

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Électrotechnique

**Projet de Fin d'Études en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'État en Électrotechnique**

Thème :

**Influence des vieillissements thermique et électrique
sur les propriétés des câbles MT isolés au PRC
fabriqués par ELSEWEDY Cables Algeria**

Proposé et dirigé par :

Pr. A. BOUBAKEUR

Étudié par :

Hani TERFA

Salah OULD MAHAMMED

Composition du Jury

- Président : Abdelouahab MEKHALDI (Professeur ENP)
- Promoteur : Ahmed BOUBAKEUR (Professeur ENP)
- Co-promotrice : Naima HAMADOUCHE (Ingénieur
ELSEWEDY Cables Algeria)
- Examineurs : Madjid TEGUAR (Professeur ENP)
Yasmina SEBBANE (Ingénieur ENP)

PROMOTION: JUIN 2016

Ecole Nationale Polytechnique, 10, Ave Hassen Badi, El-Harrach, 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 belles 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

Dédicace

Avant tous, je remercie Allah de m'avoir donné la force et la patience pour compléter le travail et d'aller jusqu'au bout du rêve.

En signe d'amour, de gratitude et de respect, je dédie ce modeste travail :

À ma chère mère, mon âme, la lumière de mes yeux, l'être que j'aime et que je chéris plus que tout au monde, celle qui a fait de moi ce que je suis.

À mon père qui m'a éclairé mon chemin et qui m'a encouragé et soutenue dans les moments difficiles de ma carrière.

À tous mes frères et mes sœurs, surtout Mahfoud qui m'a aidé et m'a encouragé à avancer et avoir ce que je veux, et à toute ma famille ;

À tous mes amis que j'ai connus ;

À toutes les personnes qui m'aiment et que j'aime, et qui sont toujours dans mon cœur.

Hani TERFA

Remerciements

Nous remercions, avant tout, notre Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.

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

Nous souhaitons également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant nos années d'études.

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu juger notre travail et nous honorer avec leur participation.

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

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

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

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

Enfin, nous remercions l'ensemble du personnel technique et administratif pour les conseils qu'ils ont pu nous prodiguer au cours de ce projet de fin d'études.

ملخص:

هذه المذكرة تدخل في إطار مشروع بحث حول تأثير التشيخ الحراري والكهربائي على خصائص الكوابل الكهربائية المعزولة بالبوليثيلان المرتبط كيميائيا (PRC)؛ المعقد بين مخبر البحث في الإلكترونيات تقني للمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات ومؤسسة السويدي كابل-الجزائر بعين الدفلى. لقد اهتمنا بدراسة تطورات الخصائص الميكانيكية؛ الكهربائية والفيزيوكيميائية للبوليثيلان المرتبط كيميائيا (PRC) والبوليكوريرفينيل (PVC) بدلالة مختلف الضغوطات الميكانيكية؛ الكهربائية والحرارية التي يمكن أن تؤثر عليهم خلال مدة الإستعمال.

الكلمات المفتاحية:

التشيخ الحراري؛ التشيخ الكهربائي؛ الخصائص الميكانيكية؛ الخصائص الكهربائية؛ الخصائص الفيزيوكيميائية؛ البوليثيلان المرتبط كيميائيا (PRC)؛ البوليكوريرفينيل (PVC)؛ الضغوطات الميكانيكية؛ الضغوطات الكهربائية؛ الضغوطات الحرارية.

Abstract:

This end study's project is a part of a research project about the influence of thermal and electrical ageing's on 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, electrical and physico-chemical properties of the XLPE and PVC versus different mechanical, electrical and thermal constraints that may influence them during their use.

Key's words:

Thermal ageing, electrical ageing, mechanical properties, electrical properties, physico-chemical properties, Cross-Linked polyethylene (XLPE), polyvinyl chloride (PVC), mechanical constraints, electrical constraints, thermal constraints.

Résumé

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur l'influence des vieillissements thermique et électrique sur les propriétés des câbles électriques isolés au polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) 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, électriques et physico-chimiques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) et du polychlorure de vinyle (PVC) en fonction des différentes contraintes mécaniques, électriques et thermiques qui peuvent influencer sur elles en cours d'exploitation.

Mots clés :

vieillessement thermique, vieillissement électrique, propriétés mécaniques, propriétés électriques, propriétés physico-chimiques, polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), polychlorure de vinyle (PVC), contraintes mécaniques, contraintes électriques, contraintes thermiques.

Sommaire

Liste des figures
Liste des tableaux
Symboles et abréviation

Introduction générale	1
Bibliographies	4
Chapitre I : Les polymères et leurs utilisations dans l'isolation des câbles électriques	5
I.1 Introduction	6
I.2 Classification des polymères	6
I.2.1 Origine des matériaux	6
I.2.2 Structure chimique et la fonctionnalité des motifs	7
I.2.2.1 Les homopolymères	7
I.2.2.2 Les copolymères	7
I.2.3 Géométrie de la molécule	8
I.2.3.1 Ordre atomique	8
I.2.3.2 Distribution des liaisons	9
I.3 Polymérisation	9
I.3.1 Polymérisation par étapes (polycondensation)	9
I.3.2 Polymérisation par chaîne (polyaddition)	10
I.4 Caractéristiques des polymères	11
I.4.1 Propriétés chimiques des polymères	11
I.4.2 Propriétés thermiques	11
I.4.2.1 Elastomères	11
I.4.2.2 Thermoplastiques	11
I.4.2.3 Thermodurcissables	11
I.4.3 Propriétés mécaniques des polymères	12
I.4.4 Propriétés électriques des polymères	12
I.4.4.1 Rigidité diélectrique	12
I.4.4.2 Propriétés électriques superficielles	12
I.4.4.3 Résistivité transversale	13
I.4.4.4 Résistance au feu	13
I.5 Utilisation des polymères dans l'isolation des câbles électriques	13
I.5.1 Polychlorure de Vinyle (PVC)	13
I.5.1.1 Présentation du PVC	14
I.5.1.2 Propriétés du PVC	14
I.5.1.2.a Propriétés physico-chimiques	14
I.5.1.2.b Propriétés électriques	15
I.5.1.2.c Propriétés mécaniques	15
I.5.1.3 Utilisation du PVC dans l'isolation des câbles électriques	15
I.5.2 Polyéthylène (PE)	15
I.5.2.1 Polyéthylène basse densité (PEBD)	16

