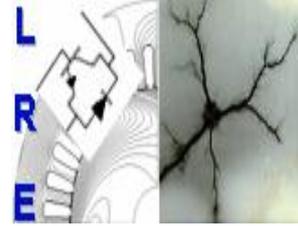


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire pour l'obtention du diplôme de  
**Master en Electrotechnique**

Intitulé

**Etude des propriétés mécaniques des câbles MT  
isolés au PRC fabriqués par ELSEWEDY Cables  
Algeria sous l'effet d'un vieillissement thermique**

Présenté par  
**OULD MAHAMMED Salah**

Sous la direction de Pr. A. BOUBAKEUR  
soutenu publiquement le 20 juin 2016

**Membres du Jury**

Président	A. MEKHALDI	Professeur à l'ENP
Promoteur	A. BOUBAKEUR	Professeur à l'ENP
Examineurs	M. TEGUAR	Professeur à l'ENP

**ENP 2016**

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ceux qui ont donné un sens à mon existence  
en offrant une éducation digne de confiance, À  
ma chère mère et à mon père ;*

*À mes grands-parents, paix à leurs âmes ;*

*À mes frères et à mes sœurs ;*

*À toutes mes tantes et mes oncles ;*

*À tous mes amis que j'ai connus ;*

*À tous les membres de la famille  
OULD MAHAMMED*

*À tous les habitants du village Ait Si Amara.*

*MECRI Beaucoup*

*OULD MAHAMMED Salah*

# *Remerciements*

*Je remercie, avant tout, notre Dieu de m'avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.*

*Je remercie mon encadreur : Mr **Ahmed BOUBAKEUR**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour ses précieuses directives, ses fructueux conseils, et ses qualités humaines.*

*Je souhaite également remercier tous les enseignants ayant assurés mes cours pendant mes années d'études.*

*J'adresse mes chaleureux remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu juger mon travail et m'honorer avec leur participation.*

*Ce travail a été réalisé à l'entreprise **ELSEWEDY Cables Algeria** de Ain Defla, mes remerciements vont à :*

***Mme N.HAMADOUCHE** : directrice de contrôle et de qualité, pour son aide, ses conseils et de m'avoir facilité l'accès aux équipements du laboratoire.*

***Miloud AGOUNE** : Ingénieur dans le laboratoire contrôle et qualité, pour ses explications qui m'ont aidé à réaliser nos essais.*

***Mohamed KITANI**: technicien au laboratoire d'Essai de Moyenne et Haute Tension qui m'a fait bénéficier de son expérience afin d'accomplir ce travail dans un climat d'amitié.*

*Enfin, Je remercie l'ensemble du personnel technicien et administratif pour les conseils qu'ils ont pu me prodiguer au cours de ce projet de fin d'études.*

## ملخص:

تدخل هذه المذكرة في إطار مشروع بحث حول دراسة الخصائص الميكانيكية للكوابل الكهربائية المعزولة بالبوليثيلان المرتبط كيميائيا تحت تأثير التشيخ الحراري؛ المعقد بين مخبر البحث في الالكتروتكنيك للمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات ومؤسسة السويدي كابل-الجزائر بعين الدفلى. لقد اهتمنا بدراسة تطورات الخصائص الميكانيكية للبوليثيلان المرتبط كيميائيا والبوليكلوريرفينيل بدلالة التشيخ الحراري الذي يمكن أن يؤثر عليهم خلال مدة الإستعمال.

## الكلمات المفتاحية:

التشيخ الحراري؛ الخصائص الميكانيكية؛ البوليثيلان المرتبط كيميائيا؛ البوليكلوريرفينيل .

## Abstract:

This master's project is a part of a research project about the influence of thermal ageing on mechanical properties of the electric cables insulated by Cross-Linked polyethylene (XLPE), which was launched by the Laboratoire de Recherche en Electrotechnique of Ecole Nationale Polytechnique in collaboration with the company of ELSEWEDY Cables Algeria in Ain Defla. We are interested by studying the evolution of the mechanical properties of the XLPE and PVC versus thermal ageing that may influence them during their use.

## Key's words:

Thermal ageing, mechanical properties, Cross-Linked polyethylene (XLPE), polyvinyl chloride (PVC).

## Résumé

Ce projet de master s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur l'étude des propriétés mécaniques des câbles électriques isolés au polyéthylène réticulé chimiquement sous l'effet d'un vieillissement thermique, qui a été lancé par le Laboratoire de Recherche en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique en collaboration avec l'entreprise ELSEWEDY Cables Algeria à Ain Defla. Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) et du polychlorure de vinyle (PVC) en fonction du vieillissement thermique qui peuvent influencer sur elles en cours d'exploitation.

## Mots clés :

vieillissement thermique, propriétés mécaniques, polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), polychlorure de vinyle (PVC).

# Sommaire

Liste des figures  
Liste des tableaux  
Symboles et abréviation

<b>Introduction générale</b> : .....	1
Bibliographies : .....	3

## Chapitre I : Les polymères et leur vieillissement thermique

I.1 Introduction : .....	5
I.2 Polymérisation : .....	5
I.3 Caractéristiques des polymères : .....	5
I.3.1 Propriétés thermiques : .....	5
I.3.1.1 Elastomères : .....	6
I.3.1.2 Thermoplastiques : .....	6
I.3.1.3 Thermodurcissables : .....	6
I.3.2 Propriétés mécaniques des polymères : .....	6
I.4 Utilisation des polymères dans l'isolation des câbles électriques : .....	6
I.4.1 Polychlorure de Vinyle (PVC) : .....	7
I.4.1.1 Présentation du PVC : .....	7
I.4.1.2 Propriétés du PVC : .....	7
I.4.2 Polyéthylène (PE) : .....	8
I.4.3 Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) : .....	8
I.4.3.1 Présentation du PRC : .....	8
I.4.3.2 Réticulation du PRC avec le peroxyde : .....	9
I.4.3.4 Propriétés du PRC : .....	11
I.5 Vieillissement thermiques des polymères : .....	11
I.5.1 Vieillissement thermique des isolants à base de polymères : .....	12
I.5.2 Processus physique : .....	12
I.5.2.1 Processus physique sans transfert de masse : .....	13
I.5.2.1.1 Vieillissement par chocs thermiques : .....	13
I.5.2.1.2 Vieillissement physique interne (évolution de la morphologie) : .....	13
I.5.2.2 Processus physique avec transfert de masse : .....	13
I.5.2.2.1 Vieillissement par absorption de solvants : .....	14
I.5.2.2.2 Vieillissement par migration d'adjuvants (Perte d'adjuvants) : .....	14
I.5.3 Processus chimique : .....	15
I.5.3.1 Coupure de chaînes statistiques : .....	15
I.5.3.2 Dépolymérisation : .....	15
I.5.3.3 Réticulation : .....	16
I.5.3.4 Oxydation : .....	16
Bibliographies : .....	17

## **Chapitre II : Techniques expérimentales**

II.1	Présentation du câble 18/30 kV :.....	20
II.1.1	Présentation des laboratoires :.....	20
II.1.2	Caractéristiques du câble :.....	20
II.1.3	Composants du câble 18/30 kV :.....	21
II.1.4	Présentation de la matière XLPE :.....	21
II.1.5	Présentation de la matière PVC :.....	21
II.2	Essai de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction :.....	22
II.2.1	Introduction :.....	22
II.2.2	Echantillonnage :.....	22
II.2.3	Appareillages :.....	23
II.2.4	Mode opératoire :.....	24
II.3	Essai de pertes de masse du PVC et du PRC :.....	25
II.3.1	Introduction :.....	25
II.3.2	Echantillonnage :.....	25
II.3.3	Appareillages :.....	25
II.3.4	Mode opératoire :.....	25
II.4	Essai d'allongement à chaud :.....	26
II.4.1	Introduction :.....	26
II.4.2	Echantillonnage :.....	26
II.4.3	Appareillages :.....	26
II.4.4	Mode opératoire :.....	27
	Bibliographies :.....	29

## **Chapitre III : Résultats et discussions**

III.1	Allongement à la rupture et résistance à la traction du PRC :.....	31
III.1.1	Allongement à la rupture :.....	32
III.1.2	Résistance à la traction :.....	33
III.2	Allongement à la rupture et la résistance à la traction du PVC :.....	34
III.2.1	Allongement à la rupture :.....	34
III.2.2	Résistance à la traction :.....	35
III.3	Comparaison entre le PRC et le PVC :.....	36
III.4	Allongement à chaud du PRC (Hot-Set-Test) :.....	36
III.5	Conséquences de dégradation :.....	38
	Bibliographies :.....	40

	<b>Conclusion générale</b> :.....	41
--	-----------------------------------	----

Annexe

## Listes des figures

Fig. I.1 : Processus de réticulation .....	9
Fig. I.2 : Molécule du peroxyde de dicumyle .....	9
Figure I.3. Schématisation des phénomènes de transfert de masse .....	14
Figure I.4. Coupures de chaînes statistiques .....	15
Fig. II.1 : Schéma du câble 18/ 30 kV isolé au PRC .....	21
Fig. II.2 – Eprouvette en forme d’haltère .....	22
Fig II.3: (a) Machine pour la préparation des bandes, (b) Emporte-pièce .....	23
Fig II.4 : Machine de traction .....	24
Fig II.5 : Etuve utilisée pour l’essai d’allongement à chaud .....	27
Fig. II.6 : Essai d’allongement à chaud .....	28
Fig. III.1 : Résistance à la traction en fonction de l’allongement à la rupture du PRC .....	31
Fig. III.2 : Allongement à la rupture du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique .....	33
Fig. III.3 : Résistance à la traction du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique .....	33
Fig. III.4 : Résistance à la traction en fonction de l’allongement à la rupture du PVC .....	34
Figure III.5 : Allongement à la rupture du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique .....	35
Figure III.6 : Résistance à la traction du PVC en fonction du temps du vieillissement thermique .....	35
Fig. III.7 : Allongement à chaud du PRC avec charge en fonction de la température d’essai	
Fig. III.8 : Allongement à chaud en fonction du temps d’essai pour T=210°C .....	36
Fig. IV.9 : Perte de masse du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique .....	37
Fig. IV.9 : Perte de masse du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique .....	38

## Liste des tableaux

Tableau III.1 : Les valeurs de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture du PRC à 120°C pour 192h .....	32
---	----

## **Symboles et abréviation**

**PE** : Polyéthylène

**PRC** : Polyéthylène réticulé chimiquement

**HT** : Haute tension

**PVC** : Polychlorure de vinyle

**PEBD** : Polyéthylène à basse densité

**PEHD** : Polyéthylène à haute densité

**XLPE** : Cross-Linked polyethylene (XLPE)

**DCP** : Peroxyde de dicumyle

**DP** : Décharges partielles

# Introduction générale

Tous les systèmes d'isolation sont conçus dans un contexte où la prise en considération de leur environnement pour lequel ils doivent fonctionner est indispensable. Le câble électrique actuel, un objet d'apparence simple, est en fait l'aboutissement de près de deux siècles de recherches, jalonnés de découvertes scientifiques. Celles-ci ont permis de franchir à chaque fois de nouveaux paliers, améliorant ainsi la fiabilité et la performance du transport d'électricité [1].

Le grand problème des câbles souterrains est l'isolation des conducteurs électriques. Depuis 1940 le polyéthylène (PE) a été et continu d'être largement utilisé dans la fabrication des câbles, ce matériau d'isolation est un produit thermoplastique qui se ramollit et devient déformable vers 80°C et fond vers 110°C. Ce comportement thermique limite assez sévèrement son emploi lorsque nous l'utilisons en haute tension. C'est ainsi qu'a été introduite la méthode de réticulation qui offre au PE un comportement à long terme amélioré [2]. Le résultat de la réticulation du PE est le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), ce dernier est devenu un matériau de choix dans l'isolation des câbles haute tension [3]. D'autres polymères sont largement utilisés dans l'isolation électrique, nous trouvons le polychlorure de vinyle (PVC), qui est utilisé en raison de leurs performances mécaniques [4].

Dans l'état actuel des connaissances, l'évaluation de l'endurance thermique des matériaux isolants solides s'effectue grâce à des essais accélérés à des températures supérieures à celle prévue en service. Les essais d'endurance sont destinés à déterminer les changements d'importantes propriétés des matériaux isolants en fonction de la contrainte thermique et du temps de vieillissement. Ils doivent simuler de façon aussi précise que possible la fonction du matériau en service réel

La CEI [5] et IEEE [6] définissent le vieillissement d'un isolant solide ou d'un système d'isolation comme toute altération irréversible des propriétés du matériau isolant. Ces changements affectent considérablement les performances de l'isolant et réduisent sa durée de vie.

Le terme vieillissement n'implique pas un mécanisme précis à cause de la complexité de la composition chimique des matériaux. Le degré de vieillissement d'un isolant dépend des propriétés physiques, de la composition chimique du matériau, de la nature et de la durée des contraintes appliquées, ainsi que du processus et des traitements au cours de sa fabrication [7].

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) et du polychlorure de vinyle (PVC). Comme tous les autres polymères, le PRC et le PVC peuvent avoir comme conséquences, sous l'action de cette contrainte, une dégradation des propriétés mécaniques, électrique, ainsi qu'une influence sur les propriétés physiques comme par exemple la perte de masse.

Afin de mettre en évidence et de constater tous ces phénomènes, nous avons réalisé des essais aux laboratoires de contrôles et de qualités de l'entreprise ELSESEDY CABLES Algeria. Trois chapitres constituent notre travail.

