

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

# Mémoire de fin de cycle

EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER  
EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : *RÉSEAU ÉLECTRIQUES*

## Thème

**Caractérisation physico-chimique  
du polyéthylène, du verre et de la  
bakélite.**

Présenté par :

Mr. SEKOUR TAHAR

Dirigé par :

M<sup>lle</sup> .N. ROUHA

*Année Universitaire: 2011 / 2012*

## Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout - puissant, le Très – Miséricordieux

La louange est Allah l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à ma promotrice N. Rouha pour ses encouragements et pour les conseils qu'elle a apportés pour l'achèvement de ce mémoire.

Je tiens également à remercier l'ensemble de membres de jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail.

Je tiens un grand merci à tout les membres du laboratoire de génie de procédés pour leurs aides précieuses.

Que tous les étudiants et les enseignants du département d'électrotechnique et aussi à tout le personnel et surtout la secrétaire Biba trouvent ici l'expression de nos reconnaissances et respect.

Je tiens également à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail et surtout A.Nabil.

# Dédicaces.

Je dédie ce modeste travail :

À la mémoire de mes grands-parents et khalti Baya.

À mes très chers parents.

À tous mes frères : Abdenour, Belkacem, Madjid et Sofiane.

À mes sœurs : Nabila, Sabiha, Cylia et Nawel.

A mes cousin (e)s : Amer, Madjid et Khelidja.

À tous mes ami (e) s en particulier : Menad, Kheirdinne, Salim, Hakim, Rafik, idris, Rédouane, Nassim. les étoiles de la chambre j109(R.U.T.O) et surtout M.Samia.

À l'équipe de l'impression : Samir et Abdellah.

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

À toute la promotion 2012 en particulier l'option Réseaux électriques.

# *SOMMAIRE*

# Sommaire

---

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

## Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1. Définition.....	3
I.2. Caractéristiques des diélectriques.....	3
I.2.1. Polarisation des diélectriques.....	3
I.2.2. Pertes diélectriques.....	4
I.2.3. Rigidité diélectrique.....	10
I.2.3.1. Objet des essais diélectriques.....	10
I.3. Effet de la pollution atmosphérique sur les matériaux isolants.....	11
I.3.1. Définition.....	11
I.3.1.1. Pollution.....	11
I.3.1.2. Salinité (Sa).....	11
I.3.1.3. Couche de pollution.....	12
I.3.1.4. Degré de pollution.....	12
I.3.2. Différents Niveaux de pollution.....	12
I.3.2.1. La pollution locale (en milieu urbain).....	12
I.3.2.2. La pollution régionale.....	12
I.3.2.3. La pollution globale ou mondiale.....	13
I.3.3. Sources de pollution.....	13
I.3.3.1. Pollution naturelle.....	13
I.3.3.1.1. Pollution marine.....	13
I.3.3.1.2. Pollution désertique.....	14
I.3.3.2. Pollution industrielle.....	14
I.3.3.3. Pollution mixte.....	14
I.3.4. Influences des facteurs climatiques sur les isolants pollués.....	14

# Sommaire

---

I.3.4.1. Le vent.....	14
I.3.4.2. La pluie.....	15
I.3.4.3. Humidités.....	15
I.3.4.4. Température.....	15
I.3.5. Influence de la répartition de la pollution sur la surface des isolations.....	15
I.3.6. Effet de la pollution sur santé humaine.....	15
I.3.7. Effet de la pollution sur les équipements électriques.....	16
I.3.7.1. Corrosion des isolateurs.....	16
I.3.7.2. Altération des surfaces des isolations solides des systèmes électriques.....	17
I.3.7.3. Arcs électriques.....	18
I.3.7.3.1. Arc non localisé.....	18
I.3.7.3.2. Arc fixe.....	18
I.3.7.4. Contournement de l'isolation des systèmes électriques.....	18
I.4. Les méthodes de mesures des caractéristiques physico-chimiques des matériaux.....	19
I.4.1. Introduction.....	19
I.4.2. Mesure du facteur de pertes $\text{tg}\delta$ par la méthode du pont de Schering.....	19
I.4.2.1 Impédance de branche.....	19
I.4.2.2. Mesure de la constante diélectrique $\epsilon_r$ .....	21
I.4.2.3. Le pont à transformateur différentiel.....	21
I.4.3. Mesure de résistances.....	23
I.4.3.1. Résistance transversale (tension en continue) .....	23
I.4.3.2. Résistivité transversale (en tension continue).....	23
I.4.3.3. Résistance superficielle (en tension continue).....	24
I.4.3.4. Résistivité superficielle (en tension continue).....	24
I.4.3.5. Résistance d'isolement.....	25
I.4.3.6 Choix de la tension de mesure.....	25

# Sommaire

---

I.4.4. Mesure de la rigidité électrique.....	26
I.4.4.1. Rigidité longitudinale.....	26
I.4.4.2. Rigidité transversale.....	27
I.4.4.3. Choix de la tension d'essai.....	28
I.4.4.3.1. Essais de rigidité en tension alternative.....	29
I.4.4.3.2. Essais de rigidité en tension continue.....	29
I.4.4.4. Sélection du mode de disjonction.....	30
I.4.5. Déterminations des spectres d'analyses.....	30
I.4.5.1. Spectroscopie infra-rouge.....	31
I.4.5.2. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	31
I.4.5.3. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	32
I.4.5.4. Analyse thermique différentielle(A.T.D).....	32
I.5.Conclusion.....	32

## Chapitre II : Protocole Expérimentale

II.1. Introduction.....	33
II.2. Présentation des matériaux.....	33
II.2.1. propriétés des matériaux.....	34
II.2.1.1. La Bakélite.....	34
II.2.1.2. Le Verre.....	35
II.2.1.3.Le Polyéthylène.....	37
II.3. Les essais de vieillissement électrique.....	40
II.3.1. Mesure de la résistance.....	40
II.3.1.1. Mesure de la résistance transversale.....	40
II.3.1.2. Mesure de la résistance superficielle.....	41
II.3.2. Rigidité diélectrique longitudinale.....	41
II.3.3. Mesure de capacité Cx et du facteur de perte tgδ.....	41
II.4. Analyses chimiques.....	42

# Sommaire

---

II.4.1. Analyse spectroscopique IR.....	42
II.4.1.1. Equipement.....	42
II.4.1.2. Mesure.....	44
II.4.2. Microscope électronique à balayage.....	45
II.4.2.1. Equipement.....	45
II.4.2.2. Principe de base.....	45
II.4.2.3. préparation des échantillons.....	47
II.4.3. Analyse thermique.....	48
II.4.3.1. L'analyse thermogravimétrique (ATG).....	48
II.4.3.1.1. Equipement.....	48
II.4.3.1.2. Mesures.....	49
II.4.3.2. Analyse Thermique Différentielle (A.T.D).....	50
II.4.3.3. Caractéristiques techniques d'A. T. G et A. T. D.....	50
<b>Chapitre III : présentation et interprétation des résultats</b>	
III.1. Introduction.....	53
III.2. Présentation, interprétation et discussion des résultats d'essais électriques.....	53
III.2.1. Mesure de la résistance.....	53
III.2.1.1. Mesure de la résistance transversale.....	54
III.2.1.2. Mesure de la résistance superficielle.....	54
III.2.2. Rigidité diélectrique longitudinale.....	55
III.2.3. Mesure de capacité Cx et du facteur de perte tg $\delta$ .....	57
III.2.3.1. Mesure de capacité Cx.....	57
III.2.3.2. Mesure du facteur de pertes.....	63
III.2.3.3. Calcul de La permittivité électrique $\epsilon_r$ et l'indice de perte $\epsilon_r \cdot \text{tg}(\delta)$ .....	68
III.3- Présentation, interprétation et discussions des résultats d'analyses chimiques.....	69
III.3.1- Analyse infrarouge.....	69

# Sommaire

---

a-Résultats d'analyse du verre.....	69
b-Résultats d'analyse IR de la bakélite.....	72
c-Résultats d'analyse IR du polyéthylène.....	77
III.3.2-Analyse microscopique a balayage (MEB).....	81
a-Analyse de la morphologie.....	81
b-Microanalyse.....	84
III.2.3-Analyse ATG/ATD.....	86
III.4. Conclusion.....	88
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>89</b>
<b>Bibliographie</b>	

# *LISTE DES FIGURES*

## Liste des figures

---

<b>Fig. I.1.</b> Représentation électrique d'un diélectrique parfait (le vide).....	4
<b>Fig. I.2.</b> Représentation électrique d'un diélectrique réel.....	5
<b>Fig. I.3.</b> Représentation série d'un diélectrique réel.....	6
<b>Fig. I.4.</b> Réponse en fréquence d'un diélectrique réel série.....	8
<b>Fig. I.5.</b> Représentation parallèle d'un diélectrique réel.....	8
<b>Fig. I.6.</b> Réponse en fréquence d'un diélectrique réel parallèle.....	9
<b>Fig. I.7.</b> Représentation réelle d'un diélectrique réel .....	10
<b>Fig.I.8.</b> Schéma de principe du pont de Schering.....	20
<b>Fig. I.9.</b> Schéma de principe du pont de Schering à transformateur différentiel.....	21
<b>Fig. I.10.</b> Circuit électrique de mesure de $C_x$ , $tg\delta$ et $\epsilon_r$ avec le pont de Schering à transformateur différentiel.....	22
<b>Fig. I.11.</b> Schéma de mesure de la résistance transversale.....	23
<b>Fig. I.12.</b> Schéma de mesure de la résistance superficielle.....	24
<b>Fig. I.13.</b> Principe de mesure de la résistance d'isolement.....	25
<b>Fig. I.14.</b> Schéma de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante.....	27
<b>Fig. I.15.</b> Schéma de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolant.....	28
<b>Fig. I.16.</b> Principe de base d'un essai de rigidité diélectrique.....	30
<b>Fig.II.1 a-</b> Synthèse du salicylaldéhyde, précurseur de la Bakélite.....	34
<b>b-</b> Structure de la Bakélite.....	34
<b>Fig.II.2.</b> Variations thermiques du volume spécifique $V$ et de l'enthalpie $H$ lors du passage de l'état liquide à l'état solide (vitreux ou cristallin).....	35
<b>Fig.II.3.</b> Représentation schématique bi-dimensionnelle de la silice cristalline cristobalite).....	36
<b>Fig.II.4.</b> Représentation schématique bi-dimensionnelle de la silice vitreuse.....	36
<b>Fig. II.5.</b> Représentation schématique de la molécule de polyéthylène.....	38
<b>Fig.II.6.</b> Schéma de principe de l'analyse par spectroscopie d'absorption infrarouge.....	43
<b>Fig. II.7.</b> Schéma de fonctionnement d'un spectromètre IR à transformée de Fourier (FTIR).....	43
<b>Fig. II.8.</b> Schéma de base d'un MEB.....	46

## Liste des figures

---

<b>Fig. II.9.</b> Microscope électronique à balayage (MEB).....	48
<b>Fig. II.10.</b> Représentation schématique d'une ATG (type Setaram TG-DTA 92 B).....	49
<b>Fig. II.11.</b> Photo de l'appareillage de l' A.T.G et l'A.T.D.....	50
<b>Fig. III.1.</b> Caractéristique $V(I)_t$ du Verre, du Polyéthylène et de la Bakélite.....	53
<b>Fig. III.2.</b> Caractéristique $V(I)_s$ du Verre, du Polyéthylène et de la Bakélite.....	54
<b>Fig. III.3.</b> Tension disruptive en fonction de la distance inter-électrodes des plaques propres de polyéthylène, de Verre et de Bakélite.....	56
<b>Fig. III.4.</b> Tension disruptive en fonction de la distance interélectrodes des plaques polluées de polyéthylène, de Verre et de Bakélite à $\sigma_s = 0.2Ms$ .....	56
<b>Fig.III.5.</b> Tension disruptive en fonction de la distance inter-électrodes des plaques polluées de polyéthylène, de Verre et de Bakélite à $\sigma_s = 5mS$ .....	57
<b>Fig.III.6.</b> Capacité $C_x$ en fonction de la fréquence du polyéthylène vierge.....	58
<b>Fig.III.7.</b> Capacité $C_x$ en fonction de la fréquence du polyéthylène vieilli à sec.....	58
<b>Fig.III.8.</b> capacité $C_x$ en fonction de la fréquence du polyéthylène vieilli sous pollution humide.....	59
<b>Fig.III.9.</b> capacité $C_x$ en fonction de la fréquence de la Bakélite vierge.....	59
<b>Fig.III.10.</b> capacité $C_x$ en fonction de la fréquence de la Bakélite vieillie à sec.....	59
<b>Fig.III.11.</b> capacité $C_x$ en fonction de la fréquence de la Bakélite vieillie sous pollution humide.....	60
<b>Fig.III.12.</b> capacité $C_x$ en fonction de la fréquence du Verre vierge.....	61
<b>Fig.III.13.</b> capacité $C_x$ en fonction de la fréquence du Verre vieilli à sec.....	61
<b>Fig.III.14.</b> capacité $C_x$ en fonction de la fréquence du Verre vieilli sous pollution Humide.....	62
<b>Fig.III.15.</b> capacité $C_x$ en fonction de la fréquence du polyéthylène vierge, vieilli à sec et sous pollution humide.....	62

## Liste des figures

---

<b>Fig.III.16.</b> capacité Cx en fonction de la fréquence de la Bakélite vierge, vieilli à sec et sous pollution humide.....	63
<b>Fig.III.17.</b> capacité Cx en fonction de la fréquence du verre vierge, vieilli à sec et sous pollution humide.....	63
<b>Fig.III.18.</b> facteur de perte en fonction de la fréquence du polyéthylène vierge.....	64
<b>Fig.III.19.</b> Facteur de perte en fonction de la fréquence du polyéthylène vieilli à sec.....	64
<b>Fig.III.20.</b> Facteur de perte en fonction de la fréquence du polyéthylène vieilli sous pollution humide.....	65
<b>Fig.III.21.</b> Facteur de perte en fonction de la fréquence de la Bakélite vierge.....	65
<b>Fig.III.22.</b> Facteur de perte en fonction de la fréquence de la Bakélite vieillie à sec.....	66
<b>Fig.III.23.</b> Facteur de perte en fonction de la fréquence de la Bakélite vieillie sous pollution humide.....	66
<b>Fig.III.24.</b> Facteur de perte en fonction de la fréquence du verre vierge.....	66
<b>Fig.III.25.</b> facteur de perte en fonction de la fréquence du verre vieilli à sec.....	67
<b>Fig.III.26.</b> facteur de perte en fonction de la fréquence du verre vieilli sous pollution Humide.....	67
<b>Fig.III.27.</b> facteur de perte en fonction de la fréquence du Polyéthylène vierge, vieilli à sec et sous pollution humide.....	67
<b>Fig.III.28.</b> facteur de perte en fonction de la fréquence de la Bakélite vierge, vieillie à sec et sous pollution humide.....	68
<b>Fig.III.29.</b> Facteur de perte en fonction de la fréquence du verre vierge, vieilli à sec et sous pollution humide.....	68
<b>Fig.III.30 :</b> spectre IR des échantillons (vierge et vieillis) de verre.....	70
<b>Fig.III.31.</b> Zone spécifique au groupement Si-O rocking des échantillons de verre.....	70
<b>Fig.III.32.</b> Zone spécifique au groupement Si-Obending des échantillons de verre.....	71

## Liste des figures

---

<b>Fig.III.33.</b> Zone spécifique au groupement Si-O stretching des échantillons de verre.....	71
<b>Fig.34.</b> spectre IR des échantillons (vierge et vieillis) de Bakélite.....	72
<b>Fig.III.35.</b> Zone spécifique au groupement C-H des échantillons de Bakélite.....	73
<b>Fig.III.36.</b> Zone spécifique au groupement O-H des échantillons de Bakélite.....	74
<b>Fig. III.37.</b> Zone spécifique au groupement C=C des échantillons de Bakélite.....	74
<b>Fig.III.38.</b> Zone spécifique au groupement CH <sub>3</sub> libre et C-H de déformation des échantillons de Bakélite.....	75
<b>Fig. III.39.</b> Zone de vibration de CH <sub>2</sub> spécifique des phénols des échantillons de Bakélite...	76
<b>Fig. III.40.</b> Spectre IR de Polyéthylène.....	77
<b>Fig.III.41.</b> zone de vibration de liaison O-H.....	78
<b>Fig. III.42.</b> Zone de vibration des liaisons C=O spécifique des carbonyles .....	79
<b>Fig. III.43.</b> zone de vibration des groupements spécifiques C-H alcane et des acides C-O.....	80
<b>Fig. III.44.</b> Polyéthylène vieilli sous pollution humide.....	82
<b>Fig. III.45.</b> Bakélite vieilli à sec.....	83
<b>Fig. III.46.</b> Bakélite vieilli sous pollution humide.....	83
<b>Fig. III.47.</b> Spectre de la microanalyse de l'échantillon de PE vierge.....	84
<b>Fig III.48.</b> Spectre de la microanalyse de l'échantillon de Polyéthylène vieilli sous pollution humide.....	85
<b>Fig. III.49.</b> Thermogrammes de la variation du Taux de perte de masse (ATG%) en fonction de la température de traitement T (C°) des échantillons de Polyéthylène (vierge vieilli à sec et vieilli sous pollution humide).....	86
<b>Fig. III.50.</b> Thermogrammes de la variation de la vitesse de dégradation thermique du Polyéthylène, en termes de pourcentage de perte de masse (ATD%) en fonction de la	

## Liste des figures

---

de traitement T (°C) pour les échantillons de Polyéthylène vierge, vieilli à sec et vieilli sous pollution humide.....	87
--	----

# *LISTE DES TABLEAUX*

## Liste des tableaux.

<b>Tab. I.1 :</b> Impact des substances rejetées dans l'atmosphère.....	13
<b>Tab. I.2 :</b> Effets sur la santé de quelques polluants atmosphériques.....	16
<b>Tab. II.1 :</b> Propriétés physiques de la Bakélite.....	35
<b>Tab. II.2 :</b> Propriétés physiques moyennes du verre sodique.....	37
<b>Tab. II.3 :</b> Propriété physique du polyéthylène.....	39
<b>Tab. II.4 :</b> Résumé des analyses.....	51
<b>Tab.III.1 :</b> Mesure de la résistance transversale et de la résistivité transversale des différents matériaux.....	54
<b>Tab.III.2 :</b> Mesure de la résistance superficielle et de la résistivité superficielle des différents matériaux.....	55
<b>Tab.III.3.</b> la rigidité diélectrique longitudinale $E_1$ .....	57
<b>Tab.III.4.</b> Le calcul de permittivité électrique et de l'indice de perte.....	69
<b>Tab III.5:</b> taux des éléments chimiques dans le Polyéthylène vierge.....	85
<b>Tab. III.6:</b> taux des éléments chimiques dans le Polyéthylène vieilli humide.....	85

*INTRODUCTION  
GENERALE*

## Introduction générale

Les matériaux diélectriques, appelés plus communément les isolants électriques, sont des milieux qui ne peuvent pas conduire le courant électrique, tels que: le vide, le verre et de nombreux plastiques comme le polyéthylène et la Bakélite.

Les diélectriques réels ont la propriété de se polariser sous l'effet d'un champ électrique. Cette propriété est évaluée par la constante diélectrique du matériau isolant dite " permittivité "qui indique la proportion dans laquelle le champ principale se trouve affaibli par la polarisation.

De ce fait, il apparaît une composante de courant en phase avec la tension appliquée (courant de perte) donnant lieu à des pertes d'énergie liées à la polarisation.

En tension continue, la polarisation est liée au courant de charge et de décharge. En tension alternative, la polarisation entraîne une augmentation de la permittivité diélectrique, ce qui signifie que plus la polarisation d'un matériau est forte, plus la capacité d'un condensateur est grande.

Le but de cette étude est de déterminer les propriétés physico-chimiques de trois isolants solides: le verre utilisé dans les systèmes d'isolateurs de traversé, la bakélite utilisée comme barrière isolante dans les armoires électriques, et le polyéthylène utilisé pour l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique.

Notre étude consistera, d'abord, à faire le point sur les phénomènes physiques qui s'opèrent dans les matériaux diélectriques, ainsi que les connaissances actuelles concernant les trois matériaux isolants considérés par cette étude et qui portera, d'une part, sur leurs structures chimiques, et d'autre part, sur leurs propriétés électriques et mécaniques intéressant particulièrement le domaine du génie électrique.

Un intérêt particulier sera réservé au problème sérieux que constitue la pollution dans le domaine de l'électrotechnique, et dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement de l'appareillage haute tension car les dépôts polluants qui recouvrent les

## Introduction générale

---

surfaces isolantes peuvent engendrer une diminution considérable de la tension de tenue des barrières isolantes. Ainsi, l'action de décharges sur ces isolants est un facteur de vieillissement qui entraîne la dégradation des surfaces isolantes.

Il sera également question de déterminer les propriétés chimiques du polyéthylène, du verre et de la bakélite et leurs comportements à l'échelle moléculaire suite à un vieillissement électrique subi sous une contrainte de champ appliqué. Pour cela nous avons réparti notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les propriétés physiques des matériaux diélectriques, à l'effet de la pollution atmosphérique sur ces matériaux ainsi que les différentes méthodes de mesures des caractéristiques physiques et chimiques des matériaux diélectriques qui sont en l'occurrence : la méthode du pont de Schering (pont à transformateur différentiel), la méthode de mesure de la résistivité, la méthode de mesure de la rigidité diélectrique et enfin les méthodes de détermination des spectres d'analyses chimiques telles que IR, MEB, ATD et ATG.

Le deuxième chapitre sera consacré à une présentation des matériaux et matériels utilisés aux laboratoires afin de réaliser le vieillissement électrique et les analyses chimiques.

Le troisième chapitre illustrera les résultats obtenus par les mesures électriques et les analyses chimiques ainsi que leurs interprétations, comme nous tenterons d'établir une corrélation entre le comportement électrique et chimique de ces matériaux, en liant la variation de leurs grandeurs électriques aux modifications opérées dans leurs structures moléculaires.

Enfin, une conclusion générale résumera l'essentiel à retenir de notre travail.

# *Chapitre I*

## *ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

## I.1. Définition

Un isolant est un matériau qui permet d'empêcher les échanges d'énergie entre deux systèmes.

On distingue : les isolants électriques, les isolants thermiques, les isolants phoniques et les isolants mécaniques.

Le contraire d'un isolant est un conducteur (électricité et chaleur), ou transmetteur (mécanique et son). En électricité comme en électronique, un isolant est une partie d'un composant ou un organe ayant pour fonction d'interdire le passage de tout courant électrique entre deux parties conductrices.

Un isolant possède peu de charges libres, elles y sont piégées, contrairement à un matériau conducteur.

## I.2. Caractéristiques des diélectriques

Les matériaux isolants sont caractérisés par l'apparition d'une composante de courant en phase avec la tension appliquée (courant de perte) donnant lieu à des pertes d'énergie liées à la polarisation.

La qualité d'un matériau isolant est définie par ses propriétés diélectriques, représentées principalement par ses pertes diélectriques, sa permittivité électrique, sa capacité électrique et sa rigidité électrique. Ces dernières sont liées à sa structure chimique qui est d'aspect amorphe ou cristallin.

### I.2.1. Polarisation des diélectriques [1, 2, 3]

Sous l'effet d'un champ électrique, les électrons présents dans un milieu diélectrique effectuent des mouvements d'oscillation autour des noyaux qui sont à l'origine de la déformation des *nuages électroniques* formés, et créent ainsi des dipôles électrostatiques. Ceci constitue la polarisation électronique du diélectrique.

Si on considère un condensateur plan à diélectrique parfait (vide) :  $q_0 = C_0 U$  (I.1)

Et un condensateur à diélectrique réel :  $q_d = CU = \epsilon_r C_0 U = \epsilon_r q_0$  (I.2)

Avec,  $C = \epsilon_r C_0$  (I.3) et  $q_d > q_0$  (I.4)

$\epsilon_0$  : la permittivité du vide

L'augmentation de C est liée au phénomène de polarisation : sous l'influence de la tension appliquée au diélectrique, a lieu l'orientation des charges liées de ce dernier.

Si  $q_p$  est la charge due à la polarisation :  $q_d = q_0 + q_p$

Le diélectrique polarisé peut être considéré comme un dipôle ayant pour moment :

$$\vec{u} = q_p \cdot d = \vec{p} \cdot s \cdot d \quad (I.5)$$

$$\text{Avec : } \vec{p} = \frac{\vec{u}}{s \cdot d} = \frac{q_p}{s} = \sigma_p \quad (I.6)$$

$$\text{Le vecteur déplacement : } D = \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{p} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad (I.7)$$

$$\text{D'où : } \vec{p} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} (\varepsilon_r - 1) \quad (I.8)$$

On définit par  $\vec{P}$  la polarisation, somme de tous les dipôles du matériau, proportionnelle au champ électrique  $\vec{E}$  qui l'a créé :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E} \quad (I.9)$$

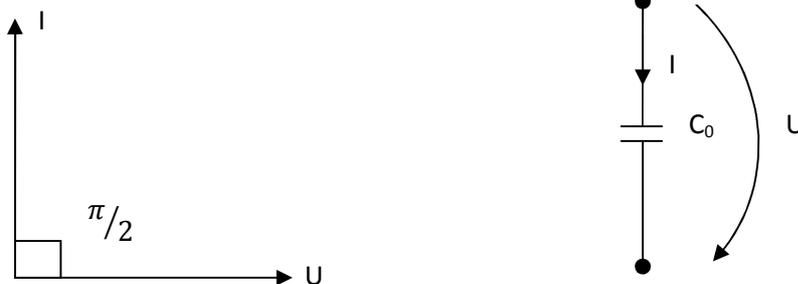
$$\text{Et } \chi \text{ la susceptibilité électrique du matériau : } \chi = \varepsilon_r - 1 \quad (I.10)$$

## I.2.2. Pertes diélectriques [1, 4, 5, 6, 7]

Les isolants soumis à des champs électriques alternatifs sinusoïdaux sont le siège de pertes d'énergie active sous forme thermique dues à la conductivité du diélectrique, ainsi qu'au phénomène de relaxation liées à la polarisation. L'élément qui produit ces phénomènes est le facteur de pertes diélectrique  $\text{tg } \delta$ ,  $\delta$ : angle de pertes diélectriques

Pour les diélectriques parfaits  $\delta=0$

$$I_C = j\omega C_0 u \quad (I.11) \quad (\text{sans pertes})$$



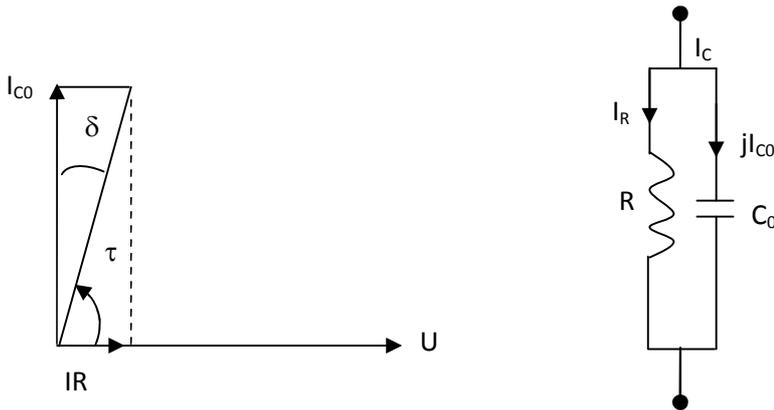
**Fig. I.1.** Représentation électrique d'un diélectrique parfait (le vide)

Or, en réalité,  $\delta$  n'est pas nulle, il existe un courant de conduction  $I$  défini par :

$$I_C = I_R + jI_{c0} \quad (I.12)$$

$$C_0 = \frac{C}{\varepsilon_r} \quad (I.13)$$

$$I_C = j\omega \underbrace{\varepsilon_r c_0}_C \cdot U = I_R + jI_{c0} \quad (I.14)$$



**Fig. I.2.** Représentation électrique d'un diélectrique réel

On pose :  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$  ; (I.15)

Avec  $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$  (I.16)

$\varepsilon_r''$  : Permittivité relative du diélectrique définissant la composante du courant  $I_R$  en phase avec la tension (composante des pertes actives).

$$\varepsilon_r'' = \frac{I_R}{\omega \cdot c_0 \cdot u} \quad (I.17)$$

$\varepsilon_r'$  : Permittivité relative du diélectrique définissant la composante du courant capacitif  $I_{c0}$  (composante des pertes réactives)

$$\varepsilon_r' = \frac{I_{c0}}{\omega \cdot c_0 \cdot u} \quad (I.18)$$

Le facteur de pertes diélectrique est la tangente de l'angle de pertes  $\delta$ . On calcule le facteur de pertes en faisant le rapport entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance équivalente d'un diélectrique.

$$I_C = j c \omega u = j \cdot c_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \omega \cdot u \quad (I.19)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (I.20)$$

D'où :

$$\underbrace{j \cdot Co \cdot \varepsilon_r' \cdot w \cdot u}_{I_{co}} + \underbrace{j \cdot Co \cdot \varepsilon_r'' \cdot w \cdot u}_{I_{co}} \quad (I.21)$$

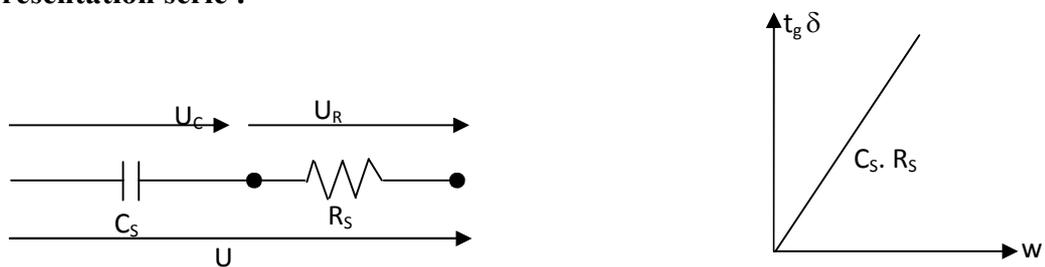
$$tg \delta = \frac{I_R}{I_{CO}} = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (I.22)$$

En pratique, on représente le plus souvent, un diélectrique par un schéma équivalent : circuit à constantes localisées.