I.5.2.2	Polyéthylène haute densité (PEHD) :.....	16
I.5.3	Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) :.....	16
I.5.3.1	Présentation du PRC :.....	16
I.5.3.2	Réticulation du PRC avec le peroxyde :.....	17
I.5.3.3	Mesure du degré de réticulation :.....	19
I.5.3.4	Propriétés du PRC :.....	19
I.5.3.4.a	Propriétés physico-chimiques :.....	19
I.5.3.4.b	Propriétés électriques :.....	19
I.5.3.4.c	Propriétés mécaniques :.....	19
I.5.3.4.d	Propriétés thermiques :.....	19
I.5.3.5	Avantages du PRC sur le PE :.....	20
	Bibliographies :.....	21
Chapitre II : Vieillessement électrique et thermique des polymères :.....		23
II.1.	Introduction :.....	24
II.2	Vieillessement thermique des isolants à base de polymères :.....	25
II.2.1	Processus physique :.....	26
II.2.1.1	Processus physique sans transfert de masse :.....	26
II.2.1.1.1	Vieillessement par chocs thermiques :.....	26
II.2.1.1.2	Vieillessement physique interne (évolution de la morphologie) :.....	26
II.2.1.1.3	Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif :.....	27
II.2.1.2	Processus physique avec transfert de masse :.....	27
II.2.1.2.1	Vieillessement par absorption de solvants :.....	28
II.2.1.2.2	Vieillessement par migration d'adjuvants (Perte d'adjuvants) :.....	28
II.2.2	Processus chimique :.....	29
II.2.2.1	Coupure de chaînes statistiques :.....	30
II.2.2.2	Dépolymérisation :.....	30
II.2.2.3	Réticulation :.....	30
II.2.2.4	Oxydation :.....	31
II.3	Vieillessement électrique des câbles :.....	31
II.4.	Endurance thermique des matériaux polymères :.....	33
II.4.1	Introduction :.....	33
II.4.2	Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides :...35	
II.4.3	Choix des critères de dégradation (critère de fin de vie) :.....	36
II.4.4	Vitesse de dégradation :.....	36
	Bibliographies :.....	37
Chapitre III : Techniques expérimentales :.....		41
III.1	Présentation du câble 18/30 kV :.....	42
III.1.1	Présentation des laboratoires :.....	42
III.1.2	Caractéristiques du câble :.....	42
III.1.3	Composants du câble 18/30 kV :.....	43
III.1.4	Présentation de la matière XLPE :.....	43

III.1.5	Présentation de la matière PVC :.....	43
III.2	Essai de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction :.....	44
III.2.1	Introduction :.....	44
III.2.2	Echantillonnage :.....	44
III.2.3	Appareillages :.....	45
III.2.4	Mode opératoire :.....	46
III.3	Essai de pertes de masse du PVC et du PRC :.....	47
III.3.1	Introduction :.....	47
III.3.2	Echantillonnage :.....	47
III.3.3	Appareillages :.....	47
III.3.4	Mode opératoire :.....	48
III.4	Essai d'absorption d'eau pour le PRC :.....	48
III.4.1	Introduction :.....	48
III.4.2	Echantillonnage :.....	48
III.4.3	Appareillages :.....	48
III.4.4	Mode opératoire :.....	49
III.5	Essai d'allongement à chaud :.....	49
III.5.1	Introduction :.....	49
III.5.2	Echantillonnage :.....	49
III.5.3	Appareillages :.....	49
III.5.4	Mode opératoire :.....	50
III.6	Essai de décharge partielles sur les tronçons de câbles (vieillis et non vieillis) :.....	51
III.6.1	Introduction :.....	51
III.6.2	Echantillonnage :.....	51
III.6.3	Appareillages :.....	52
III.6.4	Mode opératoire :.....	53
III.7	Essai de tension pendant 3h (vieillessement électrique) :.....	54
III.8	Essai de décharges partielles en fonction de la tension sur les câbles 18/30 kV (avant et après dégazage) :.....	54
III.8.1	Introduction :.....	54
III.8.2	Echantillonnage :.....	54
III.8.3	Appareillages :.....	54
III.8.4	Mode opératoire :.....	54
III.9	Essai d'enroulement suivi d'un test de décharges partielles :.....	55
III.9.1	Introduction :.....	55
III.9.2	Appareillages :.....	55
III.9.3	Mode opératoire :.....	55
III.10	Mesure de la résistance linéique des âmes conductrices :.....	55
	Bibliographies :.....	56
	Chapitre IV : Résultats et discussions :.....	57
IV.1	Allongement à la rupture et la résistance à la traction du PRC :.....	58
V.1.1	Allongement à la rupture :.....	59

V.1.2	Résistance à la traction :.....	60
IV.2	Allongement à la rupture et la résistance à la traction du PVC :.....	61
IV.2.1	Allongement à la rupture :.....	62
IV.2.2	Résistance à la traction :.....	62
IV.3	Comparaison entre le PRC et le PVC :.....	63
IV.4	Allongement à chaud du PRC (Hot-Set-Test) :.....	64
IV.5	Conséquences de dégradation :.....	65
IV.5.1	Changement de couleur du PRC :.....	65
IV.5.2	Changement de couleur du PVC :.....	66
IV.5.3	Perte de masse :.....	67
IV.6	Essai d'absorption d'eau :.....	69
IV.7	Essai de décharges partielles sur les tronçons de câbles (vieillis et non vieillis) :.....	70
IV.8	Essai de tension pendant 3h (vieillissement électrique) :.....	71
IV.9	Essai de décharges partielles en fonction de la tension sur les câbles 18/30 kV (avant et après dégazage) :.....	73
IV.10	Essai d'enroulement suivi d'un test de décharges partielles :.....	74
IV.11	Mesure de la résistance linéique des âmes conductrices :.....	75
	Bibliographies :.....	76
	Conclusion générale :.....	77

Annexe

Listes des figures

Fig. I.1 : polymère par réaction de polycondensation	10
Fig. I.2 : Processus de réticulation	17
Fig. I.3 : Molécule du peroxyde de dicumyle	17
Figure II.1. Schématisation des phénomènes de transfert de masse	27
Figure II.2. Allure des courbes de variation de masse dans les deux sens de transfert	28
Figure II.3. Coupures de chaînes statistiques	30
Fig.II.4 : Arborescence électrique observée dans le volume d'une résine époxy en configuration pointe/plan à laquelle a été superposée la théorie de la percolation de A.K. Joncher & R. Lacoste	33
Fig.II.5 : Variation du temps de vieillissement en fonction de la contrainte appliquée	34
Fig.II.6 : Variation de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour les différentes valeurs de la contrainte C	34
Fig.II.7 : Variation de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes températures	35
Fig.II.8 : Variation du logarithme de la durée de vie des polymères en fonction de l'inverse de la température	35
Fig. III.1 : Schéma du câble 18/ 30 kV isolé au PRC	43
Fig. III.2 – Eprouvette en forme d'haltère	44
Fig III.3: (a) Machine pour la préparation des bandes, (b) Emporte-pièce	45
Fig III.4 : Machine de traction	46
Figure III.5 : Etuve utilisée pour l'essai d'allongement à chaud	50
Fig. III.6 : Essai d'allongement à chaud	51
Fig III.7 : Objet d'essai	52
Fig. III.8 : Circuit d'essai	53
Fig. III.9 : Laboratoire des essais électriques	53
Fig. III.10 : Appareil de mesure de DP	53
Fig. IV.1 : Résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture du PRC	58
Fig. IV.2 : Allongement à la rupture du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique	60
Fig. IV.3 : Résistance à la traction du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique	61
Fig. IV.4 : Résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture du PVC	61
Figure IV.5 : Allongement à la rupture du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique	62
Figure IV.6 : Résistance à la traction du PVC en fonction du temps du vieillissement thermique	63
Fig. IV.7 : Allongement à chaud du PRC avec charge en fonction de la température d'essai	64
Fig. IV.8 : Allongement à chaud en fonction du temps d'essai pour T=210°C	64
Fig. IV.9.a : Echantillons du PRC vieillis	66
Fig IV.9.b : Tronçons de câble complet 18/30 isolés par le PRC après vieillissement thermique	66