Le premier chapitre est consacré à une étude théorique générale sur les polymères synthétiques et leur vieillissement thermique dans le domaine d'isolation des câbles électriques.

Le second chapitre est consacré aux techniques expérimentales où nous donnons une description détaillée des câbles 18/30 kV isolés au PRC et le PVC comme gainage, des dispositifs de mesure et de caractérisation ainsi que les techniques expérimentales que nous avons utilisées au niveau du Laboratoire Contrôle de Qualité de l'entreprise ELSEWEDY Cables Algeria de Ain Defla.

Les résultats et discussions relatifs à nos essais sont exposés dans le troisième chapitre dont nous allons présenter les conséquences du vieillissement thermique sur le comportement mécanique du PRC et du PVC.

Dans la conclusion, sont rassemblés les principaux résultats auxquels nous sommes parvenus. Nous présenterons aussi des perspectives de travail concernant une meilleure approche du vieillissement et de la fiabilité des câbles de transport d'énergie électrique.

## **Bibliographies :**

- [1] H.LAFFAYE, « cent ans de haute tension électrique à paris sous les pavés, les câbles », wordappeal - 99, rue du faubourg saint-artin, 75010 paris - www.wordappeal.com, août 2012.
- [2] Y.MECHERI, « influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département Electrotechnique, Algérie, octobre 1998.
- [3] Y.MECHERI, « influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Département Electrotechnique, Mai 2008.
- [4] M.NEDJAR, « Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Décembre 1991.
- [5] CEI 505, «Evaluation and identification of electrical insulation systems, Part 1: General principles and guide to applications», 1975.
- [6] IEEE Standard 1064-1991, «Guide for multifactor stress functional testing of Electrical insulation systems», 1991.
- [7] S.B.DALAL, R.S. GORUR, «Aging of distribution cables in service and its simulation in the laboratory», IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, N°1, pp. 139-146, February 2005.

# Chapitre I

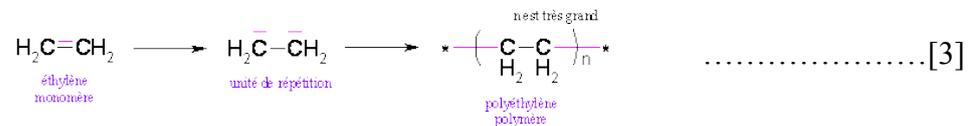
## Les polymères et leur vieillissement thermique

## I.1 Introduction

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (motifs), ces derniers présentent des molécules organiques comprenant un ou plusieurs atomes de carbone [1].

Il existe toutes sortes de polymères caractérisés par des propriétés différentes : certains sont utilisés pour leurs propriétés élastiques, thermiques ou encore électriques. Différents polymères existent à l'état naturel, mais la plupart des polymères utilisés de nos jours sont d'origine synthétique (polyéthylène, polyester, polystyrène, ...etc.) totalement issus du génie de l'homme par polymérisation de molécules monomères, cette polymérisation engendre des structures macromoléculaires qui sont souvent linéaires, ramifiées ou pontées [2].

**Exemple [3] :**



## I.2 Polymérisation

La polymérisation désigne la réaction chimique ou le procédé par lesquels des petites molécules réagissent entre elles pour former des molécules de masses molaires plus élevées. Les molécules initiales peuvent être des monomères, la synthèse conduit à des polymères [4].

La création de polymères peut résulter soit de la modification chimique de systèmes macromoléculaires existants, soit de la transformation de molécules simples en macromolécules.

## I.3 Caractéristiques des polymères

Les polymères présentent des caractéristiques mécaniques propres. Ils présentent un comportement vitreux lorsqu'ils sont amorphes, des caractéristiques de fibres lorsqu'ils sont cristallisés mais également un comportement viscoélastique. Ces différents états dépendent principalement de la nature chimique du polymère et de la température [5].

Leur structure, leur masse moléculaire, leur caractère linéaire ramifié ou non, réticulé ou non déterminent fortement leurs propriétés physico-chimiques.

### I.3.1 Propriétés thermiques

Le plus souvent, les matériaux macromoléculaires sont utilisés à l'état solide. Il est donc nécessaire de définir des techniques qui permettent d'en caractériser les propriétés thermiques, on peut distinguer trois types de matériaux macromoléculaires solides : les élastomères, les thermoplastiques et les thermodurcissables :

### **I.3.1.1 Elastomères**

Les élastomères sont des matériaux amorphes et hautement élastiques. Il s'agit de polymères utilisés au-dessus de leur température de transition vitreuse et le plus souvent après réticulation.

### **I.3.1.2 Thermoplastiques**

Les thermoplastiques sont des matériaux semi-cristallins ou amorphes qui peuvent être fondus lorsqu'on les chauffe et par la suite extrudés, moulés. Ils sont constitués uniquement de chaînes linéaires ou ramifiées. Contrairement aux élastomères et aux matériaux thermodurcissables, ils peuvent être mis en solution. Le polyéthylène et le polypropylène sont des polymères thermoplastiques.

### **I.3.1.3 Thermodurcissables**

Les polymères thermodurcissables sont des matériaux amorphes qui sont fortement réticulés lors de leur mise en œuvre et qui une fois réticulés ne peuvent plus être réutilisés sous une autre forme parce qu'ils sont insolubles et infusibles. Ils sont de plus en plus déformables contrairement aux élastomères qui sont hautement élastiques.

## **I.3.2 Propriétés mécaniques des polymères**

Les propriétés mécaniques décrivent leur comportement vis à vis des sollicitations mécaniques telles que pressions, torsions, frottements, chocs et effets de la pesanteur, Certains polymères seront appréciés pour leur bonne stabilité dimensionnelle. D'autres, les élastomères, seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs [6].

Les thermoplastiques et les thermodurcissables sont soumis au phénomène de vitrification. Au-dessous de leur température de transition vitreuse, ils deviennent durs et cassants comme du verre. Au-dessus, ils sont plus souples, plus plastiques. A l'extrême, ils deviennent élastiques [6].

Les polymères se distinguent généralement par [7] :

- Une masse volumique relativement faible ;
- Un pouvoir d'isolation calorifique élevé ;
- Une résistance élevée aux agressions atmosphériques ;
- Une importante résistance aux efforts de compression et de traction ;
- Une bonne résistance à l'usure.

## **I.4 Utilisation des polymères dans l'isolation des câbles électriques**

L'utilisation des polymères dans l'isolation électrique a comme avantages : excellentes propriétés électriques (résistivité, rigidité, permittivité), une bonne tenue mécanique et une stabilité dimensionnelle. En plus une mise en œuvre facile, faible masse et pour certains la possibilité de recyclage.

Dans ce qui suit nous présentons succinctement les deux types des polymères les plus utilisés dans la fabrication des câbles électriques surtout en Algérie : le polychlorure de vinyle et le polyéthylène réticulé chimiquement.

#### **I.4.1 Polychlorure de Vinyle (PVC)**

##### **I.4.1.1 Présentation du PVC :**

Le polychlorure de vinyle ou chlorure de polyvinyle est un polymère thermoplastique, amorphe ou faiblement cristallin. Il est préparé à partir de deux matières premières : à 57 % de sel et à 43 % de pétrole.

A l'état pur, le PVC est cassant, d'où la nécessité de lui ajouter des produits auxiliaires appelés adjuvants. Le type, la qualité et la concentration de chaque adjuvant sont le grand secret des producteurs des câbles électriques. Ces adjuvants sont de types stabilisants, plastifiants, lubrifiants ou charges [8]. Chaque adjuvant a un rôle bien déterminé. Les stabilisants sont généralement ajoutés à la résine du PVC dans le but d'éviter le dégagement de l'acide chlorhydrique qui est une cause principale dans la dégradation thermique du PVC [8] et ils donnent aux mélanges une stabilité à la lumière et une stabilité thermique suffisantes pour qu'on puisse les travailler à une température convenable [10]. Quant aux plastifiants, leur rôle est de rendre le matériau moins cassant en donnant une souplesse permanente aux produits finis [9] et en plus, ils permettent de déplacer la température de transition vitreuse de 74°C à -10°C [11]. L'amélioration des propriétés diélectriques, comme la résistance électrique aux chocs ou à la chaleur [9], est assurée par l'ajout des charges telles que : le carbonate de calcium, le kaolin calciné et la silice [8]. Les lubrifiants facilitent l'écoulement du PVC lors de sa mise en œuvre et permettent d'éviter l'adhérence de la matière plastique sur les parois métalliques [9].

##### **I.4.1.2 Propriétés du PVC**

###### **a. Propriétés physico-chimiques**

- La masse volumique des compositions du PVC varie entre 1 et 2 g/cm<sup>3</sup> à la température ambiante [2] ;
- Le PVC transmet mal la flamme, mais sa combustion entraîne le dégagement de gaz corrosifs et de fumées [2] ;
- Le PVC a un bon vieillissement thermique ;
- Il résiste au fluage à température élevée mais il reste fragile aux basses températures (demande des précautions pour la pose à temps très froid) [10] ;
- La température de transition vitreuse du PVC est élevée, elle se situe entre 75°C et 80°C ce qui le rend impropre à de nombreuses applications (câbles par exemple) sans l'adjonction de plastifiants. Avec l'emploi de plastifiants, la température de transition vitreuse se situe entre -10°C et -5°C [10].

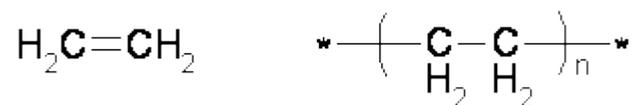
**b. Propriétés mécaniques :**

- Le PVC a une bonne résistance à la traction qui est de l'ordre de 5.5 à 6 kg/mm<sup>2</sup> à 20°C ;
- L'allongement à la rupture est de l'ordre de 100% pour les produits non plastifiés et 200 à 400 % pour les produits plastifiés [12] ;
- Les propriétés mécaniques sont fortement dépendantes de la température. Au-dessus de 140°C à 150°C, le PVC perd toutes ses propriétés mécaniques [10].

**I.4.2 Polyéthylène (PE)**

Le polyéthylène résulte de la polymérisation du gaz éthylène C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, en présence de catalyseur, dans certaines conditions de température et de pression [16]. C'est un important polymère de synthèse. Sa température de transition vitreuse est très basse (voisine de -110 °C) et son point de fusion peut atteindre 140 °C, mais sa résistance mécanique fléchit nettement dès 75 à 90 °C.

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique, sa molécule se présente sous forme de chaînes contenant 1000 à 2000 monomères. La formule chimique du polyéthylène est [2] :



Avec « n » : le degré de polymérisation (de 1000 à 2000).

Selon les conditions de polymérisation (pression, température, catalyseurs,...) on distingue deux grandes variétés de polyéthylène :

- le polyéthylène à basse densité (PEBD) ;
- Le polyéthylène à haute densité (PEHD).

Ajouté à ces deux types, on peut obtenir par réticulation le polyéthylène réticulé chimiquement dit PRC.

**I.4.3 Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)****I.4.3.1 Présentation du PRC**

Le comportement thermoplastique du polyéthylène ainsi que sa mauvaise tenue à haute température limite son utilisation comme un isolant dans les câbles haute et très haute tension [2]. Afin d'améliorer les propriétés thermiques et mécaniques du polyéthylène, on procède à une opération dite réticulation [13].

La réticulation est la modification de la structure moléculaire du polymère. Elle consiste à lier les chaînes de molécule par des liaisons radiales (pontage des chaînes moléculaires) et à les transformer en un réseau tridimensionnel qui permet d'éviter le glissement de toutes les chaînes moléculaires les uns par rapport aux autres [2].

La réticulation du polyéthylène dans l'industrie s'effectue suivant trois procédés : la réticulation avec le peroxyde, par irradiation et enfin la réticulation au silane [14].

Nous nous limitons ici à la présentation de la technique de réticulation avec le peroxyde étant donné que ce procédé qui est utilisé dans la fabrication des câbles en PRC ayant fait l'objet de notre étude.

#### I.4.3.2 Réticulation du PRC avec le peroxyde

La réticulation peut être schématisée comme suit [2] :

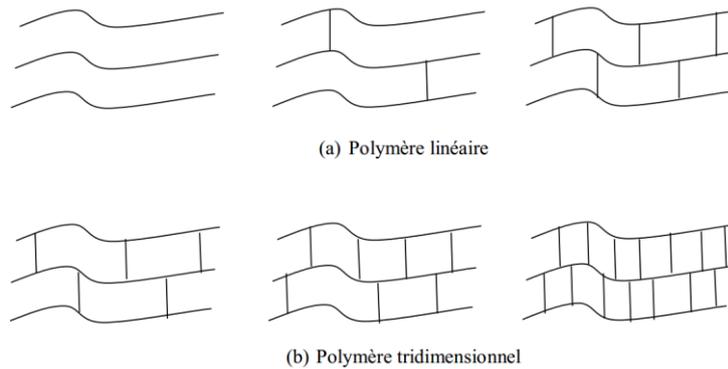


Fig. I.1 : Processus de réticulation [2].