Le circuit équivalent doit être tel que sa réponse en fréquence soit la même que celle du diélectrique.

### ➤ Circuits simples

\* Représentation série :



**Fig. I.3.** Représentation série d'un diélectrique réel

$$U_R = R_S \cdot I \quad (I.23)$$

$$U_C = \frac{I}{j \cdot C_S \cdot w} \quad (I.43)$$

$$D'où : \quad tg \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{R_S I}{I/c \cdot w} = R_S \cdot C_S \cdot w \quad (I.25)$$

Ou encore :

$$Z_s = R_s + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_s} \quad (I.26)$$

$$I = C_o \cdot \omega u (\varepsilon_r'' + j \varepsilon_r') \quad (I.27)$$

$$y = \frac{1}{Z_s} = \frac{I}{U} = \frac{R_s C_s^2 \omega^2}{R_s^2 C_s^2 \omega^2 + 1} + j \frac{C_s \cdot \omega}{R_s^2 C_s^2 \omega^2 + 1} = \frac{I}{U} = C_o \cdot \omega (\varepsilon_r'' + \varepsilon_r') \quad (I.28)$$

D'où :

$$\varepsilon_r'' = \frac{1}{C_o} \cdot \frac{R_s \cdot C_s^2 \cdot \omega}{R_s^2 C_s^2 \omega^2 + 1} \quad (I.29)$$

$$\varepsilon_r' = \frac{1}{C_o} \cdot \frac{C_s}{R_s^2 \cdot C_s^2 \cdot \omega + 1} \quad (I.30)$$

$$\Rightarrow \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = R_s \cdot C_s \cdot \omega \quad (I.31)$$

$w \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} \varepsilon_r'' &\rightarrow 0 \\ \varepsilon_r' &= \frac{C_s}{C_o} \end{aligned}$$

$\varepsilon_r$  statique =

$$\frac{C_s}{C_o} = \varepsilon_r'' + \varepsilon_r'$$

qd  $w \rightarrow 0$

$w \rightarrow 0$

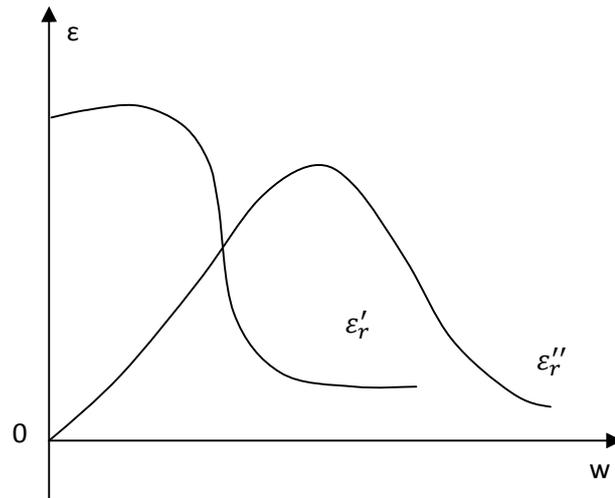
$w \rightarrow \infty$  :  $\varepsilon_r'' \rightarrow 0$

$$\varepsilon_r' \rightarrow 0$$

$\varepsilon_r$  optique  $\equiv 0$

$$= \varepsilon_r'' + \varepsilon_r'$$

qd  $w \rightarrow \infty$



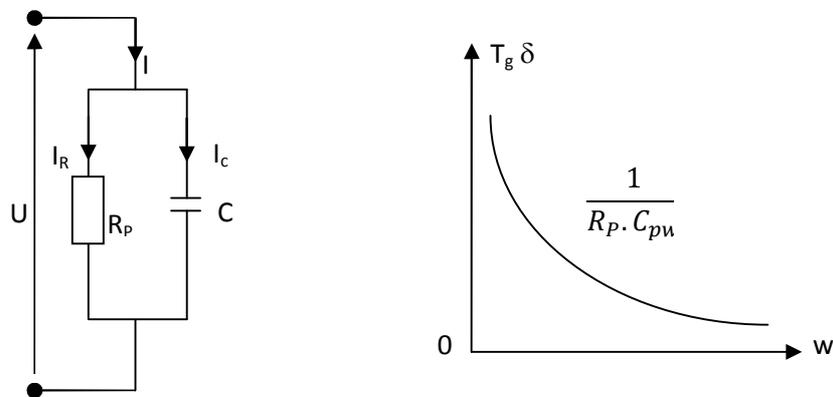
**Fig. I.4.** Réponse en fréquence d'un diélectrique réel série

Les pertes diélectriques sont représentées par les pertes joules dans  $R_S$ .

$$P_D = \frac{U_R^2}{R_S} = R_S \cdot I^2 = \frac{U^2 \cdot R_S}{R_S^2 + \frac{1}{C_S^2 \cdot \omega^2}} = U^2 \cdot C_S \cdot \omega \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (\text{I.32})$$

$$U_R = \frac{R_S}{R_S + \frac{1}{C_S \cdot \omega}} \cdot U \quad (\text{I.33})$$

**\* Représentation parallèle :**



**Fig. I.5.** Représentation parallèle d'un diélectrique réel

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{u/R_P}{C_P \cdot w u} = \frac{1}{R_P \cdot c_P \cdot w} \quad (\text{I.34})$$

Ou encore :

$$y = \frac{1}{R_P} + j \cdot w \cdot c_P = \frac{I}{U} = C_O \cdot w (\varepsilon_r'' + j \varepsilon_r') \quad (\text{I.35})$$

$$I = C_O \cdot w u (\varepsilon_r'' + j \varepsilon_r') \quad (\text{I.36})$$

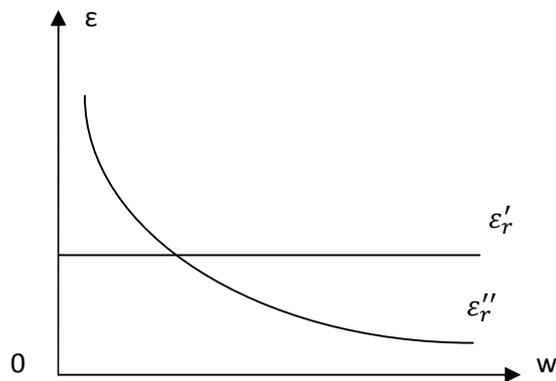
$$\Rightarrow \varepsilon_r'' = \frac{1}{R_P \cdot C_O \cdot w} \quad (\text{I.37}) \quad \text{Et} \quad \varepsilon_r' = \frac{c_P}{c_0} \quad (\text{I.38})$$

$$\text{D'où} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{1}{w R_P c_P} \quad (\text{I.39})$$

$$P_D = \frac{u^2}{R_P} = w \cdot c_P \cdot u^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = w \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2 \cdot \underbrace{\frac{s \cdot a}{v}}_1 = \varepsilon_r' \cdot \frac{E^2}{R_P \cdot c_0} \quad (\text{I.40})$$

(par unité de volume)

$$\text{Avec } c_P = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r' \cdot \frac{s}{a} \quad (\text{I.41}) \quad ; \quad u = E \cdot a \quad ; \quad (\text{I.42}) \quad c_P = \varepsilon_o \cdot c_0 \quad (\text{I.43})$$



**Fig. I.6.** Réponse en fréquence d'un diélectrique réel parallèle

## Représentation réelle : Combinaison des représentations série et parallèle

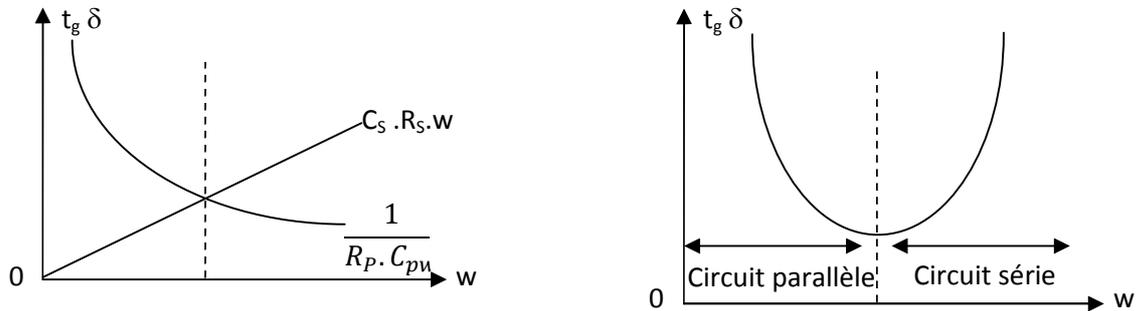


Fig. I.7. Représentation réelle d'un diélectrique réel

### I.2.3. Rigidité diélectrique [8, 9]

On appelle rigidité diélectrique d'un isolant la tension qui provoque la perforation d'un centimètre d'épaisseur de l'isolant.

La rigidité diélectrique 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 diélectrique 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.

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

- **la rigidité diélectrique transversale**, pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau.
- **la rigidité diélectrique longitudinale**, obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface.

#### I.2.3.1. Objet des essais diélectriques [1, 10, 11]

Les essais de rigidité diélectrique ont pour but de déceler les défauts de fabrication d'un matériel électrique, vérifier la qualité des isolants d'un matériel électrique, vérifier qu'une

## Chapitre I : Etude bibliographique

---

installation électrique a été correctement réalisée et contrôler la résistance d'isolement d'un matériel ou d'une installation pour en suivre l'évolution et le vieillissement.

Ils sont basés sur des mesures de résistance d'isolement et des essais de rigidité diélectrique.

### **I.3. Effet de la pollution atmosphérique sur les matériaux isolants**

#### **I.3.1 Définition**

##### **I.3.1.1. Pollution**

La pollution, est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature.

##### **I.3.1.2. Salinité (Sa) [12]**

La salinité est le poids en grammes de résidu solide contenu dans un kilogramme d'eau de mer quand tous les carbonates ont été transformés en oxydes, le brome et l'iode remplacés par le chlore, et que toute la matière organique a été complètement oxydée.

Cette détermination étant difficile à réaliser, on a cherché une méthode plus facile.

D'après les documents techniques de l'Unesco sur les sciences de la mer N°36 de 1984.

La salinité absolue, représentée par le symbole  $S_A$  est définie comme étant le rapport de masse de matière dissoute dans l'eau de mer sur la masse d'eau de mer. En pratique, cette quantité ne peut pas être mesurée directement et une salinité pratique est définie pour rendre compte des observations océanographiques.

La salinité pratique, symbole  $S$ , d'un échantillon d'eau de mer, est définie à l'aide du rapport  $K_{15}$  de la conductivité électrique de cet échantillon d'eau de mer à la température de  $15^\circ\text{C}$  et sous une pression d'une atmosphère normale, à celle d'une solution de chlorure de potassium ( $\text{KCl}$ ), dont la masse de  $\text{KCl}$  par kilogramme de solution est  $32,4356 \cdot 10^{-3}$ , aux mêmes températures et pression. La valeur de  $K_{15}$  exactement égale à 1 correspond, par définition, à une salinité pratique exactement égale à 35. La salinité pratique est définie en fonction du rapport  $K_{15}$  par l'équation suivante :

## Chapitre I : Etude bibliographique

---

$$S = 0,0080 - 0,1692 K^{1/2} + 25,3851 K + 14,0941 K^{3/2} - 7,0261 K^2 + 2,7081 K^{5/2} \quad (I.44)$$

où :  $a_0=0.0080$     $a_1=-0.1692$     $a_2=25.3851$     $a_3=14.0941$     $a_4=-7.0261$     $a_5=2.7081$

$$\Sigma \alpha_i = 35.0000 \quad 2 \leq S \leq 42$$

### I.3.1.3. Couche de pollution

On appelle couche de pollution une couche conductrice électrolyte sur la surface de l'isolant contenant des sels et des matériaux inertes.

### I.3.1.4. Degré de pollution

C'est la valeur (salinité, conductivité de la couche, densité de dépôt de sel) qui caractérise la pollution artificielle appliquée à l'isolant en essai.

## I.3.2. Différents Niveaux de pollution [13]

### I.3.2.1. La pollution locale (en milieu urbain)

Elle est constatée à proximité immédiate des sources de pollution. Elle correspond à la pollution localisée par exemple sur une rue mal ventilée, une artère très fréquentée à l'heure de pointe, ou dans un quartier à l'intérieur d'une même agglomération. Les polluants en jeu sont principalement le monoxyde de carbone (CO), l'ozone (O<sub>3</sub>) produite par les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les hydrocarbures non méthaniques (HCNM) et les composés organiques volatils (COV). La transformation photochimique de ces gaz en ozone est plus ou moins accentuée selon la situation géographique (vallée encaissée), la situation climatique (ensoleillement, faiblesse des vents) ou encore les activités industrielles. Tous ces gaz sont principalement émis par les véhicules automobiles. Les particules émises surtout par les moteurs diesel sont une autre source de pollution localisée.

### I.3.2.2. La pollution régionale

Elle est due à la dilution spatiale, à l'échelle d'une agglomération ou d'une vallée de montagne, des émissions polluantes. Son action dépend largement du régime météorologique (précipitation au sol par la pluie, dispersion par le vent...). Les fortes pollutions au niveau d'une grande agglomération sont essentiellement liées à la présence d'ozone (et donc à la production de NO<sub>x</sub>) et d'hydrocarbures non méthaniques.

# Chapitre I : Etude bibliographique

## II.2.3. La pollution globale ou mondiale :

Elle correspond à une pollution à l'échelle de la planète. Les polluants responsables de la pollution à très grande échelle, différents de ceux cités précédemment, sont ceux qui dégradent la couche d'ozone à haute altitude et le CO<sub>2</sub>, responsable à plus de 90% de l'effet de serre. L'énergie nucléaire, faible émettrice de CO<sub>2</sub>, dans la production électrique totale.

Le type de pollution observé dépend donc de la nature des polluants, ce que récapitule le

Nature de la pollution	Emission responsable
Acidification	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, NH <sub>3</sub>
Contamination du sol et des eaux	Métaux lourds, polluants organiques persistants (POPs)
Destruction de la couche d'ozone	CFC
Oxydation photochimique	NO <sub>x</sub> , COV hors méthane
Effet de serre	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , HFC, PFC indirectement : CO, COV, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>
Impact sur la santé	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COV, CO, HCl, poussières, métaux lourds, POPs

**Tab. I.1. Impact des substances rejetées dans l'atmosphère**

## I.3.3. Sources de pollution [14, 15, 16, 17]

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leurs origines et classés comme suit :

### I.3.3.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient:

- des sels marins dans les régions côtières.
- des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants).
- des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

#### I.3.3.1.1. Pollution marine

L'installation située en bord de mer est exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolants, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance.

### **I.3.3.1.2. Pollution désertique**

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolants après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total du système d'isolation.

### **I.3.3.2. Pollution industrielle**

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais ..... etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, et/ou la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants.

Les usines ne sont pas les seules responsables de ce genre de pollution ; les gaz d'échappement des véhicules et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolants.

### **I.3.3.3. Pollution mixte**

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer.

## **I.3.4. Influences des facteurs climatiques sur les isolants pollués [18,19]**

### **I.3.4.1. Le vent**

Le vent tend à disperser la pollution surtout en l'absence de relief. Plus le vent est fort, plus la pollution se disperse rapidement. Donc le vent joue deux rôles. Il assure le transport et la distribution des polluants formés sur les surfaces des systèmes électriques lorsque les polluants rencontrent une barrière, d'autre part il peut se comporter comme agent d'auto nettoyage.

### **I.3.4.2. La pluie**

La présence de pluies (ou de neiges) conduit toujours à une diminution de pollution. Cette dernière est beaucoup plus faible lorsqu'il pleut. L'atmosphère est purifiée, mais les fines pluies humidifient les surfaces polluées, donc favorisent l'adhérence de pollution, ce qui augmente le risque de contournement.

### **I.3.4.3. Humidités**

L'humidification est considérée comme un obstacle car elle influe négativement sur la tenue électrique des systèmes électriques isolants puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés à leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue.

### **I.3.4.4. Température**

Pour les surfaces polluées, les hautes températures ont une influence positive, car elles sèchent les dépôts qui augmentent leur résistivité. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

### **I.3.5. Influence de la répartition de la pollution sur la surface des isolations [20]**

L'isolation solide des systèmes électriques utilisés dans des lignes de transport ou des postes de distribution d'énergie électrique sont susceptibles d'être soumis à de fortes pollutions. Des particules et des poussières portées par le vent se déposent progressivement sur les surfaces de la partie isolantes de ces systèmes, formant ainsi une couche polluante. La répartition de cette couche dépend du profil des isolations solides utilisées, de la dimension et de la disposition) de ces matériaux isolants par rapport au sol et le niveau de la tension qui leur est appliqué.

### **I.3.6. Effet de la pollution sur santé humaine [21]**

Les études épidémiologiques sont de plus en plus nombreuses. Elles tendent à démontrer une relation entre certaines affections respiratoires ou cardiovasculaires et la pollution urbaine. Bien entendu, les risques encourus dépendent de la durée d'exposition, de la nature et de la concentration du ou des polluants. L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) dresse pour certains polluants une liste de valeurs guides dans l'air ambiant recommandées. Plus la concentration en toxines est élevée, plus la durée d'exposition doit être

## Chapitre I : Etude bibliographique

---

courte. les effets connus de quelques composés nocifs sont résumés dans le tableau ci-dessous.

<b>Polluants</b>	<b>Effets sur la santé</b>
Ozone	Risques respiratoires
SO <sub>2</sub>	Effets cardiorespiratoires
CO	Risques cardiovasculaires et comportementaux
NO <sub>2</sub>	Atteintes pulmonaires
Plomb	Atteintes neurologiques

**Tab. I.2. Effets sur la santé de quelques polluants atmosphériques**

### **I.3.7. Effet de la pollution sur les équipements électriques [17]**

Les irrégularités dans la distribution du dépôt polluant sur la surface des isolants des systèmes électriques conduisent évidemment à une diminution des performances de ces derniers sous pollution. Ce problème a toujours entraîné et engendre encore des défauts d'isolation au niveau de ces réseaux électrique, il en résulte parfois des défaillances des équipements, des installations des consommateurs d'énergie électrique, une diminution de la fiabilité des réseaux électriques ainsi qu'un manque à gagner pour les exploitants de ces structures électrique.

Des statistique établies par les exploitants de réseau électrique algérien ont montré qu'environ 60% des incidents électriques enregistrés sur ces structures électriques sont dus à l'industrialisation de l'Algérie et à l'inexistence d'information à l'échelle national sur le niveau de la pollution des différentes régions traversées par le réseau électrique de la sonelgaz et le manque de moyens de lutte contre la pollution.

#### **I.3.7.1. Corrosion des isolateurs [14,22]**

La corrosion de l'isolateur se produit lorsqu'il est humide et pollué. Le passage du courant de fuite sur la surface du diélectrique crée une corrosion électrolyte des pièces

## Chapitre I : Etude bibliographique

---

métalliques, cette corrosion crée à son tour un dépôt de rouille conductrice qui coule sur la surface de l'isolateur.

La corrosion des pièces métalliques de l'isolateur a pour effets :

- d'affecter sa résistance mécanique particulièrement pour les isolateurs de type capot et tige ;
- d'affecter la tenue électrique du fait de la formation d'un dépôt de rouille sur la surface isolante qui peut entraîner des dommages à la partie isolante du fait d'une concentration du champ électrique autour de cette nouvelle électrode.
- d'entraîner la rupture du diélectrique du fait de l'expansion de la tige corrodée ;

De part leur conception, les isolateurs en silicone sont moins vulnérables aux effets de la corrosion que les isolateurs en verre ou en porcelaine du fait qu'ils conservent une bonne hydrophobicité limitant les courants de fuite et la présence d'arcs sur la surface de l'isolateur. Même dans des conditions extrêmes, la corrosion reste limitée à la collerette adjacente aux ailettes terminales ce qui n'affecte pas la résistance mécanique de l'isolateur.

### **I.3.7.2. Altération des surfaces des isolations solides des systèmes électriques [22]**

Dans les zones de forte pollution, l'altération des surfaces des diélectriques (partie isolante des systèmes électriques) a toujours été observée.

Celle-ci est souvent concentrée dans les zones où le champ électrique est plus élevé ou prédominent les zones sèches et les arcs qui y sont associés.

Plusieurs étapes successives peuvent être notées sur des isolants de bonne qualité :

- Dépoli de la surface qui devient plus mate.
- Traces d'arcs sous forme d'arborescence.
- Erosion de la matière isolante sur plusieurs dixièmes de millimètres avec pertes de masses sans réduction notable de la tenue de l'isolation.

Les matériaux de moindre qualité peuvent être sujet à un cheminement, c'est-à-dire à la formation irréversible d'un chemin conducteur.

La présence d'une activité électrique sur le revêtement des isolations composites est un facteur d'augmentation de la dureté de surface et de la rugosité par élimination partielle de la base du revêtement en élastomère chargé.

## Chapitre I : Etude bibliographique

---

En conséquence, la formulation du revêtement doit être optimisée, non seulement pour minimiser l'influence du vieillissement UV, mais sur tous pour éviter toute dégradation carbonée lors de la fixation des arcs de surface.

Seule une érosion minimale et contrôlée est acceptable pour garantir une tenue à long terme convenable.

Hormis le choix de matériaux fiables et durables, hormis la qualité des interfaces entre tous les matériaux, la conception de l'isolation doit être telle que les contraintes électriques locales soient les plus réduites possibles et en tous cas inférieure au seuil de vieillissement.

### **I.3.7.3.Arcs électriques [23]**

#### **I.3.7.3.1.Arc non localisé**

On dit qu'un arc est non localisé, lorsque la surface de l'isolation est amorcée par un arc et qui s'éteint rapidement pour se réamorcer à un autre endroit. Ce phénomène ne cause pas de dommages pour l'installation, malgré l'apparition de courant de fuite à la surface de l'isolation.

#### **I.3.7.3.2.Arc fixe**

L'arc se fixe sur la surface de l'isolation, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif).

Le courant de fuite, au travers de diélectrique et les phénomènes de polarisation alternative des molécules, représente une énergie qui se manifeste sous forme de chaleur dans le diélectrique (pertes diélectriques). Ces pertes varient selon la nature du diélectrique; elles sont proportionnelles à la fréquence et l'importance du champ électrique. Dans le cas d'une basse tension et d'une fréquence industrielle 50 Hz, les pertes diélectriques des matériaux isolants sont très faibles. En revanche en très haute tension et surtout pour des fréquences élevées, ces pertes deviennent importantes en période d'humidification longue et sont la cause d'échauffement excessif, destructeurs de l'isolation.

### **I.3.7.4.Contournement de l'isolation des systèmes électriques [24]**

La chronologie du processus qui mène au contournement est constituée essentiellement de quatre grandes phases :

Dépôt d'une couche solide constituée de sels et de matériaux insolubles, sauf dans le cas d'une pollution marine où la pollution est sous la forme d'embruns marins, humidification de la couche de pollution et circulation d'un courant dû à la dissolution des sels contenus dans le dépôt (formation d'un électrolyte), apparition de bandes sèches dues à l'échauffement par effet Joule résultant de la circulation du courant et conduisant à l'amorçage de décharges locales, élongation des décharges jusqu'à court-circuiter l'isolation.

### **I.4. Les méthodes de mesures des caractéristiques physico-chimiques des matériaux**

#### **I.4.1. Introduction**

Les matériaux isolants sont caractérisés par leurs propriétés chimiques et physiques (électriques). Ces dernières prennent effet lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique et à travers lesquelles le matériau est classé bon ou mauvais isolant. Des techniques précises sont mises au point pour mesurer, évaluer ou détecter les grandeurs liées à ces propriétés.

#### **I.4.2. Mesure du facteur de pertes $\text{tg}\delta$ par la méthode du pont de Schering [1, 3, 7, 8, 25, 26, 27]**

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

##### **I.4.2.1 Impédance de branche :**

L'impédance de l'objet d'essais

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \quad (\text{I.45})$$

$$Z_x = \frac{1}{j\omega \cdot C_x} (1 + j\text{tg} \delta_x) \quad (\text{I.46})$$

$$\text{Avec : } \text{tg} \delta_x = \omega \cdot R_x \cdot C_x \quad (\text{I.47})$$

$$Z_N = \frac{1}{j\omega \cdot C_N} \quad (\text{I.48})$$

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

$$Z_3 = R_3 \quad (I.49)$$

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

Et (I.50)

A l'équilibre :  $I_G = 0$

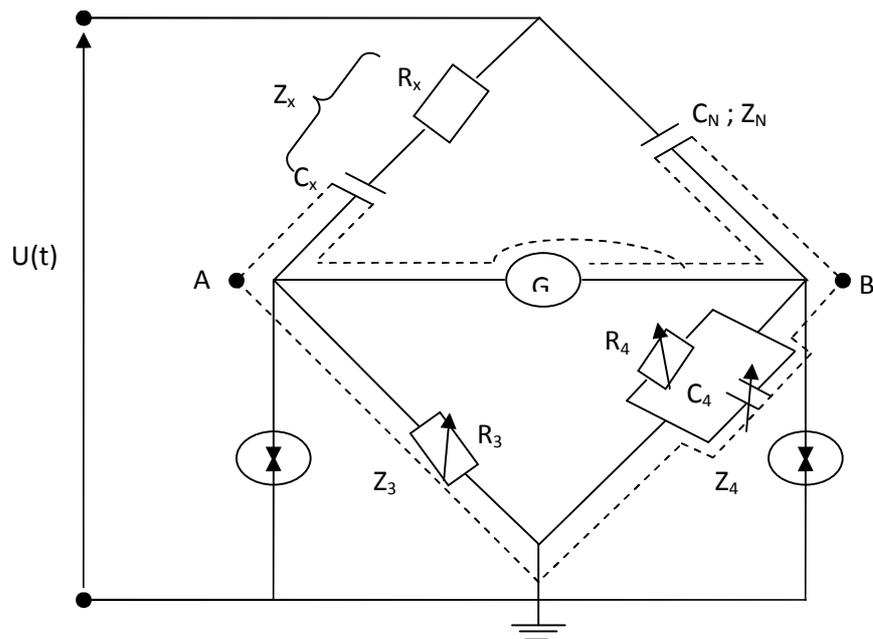
$$D'où : Z_x \cdot Z_4 = Z_N \cdot Z_3 \quad (I.51)$$

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

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \quad (I.52)$$

$$\text{tg } \delta_x = \omega \cdot R_x \cdot C_x = \frac{\omega R_3 \cdot C_x \cdot C_4}{C_N} \quad (I.53)$$

$$\Rightarrow \text{tg } \delta = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (I.54)$$



**Fig. I.8.** Schéma de principe du pont de Schering

### I.4.2.2. Mesure de la constante diélectrique $\epsilon_r$

$$C_x = \epsilon_r \cdot C_o \Rightarrow \epsilon_r = \frac{C_x}{C_o} \quad (I.55) \quad ; \text{ avec } C_o = \epsilon_o \cdot \frac{S}{a} \quad (I.56)$$

D'où :

$$\epsilon_r = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \cdot \frac{a}{\epsilon_o \cdot S} \quad (I.57)$$

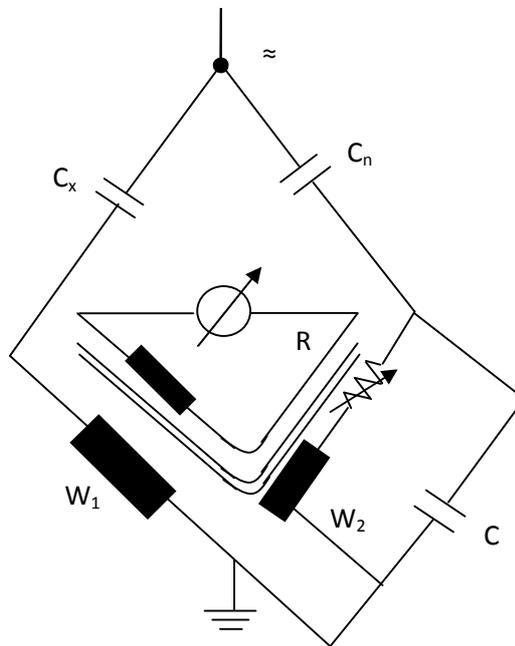
### I.4.2.3. Le pont à transformateur différentiel [28]

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.

$$\text{Le pont est en équilibre si } C_x = \frac{w_1}{w_2} \cdot C_N. \quad (I.58)$$

Le nombre de spire du  $w_1$  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.