Fig. IV.10 : Tronçons de câble complet avec la gaine du PVC après vieillissement thermique	67
Fig. IV.11 : Perte de masse du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique	67
Fig. IV.12 : Perte de masse du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique	68
Fig. IV.13 : Variation de masse en fonction du temps du vieillissement	70
Fig. IV.14 : Charge apparente des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement thermique	71
Fig. IV.15 : Variations de la charge apparente des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement électrique	72
Fig. IV.16 : Charge apparente des décharges Partielles en fonction de la tension	73
Fig. IV.17 : Ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé	74
Fig. IV.18 : Charge apparente des décharges partielles en fonction du rayon de courbure	74
Fig. IV.19 : Résistance linéique en fonction du temps de vieillissement thermique	75

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Exemple de polymères utilisés dans l'isolation électrique.....	13
Tableau IV.1 : Les valeurs de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture du PRC à 120°C pour 192h	59
Tableau IV.1 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau	69

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. En effet, cette dernière, qui se fait naturellement par l'air en aérien, nécessite le recours à des isolants spécifiques en souterrain [2].

Il existe un nombre important de technologies de câbles électriques. On peut distinguer deux grandes familles de câbles selon leur système d'isolation [2] :

- L'ancienne technologie dont le système d'isolation est en papier imprégné et la barrière d'étanchéité est une gaine de plomb,
- La nouvelle technologie dont le système d'isolation est en matériau polymère et la barrière d'étanchéité peut être une gaine de plomb ou bien une feuille d'aluminium collée à la gaine.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser aux câbles dits « synthétiques » dont la gaine et l'isolant sont en polymère.

Les polymères synthétiques sont largement utilisés dans l'industrie électrique en raison de leurs performances mécaniques, leur bonne tenue électrique, leur facilité de mise en œuvre et leur faible coût [3]. Depuis 1940 le polyéthylène (PE) a été et continu d'être largement utilisé dans la fabrication des câbles, Cet excellent matériau d'isolation, utilisé généralement en haute fréquence, est caractérisé par une très bonne rigidité diélectrique et de faibles pertes diélectriques. Par contre, c'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 lorsqu'on l'utilise en haute tension. C'est ainsi qu'a été introduite la méthode de réticulation qui offre au PE un comportement à long terme amélioré [4]. Le résultat de la réticulation du PE est le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) ou Cross-Linked Polyethylene (XLPE) dans la littérature anglo-saxonne. Ce dernier est devenu un matériau de choix dans l'isolation des câbles haute tension (HT) de nouvelle génération à cause de ses performances diélectriques, physico-chimiques, mécaniques et thermiques [5].

D'autres polymères sont largement utilisés dans l'isolation électrique, nous trouvons le polychlorure de vinyle (PVC), qui est employé à cause de son faible coût de revient. A l'état pur, le PVC est cassant d'où la nécessité de lui ajouter des produits auxiliaires appelés adjuvants. Le type et la qualité de chaque adjuvant sont les grands problèmes des producteurs de câbles électriques [6].

En général les polymères sont caractérisés par des différentes propriétés : certains sont utilisés pour leurs propriétés élastiques, thermiques ou encore électriques. Au cours des différentes phases de fabrication d'un câble, des impuretés de tailles microscopiques et de formes diverses peuvent être piégées dans l'isolant ou créées à l'interface des zones conductrices ou semi-conductrices. Des inhomogénéités dans la structure de l'isolant peuvent être créées au cours de l'extrusion ou du refroidissement de la couche isolante. Ces hétérogénéités induisent des perturbations dans la distribution du champ électrique, ainsi qu'un renforcement de ce dernier pouvant conduire à la génération, à plus ou moins long terme, d'arborescences. Ces défauts ou facteurs de vieillissement peuvent conjointement contribuer, en présence des contraintes électriques, thermiques et mécaniques, à la dégradation des propriétés principales du matériau [7].

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 [8] et IEEE [9] 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 [10-11]. 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 [12]. 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,...) [12-13].

Dans ce travail, nous nous intéressons aux différentes contraintes thermique, électrique et mécanique qui peuvent influencer 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 séparée ou combinée de ces contraintes, une dégradation des propriétés mécaniques, électriques, ainsi qu'une influence sur les propriétés physiques comme par exemple un changement de couleur et une 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. Quatre chapitres constituent notre travail ;

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

Dans le second chapitre, nous nous intéressons aux interactions entre les différents facteurs de vieillissement : d'une part la contrainte thermique (vieillessement thermique), d'autre part la contrainte électrique (vieillessement électrique) ; qui constituent les deux plus importants facteurs de dégradation des câbles électriques, et à la méthodologie d'essai et de prévision des durées de vie dans les conditions d'utilisation.

Le troisième 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 quatrième chapitre.

Dans la conclusion, sont rassemblés les principaux résultats auxquels nous sommes parvenus. Nous présentons 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] G.MARQUE, « Absorption de l'eau par les polymères », Thèse de Doctorat, université de Savoie, France, Avril 2009.
- [3] 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'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, juin 2007.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M.NEDJAR, « Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Décembre 1991.
- [7] M.NEDJAR, «Evaluation de la tenue diélectrique à court et à long termes des polymères utilisés dans les dispositifs Haute Tension», Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2003.
- [8] CEI 505, «Evaluation and identification of electrical insulation systems, Part 1: General principles and guide to applications», 1975.
- [9] IEEE Standard 1064-1991, «Guide for multifactor stress functional testing of Electrical insulation systems», 1991.
- [10] B. FALLOU, C. STEVENS, A.G. DAY, «Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants», CIGRE, Groupe 15-05, Septembre 1982.
- [11] J.GOSSOT, «Les matières plastiques. Fabrication et technologie», Edition Dunod, Paris, 1977.
- [12] 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.
- [13] 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.

Chapitre I

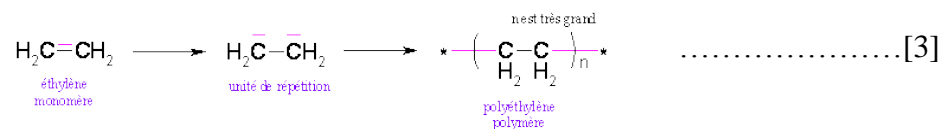
Les polymères et leurs utilisations dans l'isolation des câbles électriques

I.1 Polymère

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].

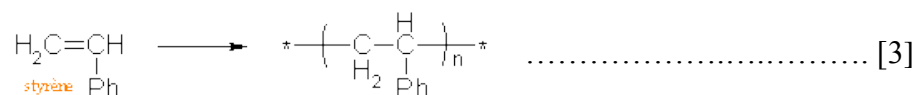
Il existe toutes sortes de polymères caractérisés par des propriétés différentes : certains sont utilisés pour leurs propriétés élastiques, thermiques ou encore électriques. Différents polymères existent à l'état naturel, le caoutchouc en est le meilleur exemple, mais la plupart des polymères utilisés 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] :

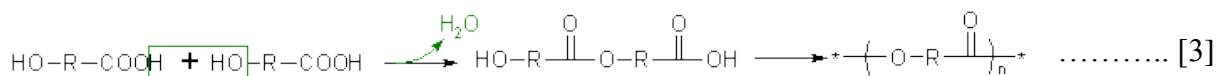


"-CH₂-CH₂-" est l'unité du polymère.