La réticulation par voie thermochimique de polyéthylène basse densité, très pauvre en doubles liaisons, est pratiquée dans le contexte industriel au moyen des peroxydes organiques. Le plus couramment employé est le peroxyde de dicumyle (DCP) [14]. Ce dernier est un matériau organique cristallin dont la formule chimique générale est de type **R-O-O-R**, comme la formule suivante [2] :

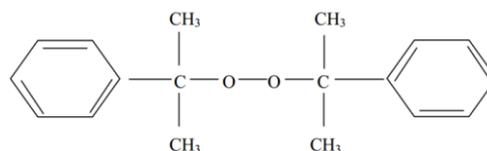
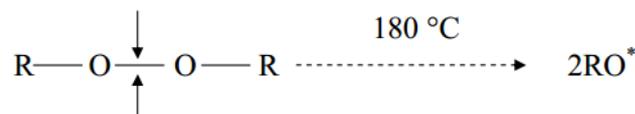


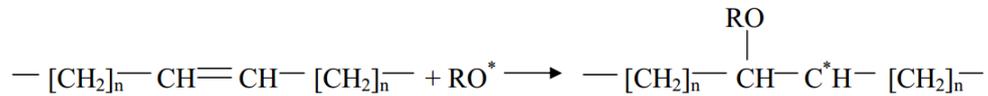
Fig. I.2 : Molécule du peroxyde de dicumyle [13].

Le principe de réticulation est décrit à partir du peroxyde de dicumyle. Les câbles en polyéthylène réticulé sont fabriqués en extrudant un mélange de polyéthylène basse densité (PEBD) et de DCP. Cette opération se fait sous pression et à une température avoisinant les 180°C, sous une vapeur d'eau ou d'azote. Sous l'effet de la température, le DCP se décompose en deux radicaux cumyles très actifs [13].



L'action des radicaux RO\* issus de la scission des peroxydes peut se produire à la fois sur les doubles liaisons et sur un atome d'hydrogène ainsi que le montrent les schémas ci-dessous [15] :

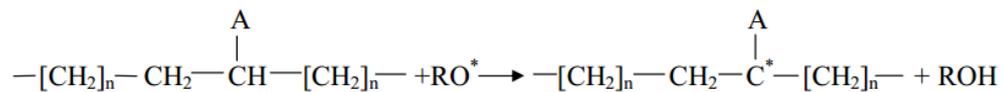
a) **Attaque sur les doubles liaisons**



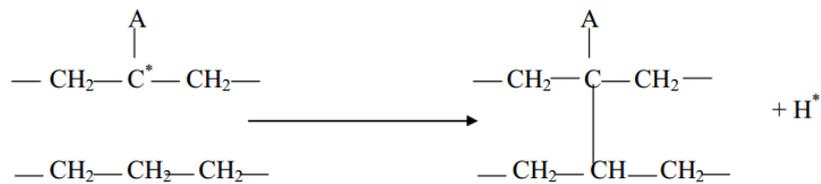
• **Pontage sur deux chaînes adjacentes :**



b) **Attaque sur un atome d'hydrogène**



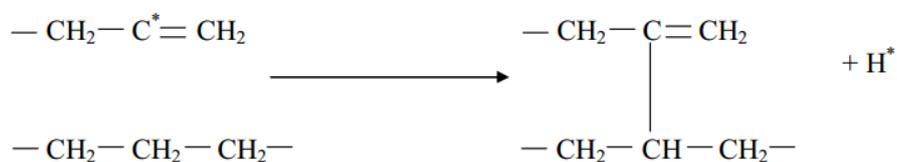
• **pontage**



c) **Attaque sur un atome d'hydrogène allylique**



• **Pontage :**



### I.4.3.3 Propriétés du PRC

#### a. Propriétés physico-chimiques

- Le PRC est un matériau semi-cristallin avec un taux de cristallinité de 35 à 40%, les deux phases amorphe et cristalline sont fortement imbriquées l'une dans l'autre ;
- Sa température de fusion cristalline est d'environ 100 à 105°C ;
- Sa tenue au vieillissement thermique est améliorée par rapport à celle d'un PEBD ;
- Sa déformation sous contrainte de traction à 150 °C sous 2 bars est faible, contrairement à celle du PEBD ;
- Le PRC est aussi adapté aux eaux corrosives [15].

#### b. Propriétés mécaniques :

La réticulation confère au PEBD des propriétés mécaniques améliorées et en particulier une meilleure résistance au fluage. Celles-ci peuvent également être améliorées par l'incorporation de charges renforçatrices au polymère [15].

#### c. Propriétés thermiques :

- Les propriétés thermiques du PRC ne sont pas très différentes de celle du PE. Le PRC résiste bien aux solvants aliphatiques, aromatiques et au stress-cracking ;
- Du fait de la réticulation, la température d'utilisation à la corde est de 90 °C et la température tolérée en court-circuit de 250 °C [15].

## I.5 Vieillissement thermique des polymères

La CEI [16] et IEEE [17] définissent le vieillissement d'un isolant solide ou d'un système d'isolation comme toute altération irréversible des propriétés du matériau isolant. Ces changements affectent considérablement les performances de l'isolant et réduisent sa durée de vie.

Le degré de vieillissement d'un isolant dépend des propriétés physiques, de la composition chimique du matériau, de la nature et la durée de la contrainte appliquée, ainsi que du processus et des traitements au cours de sa fabrication [18]. Le processus de vieillissement ou de dégradation d'un isolant solide met souvent en jeu des facteurs intrinsèques (les transformations chimiques et physiques des matériaux, charges d'espace piégées,...) et des facteurs extrinsèques (cavités gazeuses, contaminations et impuretés, hétérogénéités,...) [18,19].

Fukuda et *al.* [20] ont remarqué que dans le cas des câbles à isolation extrudée (isolés au polyéthylène et polyéthylène réticulé chimiquement), les facteurs extrinsèques tendent à être les facteurs dominants dans la dégradation de l'isolant.

Conjointement aux facteurs cités précédemment, la présence du champ électrique, de la température, de la contrainte mécanique et les agressions de l'environnement au cours du

fonctionnement des câbles à isolation synthétique, contribuent à la dégradation du matériau isolant [2].

La dégradation des polymères correspond à une limitation importante de la variété de leurs applications et la notion de durabilité a dû être introduite pour adapter au mieux les caractéristiques du matériau polymère à celles requises pour ses applications.

### **I.5.1 Vieillissement thermique des isolants à base de polymères**

Dans le domaine de l'isolation électrique, la contrainte thermique constitue une contrainte sévère de service pouvant affecter sérieusement les propriétés du matériau polymère en les dégradant et réduisant ainsi la durée de vie des câbles électriques [2]. On traitera ici le vieillissement thermique des polymères ainsi que les mécanismes conduisant à leur dégradation.

L'étude du phénomène de vieillissement thermique d'un isolant solide a deux buts principaux. Le premier est d'observer l'évolution de la durée de vie de ces isolants sous l'effet des contraintes thermiques. Le second but est de trouver une éventuelle corrélation entre le processus de vieillissement et les contraintes qui le provoquent tel que l'effet de la chaleur. Ce dernier peut se manifester de deux manières différentes ; la première concerne l'effet instantané sur le matériau dû à une forte élévation de la température ; la seconde concerne quant à elle l'effet d'une température pas trop élevée sur le matériau lorsque ce dernier est exposé à la chaleur pendant un temps assez long [21].

Le vieillissement thermique peut faire intervenir des phénomènes purement physiques (dégazage, migration de plastifiants, évolution de la morphologie), ou chimiques parmi lesquels l'oxydation par l'oxygène atmosphérique, qui joue un rôle prépondérant. Ces phénomènes peuvent affecter la structure chimique du polymère, ou dans certains cas, concerner seulement les additifs (problèmes d'incompatibilité d'adjuvants) [22,23].

### **I.5.2 Processus physique**

Le processus physique englobe tous les phénomènes conduisant à une altération irréversible des propriétés du matériau sans qu'il y ait modification de la structure chimique des macromolécules et autres constituants du matériau [24,25].

Pour les matériaux à constitution unique (comme PE, PRC...), un certain nombre de processus physiques peuvent affecter leurs propriétés, ils peuvent résulter [2] :

- de modification de la configuration spatiale des macromolécules (cristallisation secondaire, relaxation,...);
- de phénomènes de surface (fissuration) ;
- de phénomène de transport (pénétration de solvants, migration d'adjuvants).

On distingue deux grandes catégories de phénomènes selon qu'ils impliquent ou non un transfert de masse, c'est-à-dire un transport de petites molécules du matériau vers

l'environnement (perte d'adjuvants) ou de l'environnement vers le matériau (absorption de solvants) [2].

### **I.5.2.1 Processus physique sans transfert de masse**

#### **I.5.2.1.1 Vieillissement par chocs thermiques**

Les chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle [2]. Deux mécanismes sont susceptibles d'intervenir :

##### **a. Gradient de température dans l'épaisseur**

Les matériaux organiques sont, sauf cas particuliers, des isolants thermiques. Lorsque la température du milieu varie rapidement, un gradient de température s'instaure dans l'épaisseur du matériau d'où la dilatation différentielle zone superficielle - zone interne. Dans le cas d'un choc thermique de grande amplitude, une seule excursion en température peut entraîner la rupture. Dans le cas de cycles de plus faibles amplitudes, l'endommagement peut intervenir à long terme, le matériau étant sollicité en fatigue [27,28].

##### **b. Matériaux hétérogènes**

Dans les matériaux composites, soumis à des variations de température, les dilatations différentielles entraînent des contraintes internes susceptibles d'endommager le matériau. Il s'agit d'un phénomène de fatigue mécanique. La dilatation superficielle est alors due à la différence de coefficient de dilatation des phases en présence [24,25].

#### **I.5.2.1.2 Vieillissement physique interne (évolution de la morphologie)**

Le vieillissement physique interne est uniquement lié à des causes internes au matériau (mobilité moléculaire), c'est-à-dire au fait que le matériau est, au terme de sa mise en œuvre, dans un état thermodynamiquement instable. Ce vieillissement résulte alors d'une évolution plus ou moins lente vers un état plus stable [2] et se traduit par une augmentation de la compacité du réseau macromoléculaire, dans les polymères semi-cristallins (PE, PP,...), certains segments stéréo-réguliers (donc capables de cristalliser) qui se trouvaient piégés dans la phase amorphe, vont progressivement diffuser et s'incorporer à des zones cristallines.

Le vieillissement physique affecte toutes les propriétés dépendant du volume libre et la mobilité moléculaire, la masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue, le facteur de pertes diélectriques diminue et le taux de cristallinité augmente [25,29].

### **I.5.2.2 Processus physique avec transfert de masse**

Il y a deux grandes catégories de phénomènes selon qu'il y a un transfert de petites molécules du matériau vers l'environnement (pertes d'adjuvants) ou de l'environnement vers le matériau (absorption de solvants) [2] comme il est illustré sur la figure I.3.

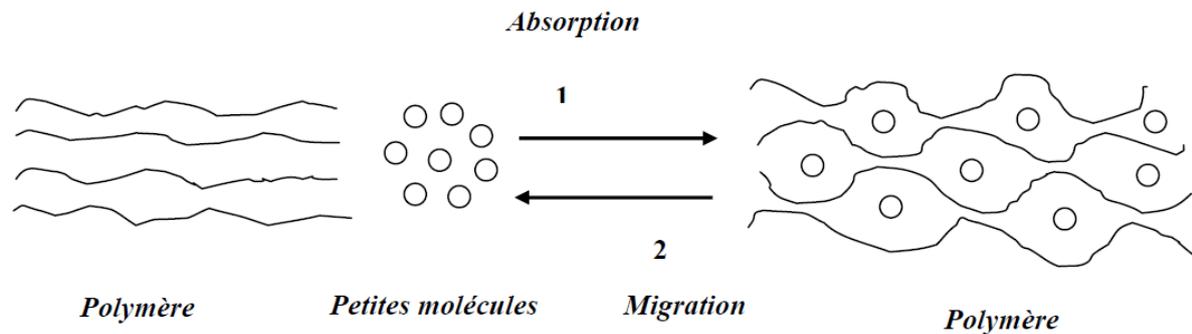


Figure I.3 Schématisation des phénomènes de transfert de masse [2].

### I.5.2.2.1 Vieillissement par absorption de solvants

Si une espèce de faible masse moléculaire (vapeur, liquide) se rencontre dans l'environnement et présente une solubilité non nulle, on constate qu'elle va pénétrer dans le polymère en provoquant des effets indésirables [30]. Le solvant pénètre dans le polymère selon une loi de diffusion qui peut varier avec le cas étudié. Deux cas se présentent:

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

### I.5.2.2.2 Vieillissement par migration d'adjuvants (Perte d'adjuvants)

La plus part des adjuvants incorporés dans la résine lors de la mise en œuvre du polymère, se déplacent du matériau vers l'environnement au cours de fonctionnement sous les conditions de service [2].

#### • Conséquences de la migration des adjuvants

Les effets les plus importants de la migration des adjuvants se situent au plan mécanique. Ils sont à l'opposé de ceux observés en cas de pénétration de solvants et se traduisent dans le cas de plastifiants par [25] :

- une augmentation du module d'élasticité (Young) et des contraintes au seuil et à la rupture ;
- diminution de l'allongement à la rupture ;
- augmentation de la température de transition vitreuse.

