 2002, 2005, 2010, 2013
- [24] A-f. Gourgues-Lorenzo et J-M.Haudin.Matériaux pour l'ingénieur ; 2006
- [25] J.C.Chaumel, D.Brossard, A.le Hir « pharmacie galénique bonne pratique de fabrication des médicaments » 9eédition.Elsevier Masson SAS ; 2009.
- [26] M. Nedjar, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PVC utilisé dans l'isolation des câbles de H.T », Thèse de Magister, U.T.O, Tizi-Ouzou ; Décembre1991
- [27] T.Gonen. Electric Power Transmission System Engineering. CRC Press, 1988
- [28] John Shae. Power and communication cables-theory and applications. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 16(3) :34–34, 2000.
- [29] Jacob stergaard, Ole Tønnesen, Jørgen Kaas-Pedersen, Arne Hejde Nielsen, and Chresten Træholt. A new concept for superconducting dc transmission from a wind farm. *Physica C : Superconductivity*, Elsevier, 372 :1560–1563, 2002.
- [30] Z Han and XH Hu. Power application of superconductivity technology in china. *Superconductor Science and Technology*, IOP Publishing, 19(3) :S109, 2006.
- [31] El Hadj Ailam et al. Machine synchrone `a plots supraconducteurs : Etude et réalisation. Nancy 1, 2006.
- [32] M. Nedjar, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PVC utilisé dans l'isolation des câbles de H.T », Thèse de Magister, U.T.O, Tizi-Ouzou ; Décembre1991
- [33] D.Bouguedad, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène

propylène diène monomère (EPDM) », thèse, doctorat, UMMTO ;2010

[34] Jean-Claud Martin, « Incendies et explosions d'atmosphère » ; traité de sécurité intérieure. Presses polytechniques et universitaires romandes ; 2008.

[35] M. Pays, “Câble de transport d'énergie. Technologie et caractéristiques”, Techniques de l'Ingénieur, Publication D4520, 1996.

[36] G. Garcia, “Sur le comportement du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à l'action des décharges partielles”, Thèse de Doctorat de Spécialité de 3ème Cycle, U.P.S. Toulouse, 1980.

[37] 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.

[38] S. Pelissou et al., “Caractérisation de câbles extrudés vieillis en service”, Rapport final, IREQ-4742, Décembre 1990.

[39] T. Gonen. Electric Power Transmission System Engineering. CRC Press, 1988

[40] W. Reider, “plasma undlichtbogen”, vierwegverlag, brunschweig, pp 128-132, 1967

[41] J. L. Le Quéré, E. Sémon, Les couplages Chromatographie en Phase Gazeuse – l'analyse des acides gras d'origine biologique. Analisis Magazine , 1998, vol. 26, n°3.

[42] P. Gaussorgues , La thermographie infrarouge, principes-technologies-applications, Tec et doc Lavoisier, Paris , 1984a, pp. 63-72.

[43] P. Gaussorgues, La thermographie infrarouge, principes-technologies-applications, Tec et doc Lavoisier, Paris, 1984b, pp. 296-314

[44] F. Amidi, k. Ouerdane, “Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques a 30kV en régions littorales”,

[45] A. Cimador ,M. cojan ,P. hautefeuille ,M. Morceau, “methode de dimensionnement des isolateur de lignes aériennes en régions polluées”, CIGRE, rpport .

[46] C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, D. A. S. Surift, Legb, “contournement des polymères humides et pollués”, L'ailette booster, rapport 15-02 1978.

[47] I. Kimoto, T. Fujimurax, “performance of isolateurs for direct current transmission line under polluted condition”, IEEE, trans, on pas vol pas 92 N3. PP 934 949, may june 1973.

[48] Philippe Jorda N, Publication ,14 novembre 2008.

[49] W. Reider, “plasma undlichtbogen”, vierwegverlag, brunschweig, pp 128-132, 1967

[50] kind, karner, “hethvoltage, experimental technique”, VIEWEG edition, 1978 .

[51] Peng Hu n, Pan-Pan Zhao, Gao-Wei Zhang, Xiao-Hong Wang, Thermal properties of <sup>60</sup>Co irradiated crosslinked high density polyethylene, 2016.