Tout monomère comporte au minimum deux sites réactifs. La polymérisation sur la double liaison du monomère correspond à l'ouverture de la double liaison.



Il n'y a pas que des doubles liaisons qui forment des polymères :



I.2 Classification des Polymères

Cette classification peut se faire en se basant sur l'origine du matériau, sa structure chimique, la géométrie de la molécule et le type de polymérisation utilisé.

I.2.1 Origine des matériaux :

- **Polymères naturels** : tels que cellulose, le bois, le coton, le cuir, la laine,... etc.
- **Polymères synthétiques** : appelés aussi résine synthétiques, du fait des similarités observées entre leur structure et celle de la résine naturelle, tels que : polychlorure de

vinyle (PVC), polypropylène (PP), polyéthylène (PE), polyéthylène à basse densité (PEBD), polyéthylène à haute densité (PEHD).

- **Polymères artificiels** : qui résultent de la transformation chimique des polymères naturels [4].

I.2.2 Structure chimique et la fonctionnalité des motifs

I.2.2.1 Les homopolymères

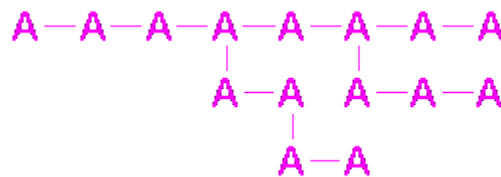
Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène.

Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles. Pour la suite du paragraphe, A sera l'unité de l'homopolymère. Parmi les différents types d'homopolymères, nous trouvons [1] :

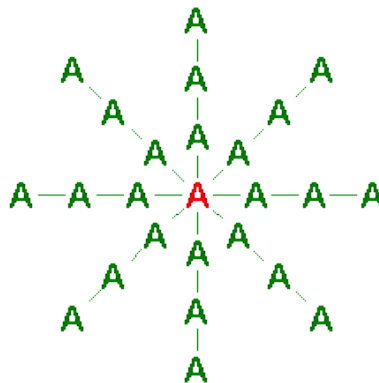
- Les homopolymères linéaires.



- Les homopolymères branchés.

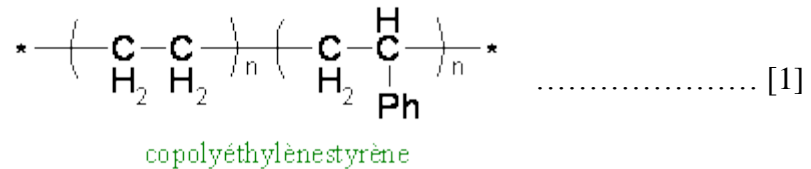


- Les homopolymères étoilés.



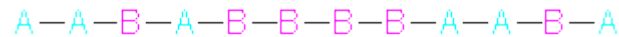
I.2.2.2 Les copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères [1]

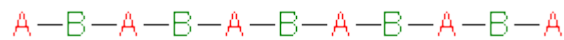


Pour la suite du paragraphe, A et B seront deux unités différentes du copolymère. Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :

- **Le mode statistique** : les monomères A et B sont réparties aléatoirement dans la chaîne.



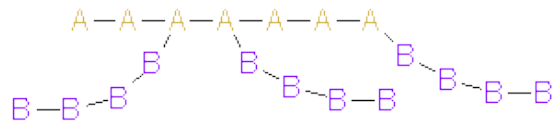
- **Le mode alterné** : A et B réparties alternativement dans la chaîne.



- **Le mode séquencé.**



- **Le mode greffé.**



I.2.3 Géométrie de la macromolécule

La géométrie de la macromolécule peut être caractérisée par l'ordre atomique et la distribution des liaisons [5].

I.2.3.1 Ordre atomique

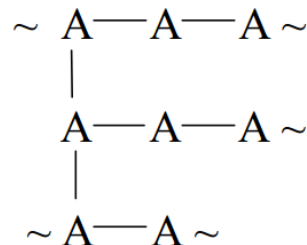
On distingue selon cette caractéristique plusieurs types :

- **Polymère amorphe** : où les atomes sont désordonnés le long de la chaîne du polymère.
- **Polymères cristallins** : suite à certaines conditions (refroidissement lent après fusion,...) les polymères peuvent posséder une structure semi ordonnée, et donner lieu à une cristallisation partielle.
- **Structure semi-cristalline** : Généralement les molécules comportent des régions cristallines dispersées au sein du matériau amorphe on dit que le matériau est partiellement cristallin. Tout désordre et tout défaut d'alignement dans les chaînes entraînent la formation d'une région amorphe.

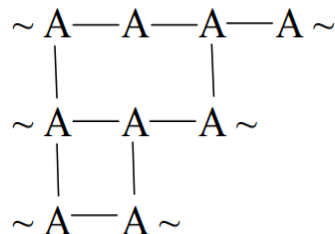
I.2.3.2 Distribution spatial des liaisons

Dans ce cas on parle de polymères linéaires, ramifiés ou tridimensionnels.

- **Polymères linéaires** : ils peuvent être des homopolymères ou des copolymères.
- **Polymères ramifiés** : leur structure est toujours planaire mais la macromolécule est constituée de branches liées chimiquement.



- **Polymères tridimensionnels** : pour des raisons de stabilité des liaisons relie les diverses branches.



I.3 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 [6].

La création de polymères peut résulter soit de la modification chimique de systèmes macromoléculaires existants, soit de la transformation de molécules simples en macromolécules. Cette dernière transformation est désignée par «polymérisation». Il en résulte deux catégories de polymérisation [6] :

- Les polymérisations par étapes (également appelées polycondensations).
- Les polymérisations en chaîne (appelées aussi polyadditions).

I.3.1 Polymérisation par étapes (polycondensation)

La polycondensation fait intervenir des réactions classiques de la chimie organique entre les groupements fonctionnels réactifs des monomères avec élimination d'un résidu simple (souvent de l'eau...) [7].

La réaction se produit par simple chauffage en présence d'un simple catalyseur ou amorceur convenable : on passe des molécules monomères puis aux molécules polymères formées, et enfin aux macromolécules (polymères) [4].

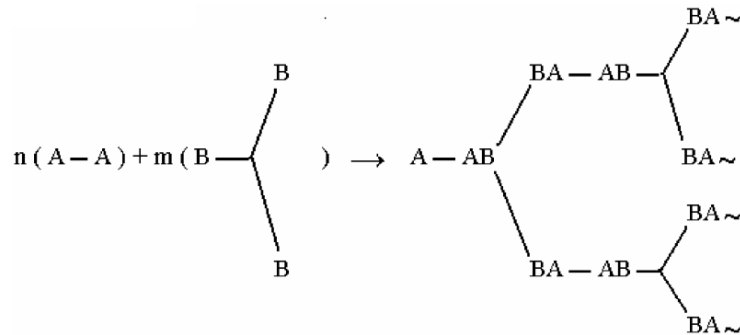


Fig. I.1 : polymère par réaction de polycondensation [4].