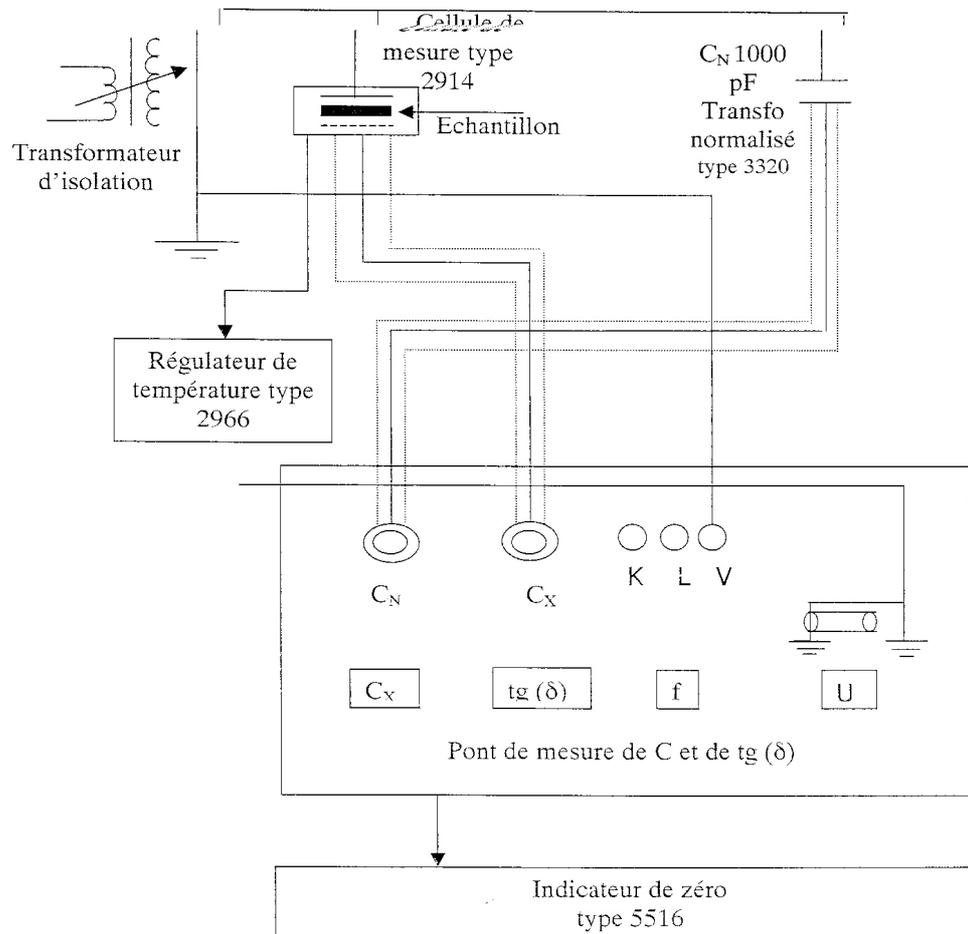
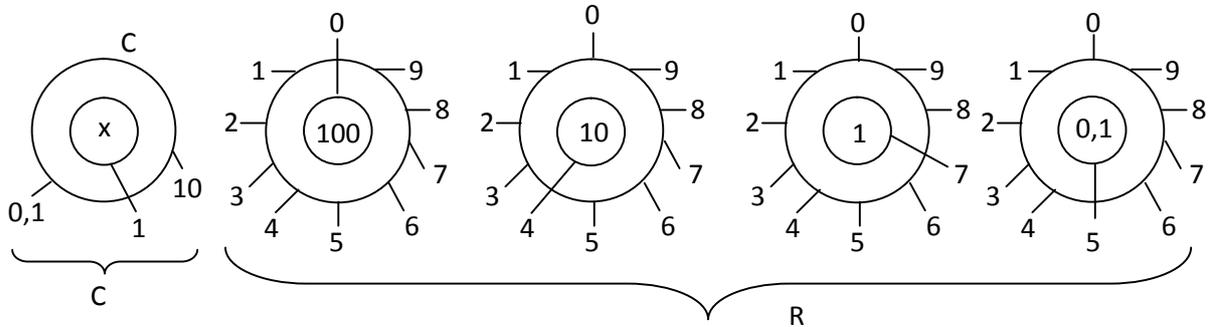


**Fig. I.9.** Schéma de principe du pont de Schering à transformateur différentiel

# Chapitre I : Etude bibliographique

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

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

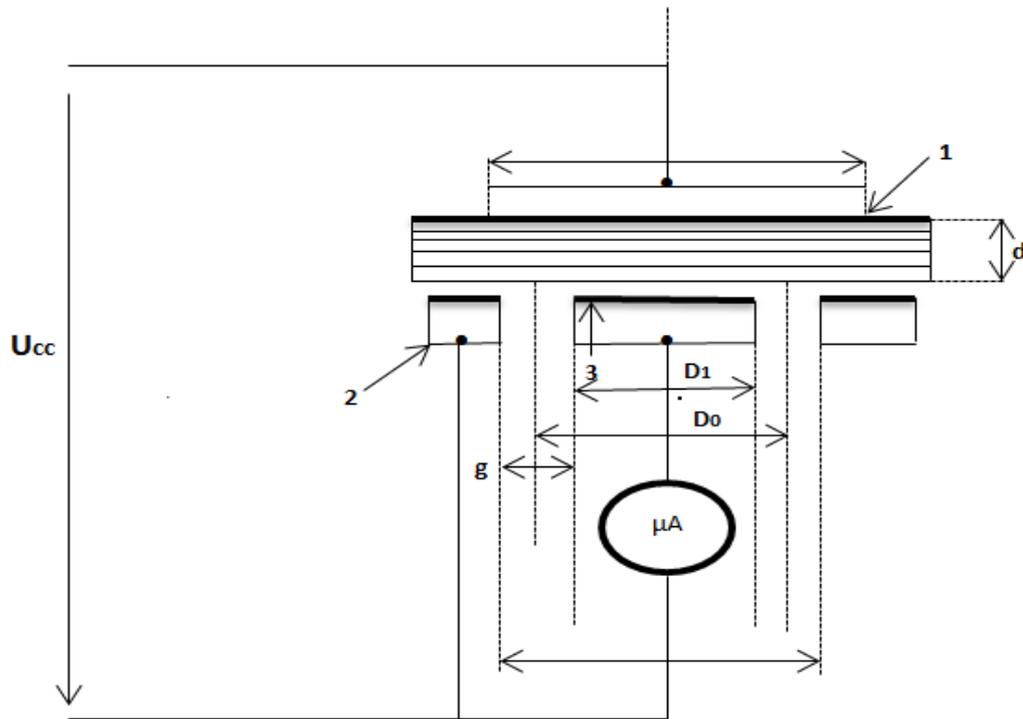


**Fig. I.10.** Circuit électrique de mesure de  $C_x$ ,  $\text{tg}\delta$  et  $\epsilon_r$  avec le pont de Schering à transformateur différentiel

## I.4.3. Mesure de résistances [8, 26, 29, 30]

### I.4.3.1. Résistance transversale (tension en continue)

La résistance transversale  $R_t$  mesurée entre deux électrodes appliquées sur deux faces apposées d'un échantillon est le quotient de la tension continue appliquées aux électrodes par la partie du courant qui travers l'isolant ente ces électrodes.



**Fig. I.11.** Schéma de mesure de la résistance transversale

- 1: électrode.
- 2: anneau de garde servant à éliminer, de la mesure, les courants de surface.
- 3: contre-électrode.

### I.4.3.2. Résistivité transversale (en tension continue) [3,8]

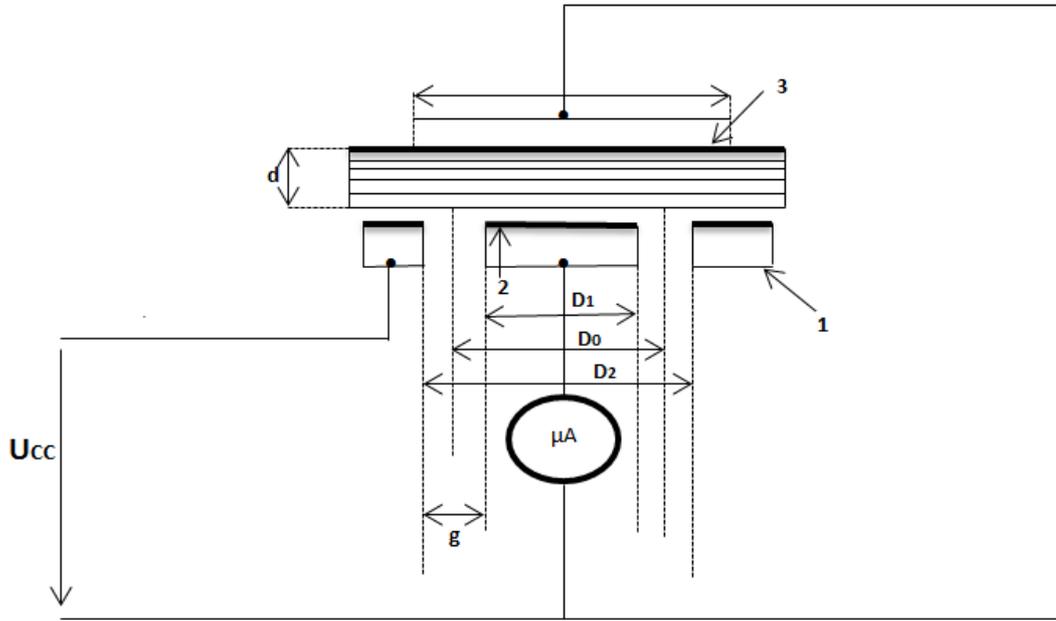
La résistivité transversale d'un matériau  $\rho_{cc}$  est le quotient du gradient de potentiel par densité de courant qui le traverse, ce qui donne :

$$\rho_{cc} = s_t \cdot R_t / d. \quad (I.59)$$

$$\text{Où } s_t = \pi D_0^2 / 4 \quad (I.60) \quad \text{et} \quad D_0 = (D_1 + D_2) / 2 \quad (I.61)$$

### I.4.3.3. Résistance superficielle (en tension continue)

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 cd dernier.



**Fig. I.12.** Schéma de mesure de la résistance superficielle

- 1: électrode
- 2 : contre-électrode
- 3: anneau de garde servant à éliminer de la mesure les courants transversaux.

### I.4.3.4. Résistivité superficielle (en tension continue) [3,8]

La Résistivité superficielle d'un matériau  $\rho_{ccs}$  est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur ; soit :

$$\rho_{ccs} = p.R_s / g. \quad (I.62)$$

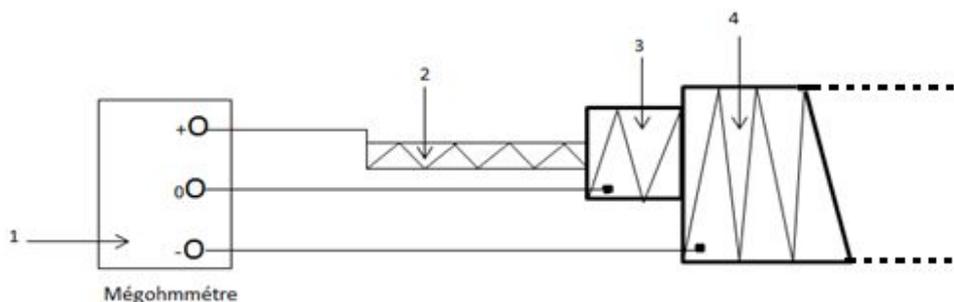
$$P = \pi.D_0 \quad (I.63) \quad \text{est le périmètre moyen entre l'électrode et la contre-électrode}$$

$$\text{Avec : } D_0 = (D_1 + D_2) / 2 \quad \text{et } g = (D_1 + D_2) / 2. \quad (I.64)$$

### I.4.3.5. Résistance d'isolement [2]

La Résistance d'isolement entre deux électrodes qui sont en contact avec un isolant est le rapport de la tension continue appliquée aux électrodes au courant global qui les traverse à un moment après l'application de cette tension.

Ce rapport dépend à la fois des résistances transversales et superficielle de l'isolant. Ces mesures sont effectuées de générateur de haute tension (1- 5kV) comportant un mégohmmètre.



**Fig. I.13.** Principe de mesure de la résistance d'isolement

1 : Mégohmmètre, 2 : conducteur, 3 : gaine isolante, 4 : électrode.

La résistance d'isolement est la résistance existant entre le conducteur sous tension et la gaine protectrice mise à la terre (câble).

Pour éviter la circulation des courants des fuites, on relie l'isolant au potentiel nul (0) du mégohmmètre.

### I.4.3.6 Choix de la tension de mesure [11]

Les mesures de résistance d'isolement devant permettre de vérifier que des matériaux ou des équipements répondent aux exigences des normes, il est important de se référer à ces normes pour choisir la tension de mesure.

Les valeurs de tension normalisées sont généralement : 50, 100, 250 et 500 volts continus.

En cas d'absence de recommandation, choisir une tension de 100 volts pour effectuer les mesures.

## Chapitre I : Etude bibliographique

---

Dans le cas de mesures sur des échantillons capacitifs et lors de l'étude de l'influence de la tension sur les valeurs de résistance d'isolement, il est important de toujours partir de la tension la plus basse et de poursuivre les mesures en augmentant la tension.

Une procédure dans l'ordre inverse pourrait donner des résultats incohérents.

### **I.4.4. Mesure de la rigidité électrique [1, 11, 26]**

L'essai de rigidité diélectrique 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, soit entre points, soit entre points et la masse, sont convenablement prévues suivant la technologie employée.

Le principe d'un essai de rigidité diélectrique est d'appliquer une tension (continue ou alternative) entre les points définis et après stabilisation de la tension de 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 (dans l'air ou dans les matériaux isolants).

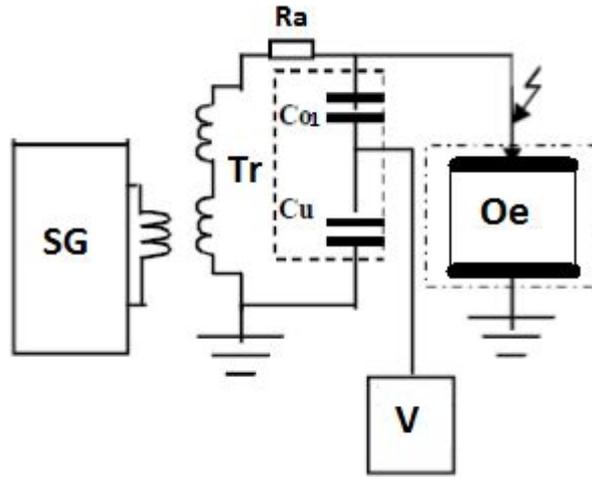
La sanction de défaut est déterminée par l'analyse de la forme, de l'amplitude et du temps de maintien du courant fourni par le générateur à l'élément en test et par comparaison avec une consigne déterminée.

#### **I.4.4.1. Rigidité longitudinale**

La rigidité diélectrique longitudinale d'un matériau isolant est obtenue entre deux conducteurs plans (électrodes planes) situés sur une même surface de cet isolant. La rigidité diélectrique 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 interélectrode  $d$  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 déterminée par la relation  $E_l = \frac{U_{\text{contournement}}}{d}$ . (I.65)



**Fig. I.14.** Schéma de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante

**SG** : Appareil de commande automatique et manuelle de la tension

**Tr** : Transformateur haute tension

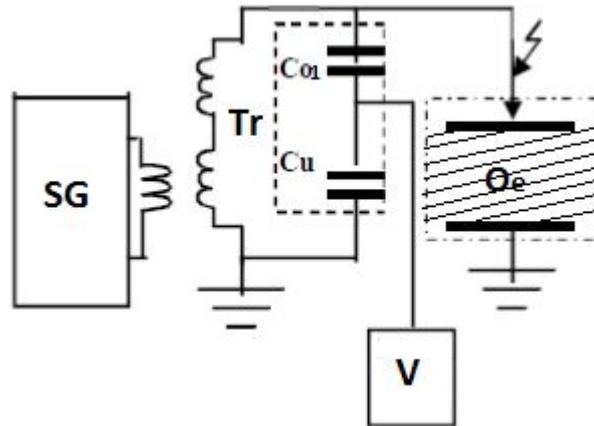
**V** : Voltmètre de crête

**Oe** : Objet d'essai

### I.4.4.2. 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  $d$  interélectrodes (épaisseur de la plaque isolante), par la montée rapide de la tension jusqu'à perforation de l'isolant.

La rigidité diélectrique transversale est déterminée par la relation  $E_r = \frac{U_p}{d}$ . (I.66)



**Fig. I.15.** Schéma de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolant

**SG** : Appareil de commande automatique et manuelle de la tension

**Tr** : Transformateur haute tension

**V** : Voltmètre de crête

**Oe** : Objet d'essai

### I.4.4.3. Choix de la tension d'essai

Les essais de rigidité diélectrique devant permettre de vérifier que des matériaux ou des équipements répondent aux exigences des normes, il est important de se référer à ces normes pour choisir la tension de mesure.

En l'absence d'indication concernant la valeur de tension d'essai, une règle habituelle est d'appliquer la formule suivante:

$$U_{\text{essai}} = 2 \times U_{\text{nominal}} + 1000 \text{ volts} \quad (\text{I.67})$$

La plupart des normes spécifient la nature, alternative (50-60 Hz) ou continue de la tension d'essai.

Une règle générale est de tester l'échantillon avec une tension d'essai de la même nature que celle qui lui sera appliquée durant son utilisation finale.

### I.4.4.3.1. Essais de rigidité en tension alternative

❖ *Avantage :*

- L'échantillon est éprouvé avec les 2 polarités de tension.

❖ *Désavantage :*

- La plupart des échantillons testés présentant une certaine valeur de capacité, la source HT doit fournir le courant de fuite et le courant réactif, ce qui entraîne un surdimensionnement du générateur d'où une augmentation de son prix, de son poids et une diminution de la sécurité de l'opérateur qui se trouve exposé à des courants plus élevés.
- Le courant réactif peut être évalué avec la formule suivant :

$$\text{Impédance} = \text{Tension/courant (loi d'Ohme : } Z = U/I) \quad (\text{I.68})$$

$$\text{Pour des capacités : } Z = 1/C\omega. \quad (\text{I.83}) \quad \text{avec } \omega = 2 \times \Pi \times f \quad (\text{I.69})$$

$$\text{Courant réactif : } I_r = U \times C \times 2 \times \Pi \times f \quad (\text{I.70})$$

Soit par exemple :  $U = 300 \text{ volts}$ .  $C = 1 \text{ nf}$  ( $\approx 10 \text{ mètres de câble blindé}$ )

$$I_r = 3000 \times 2 \times 3.14 \times 50 = 0.942 \text{ mA}$$

### I.4.4.3.2. Essais de rigidité en tension continue

❖ *Avantage :*

- La puissance de la source HT peut être inférieure à celle nécessaire en alternatif (poids moindre et sécurité pour l'utilisateur).

Le courant ne circule dans l'échantillon que durant la phase de charge.

❖ *Désavantage :*

- Le courant de charge peut faire déclencher la détection de claquage.
- L'échantillon ayant été chargé il faut le décharger au travers de la résistance de décharge incorporée dans les appareils ( $1,5 \text{ M}\Omega$ ).

Attention attendre suffisamment pour que la capacité de l'échantillon se soit déchargée avant de le déconnecter de l'appareil soit d'environ 8 secondes par mF.

- L'échantillon n'est essayé que dans une seule polarité.
- La tension d'essai doit être supérieure à celle prévue en alternatif.

## Chapitre I : Etude bibliographique

Une règle simple est d'utiliser le facteur de correction 1,4 (racine carrée de 2 = rapport entre la valeur efficace d'un signal alternatif et sa valeur crête) entre la tension continue et la tension alternative :

$$U_{\text{continue}} = 1,4 \times U_{\text{alternative}}. \quad (\text{I.71})$$

### I.4.4.4. Sélection du mode de disjonction

Le mode de contrôle du courant de fuite le plus simple et le plus répandu est le mode de contrôle par seuil de courant ou mode IMAX qui permet de fixer une limite maximale de courant circulant dans l'échantillon sous test au-delà de laquelle l'appareil détecte une disjonction et arrête l'essai en coupant la génération de la tension et en mémorisant la valeur de celle-ci sur l'écran.

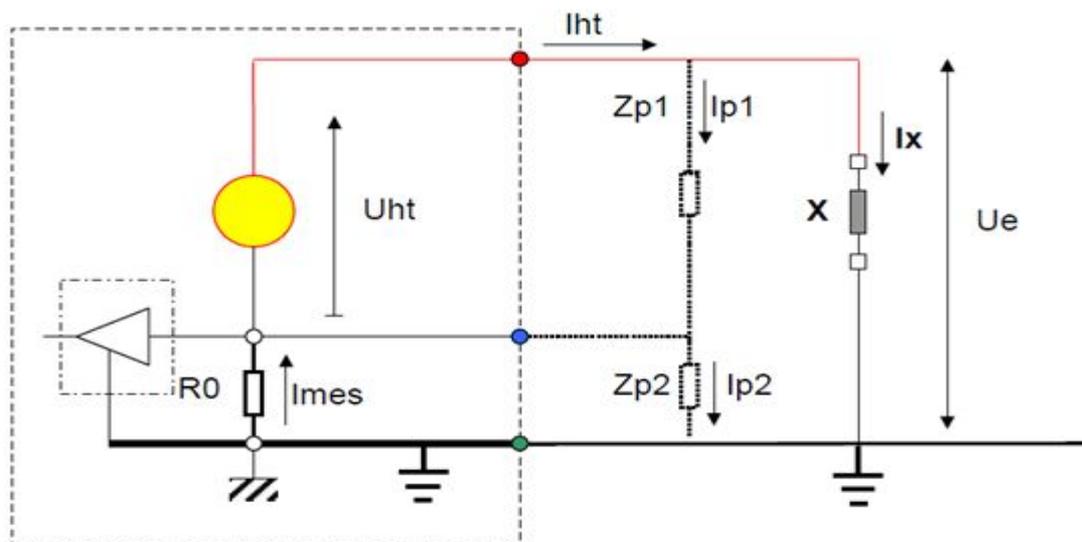


Fig. I.16. Principe de base d'un essai de rigidité diélectrique

### I.4.5. Déterminations des spectres d'analyses [31, 32, 33, 34]

L'évolution des grandeurs moléculaire liée aux modifications chimiques induites par la pollution d'un isolant peut être accessible par divers moyens d'analyse habituels. Néanmoins, dans les cas qui nous intéressent, les techniques qui apparaissent comme l'utile le plus simple à mettre en œuvre, sont les suivantes :

### **I.4.5.1. Spectroscopie infra-rouge**

La spectroscopie infra-rouge est un moyen de diagnostic permettant de déterminer la nature des liaisons chimiques présentes dans une molécule. En effet, l'expérience montre que certaines fréquences de vibration, dites « fréquences de groupe » sont caractéristiques de la présence d'un groupement chimique dans la molécule étudiée. La théorie mécanique des vibrations permet de prévoir l'existence des fréquences de groupe à partir des ordres de grandeur des différences types de constante de force. Ainsi, la spectroscopie infra-rouge est un très puissant moyen de caractérisation pour identifier des groupements moléculaires et obtenir de nombreuses informations microscopiques sur leur formation et leurs éventuelles interactions.

Dans le cas des polymères, la méthode infra-rouge peut nous renseigner, d'une manière quantitative, sur la concentration en polymère dans un mélange ou en copolymère, concentration en aditif ou en impureté dans un polymère.

Pour l'identification d'un matériau ou d'un objet, le travail en transmission est à privilégier, c'est celui qui est le plus représentatif. Dans le cas d'une poudre, un broyage dans du bromure de potassium (KBr) reste la solution la plus simple à réaliser. Pour ce qui concerne les films, l'utilisation d'une presse à chaud ou un solvant est la méthode la plus adéquate, car l'épaisseur du film ne doit pas dépasser quelques microns.

### **I.4.5.2. Microscopie électronique à balayage (MEB)**

Son principe de base est décrit comme suite :

Un faisceau très fin d'électrons, monocinétique, balaie la surface d'un échantillon où se produisent des interactions détectées par un capteur qui contrôle la brillance d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons ; on peut ainsi comparer le MEB est facile à utiliser, il a peu de contraintes 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.

### **I.4.5.3. Analyse thermogravimétrique ATG**

L'analyse thermo-gravimétrique (ATG), en anglais thermogravimetric analysis (TGA), est une technique d'analyse qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température.

Une telle analyse suppose une bonne précision pour les trois mesures: poids, température et variation de température. Comme les courbes de variations afin de pouvoir les interpréter, la dérivée de ces courbes montre à quels points ces variations sont les plus importantes.

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

### **I.4.5.4. Analyse thermique différentielle(A.T.D)**

Par cette analyse, nous avons étudié la différence de température entre un échantillon en cours d'étude et un échantillon de référence, les deux échantillons subissent donc un programme de température préalablement fixés, les signaux positifs correspondent à une transformation avec libération d'énergie << chaleur >> : réaction exothermique.

Des signaux négatifs signifient une consommation d'énergie: réaction endothermique, la différence de température  $T$  entre l'échantillon étudié et l'échantillon de référence est amplifiée et enregistrée en fonction du temps ou de la température.

## **I.5. Conclusion**

La pollution atmosphérique est l'un des agents qui nuit le plus au bon fonctionnement des systèmes d'isolation et à la continuité du service d'un système isolé. La connaissance du matériau utilisé est, dans ce cas, nécessaire pour lui assurer, du mieux possible, un fonctionnement correct même dans les mauvaises conditions d'exploitation. Ceci passe d'abord par la compréhension de son comportement physico-chimique qui est possible grâce à la mesure et la quantification de ses grandeurs caractéristiques. A chaque grandeur sa méthode de détermination qui nécessite le moyen et la technique pour une meilleure précision de la mesure.

# *Chapitre II*

## *PROTOCOLE EXPERIMENTALE*

### II.1. Introduction

Dans notre étude nous nous intéressons particulièrement aux matériaux utilisés dans les systèmes d'isolation, en particulier, la Bakélite, le verre et le polyéthylène. Les propriétés de Chacun justifient leurs domaines d'application ; la Bakélite est principalement utilisée dans l'appareillage électrique basse tension, en particulier dans les armoires électriques pour assurer l'isolement des systèmes de coupures électriques, le verre est le matériau par excellence utilisé pour la fabrication des isolateurs de traversée des lignes haute tension et le polyéthylène, sous sa forme réticulée (XLPE), est le matériau de choix utilisé pour l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique.

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les matériaux diélectriques ayant fait l'objet de notre étude, puis nous exposerons la technique expérimentale des essais électriques, menés au laboratoire de haute tension dans le but de simuler un vieillissement électrique accéléré de ces matériaux et de mesurer, avant et après ces essais, les différentes grandeurs électriques caractéristiques. Comme nous réalisons des analyses chimiques, menées au laboratoire de génie des procédés afin de les caractériser et de montrer l'effet de ce vieillissement électrique sur la micro structure de ces échantillons.

### II.2. Présentation des matériaux

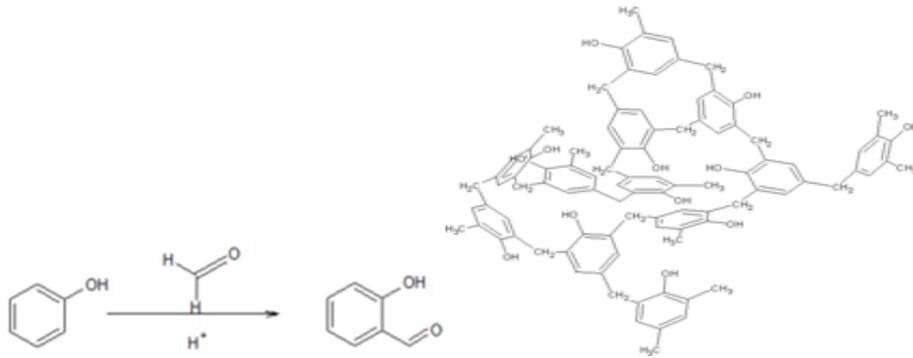
Les échantillons de Polyéthylène, de Bakélite et de verre utilisés dans notre étude sont découpés en plaque de dimension  $(120*120)$  mm<sup>2</sup>, avant de les soumettre aux mesures et aux essais de vieillissement électrique au laboratoire de haut tension, puis en fines lamelles ou en poudre pour la réalisation des analyses chimiques (IR, MEB, ATG, ATD) au niveau des laboratoires de génie des procédés de l'université A.M de Bejaia.