### I.5.3 Processus chimique

On appelle vieillissement chimique tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau (polymère ou ses adjuvants) sous l'influence de l'environnement. Dans la pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes s'interfèrent [25]. Les principaux types de réactions intervenant lors du vieillissement chimique sont les suivants :

#### I.5.3.1 Coupure de chaînes statistiques

Les coupures de chaînes statistiques se produisent sur des sites distribués de manière aléatoire dans le réseau macromoléculaire [31]. Elles peuvent être schématisées de la manière suivante (figure II.3) :

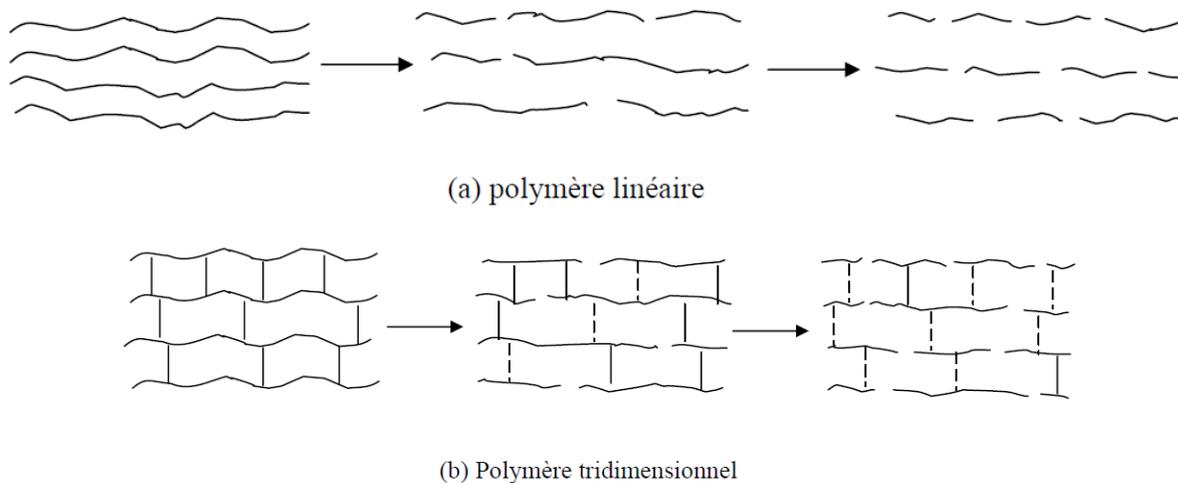


Figure I.4. Coupures de chaînes statistiques [31]

Sur le plan de la structure, ces coupures de chaînes provoquent une diminution de la longueur moyenne des chaînes donc une diminution de la masse moléculaire moyenne dans le cas des polymères linéaires, et une diminution du taux de réticulation dans le cas des polymères tridimensionnels (PRC). Les propriétés physiques, élastiques et thermiques sont très peu affectées par les coupures de chaînes statistiques. Cependant, les coupures de chaînes affectent considérablement les propriétés mécaniques car elles sont responsables de la fragilisation du matériau [25].

#### I.5.3.2 Dépolymérisation

La dépolymérisation est un cas particulier de la réaction de coupure de chaînes. Une coupure de chaîne crée un site actif qui déstabilise la liaison monomère voisine et entraîne l'élimination séquentielle de molécules de monomère. La dépolymérisation est donc l'inverse de la polymérisation, elle est d'autant plus facile que l'énergie de liaison monomère-monomère est faible [25].

### I.5.3.3 Réticulation

La réticulation, comme nous l'avons signalé dans le chapitre précédent, est la réaction conduisant à la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines. Elle se traduit par une diminution de la mobilité moléculaire. Dans le cas des polymères linéaires de taux de réticulation modérés, la réticulation se traduit par l'apparition de chaînes plus ramifiées et de masse moléculaire plus élevée que les chaînes initiales. Dans le cas des polymères tridimensionnels, la réticulation se traduit par une augmentation de la concentration en nœuds de réseau. Elle peut être suivie par une diminution du taux de gonflement, et par une augmentation de la température de transition vitreuse et du module d'élasticité [32].

Dans le cas des polymères initialement linéaires, une réticulation modérée peut également conduire à une augmentation de l'allongement à la rupture. Dans le cas réel de vieillissement, le PE peut subir simultanément des coupures de chaînes et une réticulation. Ses propriétés évoluent alors en fonction de la part prise par chacun des processus [25].

### I.5.3.4 Oxydation

Le vieillissement thermique des polymères conduit à une oxydation de chaînes carbonées entraînant ainsi une dégradation des propriétés électriques et mécaniques [33]. L'oxydation se manifeste au cours du vieillissement sous la forme d'une accumulation des groupes carbonylés (acides, cétone, aldéhydes,...) [34]. La concentration de ces groupes est d'autant plus importante dans la partie amorphe que dans la partie cristalline d'un polymère semi-cristallin, à cause de la diffusion facile de l'oxygène dans cette partie [35].

Pour faire face au problème de la dégradation oxydante des isolants à base des polymères, des antioxydants sont incorporés à la résine du matériau. La qualité et la quantité de l'antioxydant ajouté joue un rôle très important dans la stabilité à l'oxydation du matériau [36].

## Bibliographies

- [1] « GENERALITE sur LES POLYMERES Propriétés, synthèses, polymérisation, utilisations... » <http://www.chimie-sup.fr> (consulté le 01/05/2016)
- [2] L.BOUKEZZI « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Alger, 19 Juin 2007.
- [3] S. FUSESSERRY, «Polyéthylènes basse densité», Techniques de l'Ingénieur, Publication A 3310, 1996.
- [4] MICHEL FONTANILLE ET YVES GNANOU «Chimie et physico-chimie des polymères» (2<sup>e</sup>et 3<sup>e</sup>cycles – Ecoles d'ingénieurs), édition DUNOD, Paris, 2002.
- [5] P. WEISS ; « la chimie des polymères », Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone, Date de création du document 2009-2010.
- [6] [www.techno-science.net](http://www.techno-science.net). Posté par Publication le Dimanche 20 Février 2005.
- [7] A. HALASSA et K. BADACHE « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PRC utilisé dans l'isolation des câbles MT ». Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Juin 1996.
- [8] D.L. TABB, J.J. SEVICIK, J.L. KOENING, «Fourier transform infrared study of the effects of irradiation on polyethylene », Journal of Polymer Science: Polymer Physics Editions, Vol. 13, Issue 4, pp. 815-824, 1975.
- [9] R.FARHI, C.MOREL, J.CHERON « Matières plastiques & adjuvants hygiène et sécurité », INRS, avec la participation du Centre d'étude des matières plastiques. ED 638, Octobre 2006 ;
- [10] M.NEDJAR « Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Décembre 1991.
- [11] J.P. CRINE, « A molecular model to evaluate the impact of aging space charges in polymer dielectrics », IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation", Vol. 4, N° 5, pp. 487-495, October 1997.
- [12] D.AUSSEUR « Polychlorure de vinyle », technique de l'ingénieur, A 3325, 1990.
- [13] Y.MECHERI « Influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Doctorat, ENP Alger, Mai 2008.
- [14] Y.MECHERI « Influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Octobre 1998.
- [15] N. BENGUESSOUM « Influence du vieillissement thermique cyclique sur les propriétés du PRC utilisé dans l'isolation des câbles MT fabriqués par EN.I.CA. Biskra », Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Juin 2007.
- [16] CEI 505, «Evaluation and identification of electrical insulation systems, Part 1: General principals and guide to applications», 1975.
- [17] IEEE Standard 1064-1991, «Guide for multifactor stress functional testing of electrical insulation systems», 1991.

- [18] S.B. DALAL, R.S. GORUR, «Aging of distribution cables in service and its simulation in the laboratory», IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, N°1, pp. 139-146, February 2005.
- [19] R.J. DENSLEY, R. BARTNIKAS, B. BERNSTEIN, «Multi-stress ageing of extruded insulation systems for transmission cables» IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 9, N°1, pp. 15-17, January/February 1993.
- [20] T. FUKUDA ET AL. «Technological progress in high voltage power cables in Japan, Parts I and II», IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 4, pp. 9-20, 1988.
- [21] A.L. NEMMOUR et A. KHELIFI « Utilisation des réseaux de neurones au vieillissement des polymères utilisés dans les câbles MT ». Projet de fin d'études, ENP d'Alger, promotion Juin 1999.
- [22] N. NANDAKUMAR, «Ageing and stabilisation of PVC electrical insulation... a review», Popular Plastics, pp. 3-9, May 1982.
- [23] M. CHATIN, «Plastiques», Techniques de l'Ingénieur, Publication A3000, 1986.
- [24] J. VERDU, «Comportement à long terme», Techniques de l'ingénieur A 3150, A 9 I, 1980.
- [25] J. VERDU, «Vieillissement des plastiques», AFNOR technique, Edition Eyrolles, Paris 1984.
- [26] B. FALLOU, C. STEVENS, A.G. DAY, «Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants», CIGRE, Groupe 15-05, Septembre 1982.
- [27] J .P. TROTIGNON, «Précis de matières plastiques - Structures, propriétés, mise en oeuvre et normalisation», Edition Nathan, 1982.
- [28] J. VERDU, «Vieillissement physique», Techniques de l'Ingénieur, Publication A3150, 1980.
- [29] L. C. E. STRUIK, «Physical Aging in Amorphous Polymers and other Materials», Elsevier, Amsterdam, 1978.
- [30] J. VERDU, «Effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques», EDP Sciences, Echanges physique-Industrie, N°. 5, pp. 19-23, 2000.
- [31] J. VERDU, «Vieillissement chimique», Techniques de l'Ingénieur, Publication A3151, 1980.
- [32] X. BUCH, «Dégradation thermique et fluage d'un adhésive structural époxyde», Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2000.
- [33] V. LANGLOIS, L. AUDOUIN, J. VERDU, M. MEYER, «Vieillissement thermique du polyéthylène réticulé», Journées d'études des polymères, JEPO18, Groupement Français d'études et d'applications des polymères (G.F.P), Septembre 1990.
- [34] J.P. CRINE, H.ST. ONGE, «Evaluation of ageing in transmission and distribution extruded dielectric cables», R.G.E., N°3, Mars 1988.
- [35] S. LUZURIAGA, J. KOVAROVA, I. FORTELNY, «Degradation of pre-aged polymers exposes to simulated recycling: Properties and thermal stability», Polymer Degradation and Stability, Vol. 91, Issue 6, pp. 1226-1232, June 2006.
- [36] L. DESCHAMPS, C. CAILLOT, M. PARS, J. PERRET, «L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles haute tension et très haute tension», R.G.E., Tome 83, N°5, pp. 343-360, Mai 1983.

# Chapitre II

## Techniques expérimentales

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux caractérisant l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement et du polychlorure de vinyle utilisés dans la fabrication des câbles de transport d'énergie électrique fabriqués par ELSEWEDY Cables Algeria de Ain Defla, Afin de s'approcher d'une caractérisation mécanique de ces matériaux.

Cette étude a été effectuée dans le cadre de la collaboration de l'Ecole Nationale Polytechnique avec l'entreprise ELSEWEDY Cables Algeria de Ain Defla.

## II.1 Présentation du câble 18/30 kV

### II.1.1 Présentation des laboratoires

L'entreprise ELSEWEDY Cables Algeria de Ain Defla comporte deux laboratoires, un laboratoire des essais électriques dans lequel nous avons effectué les essais de décharges partielles et un laboratoire des essais mécaniques dans lequel nous avons effectué les essais de l'allongement à la rupture, de la résistance à la traction, l'allongement à chaud et l'essai d'absorption d'eau.

### II.1.2 caractéristiques du câble

Tous les essais effectués dans ce projet ont été réalisés sur des échantillons de câble moyenne tension 18/30 kV fabriqué par ELSEWEDY Cables Algeria de Ain Defla, Ce câble est isolé au Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC), avec une gaine de polychlorure de vinyle (PVC) comme une protection mécanique.

Le câble d'essai présente les caractéristiques suivantes :

- Tension de service : 18/30 kV.
- Section de l'âme : 120 mm<sup>2</sup>.
- Diamètre de l'âme : 12,7 mm.
- Diamètre de semi-conducteur interne : 13,9 mm.
- Diamètre de semi-conducteur externe : 30,3 mm ;
- Diamètre externe : 37,9.
- Résistance de conducteur à 20°C : 0,153 Ω/km.
- Conducteur : Aluminium.
- Isolant : XLPE.
- Ecran métallique : Ruban de cuivre.
- Gaine extérieure : PVC/noir.
- Température maximale de service de conducteur : 90°C.
- Température maximale de service de l'écran : 80°C.
- Température maximale de conducteur pendant le C.C : 250°C.
- Norme : IEC 60502-2.

### II.1.3 Composants du câble 18/30 kV

Nous présentons sur la figure II.1 les différents composants du câble :



Fig. II.1 : Schéma du câble 18/ 30 kV isolé au PRC.

- 1- Conducteur en aluminium.
- 2- Couche semi-conductrice extrudée.
- 3- Isolation en XLPE.
- 4- Couche semi-conductrice extrudée.
- 5- Ruban d'étanchéité.
- 6- Ruban de cuivre.
- 7- Ruban d'étanchéité.
- 8- Gaine extérieure en PVC.

### II.1.4 Présentation de la matière XLPE

- Constante diélectrique (50 Hz) : 2,3.
- Rigidité diélectrique (50 Hz) : 30 kV/mm.
- Facteur de dissipation (50 Hz) : 0,0003 ;
- Densité : 922 kg/m<sup>3</sup>.
- Résistance à la traction (250mm/min) : > 17 MPa.
- Allongement à la rupture (250mm/min): >450 %.
- Allongement à chaud (200°C, 20 MPa) : 75%.
- Température de fusion : 125 - 135 °C.