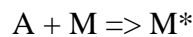
I.3.2 Polymérisation par chaîne (polyaddition)

La polyaddition est une réaction en chaîne dans laquelle un centre actif initial permet la formation de macromolécules par réunion de molécules simples ou monomères [7]. C'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie [8].

La principale caractéristique de cette polymérisation en chaîne est qu'elle se déroule en trois phases. Elles ne se déroulent pas les unes à la suite des autres dans le temps mais on assiste à un mélange des étapes [1] :

- **La première phase est la phase d'amorçage**

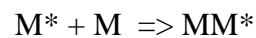
Elle correspond à l'activation d'une molécule de monomère M grâce à un amorceur A. Ainsi le début de l'équation de polymérisation en chaîne est de la forme :



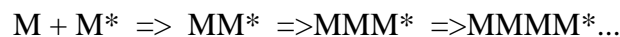
M^* est le monomère activé ou centre actif.

- **La deuxième phase est la phase de propagation :**

Elle correspond à la propagation du centre actif à d'autres monomères. L'activité de ce monomère activé se propage à d'autres monomères :



Ainsi la propagation va être la répétition de cette forme d'équation :



- **La troisième phase est la phase de terminaison :**

Elle correspond à la rencontre d'un polymère ayant un monomère activé en bout de chaîne et d'une espèce qui désactive ce monomère.

I.4 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. La nature chimique des macromolécules est liée à leur origine qui est soit naturelle, soit synthétique [9].

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

I.4.1 Propriétés chimiques des polymères

Au contact des liquides ou des gaz, le comportement des polymères varie suivant leur nature et leur composition ; il peut y avoir diffusion, absorption avec gonflement ou gélification ou dissolution selon l'agressivité des produits en présence. Ceci peut donc causer d'importantes contraintes qui peuvent être catastrophiques pour le matériau.

I.4.2 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.4.2.1 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.4.2.2 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.4.2.3 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 peu déformables contrairement aux élastomères qui sont hautement élastiques.

I.4.3 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 [10].

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 [10].

Les polymères se distinguent généralement par [4] :

- Une masse volumique relativement faible ;
- Un pouvoir d'isolement 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.4.4 Propriétés électriques des polymères

D'une façon générale les propriétés électriques sont liées aux structures moléculaires du polymère, mais il faut quand même tenir compte de [4] :

- La présence de charge ;
- La présence d'adjuvants ;
- L'absorption éventuelle d'humidité ;
- La morphologie du polymère.

I.4.4.1 Rigidité diélectrique

Cette rigidité est influencée par plusieurs paramètres dont les plus importants [4] :

- La structure du polymère ;
- Le temps d'exposition à la haute tension ;
- Présence du vide, bulles, cavités...etc.

I.4.4.2 Propriétés électriques superficielles

La résistance à la décharge superficielle électrique est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le matériau. Pour éviter ce problème ; on le carbonise et le rend conducteur. La résistance superficielle est fortement influencée par l'humidité [4].

I.4.4.3 Résistivité transversale :

La résistivité transversale caractérise le pouvoir isolant du matériau. Pour la majorité des polymères la valeur de la résistivité transversale est supérieure à 10^{12} $\Omega \cdot \text{cm}$ à la température ambiante [5].

I.4.4.4 Résistance au feu

La bonne résistance au feu est une propriété essentielle de ces matériaux, la combustion, si elle a lieu, peut-être plus ou moins rapide selon les natures chimiques de polymères et les charges éventuelles qu'il contient. Certains polymères, comme le PVC non plastifié, sont qualifiés d'auto-extinguibles (des gaz sont émis et empêchent la réaction exothermique d'oxydation de se produire).

I.5 Utilisation des polymères dans l'isolation des câbles électriques

Le champ d'application des polymères est très étendu dans le domaine électrique: condensateurs, lignes de transport d'énergie, câbles de télécommunication, alternateurs, moteurs électriques, systèmes électroniques et composants de puissance embarqués sur satellites... Les avantages que présente L'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique sont : 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. Le Tableau I.1 présente quelques exemples d'utilisation d'isolants organiques solides dans les systèmes de génie électrique.

TAB. I.1 : Exemple de polymères utilisés dans l'isolation électrique

Exemples de polymères isolants	Application
Polyéthylène (PE)	Câbles HT, HF
Polyéthylène réticulé (PR)	Câbles THT
Polychlorure de vinyle (PVC)	Câbles BT
Polypropylène (PP)	Condensateurs de puissance
Polyéthylène téréphtalate (PET)	Condensateurs de puissance
Polyéthylène naphtalène (PEN)	Câbles, condensateurs
Polysulfones, polyéther-éther-cétones (PEEK)	Accessoires électrique automobile
Polyépoxy	Electrotechnique : isolateurs, moteurs
Polyamides	Câbles BT des alimentations des avions

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.5.1 Polychlorure de Vinyle (PVC)

Le polychlorure de vinyle a été découvert par accident à au moins deux occasions au cours du XIX^e siècle, d'abord en 1835 par Henri Victor Regnault et en 1872 par Eugen Baumann. Dans les deux cas, le polymère est apparu comme un solide blanc dans des bouteilles de chlorure de vinyle après exposition à la lumière solaire. En 1926, Waldo Semon a développé

une méthode de plastification du PVC en le mélangeant avec des additifs. Ceci a permis de rendre le matériau plus flexible et plus facile à fabriquer.

La large utilisation du PVC dans la fabrication des câbles moyenne tension, comme isolant et matériau de gaine de protection revient, d'une part à son faible coût de revient et d'autre part à ses bonnes qualités d'isolation électrique. La souffrance de ce matériau de la mauvaise stabilité thermique [11], freine son utilisation comme un isolant dans les câbles HT et THT [2].

I.5.1.1 Présentation du PVC :

Le polychlorure de vinyle ou chlorure de polyvinyle est un polymère thermoplastique de grande consommation, 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 [12]. 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 [12] 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 [14]. Quant aux plastifiants, leur rôle est de rendre le matériau moins cassant en donnant une souplesse permanente aux produits finis [13] 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 [13], est assurée par l'ajout des charges telles que : le carbonate de calcium, le kaolin calciné et la silice [12]. 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 [13].

I.5.1.2 Propriétés du PVC

a. Propriétés physico-chimiques

- La masse volumique des compositions du PVC varie entre 1 et 2 g/cm³ 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) [14] ;
- Le PVC rigide résiste bien aux agents chimiques inorganiques [2] ;
- 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 [14].

b. Propriétés électriques :

- Le facteur de pertes diélectriques à 50Hz et 20°C est élevé, il est de l'ordre de 15×10^{-3} ;
- La constante diélectrique à 50Hz et 20°C est élevée, elle est de l'ordre de 3,4 ;
- La résistivité transversale est aussi élevée, elle est de l'ordre de $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ [14].

c. Propriétés mécaniques :

- Le PVC a une bonne résistance à la traction qui est de l'ordre de 5.5 à 6 kg/mm² 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 [15] ;
- Les propriétés mécaniques sont fortement dépendantes de la température. Au-dessus de 140°C à 150°C, le PVC perd toutes ses propriétés mécaniques [14].