### II.2.1. propriétés des matériaux

#### II.2.1.1. La Bakélite [35,36]

La Bakélite est un matériau de la classe des phénoplastes dont la nomenclature chimique officielle est anhydride de polyoxybenzylméthylène glycol. Elle est connue pour ses propriétés isolantes et thermorésistantes.

La Bakélite est formée lors de la réaction chimique (polycondensation) entre le phénol et le formaldéhyde (méthanal) sous pression et température élevées, en général avec un agent de remplissage comme de la poudre de bois.



**Fig. II. 1 : a-Synthèse du salicylaldéhyde,  
Précurseur de la Bakélite**

**b-Structure de la Bakélite**

Une feuille de composés phénoliques est un matériau dur, dense, fabriqué par application de chaleur et de pression sur des couches de papier ou de tissu de fibres de verre imprégnés de résine synthétique. Ces couches de laminé sont habituellement en cellulose, tissus de coton, fibres synthétiques, ou fibres de verre. Lorsque les couches sont soumises à la chaleur et à la pression, une réaction chimique (la polymérisation) transforme les couches en un plastique industriel thermodurcissable. Le composé phénolique commercialisé sous le nom de Bakélite est fabriqué en des dizaines de qualités commerciales, répondant à des exigences mécaniques, électriques et thermiques.

## Chapitre II : Protocole expérimentale

(Valeurs pour une température de 20 °C).	permittivité relative $\epsilon_r$	Rigidité diélectrique E (kV/mm)	conductivité thermique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Température max (°C)	Résistance à la rupture ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Résistivité ( $\Omega\text{m}$ )
Bakélite	5 à 9	10 à 20	1,4	1,3	150 à 170	3 à 5	$10^{10}$ à $10^{12}$

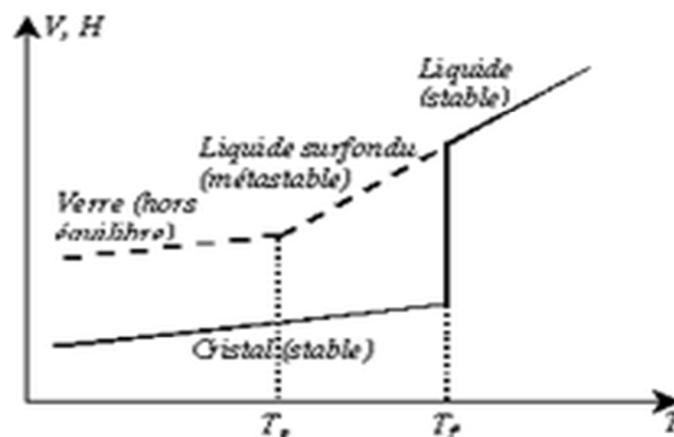
**Tab. II.1.** Propriétés physiques de la Bakélite.

Les valeurs de  $\epsilon_r$  et E sont approximatives et peuvent varier nettement en fonction de la fréquence, de la température, de l'hygrométrie voire de la pression atmosphérique.

La Bakélite est très utilisée pour l'appareillage électrique basse tension, en particulier dans les armoires électriques pour assurer l'isolement des systèmes de coupures électriques.

### II.2.1.2. Le Verre [36, 37, 38]

Le verre est un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible. C'est un corps solide constitué d'oxyde de silicium (silice  $\text{SiO}_2$ ) et de fondants, le constituant principal du sable. Le verre est un matériau amorphe qui présente un désordre structural important et un phénomène de transition vitreuse. En dessous de sa température de transition, qui est très élevée, le verre se présente à l'état vitreux.

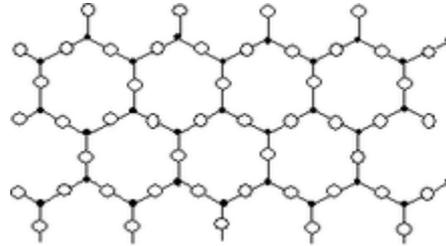


**Fig. II.2.** Variations thermiques du volume spécifique V et de l'enthalpie H lors du passage de l'état liquide à l'état solide (vitreux ou cristallin).

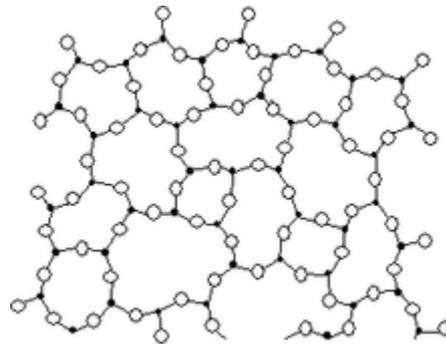
## Chapitre II : Protocole expérimentale

---

Chaque atome de silicium est placé au centre d'un tétraèdre et lié à quatre atomes d'oxygène. Ces tétraèdres sont liés ensemble par le sommet de telle sorte que chaque atome d'oxygène est lié à deux atomes de silicium. Le verre, à l'état pur, est du bioxyde de silicium.



**Fig. II.3.** Représentation schématique bi-dimensionnelle de la silice cristalline cristobalite).



**Fig. II.4.** Représentation schématique bi-dimensionnelle de la silice vitreuse.

Propriété physique	Valeur	Unité
Masse volumique	2 500	kg/m <sup>3</sup>
Module de Young	69 000	MPa
Coefficient de Poisson	0,25	-
Limite d'élasticité	3 600	MPa
Résilience	de 1 500 à 2 500	Pa
Coefficient de dilatation linéaire	de 0,5 à 15×10 <sup>-6</sup>	/°C
Conductibilité thermique	1	W/m/°C
permittivité relative	5 à 7	/
Rigidité diélectrique	10	kV/mm

**Tab. II.2.** Propriétés physiques moyennes du verre sodique

Le verre peut subir des modifications pour le renforcer et le sécuriser :

➤ **Verre trempé :**

- Trempe thermique : Des traitements thermiques permettent d'améliorer la résistance du verre par un refroidissement rapide et contrôlé, le plus souvent par de l'air.
- Trempe chimique : Ce type de trempe a lieu en remplaçant par diffusion une partie des ions sodium du verre par des ions potassium (plus gros).

Le verre est utilisé pour faire des isolateurs de lignes haute tension .

### II.2.1.3.Le Polyéthylène [3,39]

Le polyéthylène PE, est un polymère de synthèse appartenant à la famille des polyoléfines. Il est obtenu par polymérisation des monomères d'éthylène (CH<sub>2</sub>=CH<sub>2</sub>) en une structure complexe de formule générique :



## Chapitre II : Protocole expérimentale

Propriétés physiques	Valeurs	Unités
T° transition vitreuse	~ -110 (transition $\gamma$ )	°C
T° fusion	85 à 140	°C
T° d'auto-inflammation	330 à 410	°C
T° de ramollissement	123-127	°C
Domaine de fusion	125-131	°C
Indice de fusion	0.33-0.95	g/10 min
Masse volumique	0,91–0,96	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Point d'éclair	341	°C
constante diélectrique (50 Hz, 23 °C)	2,3 – 2,6	/
Module de Young à 20°C	1400	MPa
Limite élastique	22-26	MPa
Charge à la rupture	30-38	MPa
Allongement à la rupture	>600	%
Module de cisaillement	500-600	$\text{N}/\text{mm}^2$
Module d'élasticité	850-1050	$\text{N}/\text{mm}^2$
Résistance au choc à 23°C	15-21	$\text{kJ}/\text{m}^2$
Coefficient de dilatation	$1.6^{-2}\cdot 10^{-4}$	$\text{k}^{-1}$
Conductibilité thermique /20°C	0.40-0.45	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$
Résistance transversale	>1016	$\Omega\text{cm}$
Résistance superficielle	>1013	$\Omega$
Facteur de perte diélectrique (50Hz)	$1.10^{-1}-6.10^{-4}$	/
Rigidité diélectrique	>20	$\text{kV}/\text{mm}$
Teneur en matières volatiles	< 350	$\text{mg}/\text{kg}$
Résistance à la pression hydraulique 1000 h à 80°C.	5.0	MPa

**Tab. II.3.** Propriété physique du polyéthylène

La plupart des plastiques, en particulier polyéthylène sous sa forme réticulée (XLPE) utilisé pour l'isolation des câbles.

### II.3. Les essais de vieillissement électrique

Des essais de vieillissement électrique ont été réalisés au laboratoire de haute tension de l'université A.M de Bejaia sur des échantillons de Polyéthylène, de Bakélite et de Verre de dimensions données sur le tableau II.1 :

Pour simuler un vieillissement électrique accéléré, nous avons fait subir une série de 100 claquages à chaque échantillon (plaque) et dans le cas de trois états de leurs surfaces : sec, pollué avec une solution de conductivité électrique  $\sigma=5\text{mS}$  et pollué avec une solution de conductivité électrique  $\sigma=2\text{mS}$ .

La solution polluante, composée d'un mélange d'eau distillé et de chlorure de sodium (Na Cl) est préparée selon la conductivité désirée que nous contrôlons au moyen d'un conductimètre.

Pour voir l'effet de ce vieillissement électrique sur les matériaux, nous avons procédé, avant et après vieillissement, à la mesure de quelques grandeurs électriques à savoir :

- la résistance transversale  $R_t$
- la résistivité transversale  $\rho_t$
- la résistance superficielle  $R_s$
- la résistivité superficielle  $\rho_s$
- la rigidité diélectrique longitudinale  $E_l$
- la capacité  $C_x$
- et le facteur de perte  $\text{tg}\delta$

Les deux dernières grandeurs  $C_x$  et  $\text{tg}\delta$  sont déterminées sous différentes tensions électriques appliquées ( $V=10\text{V}$  à  $110\text{V}$ ) à différentes fréquences ( $f=100\text{Hz}$  à  $1100\text{Hz}$ ).

#### II.3.1. Mesure de la résistance

##### II.3.1.1. Mesure de la résistance transversale

La résistance transversale  $R_t$  des trois matériaux est déterminée par la pente de la caractéristique  $V(I)$  établie selon la méthode de mesure exposée en (Fig.I.11). La résistivité

transversale est alors calculée par l'équation (I.59) voir (**Fig. III.1**). Ces mesures sont réalisées avant et après vieillissements des échantillons.

### II.3.1.2. Mesure de la résistance superficielle

La résistance superficielle  $R_s$  des trois matériaux est déterminée par la pente de la caractéristique  $V(I)$  établie selon la méthode de mesure exposée en (**Fig. I.12**). La résistivité superficielle est alors calculée par l'équation (I.62) voir (**Fig. III.2**). Ces mesures sont réalisées avant et après vieillissements des échantillons.

### II.3.2. Rigidité diélectrique longitudinale

Nous avons déterminé la rigidité diélectrique longitudinale  $E_l$  de chaque matériau (Polyéthylène, Bakélite et Verre) qui est représentée par la pente de la caractéristique  $V(d)$  établie selon la méthode de mesure exposée en (I.65).

Nous avons, pour cela, mesuré la tension disruptive  $V_d$  pour différentes distances inter-électrodes  $d$  égale à 1cm, 2 cm et 3 cm, dans le cas de trois états de surface du matériau : sec, pollué avec une solution de conductivité électrique  $\sigma=5\text{mS}$  et pollué avec une solution de conductivité électrique  $\sigma=2\text{mS}$ .

### II.3.3. Mesure de capacité $C_x$ et du facteur de perte $\text{tg}\delta$

Les capacités  $C_x$  et les facteurs de pertes  $\text{tg}\delta$  des trois matériaux (Polyéthylène, Bakélite et Verre) sont déterminés avant (état vierge) et après vieillissement de nos échantillons pour les trois états de surfaces des plaques considérés (sec, pollué avec une solution de conductivité électrique  $\sigma=5\text{mS}$  et pollué avec une solution de conductivité électrique  $\sigma=2\text{mS}$ ).

Pour ce faire, nous avons adopté la méthode du pont de Schering à transformateur différentiel (**Fig.I.10**) et  $C_x$  et  $\text{tg}\delta$  sont alors mesurés sous différentes tensions électriques appliquées ( $V= 10\text{V}$  à  $110\text{V}$ ) à différentes fréquences ( $f=100\text{Hz}$  à  $1100\text{Hz}$ ).

La permittivité électrique  $\epsilon_r$  est calculée moyennent les équations (I.55) et (I.56) et par là, l'indice de pertes défini par  $\epsilon_r\text{tg}\delta$  est déterminé, avec :

$d$  : Epaisseur de l'éprouvette en cm (déterminée au palmer),

$S$  : Surface effective de la plaque en  $\text{cm}^2$ , soit  $20\text{cm}^2$ ,

$C_0$  : Capacité du vide équivalente à  $C_x$  en pF,

$\epsilon_0$  : Permittivité du vide ( $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m).

### II.4. Analyses chimiques

Avant et après vieillissement électrique des échantillons de Polyéthylène, de Bakélite et de Verre, nous avons procédé à la réalisation d'une série d'analyses chimiques (IR, MEB, et ATG/ATD) sur ces derniers, aux niveaux du laboratoire de génie des procédés de l'université A. Mira Bejaia, afin de les caractériser et de voir l'effet du vieillissement électrique sur la micro structure de ces matériaux.

#### II.4.1. Analyse spectroscopique IR

La spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed Infra Red spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau.

##### II.4.1.1. Equipement

L'appareillage utilisé pour notre étude est un spectroscope infrarouge à transformée de Fourier. Il est constitué de quatre éléments fondamentaux : la source infrarouge, un interféromètre, un détecteur et l'électronique de calcul. C'est un spectroscope de type **IR Affinity-1** accompagné du logiciel de traitement de données IR solution. Ses caractéristiques techniques sont:

- Rapport S/N > 30 000:1 p-p.
- Gamme spectrale de 7800 à 350  $\text{cm}^{-1}$ .
- Résolution maximale de 0,5  $\text{cm}^{-1}$
- Système AutoDry en continu
- Interféromètre de Michelson à 30° sous atmosphère contrôlée
- Système FJS avec alignement dynamique continu
- Reconnaissance automatique des accessoires.
- Sortie de faisceau secondaire pour couplage microscope

Le système comprend également une source laser He-Ne ( $\lambda = 632,8$  nm) qui sert de signal de référence pour le temps d'acquisition des données et pour la mesure du déplacement des différents miroirs optiques de l'appareil.

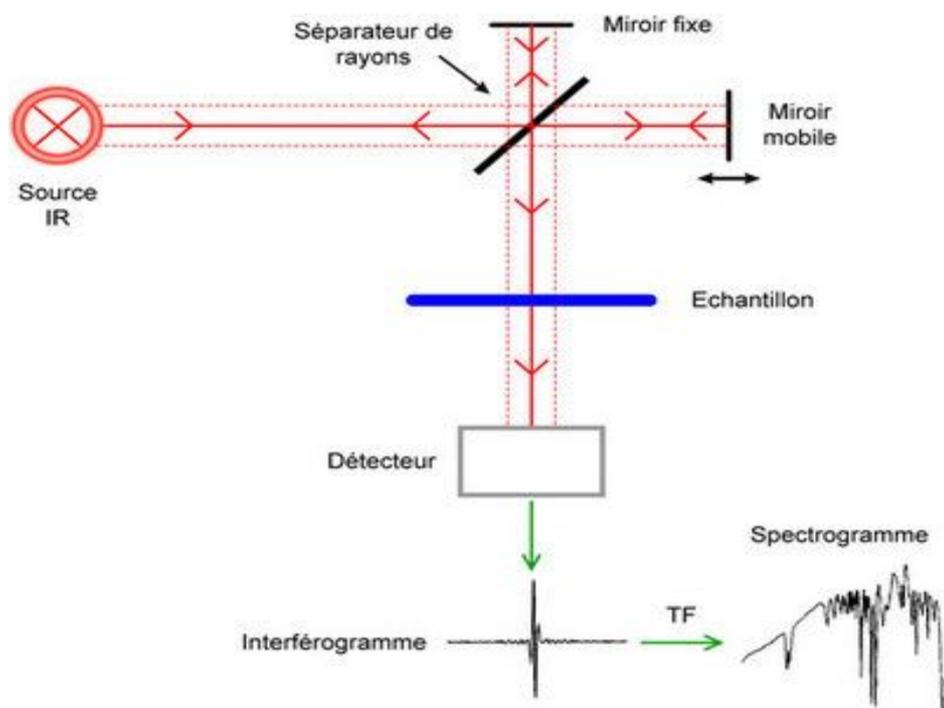


Fig. II.6. Schéma de principe de l'analyse par spectroscopie d'absorption infrarouge

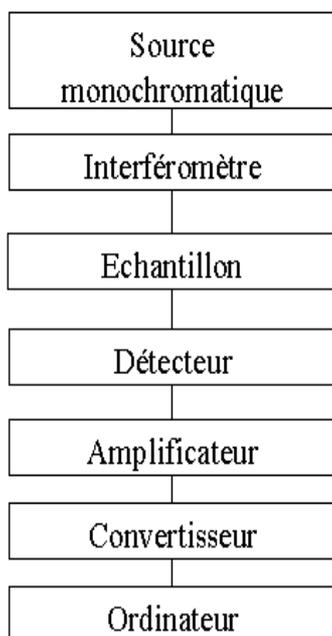


Fig. II.7. Schéma de fonctionnement d'un spectromètre IR à transformée de Fourier (FTIR)

La source ETC (Electronically Temperature Controlled) émet dans le centre infrarouge et la totalité du rayonnement est envoyé vers un interféromètre de Michelson, le

## Chapitre II : Protocole expérimentale

---

cœur de l'instrument. L'intensité du rayonnement de la source est divisée en deux : 50% retournent à la source et 50% (deux fois 25%) sont recombinaés de manière cohérente et envoyés vers l'échantillon. L'intensité des interférences créées par le séparateur de rayons (beamsplitter, semi-réfléchissant composé d'un substrat en KBr recouvert de multiples couches diélectriques) est enregistrée par le détecteur (DTGS TEC, Deuterated TriGlycine Sulfate Temperature Electronically Controlled) en fonction de la différence de marche induite par le déplacement du miroir mobile (c.à.d. en fonction du temps) pour constituer un interférogramme. La transformée de Fourier de cet interférogramme permet d'obtenir un graphe dans l'espace des fréquences qui est directement exploitable.

### II.4.1.2. Mesure

Pour effectuer une analyse infrarouge de nos échantillons, nous avons procédé de la manière suivante:

Vu la nature de nos échantillons (solides et/ou opaques) et l'exigence d'avoir des films minces (d'ordre de micron), nous avons broyé nos échantillons afin d'avoir une poudre, dont nous avons déposé quelques grammes (0,003g) sur une poudre de Kbr (bromure de potassium) pour supprimer les effets de diffusion des gros cristaux. Ce mélange poudreux est ensuite comprimé dans une presse pendant sept minutes afin de fournir une pastille translucide au travers de laquelle un faisceau de spectromètre peut passer.

L'échantillon est soumis à un rayonnement électromagnétique dans la gamme de longueur d'onde du centre infrarouge ( $2,5 \mu\text{m} < \lambda < 50 \mu\text{m}$ ). Le champ électrique induit par l'onde électromagnétique peut interagir avec un moment dipolaire d'une entité moléculaire présente dans le matériau. Lorsque la fréquence du champ coïncide avec la fréquence de vibration d'un mode propre de la molécule, l'interaction créée engendre la vibration de certaines liaisons et l'absorption de l'énergie de l'onde excitatrice correspondante. La fréquence à laquelle est absorbé le rayonnement dépend de la nature des liaisons, de la masse des atomes concernés et de l'environnement proche du groupement considéré.

Par conséquent, aux matériaux étudiés dans notre cas de composition et structure déterminés précédemment va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier les transformations faites dans nos échantillons.

Par convention, les spectres infrarouges obtenus expérimentalement ne sont pas indexés en longueur d'onde ou en fréquence mais en nombre d'onde exprimé par :

$$\tilde{\nu} \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{10^4}{\lambda \text{ (m)}} \quad [\text{cm}^{-1}]. \quad (\text{II.1})$$

$$\nu \text{ (Hz)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{f}{m}} \quad \text{ou} \quad \tilde{\nu} \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{1}{2.10^2 \pi c} \sqrt{\frac{f}{m}} \quad (\text{II.2})$$

$f$  : constante de force.                       $m$  : masse réduite.

$c$  : célérité des radiations électromagnétiques dans le vide.

Les mesures sont réalisées en transmission totale avec une incidence normale dans une gamme de nombres d'onde de 4000 à 400  $\text{cm}^{-1}$  avec une résolution de 4 $\text{cm}^{-1}$  et 120 balayages par spectre.

### II.4.2. microscope électronique à balayage

Cette analyse nous permet d'une part de voir et de prendre des images des matériaux avec un agrandissement de 5000 fois plus, comme elle permet aussi de déterminer les éléments chimiques et leurs taux (microanalyse) existants dans le mélange qui constitue l'échantillon, d'autre part, il permet de voir clairement les modifications opérées dans la structure du matériau.

#### II.4.2.1. Equipement

L'appareil utilisé pour cette analyse est le **quanta 200** qui se compose de deux parties distinctes : la colonne à gauche du schéma et l'écran cathodique à droite.

#### II.4.2.2. Principe de base

Un faisceau très fin d'électrons, monocinétique, balaie la surface d'un échantillon où se produisent des interactions détectées par un capteur qui contrôle la brillance d'un oscilloscope cathodique, dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons ; on peut ainsi comparer le MEB à un système de télévision en circuit fermé.

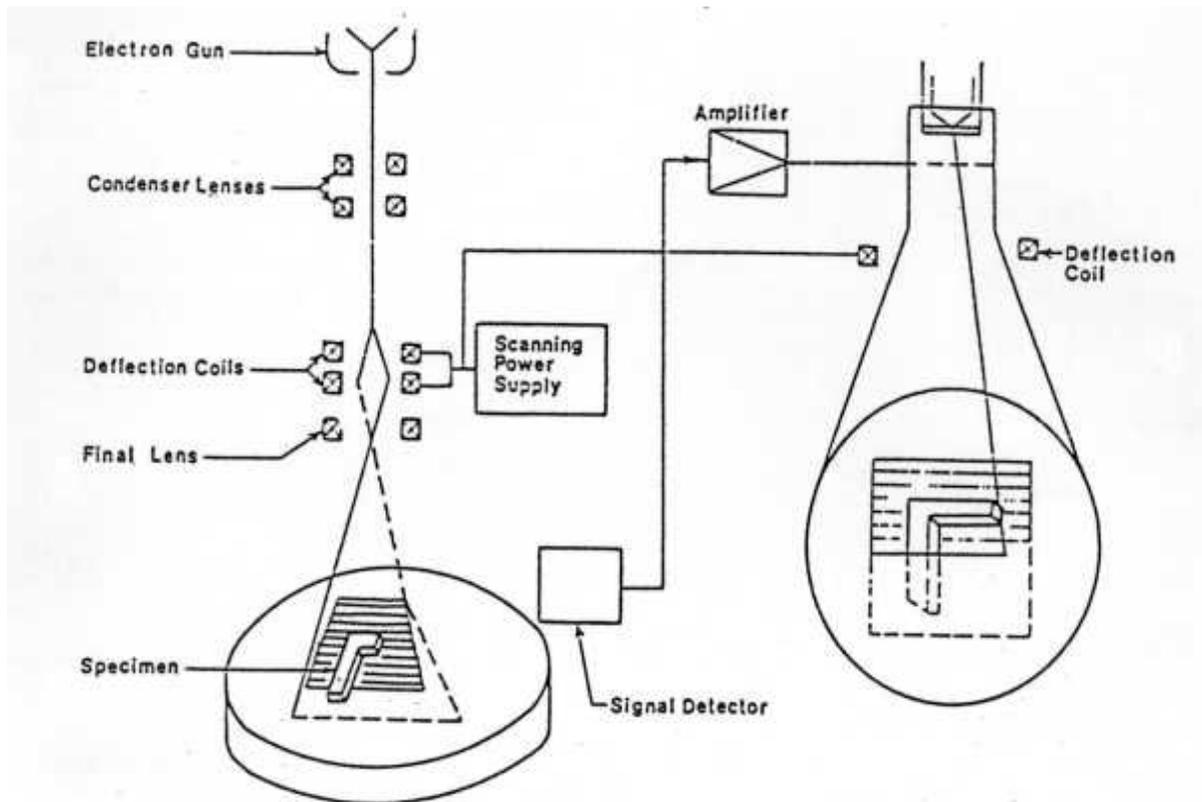


Figure II.8. Schéma de base d'un MEB

- **Le canon à électrons**

Les électrons sont produits par effet thermoélectronique à partir d'un filament de tungstène porté à haute température puis extraits au niveau du "Wehnelt" qui a aussi pour fonction, grâce au dessin de ses lignes de champ, de focaliser les électrons en un point ("cross over") qui sera l'équivalent d'une source lumineuse ponctuelle.

- **L'optique de focalisation**

On sait que la trajectoire d'un électron en mouvement est déviée quand il traverse un champ électrique ( $F = -e.E$ ) ou magnétique ( $F = m.dv/dt = -ev \wedge B$ ). Dans le microscope électronique, on utilise habituellement des bobines magnétiques qui introduisent moins d'aberrations. Elles sont constituées d'un enroulement enfermé dans une armature en acier canalisant le flux et comportant une ouverture. La forme des lignes de champ magnétique est telle qu'un électron sera d'autant plus dévié que sa trajectoire diverge plus par rapport à l'axe du système qui se comporte donc comme une lentille convergente : on parle donc de lentilles magnétiques, dont on peut faire varier aisément la distance focale en variant le courant passant dans la bobine.

## Chapitre II : Protocole expérimentale

---

La longueur focale varie avec la vitesse (énergie) des électrons : un diaphragme placé à proximité du point de focalisation permet d'éliminer les électrons dont l'énergie n'a pas la valeur nominale ou qui divergent trop par rapport à l'axe du système.

La première lentille s'appelle "condenseur" car son réglage permet de contrôler la densité du faisceau d'électrons en jouant sur sa divergence.

- **Le balayage**

Le contrôle du balayage de la surface de l'échantillon est assuré par des bobines de déflexion, alimentées par une source électrique délivrant un courant en dents de scie (déviations en x) et un courant en escalier (déviations en y) : le faisceau se déplace donc sur la surface de l'échantillon suivant des lignes  $xx'$  qui se décalent parallèlement à elles mêmes selon la direction y.

- **La mise au point**

Une bobine finale permet de contrôler la conicité du faisceau d'électrons afin de le focaliser exactement sur la surface de l'échantillon : en effet la résolution maximale (capacité à séparer deux points) est directement liée au diamètre du faisceau à la surface. De petites bobines supplémentaires permettent de corriger les aberrations, en particulier l'astigmatisme.

### II.4.2.3. préparation des échantillons

A l'aide d'un cutter, nous avons découpé un fragment de l'échantillon, sain ou dégradé, celui-ci est ensuite fixé sur des supports dans le MEB pour réaliser les analyses.



**Figure II.9.** Microscope électronique à balayage (MEB).

### II.4.3. Analyse thermique

L'analyse thermique nous permet de déterminer les propriétés thermiques d'une substance étudiée, en l'occurrence le Polyéthylène, la bakélite et le Verre.

Dans notre cas d'étude, cette analyse nous permet d'une part, de déterminer la température de dégradation thermique et le calcul des résidus instantanés de nos échantillons, d'autre part, elle nous permet de déterminer la température initiale de décomposition ( $T_i$ ), la température de dégradation maximale ( $T_m$ ) et la température finale de décomposition ( $T_f$ ). Ceci est obtenu par les analyses ATG et ATD présentées ci- de suite :

#### II.4.3.1. L'analyse thermogravimétrique (ATG)

Est une technique d'analyse qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température.