### II.1.5 Présentation de la matière PVC

- Densité : 1,54 mg/cm<sup>3</sup>.
- Couleur : noir.
- Résistivité à 23°C :  $\geq 10^{12}$   $\Omega$ .cm.
- Allongement à la rupture : 200 %.
- Résistance à la traction : 13 N/mm<sup>2</sup>.
- Perte de masse à 100°C après 7 jours : 1,5 mg/cm<sup>2</sup>.

## II.2 Essai de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction

### II.2.1 Introduction

Le plus souvent, les matériaux macromoléculaires sont utilisés à l'état solide. Il est donc nécessaire de définir des techniques qui permettent de caractériser les propriétés mécaniques telles que la souplesse, la rigidité, l'élasticité et la résistance aux chocs. Cet essai consiste à soumettre une éprouvette en forme d'haltère à une force de traction suivant son axe jusqu'à la rupture après un ou plusieurs traitements du vieillissement thermique accéléré, prescrits dans la norme applicable au type de câble.

A une température donnée, les propriétés mécaniques des polymères peuvent être déterminées soit en contrôlant la contrainte (la force  $F$  appliquée sur l'éprouvette) et en suivant la déformation (expériences de fluage), soit en contrôlant la déformation et en suivant la contrainte. Dans ce dernier cas, la déformation est maintenue variable d'une façon linéaire avec le temps (expérience de sollicitation linéaire). Généralement, l'essai en sollicitation linéaire implique la déformation de l'échantillon jusqu'à sa rupture et donc sa destruction.

Dans cet essai, nous avons déterminé les courbes Force-Allongement de la traction des différentes éprouvettes vieilles et non vieilles (avant, pendant et après vieillissement de 200h), il s'agit de mesurer la force transmise par une éprouvette subissant depuis l'état initial, un allongement augmentant linéairement avec le temps.

### II.2.2 Echantillonnage

Selon la norme [CEI 60811-501], des échantillons d'enveloppes isolantes du câble 18/30kV, d'une longueur suffisante d'environ 100 mm, doivent être prélevés. Nous avons fendu chaque échantillon parallèlement à l'axe du conducteur pour d'obtenir au minimum cinq bandes, chacune est de deux faces parallèles et lisses, l'épaisseur des bandes doit être comprise entre 0,8 mm et 2,0 mm.

Au moyen d'un poinçon (ou emporte-pièce), nous avons découpé les éprouvettes en forme d'haltère dont l'empreinte est conforme à la Figure II.2

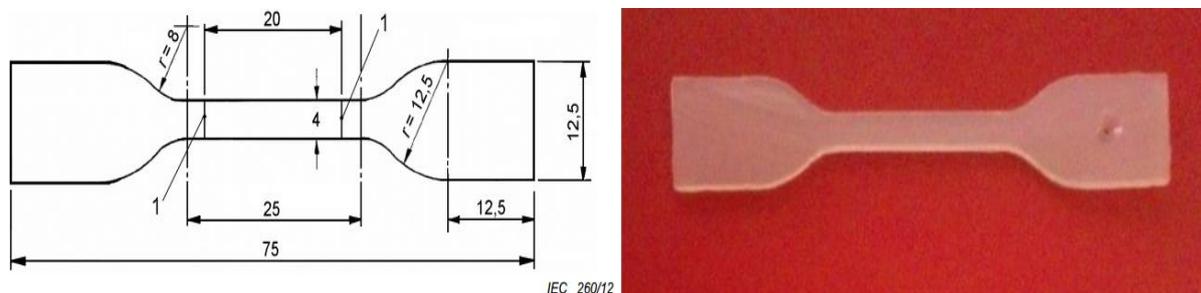


Fig. II.2 – Eprouvette en forme d'haltère

Pour améliorer la fiabilité des résultats, il est recommandé de suivre les indications suivantes [1]:

- L'emporte-pièce doit être très affûté pour réduire les imperfections dans l'éprouvette.
- Un papier ou un autre support adapté doit être disposé entre la bande et la contre-plaque.
- Ce support doit être marqué, mais pas complètement coupé par l'outil lorsque l'on découpe l'éprouvette.
- On doit éviter les bavures sur les côtés de l'éprouvette.

### II.2.3 Appareillages

Afin de couper les échantillons d'enveloppes isolantes en bandes parallèles et lisses, puis les découper en éprouvettes de forme d'haltère, nous avons utilisé un dispositif de coupe-bandes et un emporte-pièce donnés dans la figure II.3:

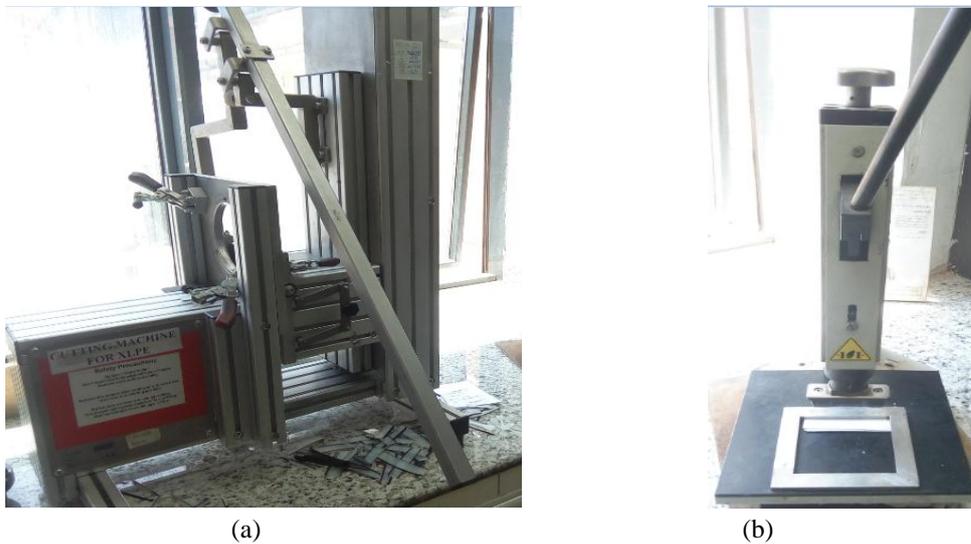
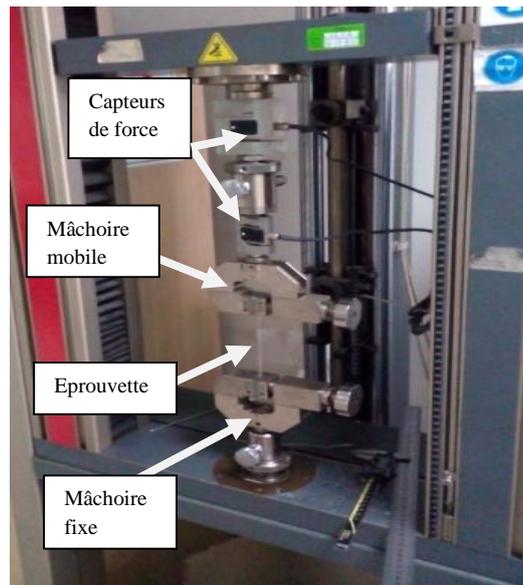


Figure II.3: (a) Machine pour la préparation des bandes, (b) Emporte-pièce

L'appareil utilisé pour les mesures de traction est une machine de traction appelée **Zwick-Roell** gérée par un ordinateur en utilisant le logiciel traction testXpert. Cet appareil comporte un capteur de force qui transforme en potentiel électrique la force appliquée à un échantillon en cours de déformation. L'échantillon est attaché à deux mâchoires dont l'une est fixe et l'autre mobile. La mâchoire mobile est attachée à une traverse, par l'intermédiaire du capteur de force. La traverse se déplace sur deux vis sans fin à une vitesse prédéterminée (25-250 mm/min) grâce à un système d'engrenage. Au cours de l'étirement, le capteur de force transmet un signal proportionnel à la force imposée à l'échantillon. Les capteurs de force ne sont sensibles que dans un intervalle restreint de forces, mais ils sont facilement interchangeables. La figure II.4 présente la machine de traction Zwick-Roell.



**Fig II.4 : Machine de traction.**

Selon la norme [IEC 60811-401], nous avons réalisé le traitement du vieillissement dans une étuve à air, naturelle ou sous pression. L'air doit entrer dans l'étuve de façon qu'il passe sur la surface des éprouvettes et qu'il sorte de l'étuve au voisinage de son sommet.

#### **II.2.4 Mode opératoire**

- **Vieillissement des éprouvettes PRC**

Pour une température bien spécifiée (80°C, 100°C, 110°C, 120°C, 140°C), Nous avons réalisé chaque traitement du vieillissement de 200 heures sur quatre échantillons, dont chacun comprend six éprouvettes, conformément à la CEI60811-401, ces éprouvettes doivent être suspendues verticalement vers le centre de l'étuve, de façon qu'elles soient placées à 20 mm au minimum l'une de l'autre. Avant tout essai, toutes les éprouvettes doivent être conservées à une température de  $(23 \pm 5)$  °C pendant au moins 3 h.

Après chaque deux jour du vieillissement, les éprouvettes doivent être retirées de l'étuve et maintenues à la température ambiante, en évitant la lumière solaire directe, pendant au moins 16 h [2].

Après la mesure de l'épaisseur, nous installons l'éprouvette entre les deux mâchoires de la machine, en mettant une vitesse fixe (25 mm/min pour PRC et 50 mm/min pour le PVC), ensuite nous démarrons la machine en utilisant les commandes du logiciel testXpert. L'éprouvette se dilate sous l'effet de la force exercée par les mâchoires jusqu'à la rupture. Nous mesurons simultanément sur la même éprouvette l'allongement à la rupture exprimée en pourcentage, et la résistance à la traction exprimée en  $N/mm^2$ . La mesure de ces paramètres se fait à température ambiante.

- **Vieillissement des éprouvettes du PVC**

Pour la préparation des éprouvettes en forme d'haltère du PVC, nous avons coupé longitudinalement un tronçon dans la gaine. Tous les autres constituants du câble doivent être retirés du tronçon. Si la gaine présente des rainures ou des empreintes, on doit les éliminer.

Nous avons préparé les éprouvettes du PVC à partir des échantillons de gaine, de la même manière que les éprouvettes XPLE conformément à la CEI60811-401. Et pour les essais du vieillissement, nous avons utilisé des échantillons qui ne présentent aucun signe de détérioration mécanique.

Le mode opératoire du vieillissement et de la traction du PVC est le même que celui de l'XLPE, la seule différence est que pour le PVC, la vitesse de traction est de 50 mm/min [2].

## **II.3 Essai de pertes de masse du PVC et du PRC**

### **II.3.1 Introduction**

L'ensemble des expériences réalisées conduit à mettre en évidence la réduction des propriétés mécaniques de l'enveloppe isolante et de la gaine au PVC qui sont soumises à une contrainte thermique. Nous avons réalisé un essai de perte de masse afin d'étudier la variation de masse en milligrammes du PRC et du PVC en fonction du temps du vieillissement.

### **II.3.2 Echantillonnage**

Selon la norme [CEI 60811-409], nous avons effectué un essai de perte de masse sur des éprouvettes en forme d'haltère des enveloppes isolantes et de la gaine au PVC du câble 18/30kV préparées comme il est spécifié en (II.2.2) sauf que nous avons choisi celles qui ont des épaisseurs égales à  $(1,0 \pm 0,2)$  mm.

### **II.3.3 Appareillage**

Le matériel d'essai doit comprendre:

- Des poinçons pour éprouvettes en forme d'haltère ;
- Une étuve à circulation d'air ;
- Une balance d'analyse d'une sensibilité de 0,1 mg ;
- Un dessiccateur pour éliminer l'humidité et protéger contre elle.

### **II.3.4 Mode opératoire**

Les éprouvettes préparées doivent être placées dans un dessiccateur à la température ambiante pendant au moins 20h. Immédiatement après la sortie du dessiccateur, chaque éprouvette doit être pesée avec précision, en milligramme.

Ensuite, pour chaque température bien spécifiée (80°C, 100°C, 120°C, 140°C) les éprouvettes doivent être maintenues dans l'étuve afin de réaliser un vieillissement de 200h dans les conditions suivantes [3]:

- Des mélanges de compositions nettement différentes ne doivent pas être essayés en même temps dans la même étuve;
- Les éprouvettes doivent être suspendues verticalement au milieu de l'étuve, chacune séparée d'au moins 20 mm de toute autre éprouvette;
- Le volume occupé par les éprouvettes ne doit pas dépasser 0,5 % du volume de l'étuve.

Après ce traitement thermique, les éprouvettes doivent être de nouveau placées dans un dessiccateur à température ambiante pendant 20 h.

Ensuite, nous avons repesé les éprouvettes vieilles, en milligrammes, et calculé la différence entre les masses déterminées avant et après traitement du vieillissement.

## **II.4 Essai d'allongement à chaud**

### **II.4.1 Introduction**

Cette méthode d'essai est reconnue comme fondamentale; elle a été développée et utilisée durant de nombreuses années, principalement pour les matériaux dans tous les câbles de distribution d'énergie. Elle a aussi été largement reconnue et utilisée pour d'autres types de câbles, en particulier les câbles à fibres optiques, les câbles de communication et de commande, ainsi que les câbles utilisés à bord des navires et dans les applications offshore [4].

L'essai d'allongement à chaud, généralement applicable aux mélanges réticulés utilisés pour les matériaux d'isolation et de gainage [4]. Le but de cet essai est la détermination des propriétés mécaniques.