I.5.1.3 Utilisation du PVC dans l'isolation des câbles électriques

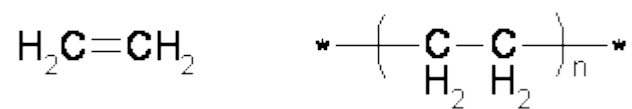
Le PVC est utilisé comme isolant et gaine de protection dans les câbles électriques :

- Dans les locaux où on peut avoir un risque d'explosion ;
- Dans les installations électriques nécessitant une protection élevée contre les risques d'incendie (centrales thermiques et nucléaires), contre les hydrocarbures et les agents chimiques ;
- Dans les équipements électriques de navires et de voitures ;
- Pour l'alimentation des moteurs moyenne tension.

I.5.2 Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène résulte de la polymérisation du gaz éthylène C₂H₄, en présence de catalyseur, dans certaines conditions de température et de pression [16]. C'est un important polymère de synthèse, avec le PP et le PVC. Sa température de transition vitreuse est très basse (voisine de -110 °C) et son point de fusion peut selon les grades 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.5.2.1 Polyéthylène basse densité (PEBD)

Le polyéthylène basse densité (ou à haute pression) est réalisé suivant un procédé à haute pression. L'éthylène est injecté en continu dans le réacteur par l'intermédiaire d'hyper-compresseurs. La pression de polymérisation se situe entre 1000 et 5000 bars et la température entre 150 et 400 °C [5]. Différents catalyseurs sont employés. Grâce à sa structure non polaire, le PEBD possède de bonnes propriétés diélectriques [17].

I.5.2.2 Polyéthylène haute densité (PEHD)

Le polyéthylène haute densité est dit aussi "basse pression" est obtenu par polymérisation sous des conditions moins sévères que celle de PEBD. La pression de polymérisation est inférieure à 50 bars et la température est voisine de 100°C. La réaction s'effectue en présence de catalyseurs. Sa densité est de 0.96 g/cm³ et son taux de cristallinité de 93%. Sa température de fusion est comprise entre 130°C et 145°C [18,19]. Les chaînes de PEHD sont beaucoup plus alignées que celles de PEBD, ce qui explique la valeur élevée de sa densité [2].

I.5.3 Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)

I.5.3.1 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 [16].

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 [20].

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.5.3.2 Réticulation du PRC avec le peroxyde

La réticulation peut être schématisée comme suit [2] :

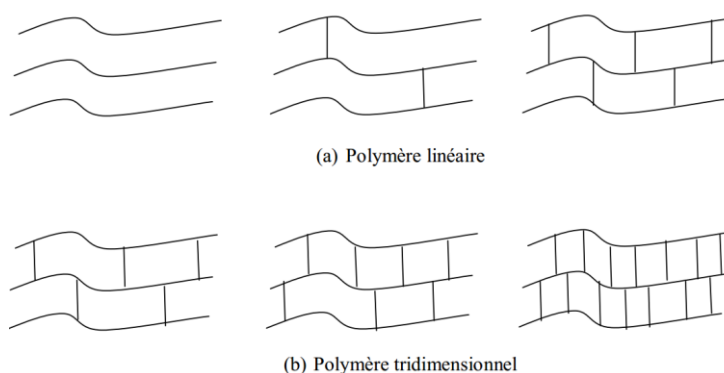


Fig. I.2 : Processus de réticulation [2].

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) [20]. Ce dernier est un matériau organique cristallin dont la formule chimique générale est de type **R-O-O-R**, comme la formule suivante [2] :

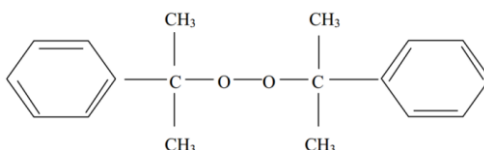
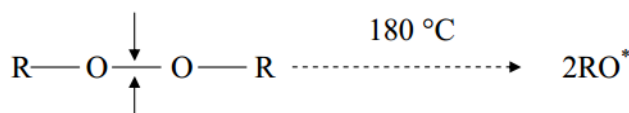


Fig. I.3 : Molécule du peroxyde de dicumyle [16].

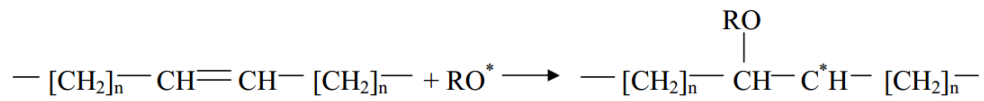
La concentration du peroxyde dans le matériau joue un rôle très important dans le processus de formation des pontages de réticulation. D'après les travaux de M. Celina et G. A. George, la teneur optimale du peroxyde est de 2 % à 3 %. Une augmentation de la quantité de peroxyde au-delà de 3 % n'a pratiquement aucune influence sur la structure du matériau [21].

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 (environ 2 % en teneur). 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 [16].



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 [5] :

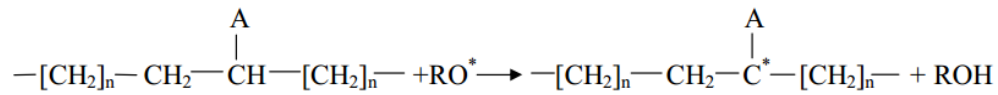
a) Attaque sur des doubles liaisons



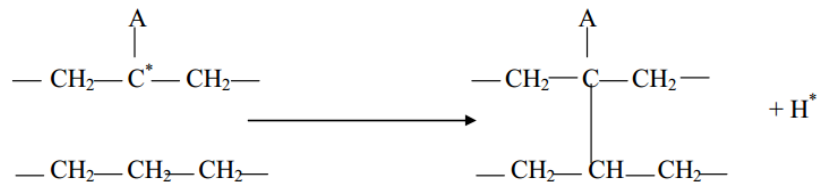
• Pontage sur deux chaînes adjacentes :



b) Attaque sur un atome d'hydrogène



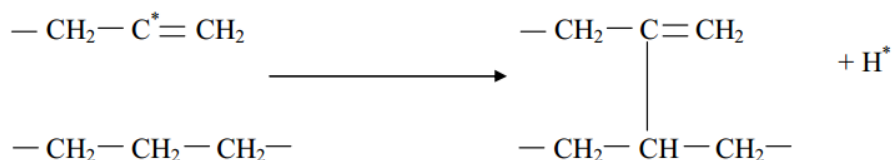
• pontage



c) Attaque sur un atome d'hydrogène allylique



• Pontage :



I.5.3.3 Mesure du degré de réticulation :

Le taux de réticulation est caractérisé par le nombre de pontages qui prennent la place des groupes réactifs (doubles liaisons, atome d'hydrogène allyliques,...). Le processus s'arrêtera lorsque la totalité des groupes réactifs sera consommé. Le taux de réticulation peut être déterminé par différentes méthodes [2] :

- Mesure de la solubilité dans un solvant approprié ;
- Mesure de la déformation à chaud sous contrainte « Hot-Set-test » ;
- L'analyse d'enthalpie différentielle qui permet de mettre en évidence la relation existant entre la température de fusion cristalline du polyéthylène et son taux de réticulation.