##### II.4.3.1.1. Equipement

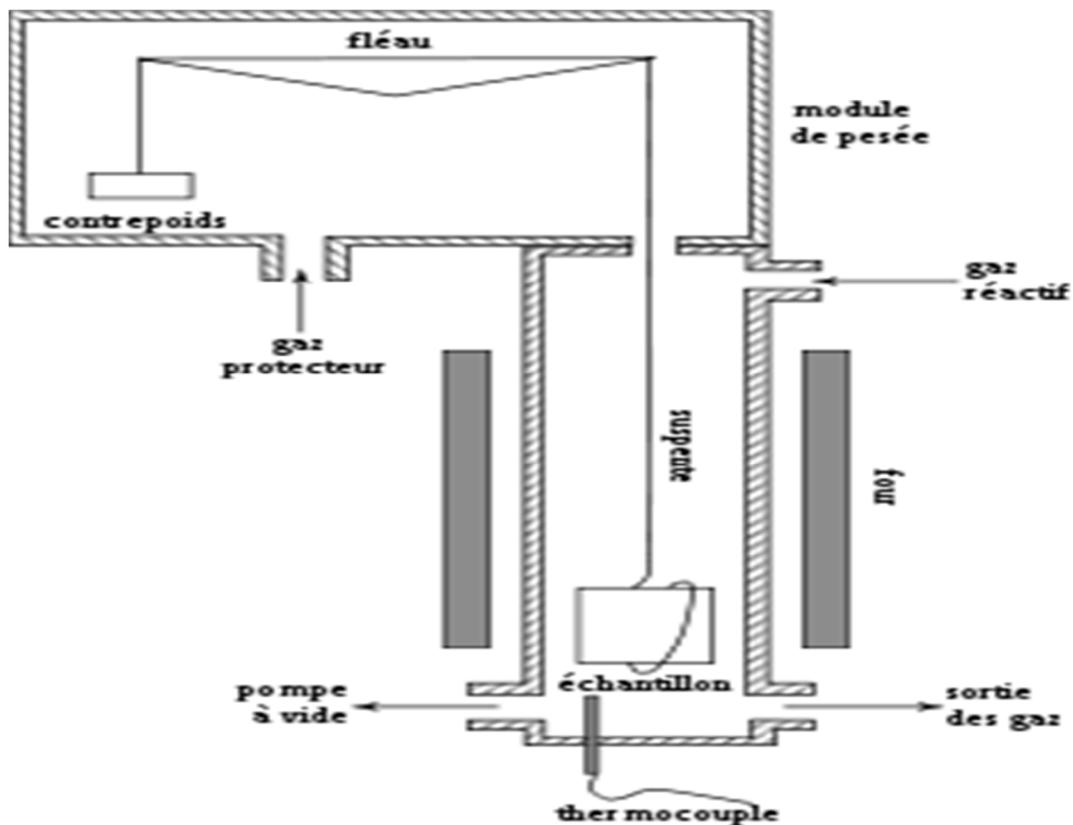
Cet appareil se compose essentiellement d'une enceinte étanche permettant de contrôler l'atmosphère de l'échantillon, d'un four permettant de gérer la température, d'un module de pesée (microbalance), d'un thermocouple pour mesurer la température et d'un ordinateur permettant de contrôler l'ensemble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

## Chapitre II : Protocole expérimentale

La microbalance est normalement sous atmosphère inerte (gaz), qui constitue un « couvercle » empêchant le gaz réactif de pénétrer dans l'enceinte du module de pesée, et le gaz doit être moins dense que le gaz réactif. L'appareil dispose d'un système de refroidissement, habituellement à circulation d'eau, afin de limiter les parties chaudes.

Si l'atmosphère réactive utilisée est corrosive, on peut ajouter une « sur-enceinte », en général en silice, afin de réduire encore le risque de reflux de l'atmosphère réactive dans le module de pesée.

La figure ci-dessous illustre l'appareil et ses différents organes principaux, utilisé pour l'analyse thermique de nos échantillons.



**Fig. II.10.** Représentation schématique d'une ATG (type Setaram TG-DTA 92 B).

### II.4.3.1.2. Mesures

La manière d'enregistrement des variations de la masse consiste à maintenir le fléau de la balance en position horizontale et mesurer la force nécessaire à cela. L'équilibre entre l'ensemble suspente-échantillon et le contrepoids est assuré par un électroaimant. Le courant nécessaire pour le maintien de l'équilibre est traduit en mesure de masse.

### II.4.3.2. Analyse Thermique Différentielle (A.T.D.)

Par cette analyse, nous avons étudié la différence de température entre un échantillon en cours d'étude et un échantillon de référence, les deux échantillons subissent donc un programme de température préalablement fixés, les signaux positifs correspondent à une transformation avec libération d'énergie « de chaleur » : réaction exothermique.

Des signaux négatifs signifient une consommation d'énergie : réaction endothermique, la différence de température  $T$  entre l'échantillon étudié et l'échantillon de référence est amplifiée et enregistrée en fonction du temps ou de la température.

### II.4.3.3. Caractéristiques techniques d' A. T. G et A. T. D :

- gamme de température : 20 à 1600°C ;
- programmation de température : 0,01 à 99,99°C/mn ;
- atmosphères contrôlées inertes ou réactives ;
- portée de la balance: 20 g ;
- gamme de la balance : 0, 1 à 400 mg ;



**Fig. II.11.** Photo de l'appareillage de l' A.T.G et l'A.T.D

## Chapitre II : Protocole expérimentale

Le tableau (Tab .II.4) ci-dessous résume l'ensemble des analyses effectuées sur les échantillons de Polyéthylène, de Bakélite et de verre sains et dégradés.

		Types d'analyses étudiées					
		Analyse et nature	Infrarouge d'échantillon	Microscope à balayage Electronique et nature d'échantillon		ATG et Nature d'échantillon	DTG et
polyéthylène	Vierge	oui	Film	oui	Film	Oui	Film
	Vieilli à sec	Oui	Film	non		Oui	Film
	Vieilli humide	Oui	Film	oui	Film	Oui	Film
Bakélite	Vierge	Oui	Pastille en Kbr	Oui	solide	Non	
	Vieilli à sec	Oui	Pastille en Kbr	Oui	solide	Non	
	Vieilli humide	Oui	Pastille en Kbr	Oui	solide	Non	
Verre	Vierge	Oui	Pastille en Kbr	Non		Non	
	Vieilli à sec	Oui	Pastille en Kbr	Non		Non	
	Vieilli humide	Oui	Pastille en Kbr	Non		Non	

**Tab. II.4.** Résumé des analyses.

## Chapitre II : Protocole expérimentale

---

Les résultats des mesures électriques et d'analyses chimiques réalisées sont présentés et interprétés dans le chapitre trois suivant.

# *Chapitre III*

*PRESENTATION*

*ET*

*INTERPRETATION*

*DES RESULTATS*

# Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

## III.1.Introduction

Les mesures électriques qui sont menées au laboratoire de haute tension de génie électrique et les analyses chimique (IR, MEB et ATG/ATD) menées au laboratoire de génie des procédés se sont soldées par des résultats intéressants tirés des caractéristiques électriques et des spectres d'analyses obtenues.

Dans ce chapitre seront présentées, interprétés et discutés les résultats obtenus, dans le but d'arriver à établir une corrélation entre les résultats des essais électriques et des analyses chimiques.

## III.2. présentation, interprétation et discussion des résultats d'essais électriques

### III.2.1.Mesure de la résistance

#### III.2.1.1.Mesure de la résistance transversale

La figure (III.1) représente les caractéristiques  $V(I)_t$  des différents matériaux isolants (Verre, Polyéthylène et Bakélite). La résistance transversale  $R_t$ , déterminée par la pente de la caractéristique  $V(I)_t$  et La résistivité transversale  $\rho_t$  calculée par l'équation (I.59) sont dressées dans le tableau III.1 pour un état vierge des trois matériaux.

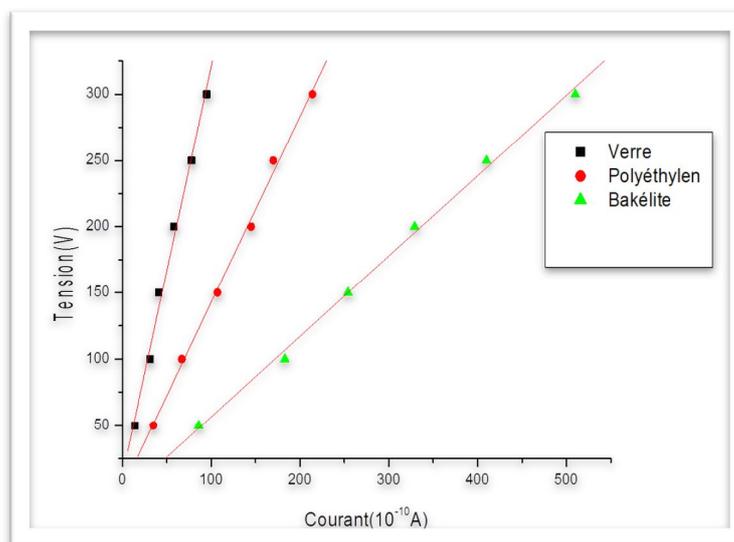


Fig.III.1Caractéristique  $V(I)_t$  du Verre, du Polyéthylène et de la Bakélite

## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

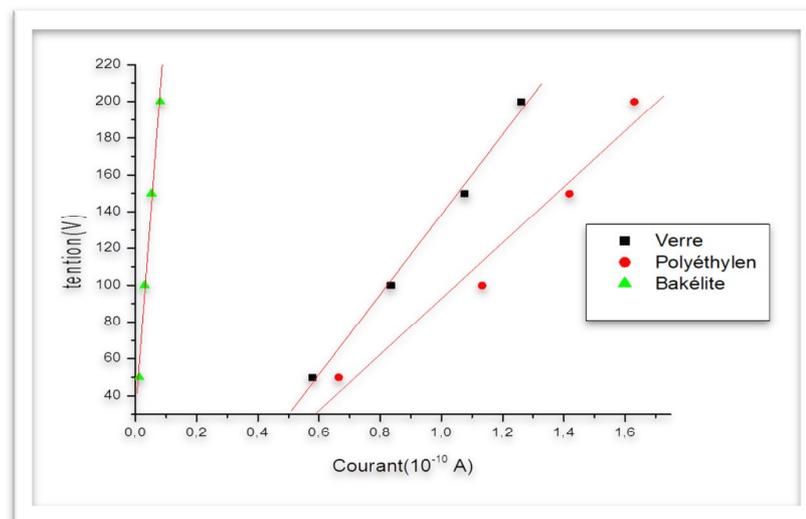
Le tableau(III.1) représente les résultats de mesure de la résistance transversale et le calcul de la résistivité transversale des différents matériaux isolants:

	Résistance $R_t(x10^{10} \Omega)$	Résistivité $\rho_t (x10^{10}\Omega.m)$
Verre	3,08471	1.085
Polyéthylène	1,40434	13.17
Bakélite	0,60669	0.79

**Tab.III.1.** Mesure de la résistance transversale et de la résistivité transversale des différents matériaux

### III.2.1.2. Mesure de la résistance superficielle

La figure (III.2) représente les caractéristiques  $V(I)_s$  des différents matériaux isolants (Verre, Polyéthylène et Bakélite). La résistance superficielle  $R_s$ , déterminée par la pente de la caractéristique  $V(I)_s$  et La résistivité superficielle  $\rho_s$  calculée par l'équation (I.62) sont dressées dans le tableau (III.2) pour un état vierge des trois matériaux.



**Fig.III.2.** Caractéristique  $V(I)_s$  du Verre, du Polyéthylène et de la Bakélite

## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

---

Le tableau(III.2) représente les résultats de mesure de la résistance transversale et le calcul de la résistivité transversale des différents matériaux isolants:

	Résistance $R_s$ ( $\times 10^6 \Omega$ )	Résistivité $\rho_s$ ( $\times 10^9 \Omega.m$ )
Verre	217,30754	3.139
Polyéthylène	151,88632	2.194
Bakélite	14,33701	0.2071

**Tab.III.2.** Mesure de la résistance superficielle et de la résistivité superficielle des différents matériaux

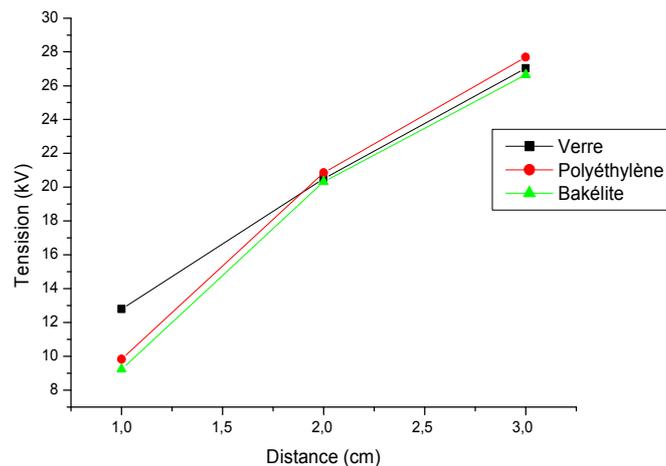
### III 2.2. Rigidité diélectrique longitudinale

Les figures (III.3, III.4, III.5) illustrent la variation de la tension appliquée en surface en fonction de la distance inter-électrodes des différents matériaux isolants (Verre, Polyéthylène et Bakélite), dans de cas des différents états de surface des matériaux vieillis (propre et pollué à  $\sigma = 5mS$  et  $\sigma=0.2mS$ ) respectivement.

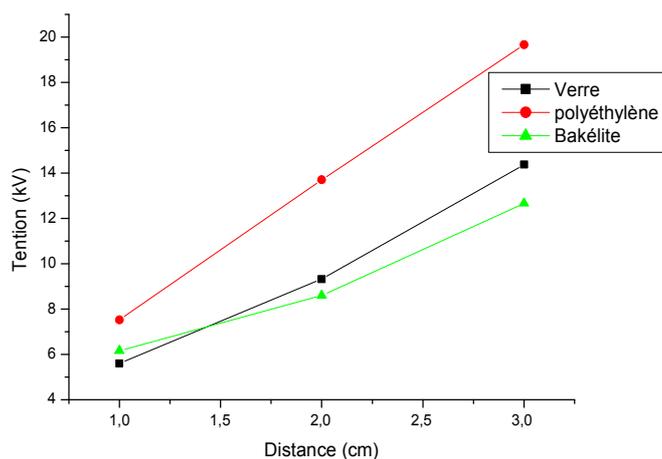
Le vieillissement électrique des matériaux résulte une diminution de leur rigidité diélectrique qui est plus marquée avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.

A l'état propre (sec), le verre est plus rigide devant le polyéthylène suivi de la bakélite. Ce constat est appuyé par les valeurs des résistivités superficielles de ces matériaux. Cependant, à l'état pollué, cet ordre est rompu et le verre perd de ses performances au fur et à mesure que la conductivité de la pollution déposée est élevée.

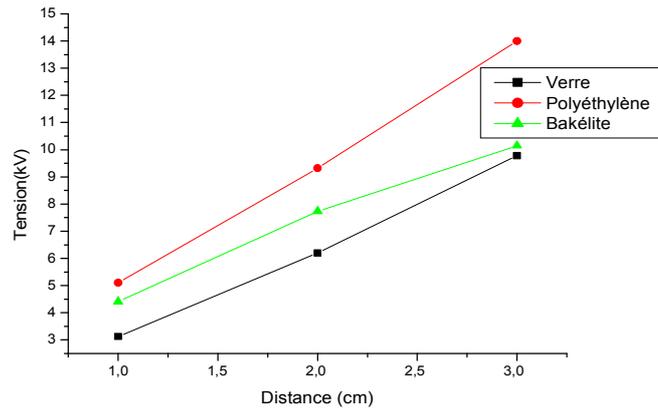
La décharge glissante résultant de l'application de la contrainte de champ électrique a provoqué la dégradation de la surface des matériaux, laissant des traces visibles à l'œil nu et plus profondes avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante ; la Bakélite se carbonise et la couche de carbone ainsi déposée augmente sa conductivité superficielle, ce qui affecte directement sa rigidité longitudinale, alors que le polyéthylène se consume sous l'effet thermique qui accompagne la décharge le rendant non fonctionnel.



**Fig.III.3 :** Tension disruptive en fonction de la distance inter-électrodes des plaques propres de polyéthylène, de Verre et de Bakélite



**Fig.III.4 :** Tension disruptive en fonction de la distance interélectrodes des plaques polluées de polyéthylène, de Verre et de Bakélite à  $\sigma_s = 0.2\text{mS}$



**Fig.III.5 :** Tension disruptive en fonction de la distance inter-électrodes des plaques polluées de polyéthylène, de Verre et de Bakélite à  $\sigma_s = 5\text{mS}$

Le tableau(III.3) représente les résultats de mesure la rigidité diélectrique longitudinale  $E_l$  de chaque matériau (Polyéthylène, Bakélite et Verre) qui est représentée par la pente de la caractéristique  $V(d)$

	$E_l(\text{kV/cm})$ vierge	$E_l(\text{kV/cm})$ $\sigma_s = 0.2\text{mS}$	$E_l(\text{kV/cm})$ $\sigma_s = 5\text{mS}$
Polyéthylène	8.93	7.52	5.11
Verre	12.8	5.6	3.1
bakélite	8.7	6.16	4.41

**Tab.III.3.** la rigidité diélectrique longitudinale  $E_l$

### III.2.3. Mesure de capacité $C_x$ et du facteur de perte $\text{tg}\delta$

#### III.2.3.1. Mesure de capacité $C_x$

Les figures (III.6 à III.17) illustrent la variation de la capacité  $C_x$  des trois matériaux considérés, en fonction de la fréquence, sous différentes tensions de mesure. Nous remarquons une diminution importante de la capacité avec l'augmentation de la fréquence de la tension appliquée, alors que l'amplitude de cette dernière n'a pas d'influence sensible sur  $C_x$ .

## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

Le vieillissement électrique des matériaux résulte une diminution de leur capacité qui est plus marquée avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.

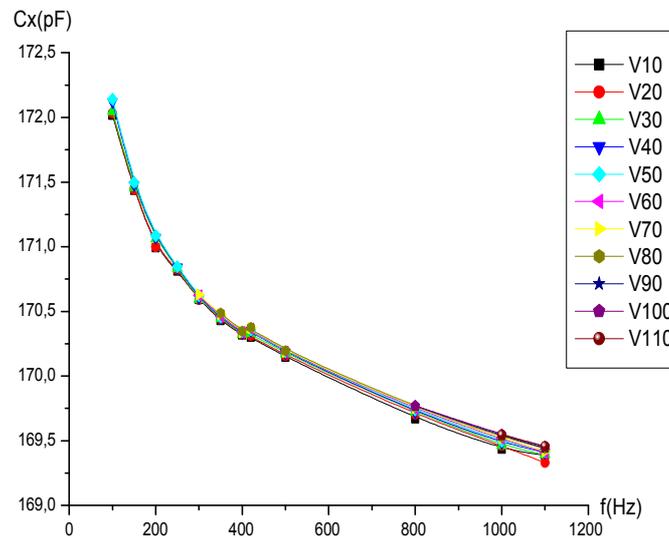


Fig.III.6 capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence du polyéthylène vierge

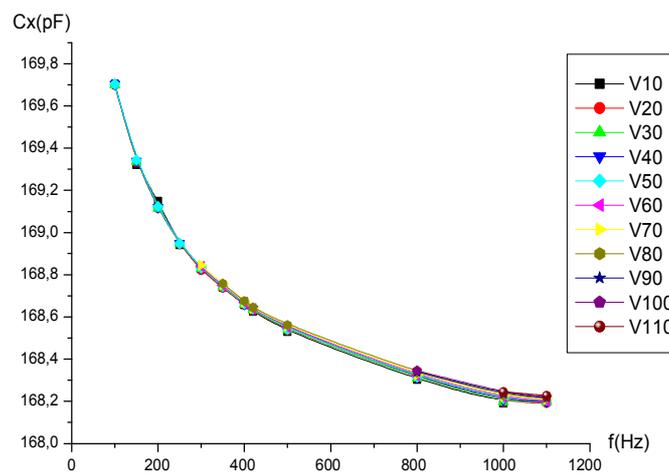


Fig.III.7 capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence du polyéthylène vieilli à sec

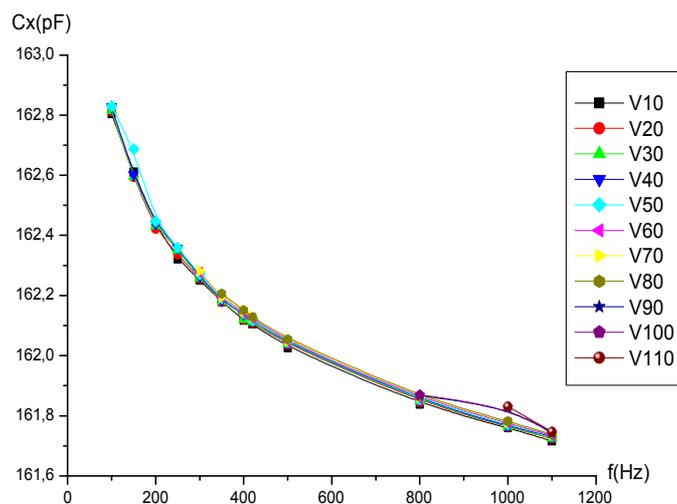


Fig.III.8 capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence du polyéthylène vieilli sous pollution humide

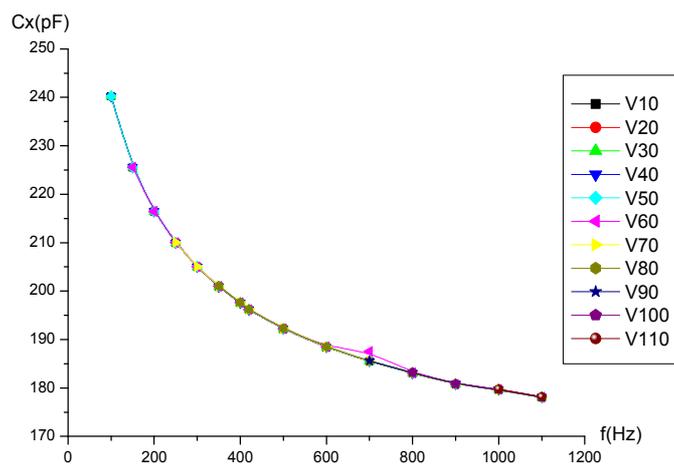


Fig.III.9 capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence de la Bakélite vierge

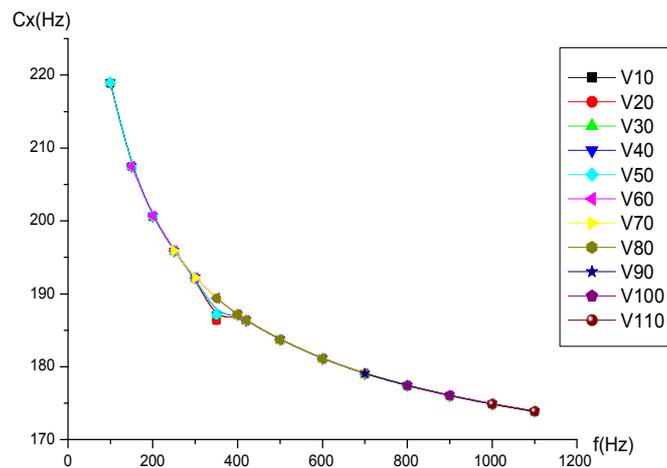


Fig.III.10 capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence de la Bakélite vieillie à sec

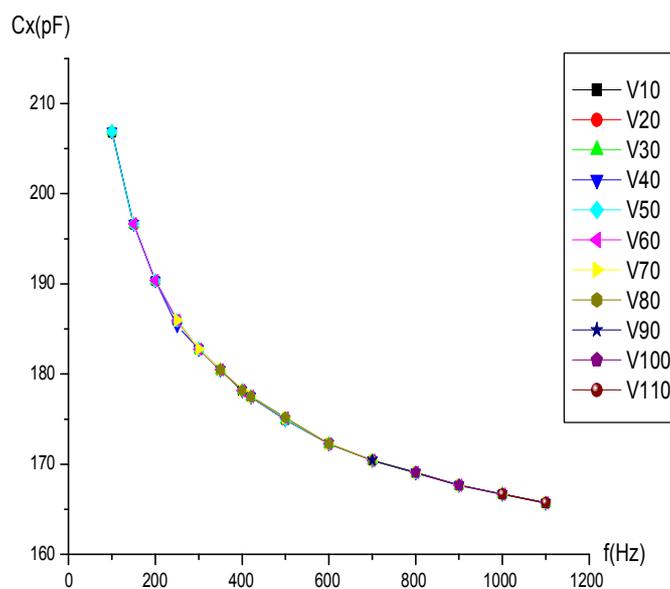


Fig.III.11. capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence de la Bakélite vieillie sous pollution humide

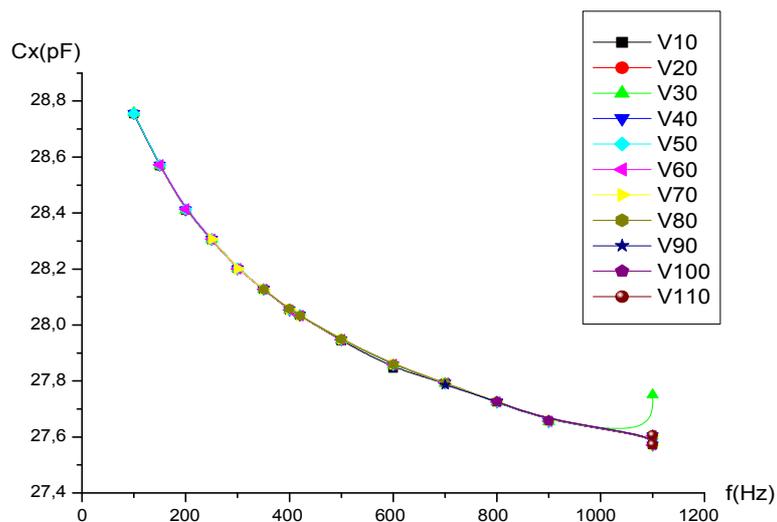


Fig.III.12 capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence du Verre vierge

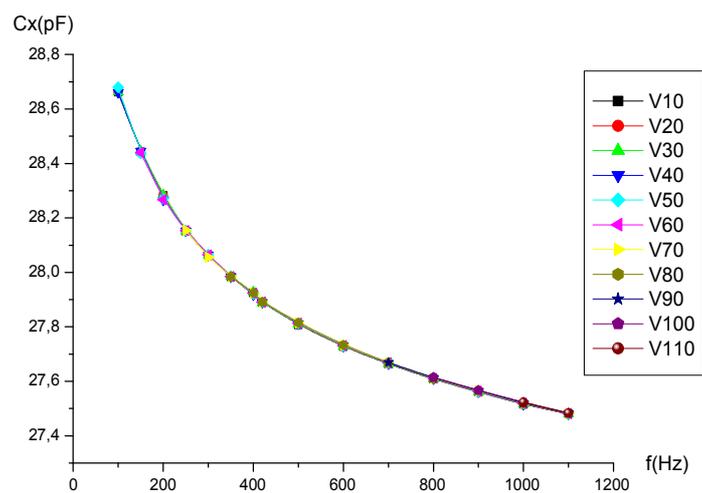


Fig.III.13 capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence du Verre vieilli à sec

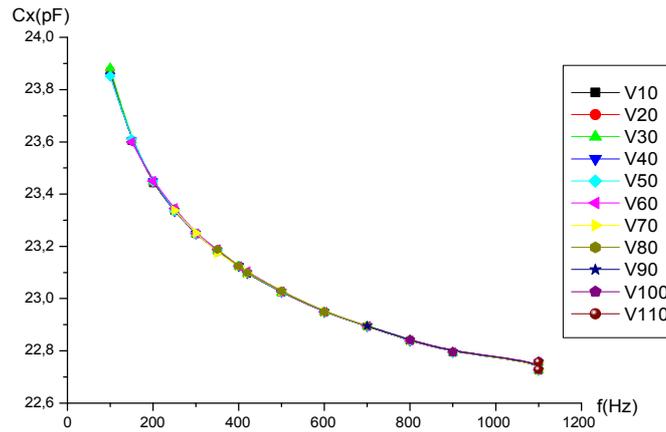


Fig.III.14 capacité Cx en fonction de la fréquence du Verre vieilli sous pollution humide

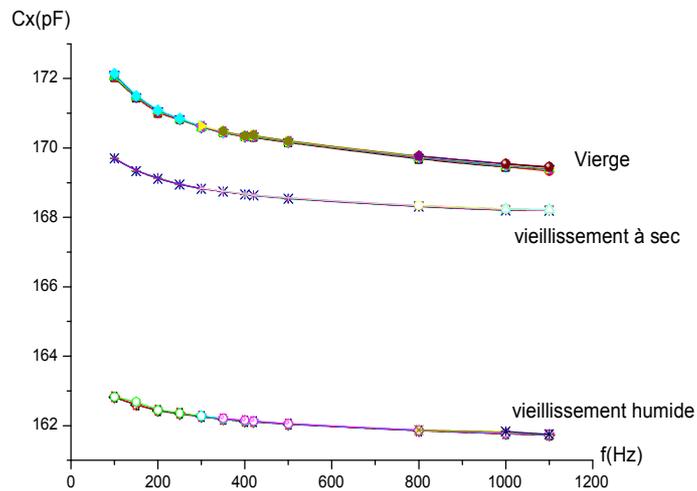


Fig.III.15. capacité Cx en fonction de la fréquence du polyéthylène vierge, vieilli à sec et sous pollution humide

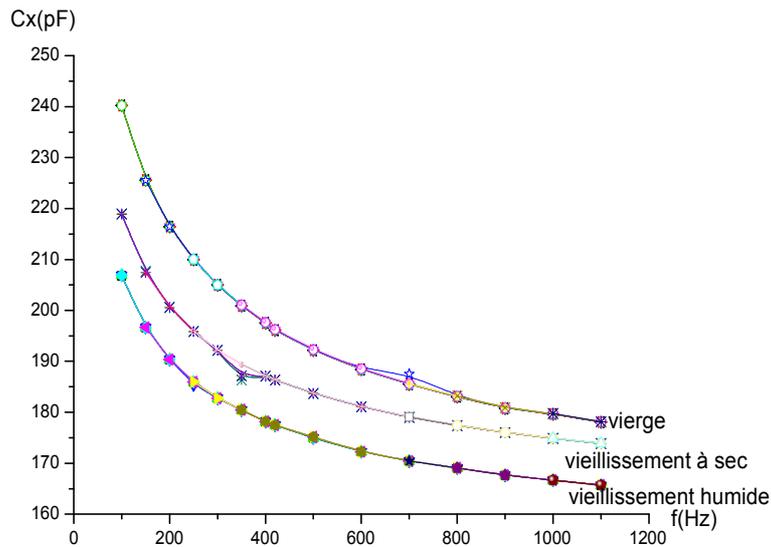


Fig.III.16. capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence de la Bakélite vierge, vieilli à sec et sous pollution humide.