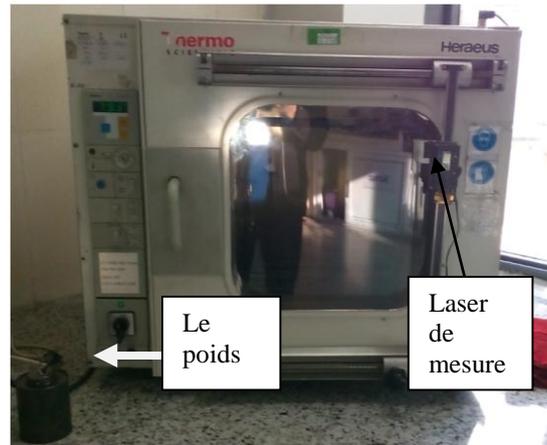
### **II.4.2 Echantillonnage**

Conformément à la CEI 60811-501 [1], Nous avons préparé des éprouvettes, en forme d'haltère comme il est présenté en III.2.2.

### **II.4.3 Appareillage**

Selon la CEI 60811-507 [9], L'appareillage comporte les parties suivantes:

- a) Une étuve capable de maintenir la température et la tolérance spécifiée (Fig. II.5).
- b) Des mâchoires doivent être prévues de manière que chaque éprouvette puisse être suspendue dans l'étuve par la mâchoire supérieure, des poids étant attachés à la mâchoire inférieure de l'éprouvette.



**Figure II.5 : étuve utilisée pour l'essai d'allongement à chaud**

Il convient que la fixation des mâchoires ne cause aucune obturation étanche à l'air des deux extrémités de l'éprouvette d'haltère lors de l'essai.

#### **II.4.4 Mode opératoire**

Les essais se font dans une étuve maintenue à une température constante (140, 160, 180, 200, 210) °C.

Conformément aux normes CEI 60811-507, CEI 60811-501 ; Nous avons utilisé cinq éprouvettes de forme d'haltère, Les éprouvettes doivent être suspendues verticalement dans l'étuve et les masses doivent être attachées à la mâchoire inférieure pour appliquer la contrainte de traction spécifiée dans la CEI 60811-507, cette contrainte est une charge de  $(20 \pm 0,5) \text{ N/cm}^2$ . Ce processus doit être effectué le plus rapidement possible de façon que la porte de l'étuve ne soit ouverte qu'un minimum de temps.

Après que l'étuve a atteint à nouveau sa température, les éprouvettes doivent être maintenues dans l'étuve pendant encore 10 min. La distance entre les traits du repère est mesurée de façon que l'on puisse calculer l'allongement.

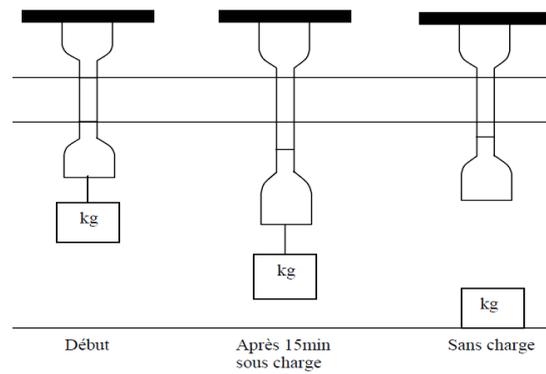
L'étuve, que nous avons utilisée, possède une fenêtre et la mesure faite à l'aide d'un laser sans ouvrir la porte.

On doit alors supprimer la force de traction (la charge) exercée sur les éprouvettes et on doit laisser reposer ces éprouvettes dans l'étuve. Les éprouvettes doivent être maintenues dans l'étuve pendant 5 min ou jusqu'à ce que la température spécifiée soit de nouveau atteinte, selon la durée la plus longue.

Les éprouvettes doivent ensuite être retirées de l'étuve et on doit les laisser refroidir lentement jusqu'à la température ambiante, après la distance entre les traits de repère doit de nouveau être mesurée.

Il convient de prendre les précautions appropriées pour éviter tout danger physique lors de la manipulation des mâchoires, des masses et des éprouvettes chaudes.

Le schéma de principe de la méthode de mesure est présenté sur la figure II.6.



**Fig. II.6 : Essai d'allongement à chaud [1].**

La force de traction est obtenue en ajoutant une masse  $M$  tel que

$$M = e \cdot 81.584 \text{ [g]}$$

Où :  $e$  : l'épaisseur de l'éprouvette.

## Bibliographie

- [1] IEC 60811-501, «Câbles électriques et à fibres optiques – Méthodes d’essai pour les matériaux non-métalliques – Partie 501: Essais mécaniques – Détermination des propriétés mécaniques des mélanges pour les enveloppes isolantes et les gaines», Edition 1.0, 03-2012.
- [2] CEI60811-401, « Câbles électriques et à fibres optiques – Méthodes d’essai pour les matériaux non-métalliques – Partie 401: Essais divers– Méthodes de vieillissement thermique– Vieillissement en étuve à air », Edition 1.0, 03-2012.
- [3] CEI60811-409, « Câbles électriques et à fibres optiques – Méthodes d’essai pour les matériaux non-métalliques – Partie 409: Essais divers – Essai de perte de masse des enveloppes isolantes et gaines thermoplastiques », Edition 1.0, 03-2012.
- [4] CEI60811-507, « Câbles électriques et à fibres optiques – Méthodes d’essai pour les matériaux non-métalliques – Partie 507: Essais mécaniques – Essai d’allongement à chaud pour les matériaux réticulés », Edition 1.0, 03-2012.
- [5] L.BOUKEZZI « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l’isolation des câbles de haute tension ». Thèse de Doctorat, ENP Alger, 19 Juin 2007.
- [6] CEI 60502-2, « Câbles d’énergie à isolant extrudé et leurs accessoires pour des tensions assignées de 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) à 30 kV ( $U_m = 36$  kV) – Partie 2: Câbles de tensions assignées de 6 kV ( $U_m = 7,2$  kV) à 30 kV ( $U_m = 36$  kV) », Edition 3.0, 02- 2014.

# Chapitre III

## Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux caractérisant l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement et du polychlorure de vinyle utilisés dans la fabrication des câbles de transport d'énergie électrique, afin de s'approcher d'une caractérisation mécanique de ces matériaux. Nos résultats sont valables pour un vieillissement accéléré ne dépasse pas 240h.

### III.1 Allongement a la rupture et la résistance à la traction du PRC

Les essais de traction permettent d'expliquer une partie des comportements mécaniques des polymères. La résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture du PRC est représentée à la figure III.1 pour sept échantillons du PRC vieillis à 120°C après 192h (8 jours).

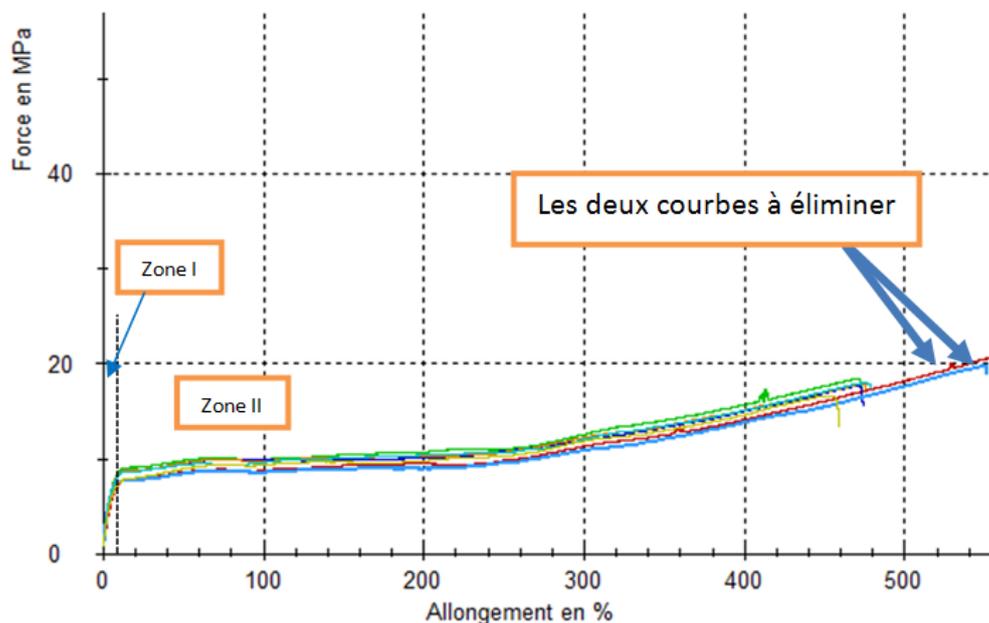


Fig. III.1 : Résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture du PRC

On observe un domaine élastique (Zone I) qui ne présente pas de seuil d'écoulement (dû à l'apparition d'une diminution de section, appelée striction); dans ce cas la résistance à la traction est une fonction linéaire de l'allongement à la rupture, et le PRC peut revenir à son état initial.

Après le domaine élastique, le polymère se déforme plastiquement à contrainte constante (Zone II). Dans ce cas le PRC ne peut pas revenir à son état initial et la contrainte augmente progressivement jusqu'à la rupture totale.

Donc, on peut dire que le PRC est un matériau ductile puisque il présente un domaine élastique et un domaine plastique.

A partir de nos résultats, nous remarquons que la Température pratiquement n'influe pas sur la limite d'élasticité, tel que le point (10%, 8 MPa) est le même pour les différentes températures du vieillissement.

Le PRC est un matériau hyper-élastique qui présente un domaine élastique à très faible contrainte et une déformation très importante, il s'agit d'un élastomère. Les élastomères, seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs.

Les valeurs de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction sont présentées au tableau III.1. Conformément aux recommandations de la CEI 60811-501, On ne doit pas tenir compte des mauvais résultats obtenus sur des éprouvettes rompues à la suite d'une détérioration provoquée par les mâchoires; dans ce cas, on doit obtenir au moins quatre résultats valables pour calculer la résistance à la traction et l'allongement à la rupture; dans le cas contraire, l'essai doit être répété.

**Tableau III.1 : Les valeurs de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture du PRC à 120°C pour 192h :**

N <sub>r</sub>	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)
1	16.7	458.5
2	17.6	472.6
3	17.9	473.6
4	17.9	475.3
5	18.4	478.4
6	19.7	551.5
7	20.6	554.3

On tire la valeur médiane et on trace les courbes qui représentent l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction en fonction du temps du vieillissement.

### III.1.1 Allongement à la rupture

La figure III.2 illustre les variations de l'allongement à la rupture du PRC en fonction du temps de vieillissement pour les différentes températures. Nous remarquons qu'il y a une amélioration de l'allongement au début du vieillissement pour les différentes températures. Cette augmentation peut être due probablement d'une part à un effet de réticulation et d'autre part à la diminution du taux d'humidité, puis elle est suivie par une dégradation de l'allongement en fonction du temps de vieillissement. Pour les températures 100°C, 120°C et 140°C, la dégradation commence à partir de 90h environ, mais pour la température 80°C, le PRC est encore dans la phase d'amélioration.

On remarque que la vitesse de d'amélioration et de dégradation augmente proportionnellement avec la température ce qui vérifie les résultats obtenus par [2].

D'après V. Langlois et *al.*, la réduction des propriétés mécaniques est intimement liée à la dégradation thermo-oxydante du matériau qui s'accompagne par coupures de chaînes [1,2, 3].

Les coupures de chaînes provoquent une diminution de la masse moléculaire moyenne et du taux de réticulation d'une part, et une perte de plastifiants d'une autre part [3], engendrant ainsi une fragilisation du matériau. Elles entraînent également la diminution de la viscosité du polymère [2] et elles contribuent aussi à la formation des groupes vinyles et vinylidènes ou d'autres groupes non saturés dans les chaînes du polyéthylène [4].

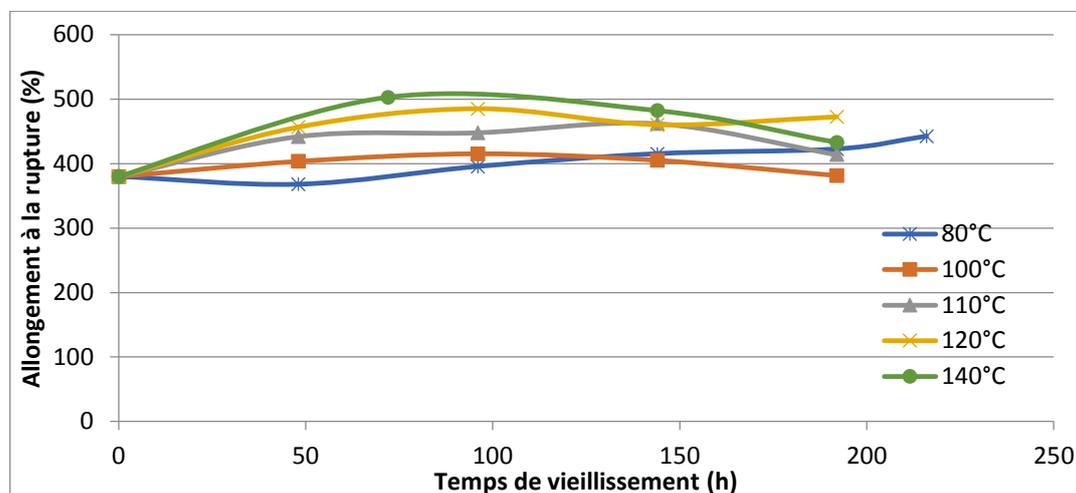


Fig. III.2 : Allongement à la rupture du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique

Dans le cas réel du vieillissement, le PRC subit simultanément des coupures de chaînes et une réticulation. Alors, ses propriétés mécaniques évoluent en fonction de la part prise par chacun des processus. Mais souvent la présence de l'oxygène (oxydation) entraîne une prédominance des coupures du squelette par rapport aux réticulations [5].