I.5.3.4 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 [5].

b. Propriétés électriques

- Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celle du PEBD. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE, ces arborescences étant des chemins de PE calciné qui se forment au sein de l'isolant sous l'effet d'un champ électrique. Elles sont, en général, initiées par une impureté, une fissure, une bulle, ou une aspérité à l'interface des semi-conducteurs. Elles sont des causes importantes de claquage des câbles ;
- Le PRC est un matériau moins rigide que le PE pour une température basse, et le gradient de potentiel maximal admissible avec le PRC est 8 kV/mm [5].

c. 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 [5].

d. 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 [5].

I.5.3.5 Avantages du PRC sur le PE

Dans l'optique des usages électriques, le PE est apprécié pour sa légèreté, sa stabilité chimique, sa bonne résistance à l'ozone, sa flexibilité, son absence de fragilité aux basses températures et ses grandes qualités diélectriques dans la gamme des matières plastiques connues. Néanmoins, il est à noter quelques points faibles [16] :

- Une température de ramollissement pâteux suivie de fusion, relativement basse, ce qui lui confère une mauvaise tenue en cas de court-circuit du câble à isoler ;
- Sous l'effet d'une contrainte mécanique, une tendance à fluer lentement et d'autant plus que la température s'élève, pour s'écouler franchement au-dessus de 120°C ;
- Une médiocre résistance à l'action de l'oxygène de l'air, au vieillissement thermique et aux rayons UV. Ces inconvénients sont toutefois efficacement atténués par l'incorporation d'antioxydants et de noirs de carbone ;
- L'aptitude à se fissurer au contact de certaines matières organiques telles que les liquides détergents.

La réticulation du PE a pour conséquence les principaux avantages suivants [5] :

- La réticulation confère au PEBD des propriétés mécaniques améliorées et en particulier une meilleure résistance au fluage (déformation à chaud) ;
- La réticulation fait disparaître complètement la tendance qu'avait la résine à se fissurer au contact d'atmosphères agressives du type oxydant ;
- Le PRC possède une meilleure résistance à la fissuration sous l'effet de contraintes mécaniques extérieures ;
- Du fait de la réticulation, la température d'utilisation à la corde est de 90°C et la température tolérée en court-circuit est de 250°C [13] ;
- Le PRC chargé de noirs de carbone appropriés ne propage la flamme que difficilement ;
- Les propriétés thermiques et électriques du PRC ne sont pas très différentes de celles du PE. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE.

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, 19 Juin 2007.
- [3] S. FUSESSERRY, «Polyéthylènes basse densité», Techniques de l'Ingénieur, Publication A 3310, 1996.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] MICHEL FONTANILLE ET YVES GNANOU «Chimie et physico-chimie des polymères» (2^eet 3^ecycles – Ecoles d'ingénieurs), édition DUNOD, Paris, 2002.
- [7] 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.
- [8] A.MEDJDOUB « Essais de systèmes de câble et caractérisation des matériaux utilisés dans l'isolation des câbles de haute tension ». Thèse de Magister, Université A. Mira de Béjaia, Avril 2010 ;
- [9] P. WEISS ; « la chimie des polymères », Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone, Date de création du document 2009-2010.
- [10] www.techno-science.net Posté par Publication le Dimanche 20 Février 2005.
- [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.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.
- [13] 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 ;
- [14] M.NEDJAR « Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Décembre 1991.
- [15] D.AUSSEUR « Polychlorure de vinyle », Technique de l'Ingénieur, A 3325, 1990.
- [16] Y.MECHERI « Influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Mai 2008.
- [17] E. PESCHKE, R. VON-OLSHAUSSEN, «Cable Systems for high and Extra-high Voltage», Erlangen and Munich, GmbH, Publicis MCD Verlag, 1999.

- [18] H.K. KAUSCH, N. HEYMANS, C.J. PLUMMER, P. DECROLY, «Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques, principe de mise en œuvre», Traité des matériaux, Tome N° 14, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2001.
- [19] S.O. HAN, D.W. LEE, O.H. HAN, «Thermal degradation of Cross linked high density polyethylene», Polymer Degradation and Stability, Vol. 63, pp. 237-243, 1999.
- [20] 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 Magister, ENP Alger, Octobre 1998.
- [21] M. CELINA, G. A. GEORGE, « Characterisation and Degradation Studies of Peroxide and Silane Cross-linked Polyethylene» Polymer Degradation and Stability, Vol. 48, pp. 297-312, 1995.

Chapitre II

Vieillissement électrique et thermique des polymères

Nous nous intéressons dans ce chapitre aux interactions entre les différents facteurs de vieillissement : d'une part la contrainte thermique (vieillessement thermique), d'autre part la contrainte électrique (vieillessement électrique), qui constituent les deux plus importants facteurs de dégradation des câbles électriques, et à la méthodologie d'essai et de prévision des durées de vie dans les conditions d'utilisation.

II.1. Introduction

La CEI [1] et IEEE [2] 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 [3-4]. 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 [5]. Le processus de vieillissement ou de dégradation d'un isolant solide met souvent en jeux des facteurs intrinsèques (les transformations chimiques et physiques des matériaux, charges d'espace piégées,...) et des facteurs extrinsèques (cavités gazeuses, contaminations et impuretés, hétérogénéités,...) [5-6].

Les facteurs intrinsèques sont associés à la structure du matériau lui-même. Ils se présentent sous forme :

- De changements chimiques comme l'oxydation et l'hydrolyse.
- De changements physiques telles la recristallisation et cristallisation secondaire.
- De transport et piégeage : les piégeages de charges sont présents dans l'isolant sous forme d'atomes d'impuretés, de défauts physiques, et de différents groupes chimiques comme les groupes carbonylés formés durant l'oxydation du matériau [7].

Les principaux facteurs extrinsèques dans les câbles à isolation synthétique sont :

- **Cavités gazeuses** : elles sont présentes au sein de l'isolant lui-même ou à l'interface isolant/écrans semi-conducteurs. Si le champ électrique, qui est l'une des contraintes qui se présente lors du fonctionnement des câbles, à travers la cavité dépasse la rigidité diélectrique du gaz inclus dans la cavité, une décharge partielle peut avoir lieu. Si la décharge est suffisamment intense, elle conduit à la dégradation successive de l'isolant et forme éventuellement une arborescence électrique endommageant ainsi l'isolation électrique [8,9].
- **Contaminations et impuretés** : les impuretés sont généralement dispersées dans l'isolant sous forme de particules conductrices ou non. On les retrouve aussi en quantités importantes dans l'écran semi-conducteur et à l'interface isolant/semi-conducteur. La présence de ces

impuretés augmente le champ électrique local (différence de permittivité entre deux milieux) et donne naissance à une arborescence électrique [7].