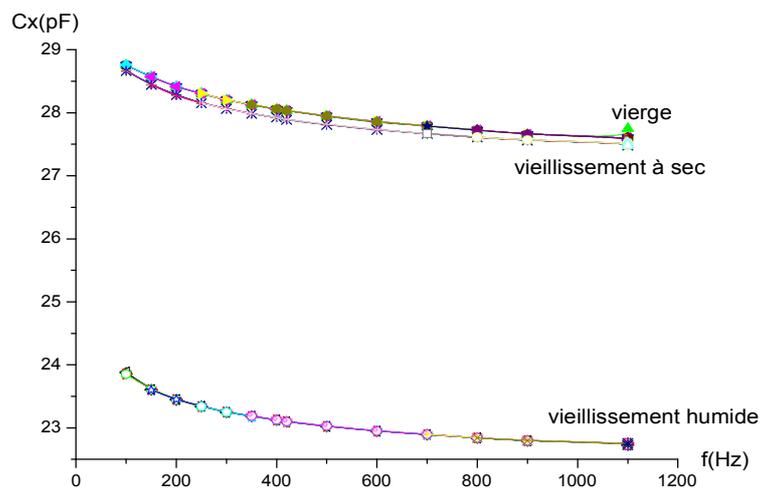


Fig.III.17 : capacité  $C_x$  en fonction de la fréquence du verre vierge, vieilli à sec et sous pollution humide

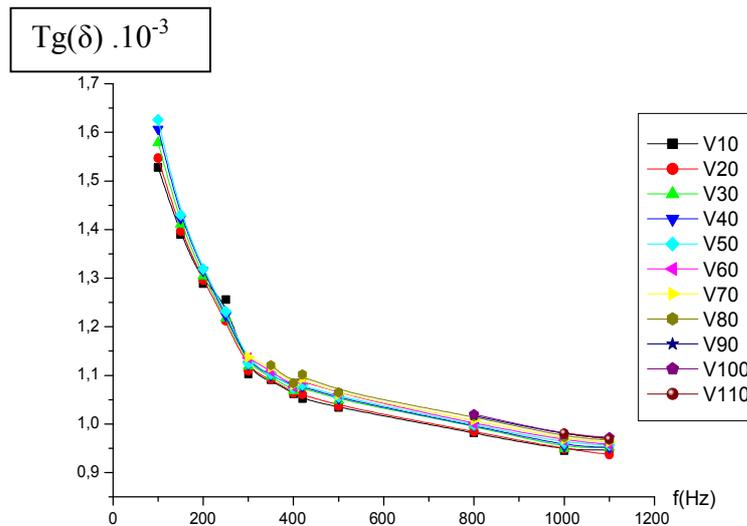
### III.2.3.2. Mesure du facteur de pertes

Les figures (III.18 à III.29) illustrent la variation du facteur de pertes  $\text{tg}\delta$  des trois matériaux considérés, en fonction de la fréquence, sous différentes tensions de mesure. Nous remarquons une diminution importante de  $\text{tg}\delta$  avec l'augmentation de la fréquence de la tension appliquée, alors que l'amplitude de cette dernière n'en a pas d'influence sensible. Ce résultat implique que les trois matériaux répondent en fréquence tel un circuit équivalent à

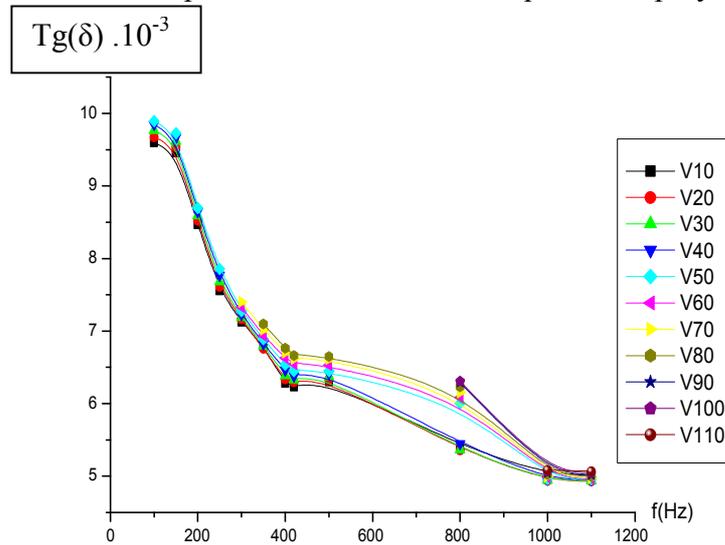
## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

constantes localisées RC parallèle, ce qui les prédestine à un fonctionnement à fréquence élevée vu leur meilleur rendement en terme de qualité d'énergie.

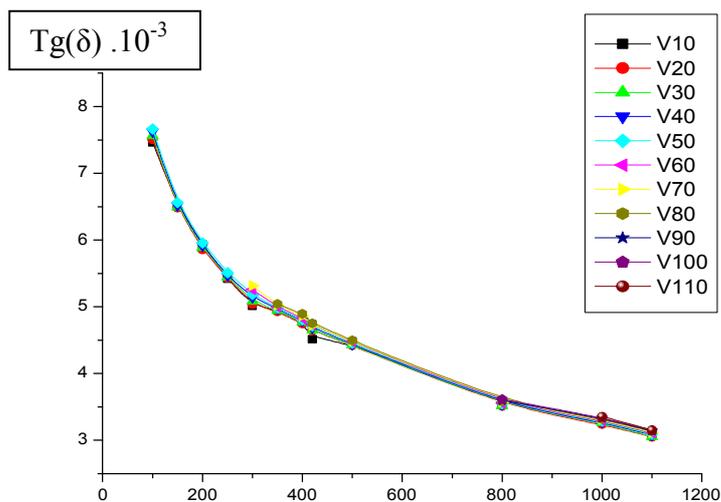
Le vieillissement électrique des matériaux résulte une augmentation du facteur de pertes qui est plus marquée avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante dans le cas du verre. Une exception à cette règle s'est présentée dans le cas de la Bakélite et du polyéthylène où la couche polluante a diminué de l'effet du vieillissement électrique des matériaux relativement au cas de leur vieillissement à sec.



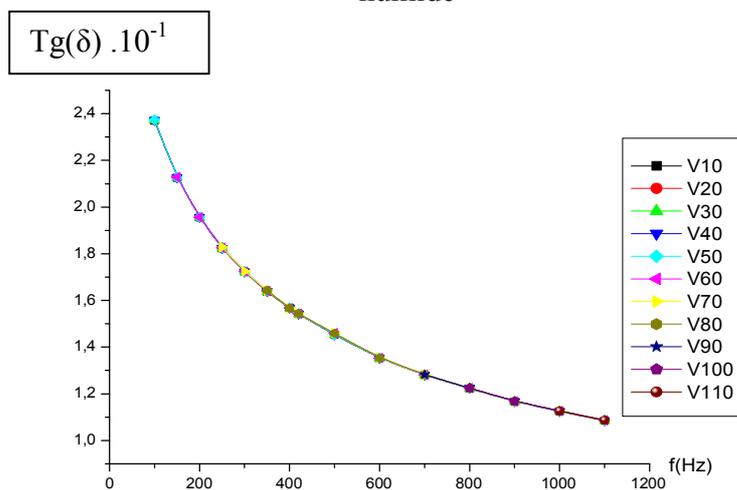
**Fig.III.18.** facteur de perte en fonction de la fréquence du polyéthylène vierge



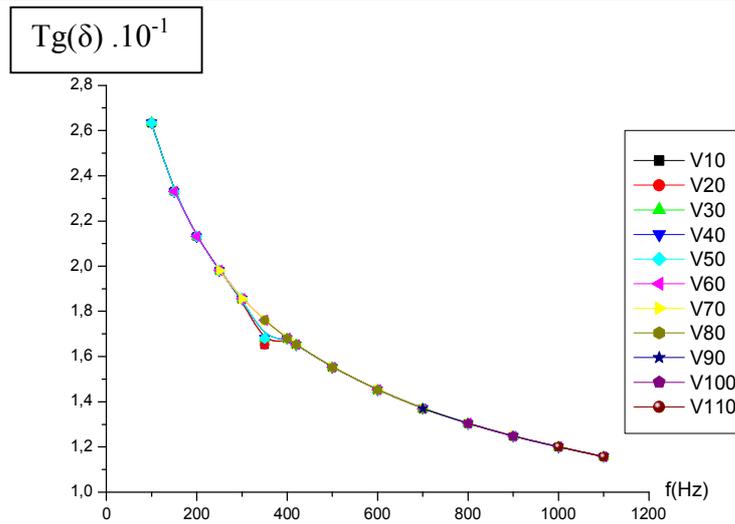
**Fig.III.19.** Facteur de perte en fonction de la fréquence du polyéthylène vieilli à sec



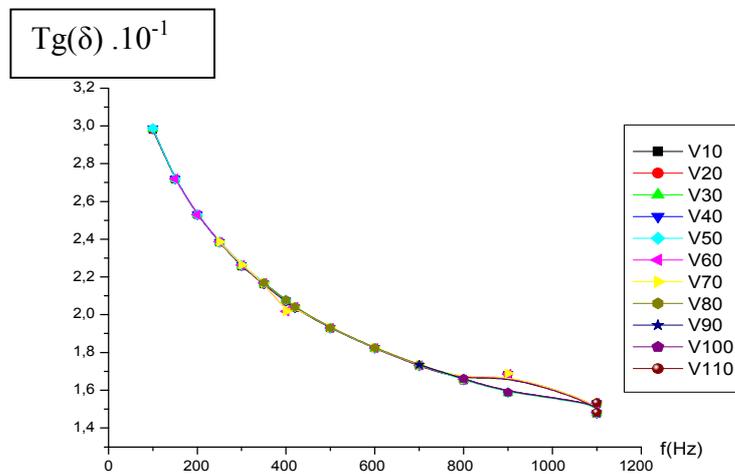
**Fig.III.20.** Facteur de perte en fonction de la fréquence du polyéthylène vieilli sous pollution humide



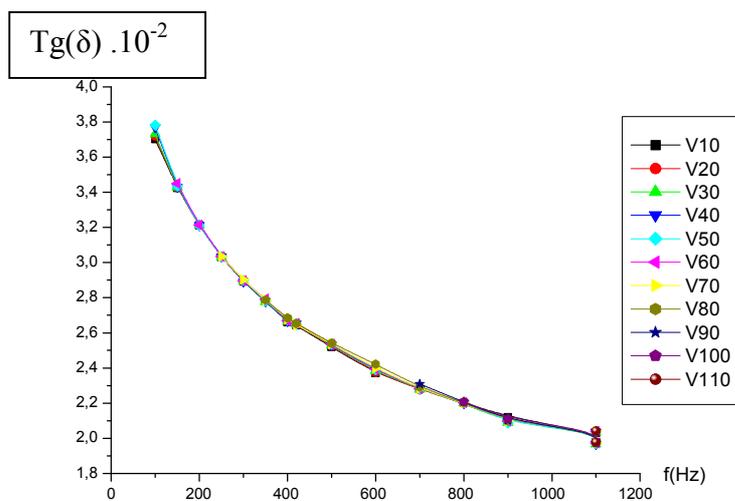
**Fig.III.21.** Facteur de perte en fonction de la fréquence de la Bakélite vierge



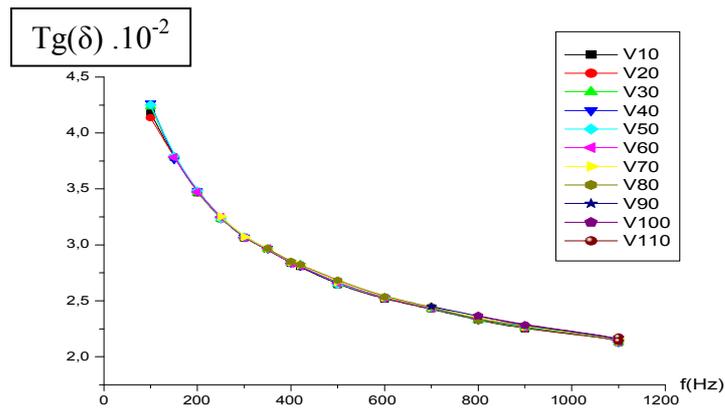
**Fig.III.22.** Facteur de perte en fonction de la fréquence de la Bakélite vieillie à sec



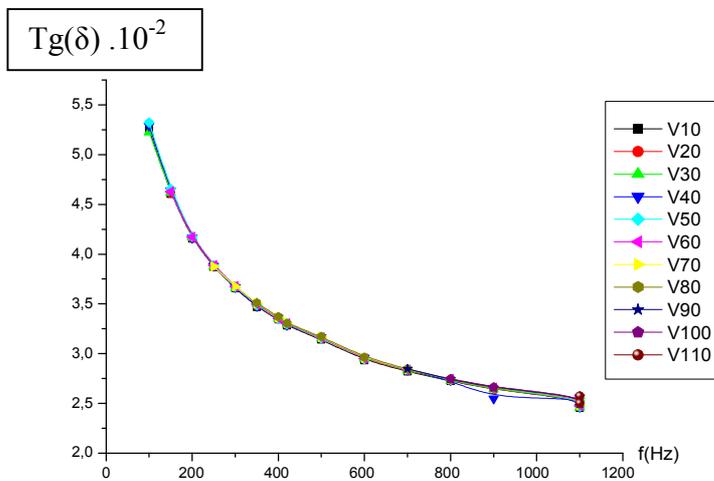
**Fig.III.23.** Facteur de perte en fonction de la fréquence de la Bakélite vieillie sous pollution humide



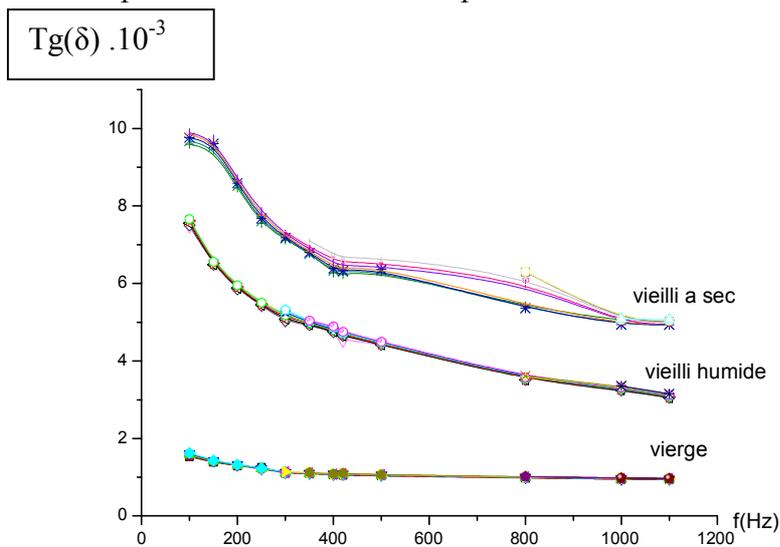
**Fig.III.24.** Facteur de perte en fonction de la fréquence du verre vierge



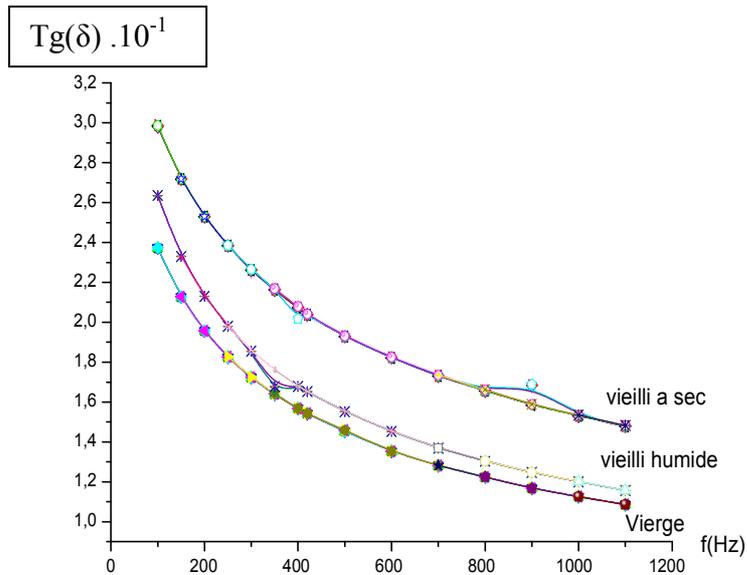
**Fig.III.25.** facteur de perte en fonction de la fréquence du verre vieilli à sec



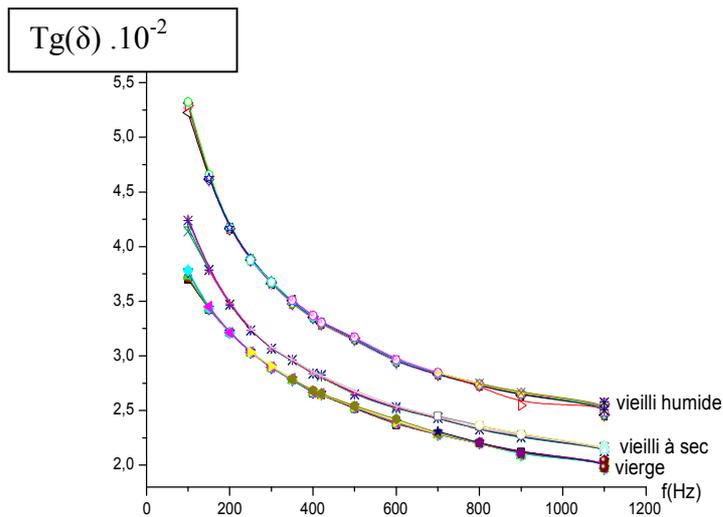
**Fig.III.26.** facteur de perte en fonction de la fréquence du verre vieilli sous pollution humide



**Fig.III.27.** facteur de perte en fonction de la fréquence du Polyéthylène vierge, vieilli à sec et sous pollution humide



**Fig.III.28.** facteur de perte en fonction de la fréquence de la Bakélite vierge, vieillie à sec et sous pollution humide



**Fig.III.29.** Facteur de perte en fonction de la fréquence du verre vierge, vieillie à sec et sous pollution humide.

### III.2.3.3. Calcul de La permittivité électrique $\epsilon_r$ et l'indice de perte $\epsilon_r \cdot tg(\delta)$

Le calcul de la permittivité électrique et de l'indice de perte représenté sur le tableau (III.4) pour une tension (50V) et une fréquence (100Hz) pour les différents matériaux à l'état vierge

	Permittivité $\epsilon_r$	l'indice de perte $\epsilon_r \cdot \text{tg}(\delta)$
Polyéthylène	2.06	$3.36 \times 10^{-3}$
Bakélite	18.96	$49.93 \times 10^{-1}$
Verre	9.23	$34.44 \times 10^{-2}$

**Tab.III.4.** Le calcul de permittivité électrique et de l'indice de perte

### III.3- Présentation, interprétation et discussions des résultats d'analyses chimiques

#### III.3.1- Analyse infrarouge

Cette analyse a permis d'obtenir des spectres de variation d'absorbance  $A$  (unité arbitraire de la quantité de lumière réfléchiée par le matériau) en fonction de la fréquence de bombardement des matériaux par le rayonnement infrarouge, soit du nombre d'onde  $\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ).

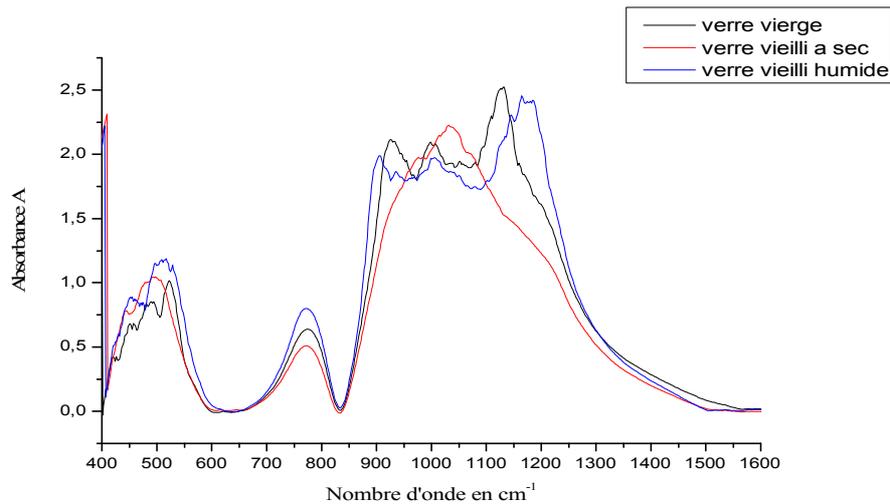
L'absorbance  $A$  met en évidence les types de liaisons existants dans le matériau, caractérisés par un ou plusieurs pics apparaissant sur une plage de fréquence (nombre d'onde  $\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ )) bien définie.

Les figures (III.30 à III.41.) illustrent la variation de l'absorbance  $A$  en fonction du nombre d'onde  $\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) pour les différents échantillons analysés sains et dégradés de verre, de bakélite et de polyéthylène respectivement.

Pour chaque matériau, ces spectres infrarouges sont déterminés pour trois échantillons, dont deux ont été vieillis sous l'effet du champ électrique pour deux états de surface (sec et humide), le troisième vierge, fait office de référence.

#### a. Résultats d'analyse du verre

Les pics obtenus du degré d'absorbance  $A$ , sur les différents intervalles du nombre d'ondes  $\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), illustrés sur la figure (III.30)

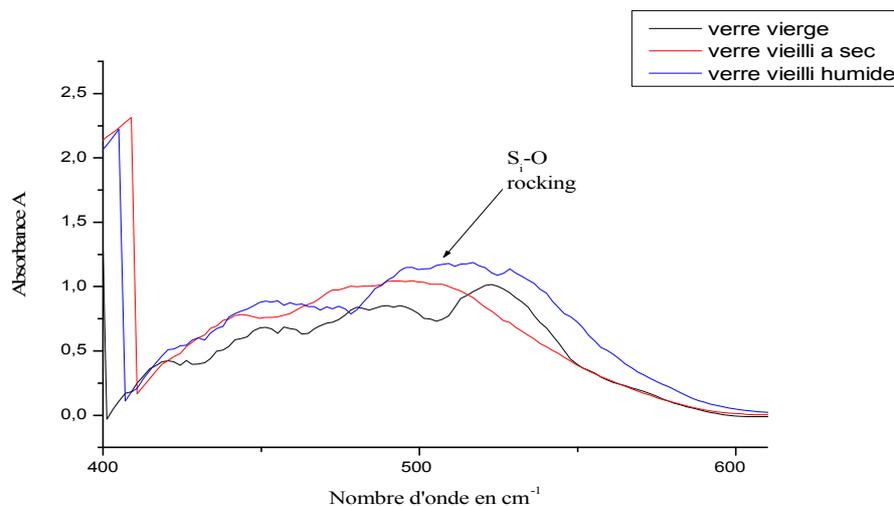


**Fig.III.30** : spectre IR des échantillons (vierge et vieillis) de verre

Un même groupe peut donner lieu à plusieurs types de vibrations et donc à des absorptions à différentes fréquences.

Ainsi le silicium lié à 4 atomes d'oxygène de la silice donne trois types de vibrations : Si-O stretching (850 à 1500  $\text{cm}^{-1}$ ), Si-O bending (650 à 840  $\text{cm}^{-1}$ ), Si-O rocking (400 à 600  $\text{cm}^{-1}$ ) comme le montre la figure (30).

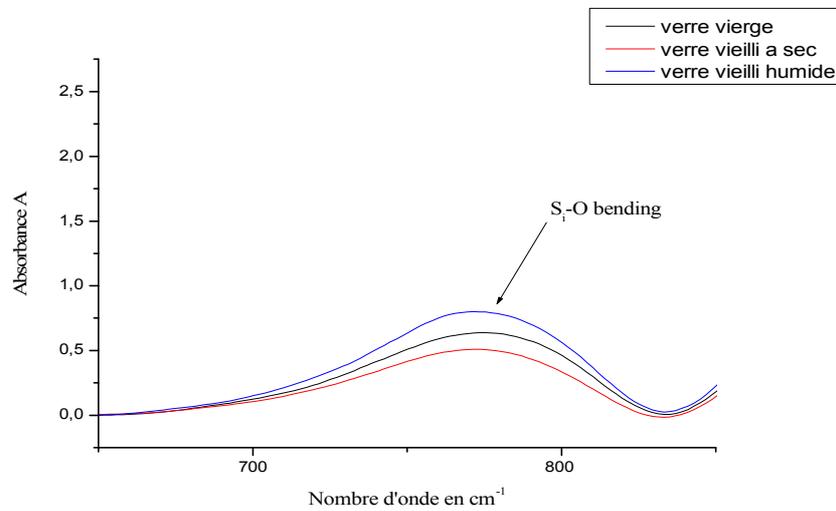
On constate, dans la bande située entre 400 à 600  $\text{cm}^{-1}$  figure (III.31), la présence de la vibration liée ou basculement des liaisons  $\text{Si}_i\text{-O}$  (rocking).



**Fig.III.31.** Zone spécifique au groupement  $\text{Si}_i\text{-O}$  rocking des échantillons de verre

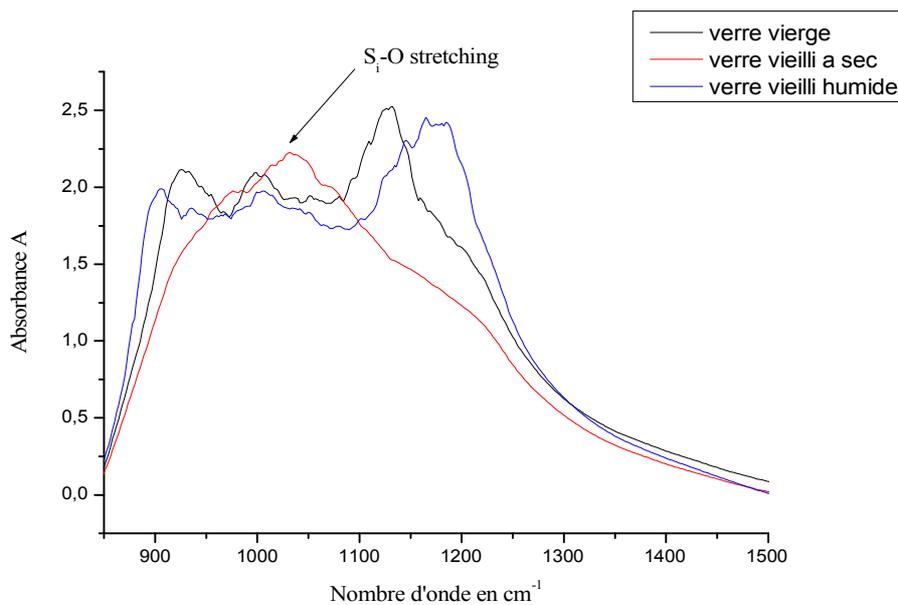
## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

L'intervalle  $650$  à  $840\text{cm}^{-1}$  figure(III.32) correspond aux vibrations liées recourbement de liaison  $\text{Si-O}$



**Fig.III.32.** Zone spécifique au groupement Si-O bending des échantillons de verre

Nous remarquons dans la bande située entre  $850$  à  $1500$ (figure.33) que la présence des vibration liée ou dilatement de liaison Si-O



**Fig.III.33.** Zone spécifique au groupement Si-O stretching des échantillons de verre

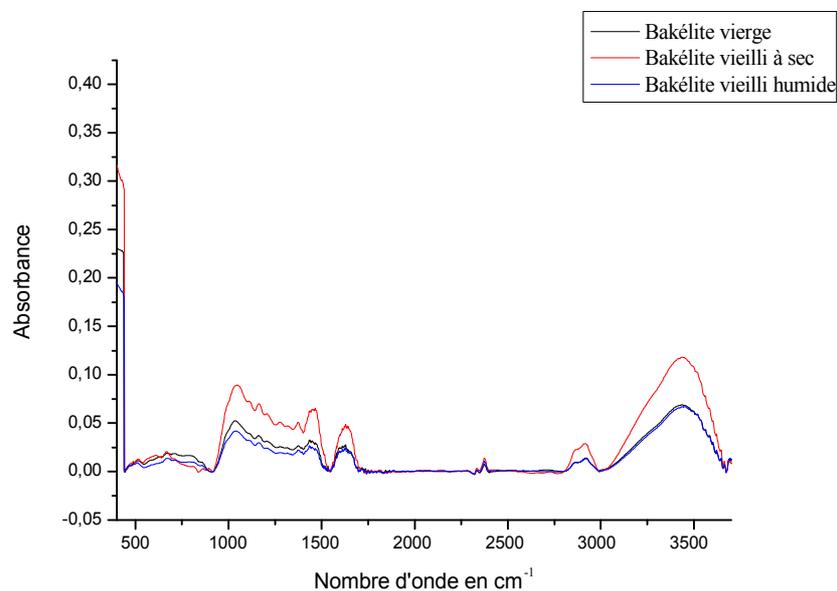
## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

Ces résultats d'analyses expliquent la diminution de la capacité et l'augmentation du facteur de pertes dans le verre, qu'on peut lier directement à la fragilisation de ce matériau suite aux déformations que subissent les liaisons Si-O par basculement (rocking), recourbement (bending) et élongation (stretching), pouvant aller jusqu'à leur rupture, sous l'effet d'une contrainte de champ appliqué. La conductivité de la pollution déposée renforce l'énergie de la décharge et en corolaire, le processus de dégradation du matériau.