### III.1.2. Résistance à la traction

La figure III.3 représente les variations de la résistance à la traction du PRC en fonction du temps de vieillissement pour différentes températures (80°C, 100°C, 110°C, 120°C, 140°C). Nous remarquons que les allures sont semblables aux allures de l'allongement à la rupture pour les différentes températures. Les mêmes facteurs influant sur l'allongement à la rupture influent sur la résistance à la traction.

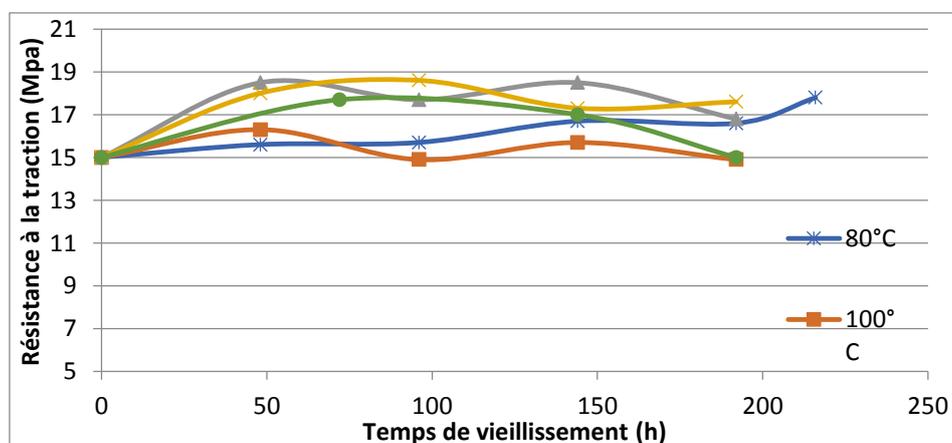


Fig. III.3 : Résistance à la traction du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique.

D'une manière générale, le comportement mécanique est gouverné par les caractéristiques morphologiques du polymère comme le degré de cristallinité, l'épaisseur des cristallites et le rapport cristal-amorphe [6].

### III.2 Allongement à la rupture et la résistance à la traction du PVC

De la même manière que le PRC, nous représentons la résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture du PVC à la figure III.4 pour huit échantillons vieillis à 140°C après 72 h (3 jours).

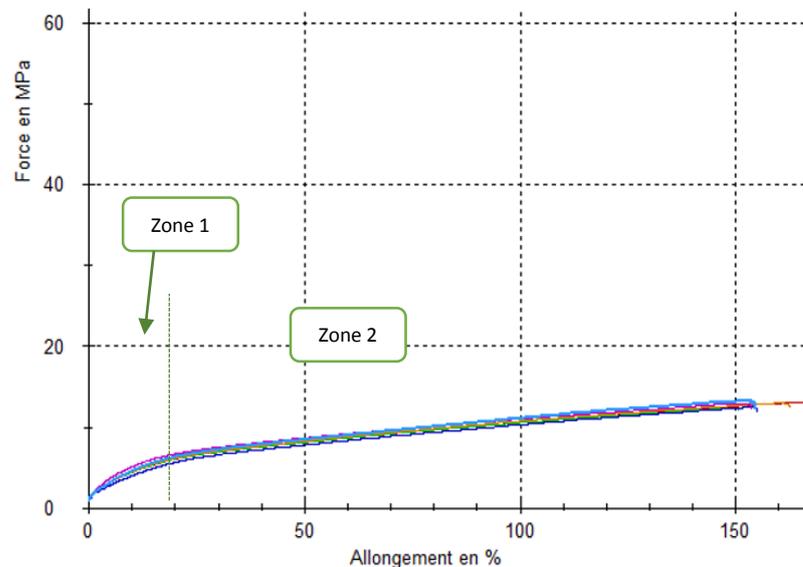


Fig. III.4 : Résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture du PVC

La courbe III.4 ne présente pas de seuil d'écoulement. Après le domaine élastique, le PVC se déforme plastiquement, on appelle cela un genou de traction. Dans cette zone, la résistance à la traction est une fonction linéaire de l'allongement jusqu'à la rupture totale du PVC. Ce point de rupture est la caractéristique essentielle de la courbe de traction/déformation.

La différence entre les deux zones élastique et plastique du PVC est que dans la zone élastique, le PVC peut revenir à son état initial après déformation. Par contre dans la zone plastique, une fois le PVC se déforme, il ne peut pas revenir à son état initial.

#### III.2.1 Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture du PVC en fonction du temps de vieillissement est représenté à la figure III.5 pour différentes températures (80°C, 110°C, 140°C, 160°C). Nous remarquons que pour les températures 80°C et 110 °C, l'allongement à la rupture s'améliore un peu au début du vieillissement, puis il se dégrade avec des vitesses différentes; contrairement pour 140°C et 160 °C la dégradation commence directement au début du vieillissement.

Nous remarquons aussi plus que la température de vieillissement est élevée plus que la vitesse de dégradation est très élevée.

Les mêmes phénomènes qui influent sur la dégradation du PRC influent sur le PVC.

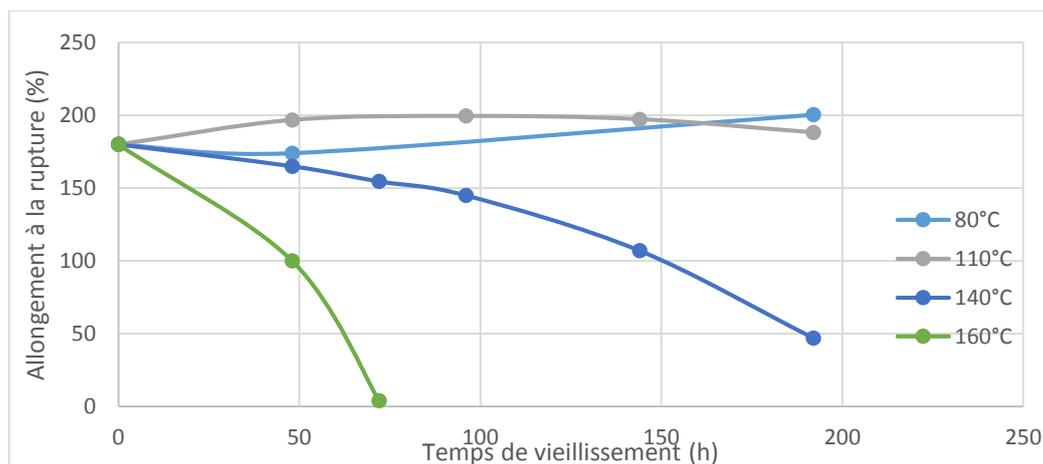


Figure III.5 : Allongement à la rupture du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique.

### III.2.2. Résistance à la traction

Comme dans le cas de l'allongement à la rupture, la résistance à la traction nous permet de déterminer la progression du comportement mécanique du polymère au cours du vieillissement. La figure III.6 représente les variations de la résistance à la traction du PVC en fonction du temps de vieillissement pour différentes températures (80°C, 110°C, 140°C, 160°C). Pour les températures 80°C, 110°C et 140°C, la résistance à la traction augmente légèrement en fonction du temps de vieillissement. Contrairement pour la température 160°C, l'augmentation est très rapide.

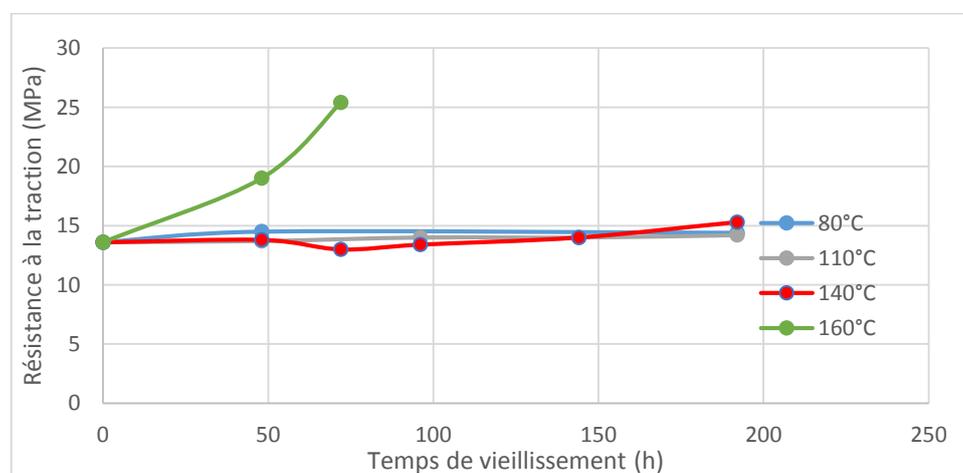


Figure III.6 : Résistance à la traction du PVC en fonction du temps du vieillissement thermique.

Nous remarquons que la résistance à la traction et l'allongement à rupture varient inversement tel que le vieillissement provoque une diminution de l'allongement à la rupture et une augmentation de la résistance à la traction. C'est-à-dire plus que le PVC vieilli plus qu'il devient rigide, dur et cassant comme du verre. Ce résultat nous permet de conclure que la température de transition vitreuse augmente avec le temps de vieillissement, cette augmentation peut être due à la perte des plastifiants qu'on ajoute au PVC afin d'améliorer son élasticité. Nos résultats sont en accord avec ceux publiés dans la littérature [3].

### III.3 Comparaison entre le PRC et le PVC

PRC	PVC
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon allongement à la rupture</li> <li>• La dégradation des propriétés mécaniques est très lente.</li> <li>• Amélioration des propriétés mécaniques pour toutes les températures au début de vieillissement suivi par une atténuation lente.</li> <li>• La limite d'élasticité reste pratiquement inchangée en fonction de la température et en fonction du temps de vieillissement.</li> <li>• L'allongement à la rupture et la résistance à la traction ont la même variation au cours de vieillissement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne résistance à la traction</li> <li>• La dégradation des propriétés mécaniques est très rapide</li> <li>• Perte totale de toutes les propriétés mécaniques pour les températures supérieures de 140°C très rapidement.</li> <li>• Atténuation directe (sans amélioration) pour les températures 140°C et 160°C.</li> <li>• Le vieillissement thermique engendre une augmentation de la résistance à la traction et une diminution de l'allongement à la rupture.</li> </ul>

### III.4 Allongement à chaud du PRC (Hot-Set-Test) :

Cet essai a pour objectif de voir l'influence de la température d'essai sur le comportement mécanique du PRC (degré de réticulation).

La figure III.7 illustre les résultats de l'essai de l'allongement à chaud avec charge en fonction de la température.

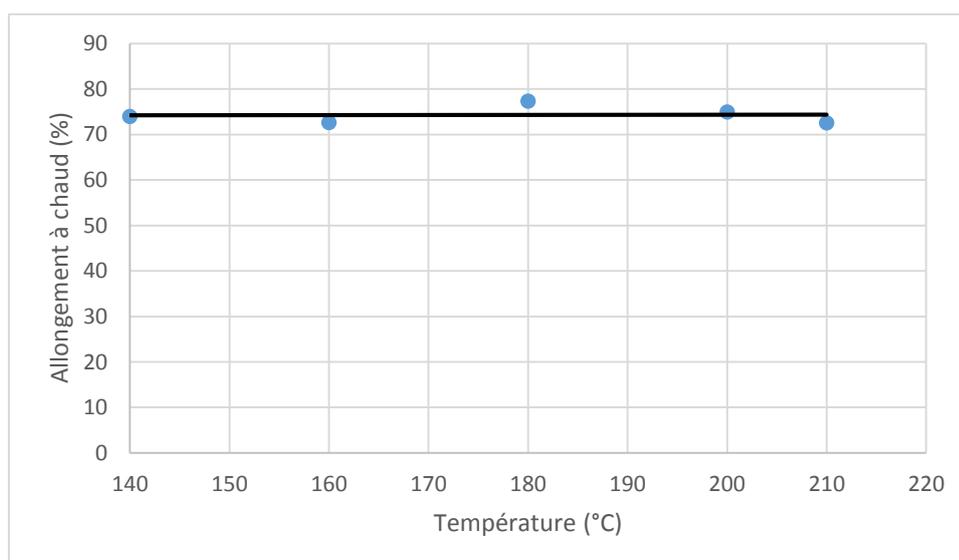
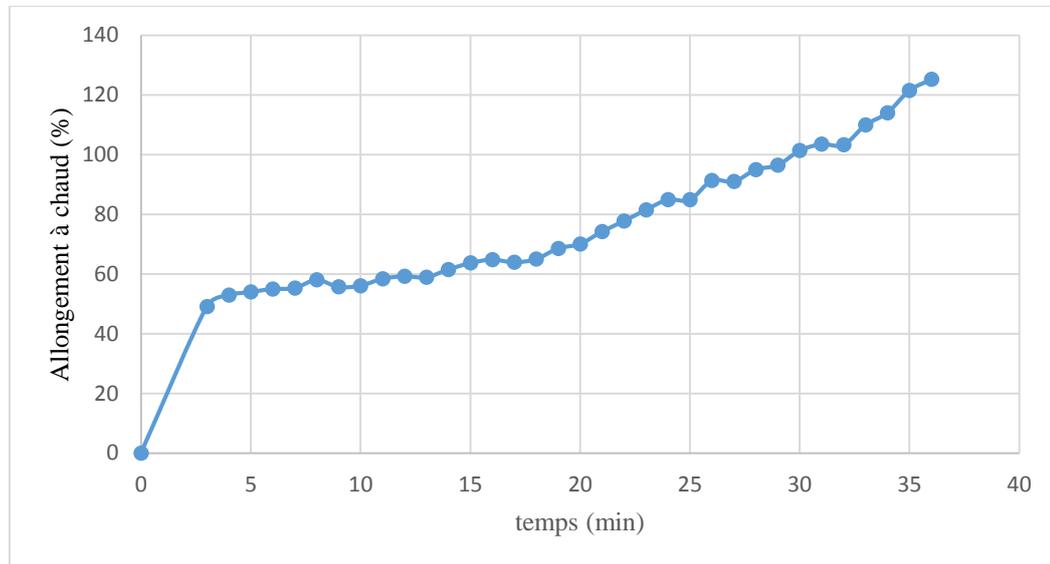


Fig. III.7 : Allongement à chaud du PRC avec charge en fonction de la température d'essai

Nous remarquons que la température d'essai n'a pratiquement aucune influence sur l'allongement à chaud du PRC, donc le degré de réticulation reste pratiquement le même pour toutes les températures d'essai.