### b- résultats d'analyse IR de la bakélite

Les analyses IR effectués sur les échantillons de la bakélite (vierge, vieilli à sec etsous pollution humide) on révélé d'importants modification dans la structures du matériau, suite au vieillissement électrique subit sur la contrainte du champ électrique appliqué.

Les pics obtenus du degrés d'absorbance  $A$ , sur les différents intervalles du nombre d'onde  $\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), illustré sur la figure (III.34) sont spécifiques à la présence de différents groupements chimiques.

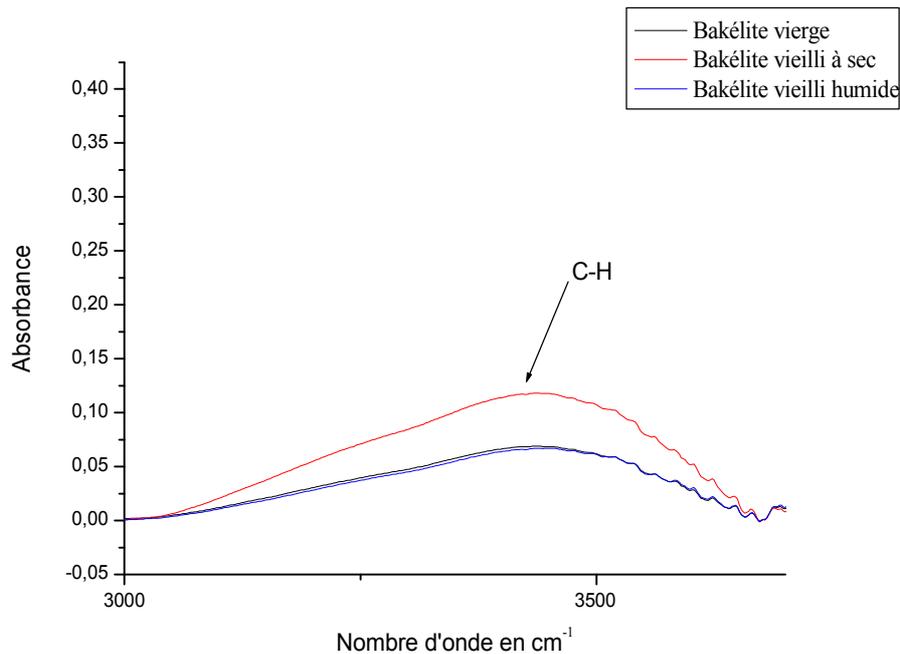


**Fig.34.** spectre IR des échantillons (vierge et vieillis) de Bakélite

## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

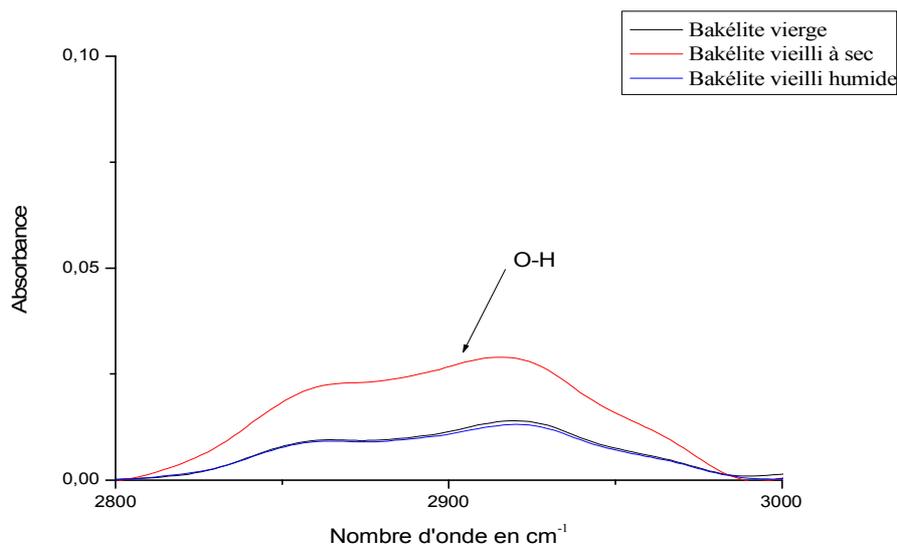
Les bandes situées entre 3000 et 3700  $\text{cm}^{-1}$  (figure III.35) sont attribuées à la vibration liées à la rupture des liaisons C-H des phénols existant dans la structure du matériau et la présence de cette vibration entraîne systématiquement celle de la formation des liaisons C=C.

Cette vibration est accentuée dans le cas de la Bakélite vieillie à sec.



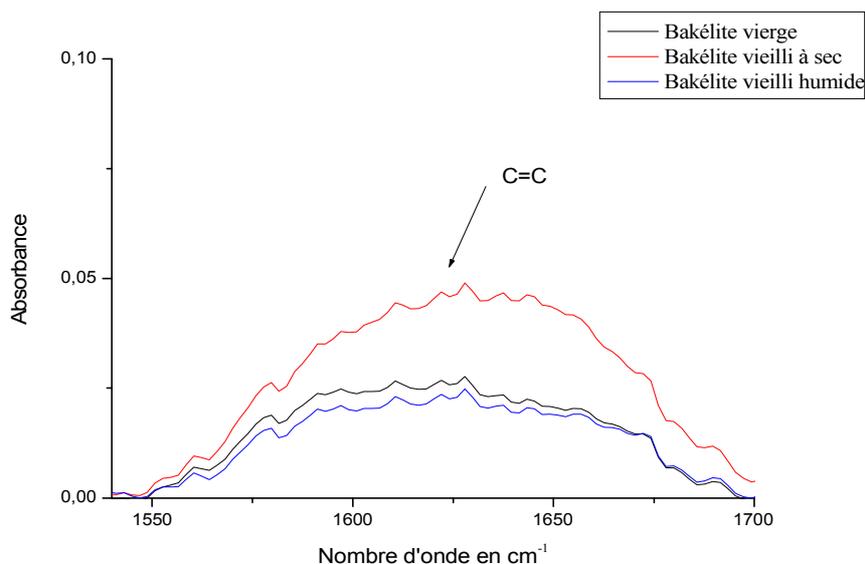
**Fig.III.35.** Zone spécifique au groupement C-H des échantillons de Bakélite

Les pics apparaissant de 2800 à 3000  $\text{cm}^{-1}$  (figure III.36) correspondent à l'élongation des groupements O-H, qui sont plus importants dans le cas de la Bakélite vieillie à sec.



**Fig.III.36.** Zone spécifique au groupement O-H des échantillons de Bakélite

Dans le domaine allant de 1550 à 1700 cm<sup>-1</sup> du nombre d'onde  $\nu$  (cm<sup>-1</sup>), apparait la vibration liée au renforcement des doubles liaisons C=C, synonyme de rupture de liaison C-H des groupements éthyles (CH<sub>2</sub>) (figure III.37) ; ceci se traduit par une libération des atomes d'hydrogène et un dépôt de carbone, suite à d'éventuelles scissions de chaînes moléculaires. Ce cas est accentué dans le cas de la Bakélite vieillie à sec.

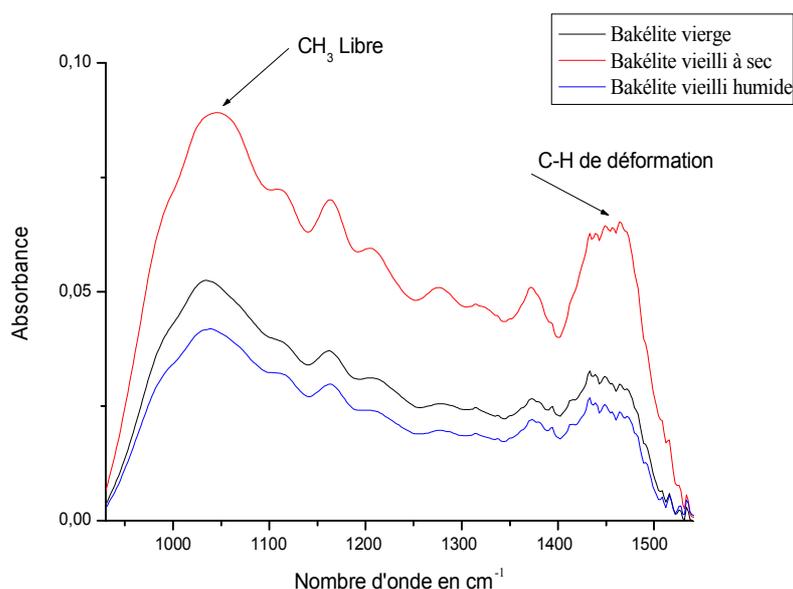


**Fig. III.37.** Zone spécifique au groupement C=C des échantillons de Bakélite

La limite 1000 à 1300  $\text{cm}^{-1}$  (figure III.38) correspond aux vibrations des groupements libres  $\text{CH}_3$ .

Et l'intervalle 1300 à 1550  $\text{cm}^{-1}$  (figure III.38) correspond aux vibrations liées à la formation des liaisons C-H.

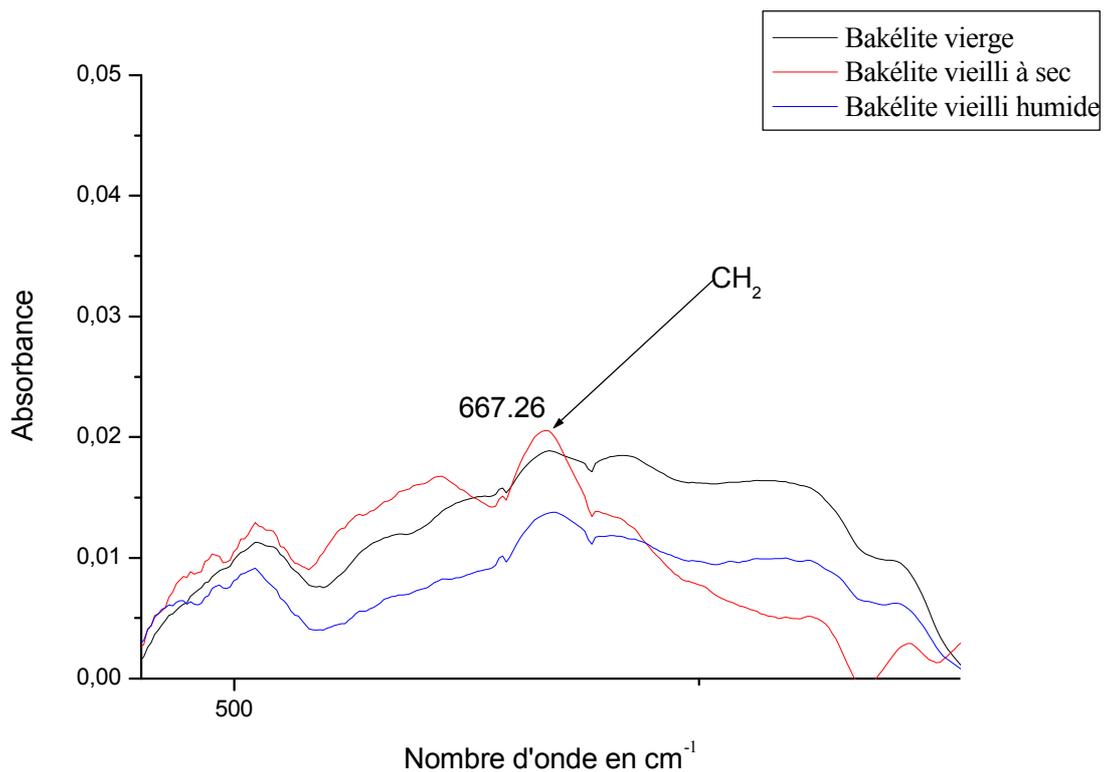
Ce cas est accentué dans le cas de la Bakélite vieillie à sec.



**Fig.III.38.** Zone spécifique au groupement  $\text{CH}_3$  libre et C-H de déformation des échantillons de Bakélite

A faible fréquence  $\nu \leq 800 \text{ cm}^{-1}$ , nous retrouvons les pics relatifs à la vibration des groupements  $(\text{CH}_2)_n$  spécifiques des phénols (figures III.39).

Ce cas est accentué dans le cas de la Bakélite vieillie à sec.



**Fig. III.39.** Zone de vibration de CH<sub>2</sub> spécifique des phénols des échantillons de Bakélite

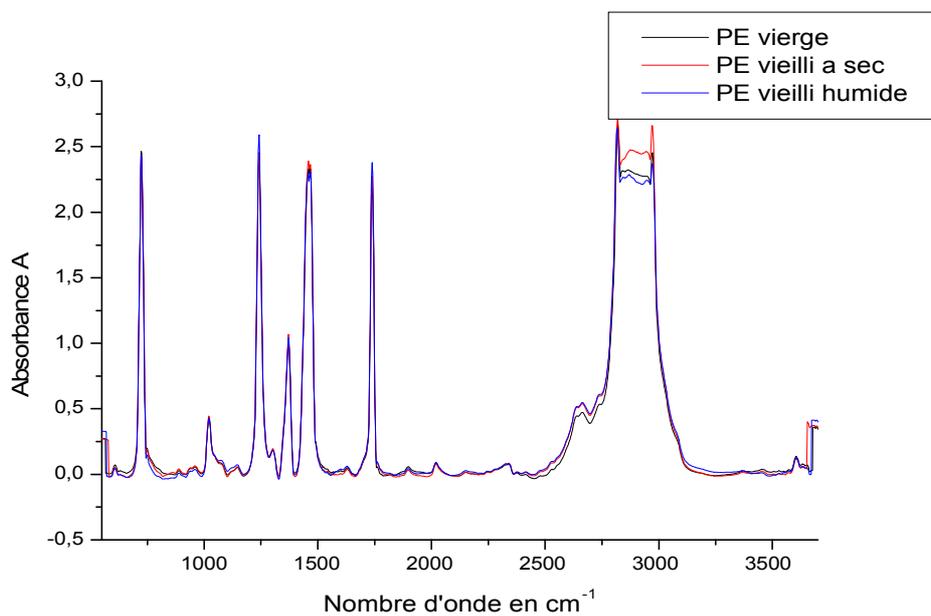
Ces résultats d'analyses expliquent la diminution de la capacité et l'augmentation du facteur de pertes dans la Bakélite, qu'on peut lier directement à la fragilisation de ce matériau suite à la rupture des liaisons C-H, sous l'effet d'une contrainte de champ appliqué.

La pollution humide réduit, d'une part, l'effet thermique lié à la décharge, et sa conductivité favorise, sous l'effet de l'énergie de la décharge, la décomposition de la solution NaCl déposée. Les atomes d'hydrogène libérés se combinent aux atomes de chlore, donnant lieu à un dégagement gazeux de HCl et réduisant, de ce fait, l'effet du polluant sur l'état de dégradation du matériau et en corolaire réduit la diminution de la capacité et l'augmentation du facteur de pertes du matériau relativement au cas du vieillissement à sec de la bakélite.

### c- résultats d'analyse IR du polyéthylène

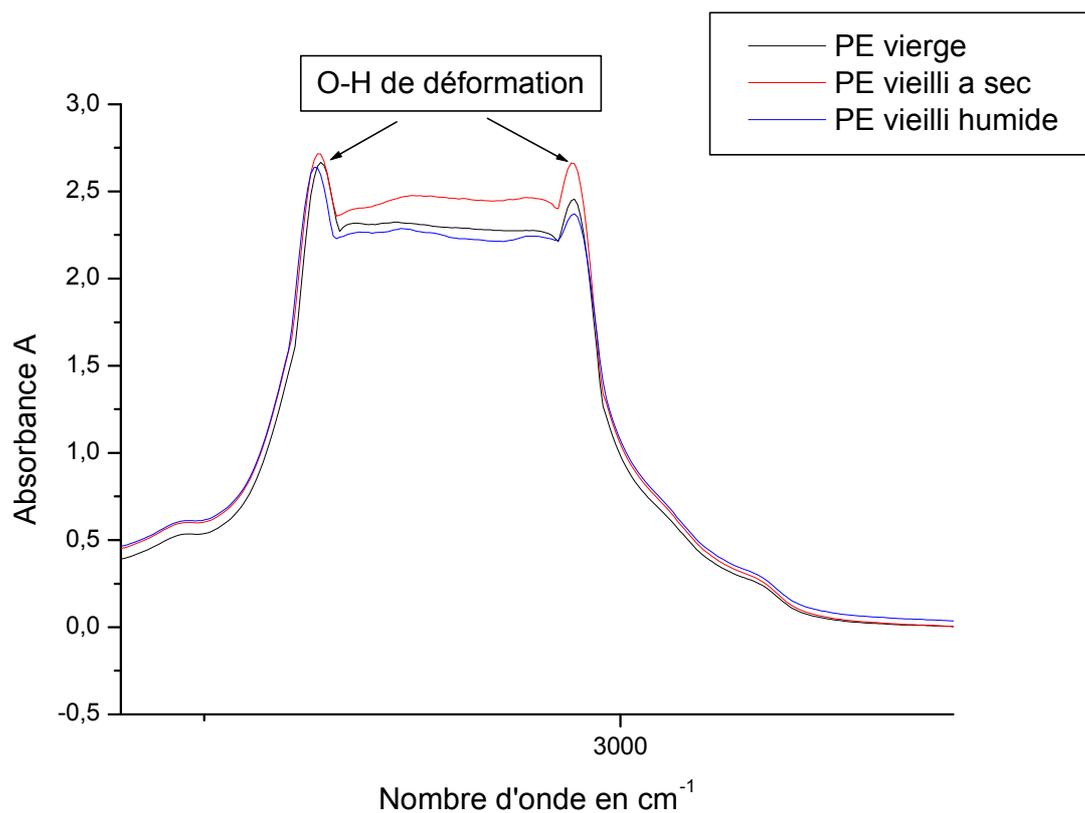
Les analyses IR effectués sur les échantillons de polyéthylène (vierge, vieilli à sec et sous pollution humide) on révélé d'importants modification dans la structures du matériau, suite au vieillissement électrique subit sous la contrainte du champ électrique appliqué.

Les pics obtenus du degrés d'absorbance A, sur les différents intervalles du nombre d'onde  $\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), illustré sur la figure (III. 40) sont spécifiques à la présence de différents groupements chimiques.



**Fig. III.40.** Spectre IR de Polyéthylène

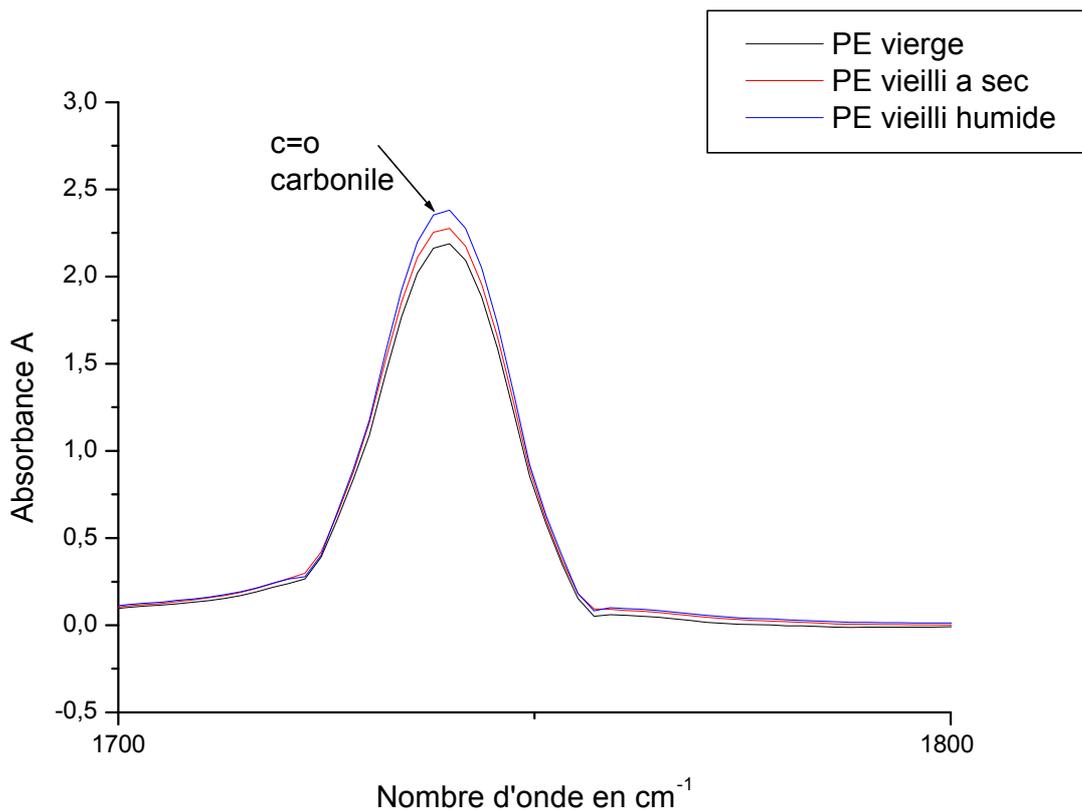
Le matériau est d'abord sujet à des déformations dans sa structure moléculaire, révélée par la formation des liaisons O-H spécifique des acides, visibles dans l'intervalle 2600 à 3300  $\text{cm}^{-1}$  du nombre d'onde  $\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) (figure III. 41).



**Fig.III.41.** zone de vibration de liaison O-H

La zone s'étendant de 1720 à 1770  $\text{cm}^{-1}$  (figure III.42) a également révélée la formation des doubles liaisons C=O spécifique des carbonyles, laissant supposer des coupures de chaînes entre les groupements monomères des éthylènes.

Ce cas est accentué dans le cas du polyéthylène vieilli humide.

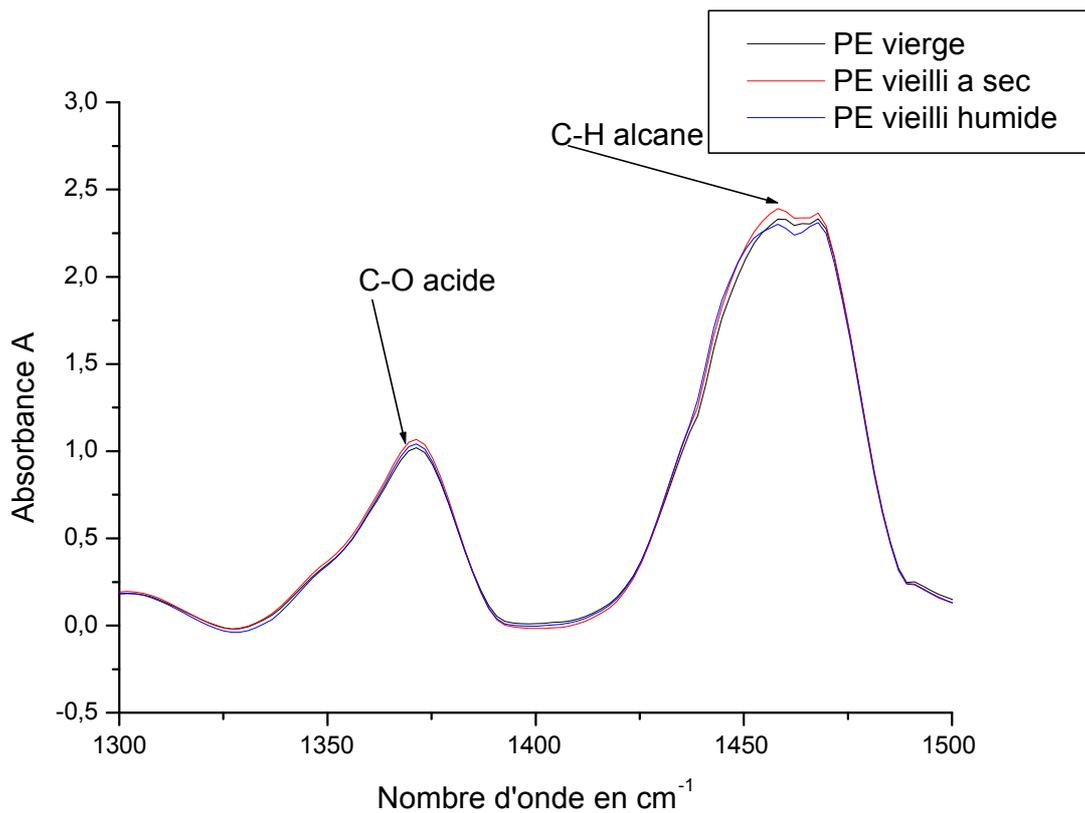


**Fig. III.42.** Zone de vibration des liaisons C=O spécifique des carbonyles

Nous avons également enregistré des vibrations liées à la formation des liaisons C-H spécifique des groupements alcanes, visibles dans l'intervalle 1400 à 1500  $\text{cm}^{-1}$  du nombre d'onde  $\nu(\text{cm}^{-1})$  (figure III.43).

L'intervalle entre 1300 à 1400  $\text{cm}^{-1}$  illustrés sur la (fig III.43) est spécifique aux aromes.

Ces cas sont légèrement accentués dans le cas du polyéthylène vieilli à sec.



**Fig. III.43.** zone de vibration des groupements spécifiques C-H alcane et des acides C-O

Ces résultats d'analyses expliquent la dégradation du polyéthylène, sous l'effet de la contrainte de champ appliqué, et qui se traduit par la diminution de la capacité et l'augmentation du facteur de pertes dans le polyéthylène. Ceci peut être lié directement à la fragilisation de ce matériau suite à la scission des chaînes moléculaires des groupements monomères éthylène, laissant place à la formation des groupements carbonyle et des acides et à la libération des atomes d'hydrogène.

La conductivité de la pollution déposée renforce l'énergie de la décharge qui décompose la solution NaCl déposée. Les atomes d'hydrogène libérés se combinent aux atomes de chlore donnant lieu à un dégagement gazeux de HCl et réduisant, de ce fait, l'effet du polluant sur l'état de dégradation du matériau et en corolaire réduit la diminution de la capacité et l'augmentation du facteur de pertes du matériau relativement au cas du vieillissement à sec du polyéthylène.

## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

---

Cette analyse nous a amené à conclure que le vieillissement électrique a un impact direct sur la structure chimique des trois matériaux (le verre, la bakélite et le polyéthylène) étudiés.

La modification de la morphologie de ces matériaux, révélée par la déformation de leurs structures chimiques : ruptures de liaisons chimiques et scissions des chaînes moléculaires, est directement liée à la dégradation des caractéristiques diélectriques de ces matériaux.

### III.3.2-Analyse microscopique a balayage (MEB)

#### a. analyse de la morphologie

L'analyse MEB, effectuée au moyen du microscope électronique à balayage, a permis dans un premier temps, de faire des observations sur l'état de surface des échantillons de polyéthylène (vierge et vieilli sous pollution humide) et de bakélite (vierge, vieilli à sec et sous pollution humide).

Ce moyen permet de faire des observations et une prise photographique de la structure morphologique de l'état de surface de ces échantillons.

L'observation au microscope a révélé de profondes traces de défauts laissées par la décharge.

La trace de la décharge sur l'échantillon de polyéthylène lui confère une texture spongieuse, laissant voir des porosités de diamètre allant de quelques 20 à 40  $\mu\text{m}$  figure (III.44).

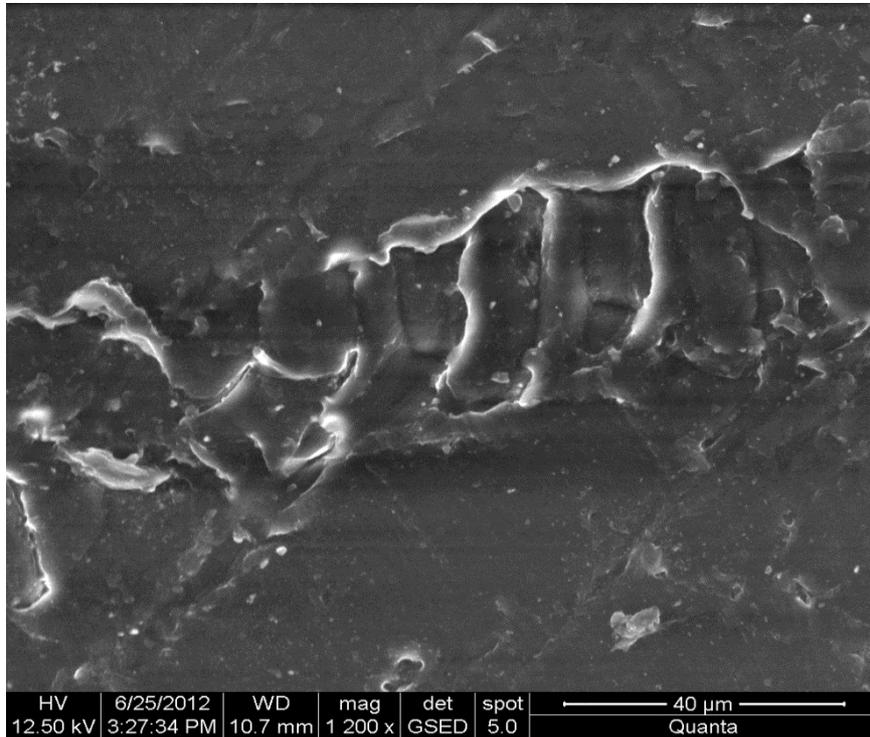
La trace de la décharge sur l'échantillon de Bakélite vieilli à sec, laisse des rainures de quelques 25  $\mu\text{m}$  de diamètre et révèle une carbonisation de la surface qui met en évidence l'effet thermique qui l'accompagne figure (III. 45). Le dépôt de pollution humide a réduit de cet effet thermique et des traces moins profondes et généralisées sur toute la surface ont été observées dans le cas de la Bakélite vieillie sous pollution humide Figure (III.46).

Ces résultats viennent étayer d'une part, ceux trouvés par les analyses infrarouges, mettant en évidence le changement de l'état de surface des matériaux et confirmant le dépôt de carbone dans le cas de la Bakélite vieillie à sec et ceux obtenus par les essais électriques,

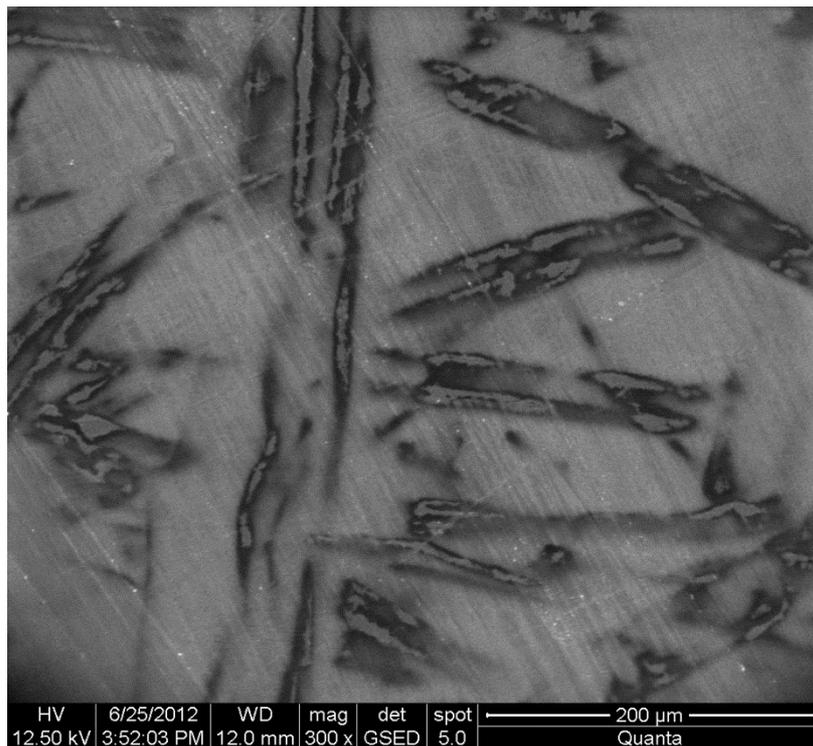
## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

---

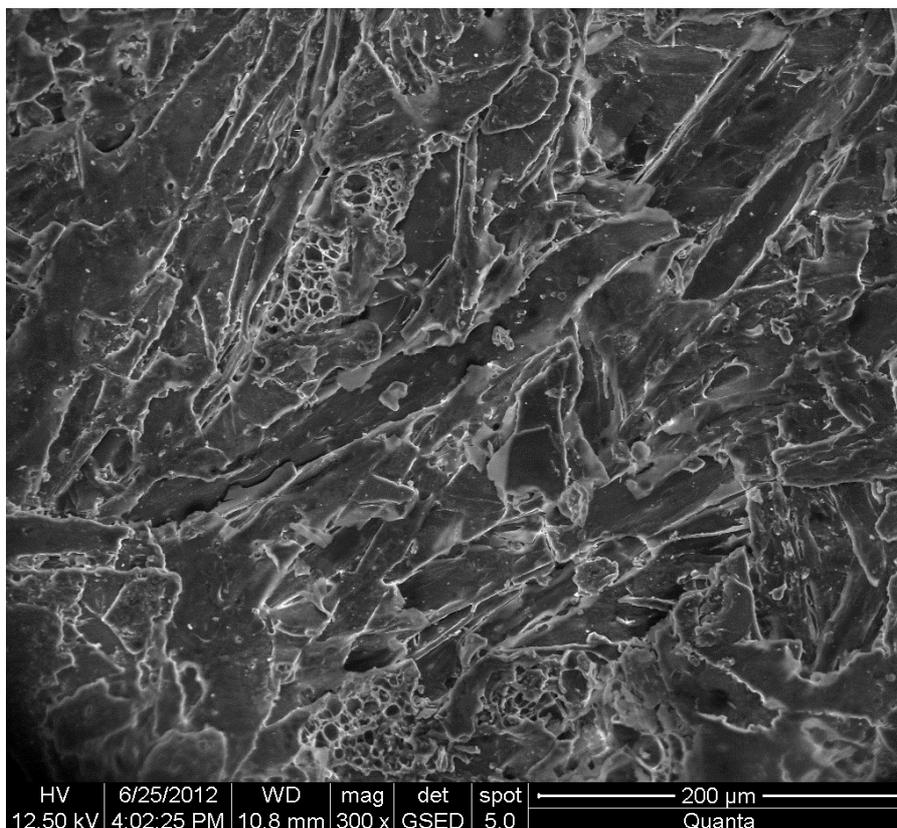
d'autre part, révélant une dégradation des caractéristiques diélectriques, plus sévère dans le cas de l'échantillon de la bakélite vieilli à sec relativement au cas de la bakélite vieillie sous pollution humide.



**Fig. III.44.** Polyéthylène vieilli sous pollution humide



**Fig. III.45.** Bakélite vieilli à sec



**Fig. III.46.** Bakélite vieilli sous pollution humide

### b) Microanalyse

La microanalyse nous a permis de recenser les éléments chimiques constituant le matériau étudié et de déterminer leurs taux en (%) dans le mélange.

Les figures (III.47, III.48) et les tableaux (III.5) à (III.6) correspondant, illustrent les variations des taux des différents composants constituant le matériau polyéthylène (vierge et vieilli sous pollution humide) étudié.

Les résultats obtenus par cette analyse microscopique montrent une diminution du taux de carbone dans le mélange de l'échantillon vieilli sous pollution humide par rapport au taux enregistré sur l'échantillon vierge de référence (figures III.47 et le tableau III.5)

L'augmentation du taux d'oxygène, dans le cas du mélange de polyéthylène vieilli, par rapport aux taux de référence (mélanges vierge), justifie la formation des groupements C=O.

Ce résultat vient confirmer celui obtenu par l'analyse infrarouge, révélant une scission de la chaîne moléculaire des groupements monomères éthylène, laissant place à la formation des groupements carbonyle et des acides et à la libération des atomes d'hydrogène.

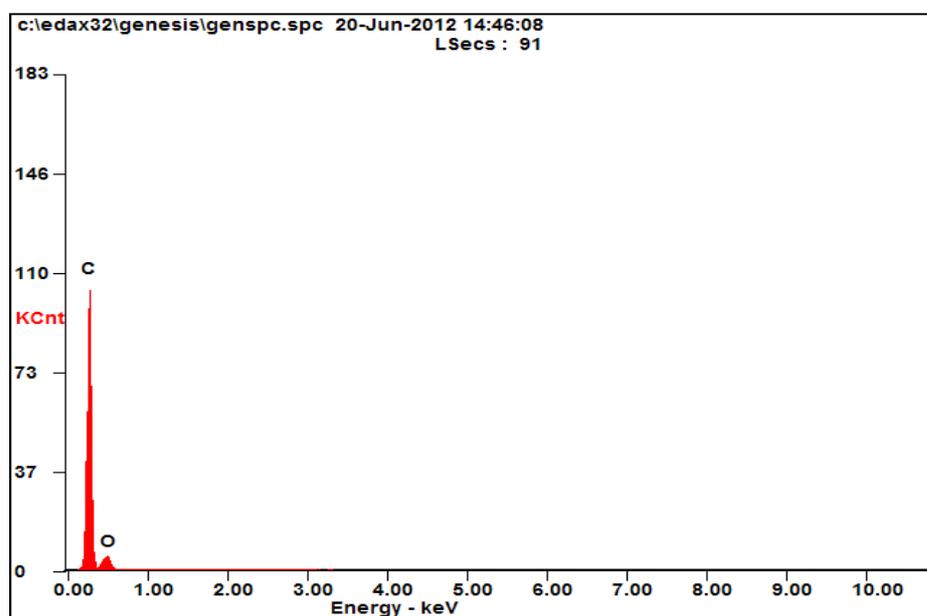
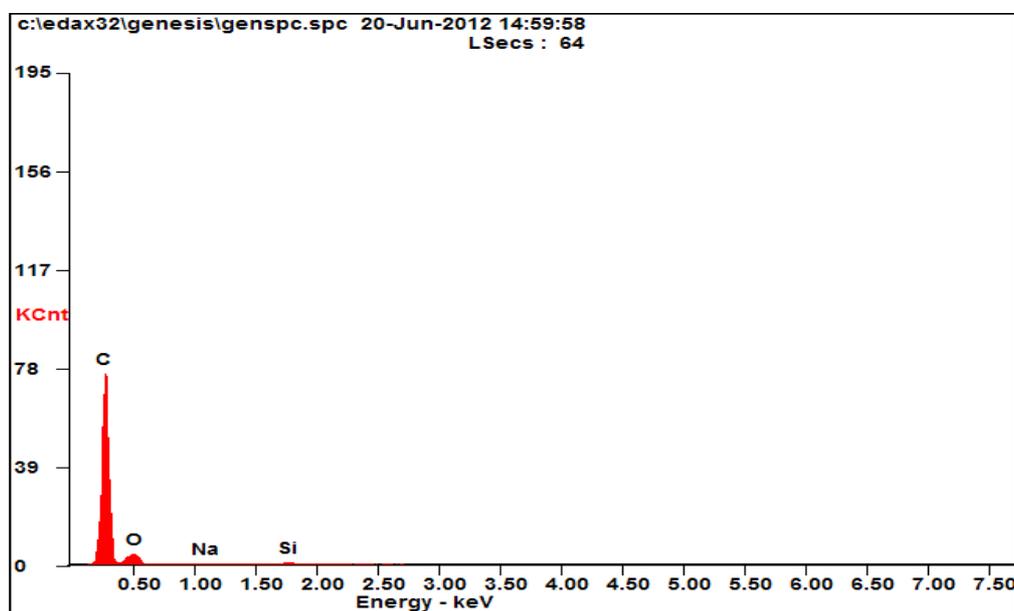


Fig. III.47. Spectre de la microanalyse de l'échantillon de PE vierge.

<i>Elément</i>	<i>W %</i>	<i>A %</i>
<i>C</i>	90.57	92.75
<i>O</i>	09.43	07.25

**Tab III.5:** taux des éléments chimiques dans le Polyéthylène vierge



**Fig III.48.** Spectre de la microanalyse de l'échantillon de Polyéthylène vieilli sous pollution humide

<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>C K</i>	88.83	91.53
<i>O K</i>	10.63	08.22
<i>NaK</i>	00.08	00.05
<i>SiK</i>	00.45	00.20

**Tab. III.6:** taux des éléments chimiques dans le Polyéthylène vieilli humide

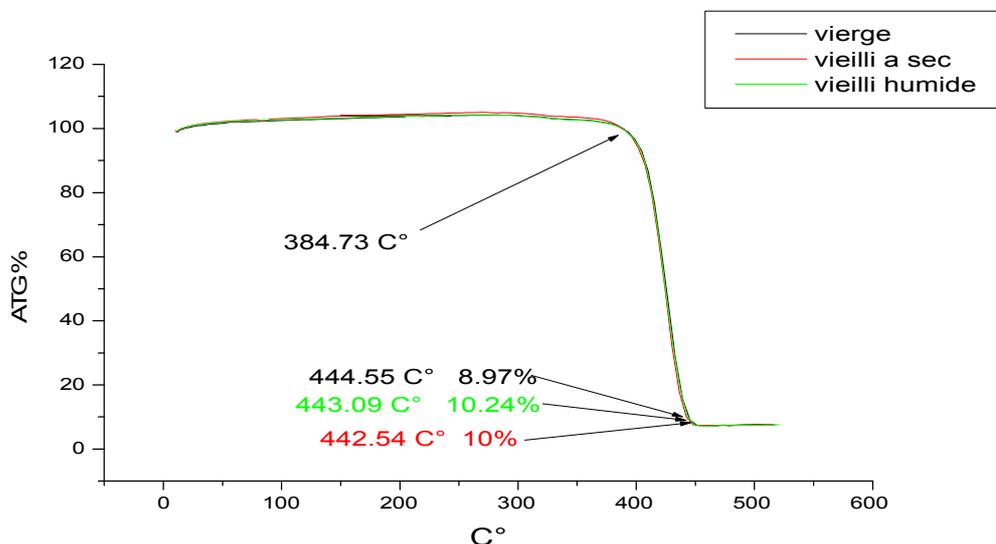
### III.2.3-Analyse ATG/ATD

Ces analyses nous ont permis de voir l'impact de la température sur la stabilité thermique des échantillons de polyéthylène étudiés.

Les figures (III.49) et(III.50), relatives aux échantillons vierge et vieillis analysés de polyéthylène, illustrent les thermogrammes de l'ATG et de l'ATD, donnant l'évolution de la propriété thermique du matériau par rapport à la variation de la température.

Les thermogrammes de l'ATG (figure III.49) montrent une bonne tenue thermique du matériau (vierge, vieilli à sec et vieilli humide) , Jusqu'à une température de traitement de 384.73°C. Au-delà de cette valeur, une chute brutale de cette propriété est enregistrée (jusqu'à une température  $T \approx 444^\circ\text{C}$ ) jusqu'à la rupture totale de la tenue thermique du matériau, se traduisant par une perte de masse importante.

On remarquer que le comportement des échantillons vierge, vieilli à sec et vieilli sous pollution humide, reste similaire jusqu'à une température de 442°C où une différence de perte de masse d'environ 0.5% est notée, cette différence qui avantage le matériau dégradé électriquement.

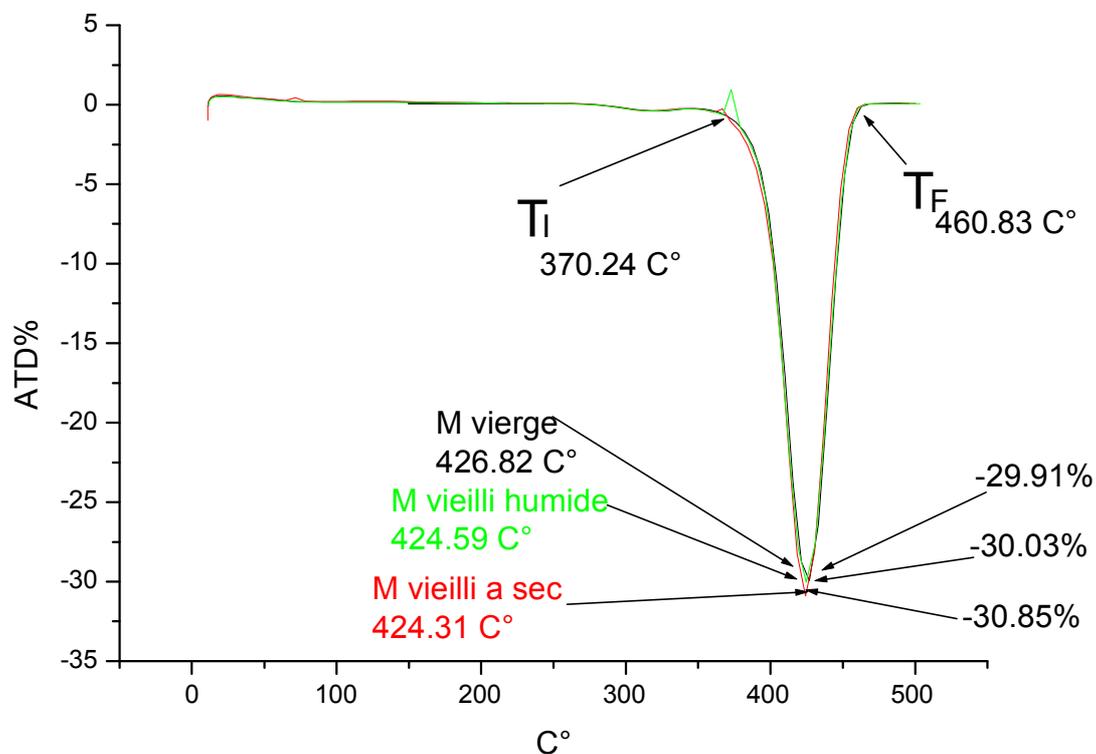


**Fig. III.49.** Thermogrammes de la variation du Taux de perte de masse (ATG%) en fonction de la température de traitement T (C°) des échantillons de Polyéthylène (vierge vieilli à sec et vieilli sous pollution humide).

## Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

La figure (III.50) illustre les résultats de l'analyse ATD donnant les variations de la vitesse de dégradation thermique du matériau, en termes de pourcentage de perte de masse, pour le polyéthylène.

On observe une première phase d'évolution de la dégradation thermique du matériau s'étalant entre les températures 370°C et 400°C, caractérisée par une grande perte de masse, suivi d'un ralentissement de la perte de masse allant jusqu'à la stagnation à la température 424 °C (vitesse presque nulle), puis vient un changement de pente traduisant un changement de la stabilité thermique, qui continue jusqu'à la rupture thermique du matériau à 460°C.



**Fig. III.50.** Thermogrammes de la variation de la vitesse de dégradation thermique du Polyéthylène, en termes de pourcentage de perte de masse (ATD%) en fonction de la de traitement T (°C) pour les échantillons de Polyéthylène vierge, vieilli à sec et vieilli sous pollution humide.

### III.4. Conclusion

Il ressort de ces différentes analyses réalisées (IR, MEB et ATG/ATD) sur les matériaux Polyéthylène, Bakélite et Verre vierges et vieillis électriquement, que la dégradation électrique de ces derniers, qui se manifeste par une diminution de la rigidité longitudinale et de la capacité des matériaux et par une augmentation de leurs facteurs de perte, se traduit par une modification de la morphologie des matériaux, soit une déformation de leurs structures moléculaires (formation de nouvelles liaisons C=C, C=O, O-H...etc.) suite à des ruptures des liaisons (C-C, C-H, Si-O...etc.) ou des scissions de chaînes moléculaires.

Une corrélation peut ainsi être établie entre le comportement électrique et chimique du matériau, liant la variation des grandeurs électriques ( $E_1$ ,  $C_x$  et  $\text{tg}\delta$ ) aux modifications morphologiques du matériau, traduisant la dégradation de ce dernier.

*CONCLUSION  
GENERALE*

### Conclusion générale

Notre travail s'inscrit dans le cadre de la dégradation des matériaux utilisés dans l'isolation des systèmes électriques.

Après avoir fait le point sur les généralités liées aux phénomènes électriques caractérisant les matériaux isolants (rigidité diélectrique, polarisation électrique, pertes diélectrique...etc.), nous nous sommes intéressés aux facteurs pouvant affecter ces grandeurs caractéristiques du matériau, tels que le vieillissement de ce dernier sous une contrainte de champ électrique et l'effet additionné d'un dépôt de pollution sur celui-ci.

Dans notre étude, nous nous sommes penchés sur trois matériaux intéressants particulièrement de domaine du génie électrique qui sont en l'occurrence le polyéthylène, la bakélite et le verre qui trouvent une utilisation très large dans les systèmes d'isolation.

Avant de mesurer, à l'état vierge et vieilli des matériaux, certaines grandeurs électriques caractéristiques de ces premiers, tels que leurs résistances et résistivités transversales et superficielles, leurs rigidités longitudinales, leurs capacités et permittivités électriques, leurs facteurs de pertes, nous avons exposé les différentes techniques de leurs mesures.

Et pour mieux comprendre les résultats de mesure électriques obtenus, nous avons réalisé une série d'analyses chimiques ; infrarouge, microscopie électronique à balayage et analyse thermogravimétrique et différentielle, afin de mieux comprendre le comportement de ces matériaux à l'échelle moléculaire et arriver, à travers ces résultats d'analyses chimiques, à corrélérer ces derniers avec les résultats des mesures électriques et ainsi faire une caractérisation physico- chimique de ces trois matériaux.

Des résultats intéressants ont été obtenus, que nous résumons comme suit :

L'exposition à la pollution atmosphérique de ces matériaux isolants diminue leurs tenues diélectriques donc de leurs rigidités diélectriques, synonyme d'une dégradation du matériau. Cette dégradation conduit à une augmentation du facteur de perte et à la diminution de sa capacité. Cependant, l'augmentation de la fréquence améliore le facteur de perte et la capacité des trois matériaux.

## Conclusion générale

---

- Cette diminution de la tenue diélectrique peut entraîner, sous certaines conditions, un contournement électrique des isolants recouvert de pollution, qui se traduit généralement par des interruptions plus ou moins longues de l'alimentation en énergie électrique.
- le polyéthylène possède une grande résistivité, un faible facteur de perte et une rigidité diélectrique meilleure que celle de la bakélite et du verre.
- Cependant, la bakélite possède la plus grande permittivité.
- L'analyse chimique a permis de conclure que la dégradation des isolants sous l'effet d'un champ électrique résulte des ruptures des liaisons chimiques, d'une scission de chaînes moléculaires, et l'observation au microscope nous a permis de voir de profondes traces de défauts laissées par la décharge.
- Une corrélation peut ainsi être établie entre le comportement électrique et chimique du matériau liant la variation des grandeurs électriques ( $C_x$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $R_t$ ,  $R_s$ ,  $\rho_t$ ,  $\rho_s$ ,  $\epsilon_r$  et  $E_1$ ) aux modifications morphologiques du matériau, traduisant la dégradation de ce dernier.

Ce travail est une étape d'une démarche visant une meilleure compréhension du phénomène de dégradation des isolants

*REFERENCES*  
*BIBLIOGRAPHIQUES*

- [1] **Affolter Jean-François**, "Haute Tension "Ecole d'ingénieurs du canton de Vaud département E+I, idition octobre 2000.
- [2] **R.FOURNIE**, "Les isolants en électrotechnique ", Vol-1 Conception et théorie.
- [3] **A.R.BLYTHE**, "Electrical properties of polymers", cambridge universiyy press, vol 1,1979.
- [4] **M. j. Hemandez , R. Harley, N.Hampton, R.Hartlien**, "Characterization of ageing for MV power cables using law frequency Tan  $\delta$  diagnostic measurements", IEEE, trans, On elect, insu, vol 16 n°3, P 862-870, juin 2009.
- [5] **M. j. Hemandez , R. Harley, N.Hampton, R.Hartlien**, "Correlation between Tan  $\delta$  diagnostic ", IEEE, Trans, On elect, insu, vol 16 n°1, P 162-170, Feverier 2009.
- [6] **G.Marrone, F. Marinoni**, "set up of a dust chamber providing artifitial insulator contamination suitable to reproduce conditions occurring in the Field", paper presented at 5<sup>th</sup> international symposium on high voltage engineering, N°52,1987.
- [7] **F.H.KREUGER**, "Industrial high voltage: coordinating, measuring and testing", Delts University Press,Vol 11, 1992.
- [8] **Michel Aguet et Mercea** , "Haute tension , volume XXII : traite de l'électricité", 1982 Editions jeorgi.
- [9] "Méthode d'essais recommandés pour la détermination de la rigidité diélectrique des matériaux isolants solides aux fréquences industrielles", Publ ,CEI,N°273 ,Genève,1963.
- [10] Handbook of materals measurement methods, Part B, " measurement methods for materials properties", idition springer.
- [11] notes d'informations techniques, les tests dielectriques,"les essais de rigidite et d'isolement", SEFELEC, édition 2004.
- [12] **Groupe d'action 33-04-03**, "dispositif de surveillance des isolateurs soumis a la pollution", Revu Electra, n°152, Février 1994, p78-90.

- [13] "La pollution de l'air", Rapport d'information N° 3088 de l'assemblée nationale, 23 mai 2001.
- [14] **D. Dumora, R. Parraud**, "solutions apportées aux problèmes de pollution par différents isolateurs en verre trempé et isolateurs en composite", 428RP 99/BC/MRG, Sediver-79 Avenue François Arago-92017 Nanterre Cedex France.
- [15] **A. Cimador, S. Vitet**, "La pollution des isolateurs", EDF-Epure N° 27, juillet 1990.
- [16] **A. Mekhdi**, "Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces sous tension alternative 50 Hz", Thèse de doctorat d'état, Ecole nationale polytechnique, Algérie, 1999.
- [17] **H. Zhang and R. Hacham**, "electrical surface resistance hydrophobicity and diffusion phenomena in PVC", IEEE, Trans, On elect, Insul, Vol, 6, N° 1 pp 73-83, February 1999.
- [18] **pierre Masclat**, pollution atmosphérique.
- [19] **A. Cimador, M. Cojan, P. Hautefeuille, M. Morceau**, "Methodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées", CIGRE, Rpport 33-04, 1978.
- [20] **H. Streubel, H. Reuter**, "Die Übershlagspaltung ungleichmassig verchmutzter isolatoren".
- [21] **Philippe Jordan**, publication, 14 novembre 2008.
- [22] **I. Kimoto, T. Fujimurax**, "performance of isolateurs for direct current transmission line under polluted conditions", IEEE, Trans, On PAS, Vol Pas-92 N°3, pp 934-949, May June 1973.
- [23] **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.
- [24] **W.Reider**, "Plasma und Lichtbogen", Vierweg Verlag, Brunschweig, pp 128\_132, 1967.

- [25] **E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel**, "High Voltage Engineering", Second edition 2000, published by Butterworth-Heinemann.
- [26] **M.Aguet, M.Ianoz**, "Haute tention", édition DUNOD 1987.
- [27] **Kind. Kärner**, "Heth-voltage, Exprimental technique", VIEWEG , edition 1978 .
- [28] Documentation technique du pont de schering à transformateur différentiel Tettex instruments tye 2089.
- [29] "Méthode recommandés pour la mesure des résistivités transversales et superficielles d'un matériau électrique", publ CEI, N°93 , Genève, 1958
- [30] **G.Marrone, F. Marinoni**, "set up of a dust chamber providing artifitial insulator contamination suitable to reproduce conditions occurring in the Field", paper presented at 5<sup>th</sup> international symposium on high voltage engineering, N°52,1987.
- [31] **Christophe Darcel et Jacques Uziel**, "Les grands principes", Chimie organique, idition DUNOD.
- [32] **H.Galons**, " Chimie organique", édition, ELSEVIER MASSON.
- [33] **Elise Marche**, Chimie organique-UE1, édition, EDISCIENCE,2010.
- [34] Handbook of materials measurement methods, Part B, " measurement methods for composition and structure", idition SPRINGER.
- [35] **A.Simuila, L.Dascalesco et R.Tabazeon** , "breackdown of ionised air gaps in the presence of spherical conductive particule", session 2143, 9<sup>th</sup> ISH, Graz 1995, pp1-4.
- [36] **A.Chablose**. "Technologie des matériauxà l'usage des profesions de l'électrisié .
- [37] **P. COMBETTE et I. ERNOULT**, "structure, fabrication et emploi", idition HERMANN ,2005
- [38] **A. Cimador, S .Vitet**, "la pollution des isolateurs", EDF-Epure N°27, Juillet 1990.
- [39] **Kind. Kärner**, "Heth-voltage, Exprimental technique", VIEWEG , edition 1985 .



## ***Résumé***

Dans les applications hautes tension, les solides isolants peuvent être exposés à des décharges. Dans le présent travail expérimental, nous étudions la dégradation superficielle du Polyéthylène, du Verre et de la Bakélite en utilisant des mesures électriques et des analyses chimiques.

Les échantillons de Polyéthylène, de Bakélite et de verre utilisés dans notre étude sont découpés en plaque, avant de les soumettre aux mesures et aux essais de vieillissement électrique (à l'état sec et à l'état humide) au laboratoire de haut tension, puis en fines lamelles ou en poudre pour la réalisation des analyses chimiques (IR, MEB, ATG, ATD) au niveau des laboratoires de génie des procédés de l'université A.M de Bejaia.

Les résultats de l'analyse chimique a permis de conclure que la dégradation des isolants sous l'effet d'un champ électrique résulte des ruptures des liaisons chimique, d'une scission de chaines moléculaires, et l'observation au microscope nous a permis de voir de profondes traces de défauts laissées par la décharge.