Nous avons suivi l'allongement au cours de l'essai jusqu'à la rupture totale de l'échantillon, à la température 210°C. Les résultats sont illustrés sur la figure III.8 :



**Fig. III.8 : Allongement à chaud en fonction du temps pour T=210°C**

Le résultat obtenu met en évidence deux phases d'évolution :

- **Phase 1** : L'allongement à chaud augmente rapidement en fonction du temps, ce qui implique une forte diminution du degré de réticulation [7].
- **Phase 2** : la caractéristique évolue lentement en fonction du temps sous forme exponentielle.

Ces deux phases peuvent être expliquées par la présence des zones amorphes et des zones cristallines dans le PRC. Les chaînes macromoléculaires se coupent plus rapidement dans les zones amorphes (ce qui explique la phase 1), contrairement aux zones cristallines, elles se coupent plus lentement (ce qui explique la phase 2).

Donc au début, les coupures de chaînes commencent dans les zones amorphes car elles sont moins stables puis dans les zones cristallines.

Il est connu dans la littérature que le maximum de la densité de réticulation correspond au minimum d'allongement à chaud [8]. Donc, on peut dire que le taux de réticulation du PRC diminue plus en plus au cours du temps. Ce qui implique une diminution de la viscosité de l'isolant.

### III.5 Conséquences de dégradation

#### Perte de masse

Nous présentons sur les figures III.9 et III.10 les variations de la perte de masse surfacique du PRC et du PVC en fonction du temps de vieillissement pour les trois températures : 80°C, 140°C et 160°C.

Selon la norme IEC 60811-409, la perte de masse de chaque éprouvette doit être déterminée en divisant sa “différence de masse” en milligrammes, par sa surface d’évaporation en centimètres carrés.

La surface d’évaporation “A” est calculée en appliquant la formule suivante:

$$A = \frac{1256 + 180 \delta}{100}$$

Où  $\delta$  est l’épaisseur moyenne des bandes, en millimètres.

#### III.5.1 Variation de la perte de masse du PRC

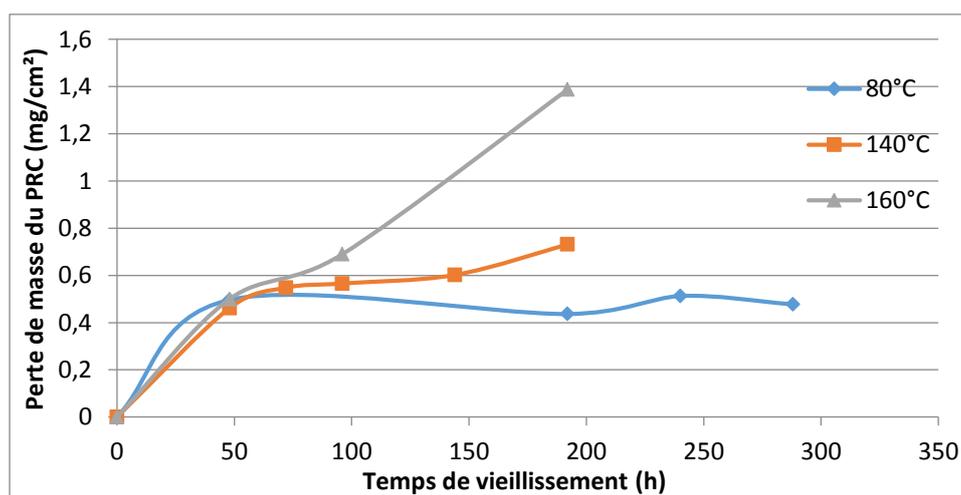


Fig. III.9 : Perte de masse du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique.

Nous remarquons une augmentation de la perte de masse du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique, cette augmentation est beaucoup plus accentuée plus que la température de vieillissement est élevée. Nous remarquons aussi qu’il y a deux zones de progression, une forte perte de masse dans la première zone (moins 50 heures environ) qui peut être due à la perte d’adjuvants (les constituants volatiles et les produits de décompositions formés durant le processus du vieillissement [2-3]) dans les zones amorphes qui sont moins stables et à la diminution du taux d’humidité dans l’isolant, puis une légère augmentation de la perte de masse au cours du temps dans la deuxième zone (à partir de 50 heures) qui peut être due à la perte d’adjuvants dans les zones cristallines qui sont plus stable.

De nombreux travaux effectués sur ce sujet permettent d’affirmer que l’ensemble de nos résultats sont en accord avec ceux publiés dans la littérature [3-7].

Nous pouvons dire que pour la température 160°C, le PRC ne répond pas aux exigences de la norme IEC 60502-2 (perte de masse maximum est de 1,5 mg/cm<sup>2</sup>) à partir de 160h, par contre pour les températures 140°C et 80°C, le PRC n'a pas encore atteint cette limite.

### III.5.2 Variation de la perte de masse du PVC

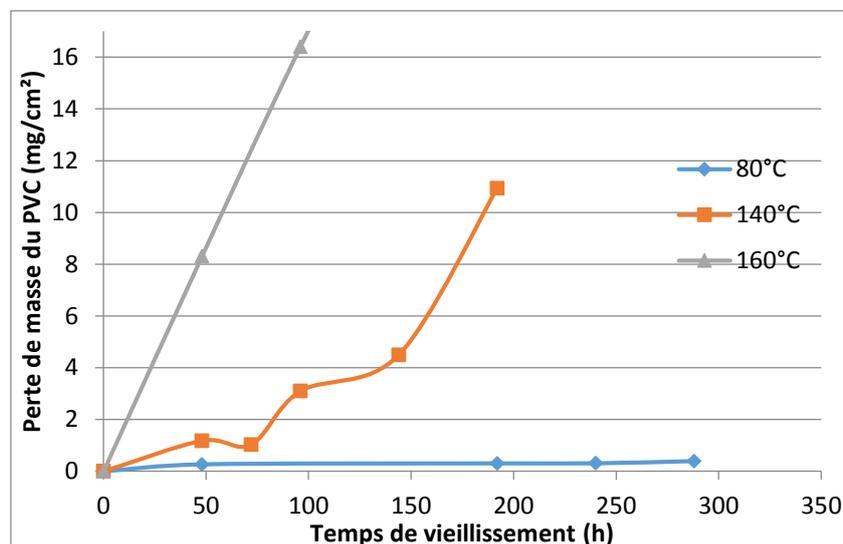


Fig. III.10 : Perte de masse du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique.

Comme pour le PRC, nous remarquons une augmentation de la perte de masse surfacique du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique, plus que la température augmente plus que la vitesse de l'augmentation de la perte est plus importante. Cette perte de masse peut être due aux pertes de plastifiants et au dégagement d'acide chlorhydrique.

Selon la norme IEC 60502-2 (perte de masse maximum est de 1,5 mg/cm), nous remarquons que le PVC perd les propriétés mécaniques et ne répond pas aux exigences à partir de 10 heures environ pour la température 160°C et à partir de 80 heures pour 140°C, contrairement à 80°C, le PVC n'a pas encore atteint sa limite.

## Bibliographies

- [1] V. LANGLOIS, L. AUDOUIN, J. VERDU, M. MEYER, «Vieillissement thermique du polyéthylène réticulé», Journées d'Études des Polymères (JEPO18), Groupement Français d'études et d'applications des Polymères (G.F.P), Eveux-L'arbresle, Septembre 1990.
- [2] Y.MECHERI « Influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Mai 2008.
- [3] D.BOUGUEDAD « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère) » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2002.
- [4] S. LUZURIAGA, J.KOVAROVA, I. FORTELNY, «Degradation of pre-aged polymers exposes to simulated recycling: Properties and thermal stability», Polymer Degradation and Stability, Vol. 91, Issue 6, pp. 1226-1232 , June 2006.
- [5] J. VERDU, « Vieillissement des plastiques », AFNOR Technique, Edition Eyroles, Paris 1984.
- [6] M. CELINA, K.T. GILLEN, R.L. CLOUGH, « Inverse temperature and annealing phenomena during degradation of Cross linked polyolefins», Polymer Degradation and Stability, Vol. 61, pp. 231-244, 1998.
- [7] L.BOUKEZZI « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension ». Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, 19 Juin 2007.
- [8] B. SULTAN « Crosslinking of polyolefin », The Polymeric Materials Encyclopaedia ©, CRC press. Inc., 1996.
- [9] M.NEDJAR « Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Décembre 1991.

## Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés mécaniques des câbles électriques isolés au PRC qui a été lancé par le Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique en collaboration avec l'entreprise ELSEWEDY CABLES Algeria. Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques et physico-chimiques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) et du polychlorure de vinyle (PVC) en fonction du vieillissement thermique.

Dans ce projet, nous avons réalisé des essais mécaniques sur des échantillons du PRC et du PVC, nous avons constaté que dans le cas du vieillissement thermique, le PRC subit simultanément des coupures de chaînes et une réticulation. Alors, ses propriétés mécaniques évoluent en fonction de la part prise par chacun des processus, le PRC présente une amélioration de ses propriétés pour toutes les températures au début de vieillissement suivi par une atténuation plus accentuée plus que la température est élevée. Cette amélioration peut être due probablement à un effet de réticulation et à la diminution du taux d'humidité, par contre la dégradation est due aux coupures des chaînes qui provoquent une diminution de la masse moléculaire moyenne et du taux de réticulation d'une part, et une perte de plastifiants d'une autre part, engendrant ainsi une fragilisation du matériau. Néanmoins, le PRC présente un bon allongement à la rupture et une dégradation des propriétés mécaniques très lente.

Dans l'essai de l'allongement à la rupture du PRC, nous avons observé un domaine élastique dont la résistance à la traction est une fonction linéaire de l'allongement à la rupture, le PRC peut revenir à son état initial. Après le domaine élastique, le polymère se déforme plastiquement à contrainte constante, dans ce cas le PRC ne peut pas revenir à son état initial et la contrainte augmente progressivement jusqu'à la rupture totale. Donc, on peut dire que le PRC est un matériau ductile puisque il présente un domaine élastique et un domaine plastique.

La résistance à la traction et l'allongement à la rupture du PRC varient de la même façon au cours du temps, contrairement au PVC, ils varient inversement tel que le vieillissement provoque une diminution de l'allongement à la rupture et une augmentation de la résistance à la traction. C'est-à-dire plus que le PVC vieilli plus qu'il devient rigide, dur et cassant comme du verre. Ce résultat nous permet de conclure que la température de transition vitreuse augmenterait avec le temps de vieillissement, cette augmentation peut être due à la perte des plastifiants qu'on ajoute au PVC afin d'améliorer son élasticité. Toutefois, le PVC présente une bonne résistance à la traction mais la dégradation de ses propriétés mécaniques est très rapide et il perd toutes les propriétés mécaniques pour les températures supérieures de 140°C.

Enfin, cette étude nous permet de connaître un petit peu le comportement mécaniques des isolateurs synthétiques (PRC, PVC) vis-à-vis le vieillissement thermique qui peut influencer sur eux au cours de leur utilisation.

## Annexe

- **Monomère** : En chimie, un monomère est une substance le plus souvent organique utilisée dans la synthèse des oligomères et des polymères au cours d'une réaction d'oligomérisation ou de polymérisation. Le mot monomère vient du grec monos, un seul ou une seule, et meros, partie.
- **Hydrolyse** : L'hydrolyse d'une substance est sa décomposition par l'eau grâce aux ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  et  $\text{HO}^-$  provenant de la dissociation de l'eau.
- **Valeur médiane** : quand plusieurs résultats d'essais sont obtenus et classés par ordre de valeurs croissantes (ou décroissantes), la valeur médiane est la valeur du milieu de la série si le nombre de valeurs disponibles est impair, et la moyenne arithmétique des deux valeurs centrales de la série si le nombre est pair.
- $U/U_0 = 18/30 \text{ kV}$

**Où :**

$U_0$  : est la tension assignée à fréquence industrielle entre chacun des conducteurs et la terre, ou l'écran métallique, pour laquelle le câble est conçu.

$U$  : est la tension assignée à fréquence industrielle entre conducteurs, pour laquelle le câble est conçu.