• **Autres charges additives** : la non-uniformité de la dispersion des charges additives, comme les antioxydants ou les charges renforçatrices, présente une classe de facteurs extrinsèques du vieillissement [7].

Fukuda et *al.* [10] 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 [7].

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 [11].

II.2 Vieillessement 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 [11]. 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 [12].

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) [13;14].

II.2.1 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 [15,16, 17].

Pour les matériaux à constitution unique (comme PE, PRC,...), un certain nombre de processus physiques peuvent affecter leurs propriétés. Cela peut comprendre le ramollissement du matériau au-delà de sa température de transition vitreuse ou au-delà du point de fusion de sa partie cristalline [3]. Le processus physique peut résulter [7] :

- de modification de la configuration spatiale des macromolécules (cristallisation secondaire, relaxation,...) ;
- de phénomènes de surface (fissuration en milieu tensioactif) ;
- 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) [11].

II.2.1.1 Processus physique sans transfert de masse

II.2.1.1.1. Vieillessement par chocs thermiques

Les chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle [7]. 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 [17,18].

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 [15,16].

II.2.1.1.2. Vieillessement 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 [11] 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 [16,19].

Le matériau perd de l'énergie au cours de son vieillissement physique et récupère l'énergie perdue dès qu'il est chauffé au-dessus de sa transition vitreuse [11].

II.2.1.1.3 Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif

En milieu tensioactif, les polymères et plus particulièrement le polyéthylène sont le siège de fissurations dans les zones les plus contraintes. Le phénomène de fissuration est lié au développement de forces de tension superficielles à l'interface polymère-liquide. Il dépend de plusieurs paramètres à savoir la contrainte mécanique, la température et la tensio-activité du liquide dont la viscosité détermine la vitesse de pénétration dans les fissures.

II.2.1.2 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) [7] comme il est illustré à la figure II.1.

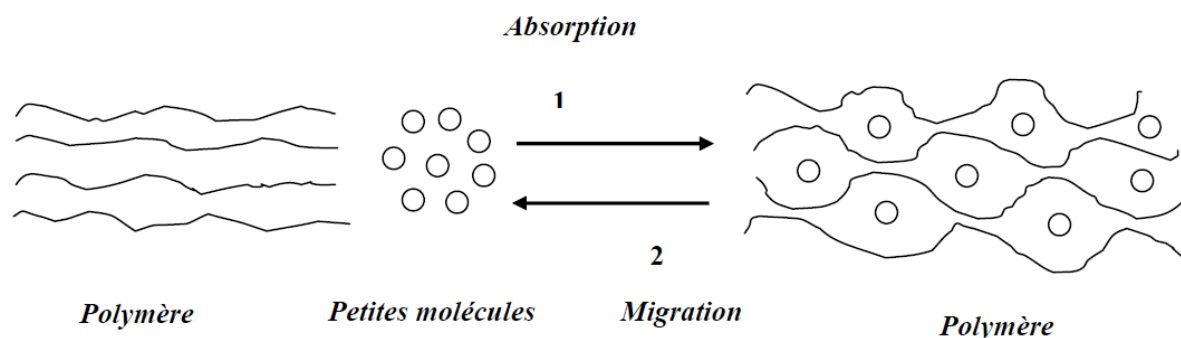


Figure II.1. Schématisation des phénomènes de transfert de masse [11].

Le nombre de petites molécules susceptibles de s'installer dans le réseau macromoléculaire dépend du nombre de sites (accessibles) portés par les macromolécules, capables d'établir des interactions avec elles et donc les retenir. Les phénomènes de transfert de masse peuvent être appréhendés quantitativement dans le domaine de la pratique par des mesures gravimétriques (figure II.2) [11].

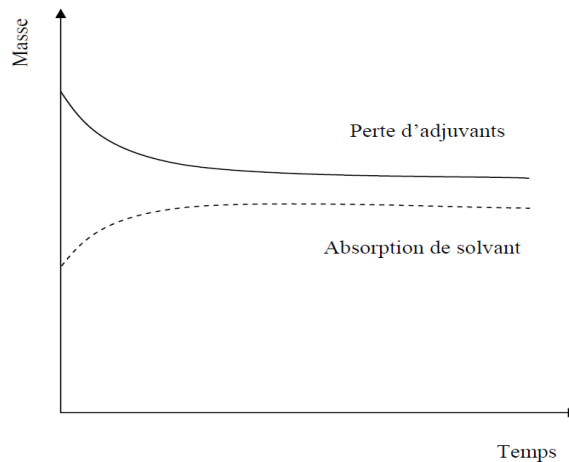


Figure II.2. Allure des courbes de variation de masse dans les deux sens de transfert [16].

II.2.1.2.1 Vieillessement 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 [20]. Le solvant pénètre dans le polymère selon une loi de diffusion qui peut varier avec le cas étudié. Deux cas se présentent [11] :

- **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.

La pénétration du solvant dans un polymère est influencée par les facteurs suivants [7] :

- **La structure chimique du motif structural élémentaire** : C'est elle qui détermine essentiellement l'affinité du polymère pour le solvant considéré.
- **la morphologie** : Les zones cristallines peuvent être considérées comme imperméables. La solubilité globale décroît donc avec le taux de cristallinité.
- **Le taux de réticulation** : La pénétration de solvants est d'autant plus aisée que le taux de réticulation est faible, sauf si la réticulation fait apparaître de nouveaux groupes fonctionnels ayant une affinité élevée pour le solvant.

III.2.1.2.2 Vieillessement 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 [7].

Le transfert de ces petites particules s'effectue en trois mécanismes principaux :

a. Evaporation

C'est le cas le plus fréquemment rencontré dans les applications électriques (isolation des câbles). Les molécules de plastifiant à la surface peuvent donc passer dans l'atmosphère, d'où la naissance d'un gradient de concentration dans l'épaisseur du matériau. L'apparition de ce gradient entraîne la diffusion du plastifiant du cœur vers la surface conduisant à sa disparition progressive [16]. La capacité d'évaporation du plastifiant est directement liée au poids moléculaire de ce dernier [22]. Le phénomène d'évaporation se manifeste dans la dégradation des polymères utilisés dans l'isolation des câbles sous la forme d'une perte de masse [23,24] et affecte considérablement les propriétés mécaniques du polymère [25-26].

b. Extraction

Les phénomènes d'extraction sont à prendre en compte dans les cas de contact entre un polymère et un milieu liquide. Ici, c'est la stabilité de l'adjuvant dans le liquide qui est susceptible de jouer le rôle le plus important et qui sera en tout cas le premier paramètre à prendre en compte lors du choix du matériau [27,28].

c. Exsudation

L'exsudation n'est que le résultat d'une évolution du matériau vers l'équilibre. Dans certains cas, le mélange (polymère + adjuvants) peut être déstabilisé par un corps tiers provenant de l'environnement [27,28].

• 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 [16] :

- 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.

II.2.2 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 [16]. Les principaux types de réactions intervenant lors du vieillissement chimique sont les suivants :

II.2.2.1 Coupure de chaînes statistiques

Les coupures de chaînes statistiques se produisent sur des sites distribués de manière aléatoire dans le réseau macromoléculaire [28]. Elles peuvent être schématisées de la manière suivante (figure II.3) :

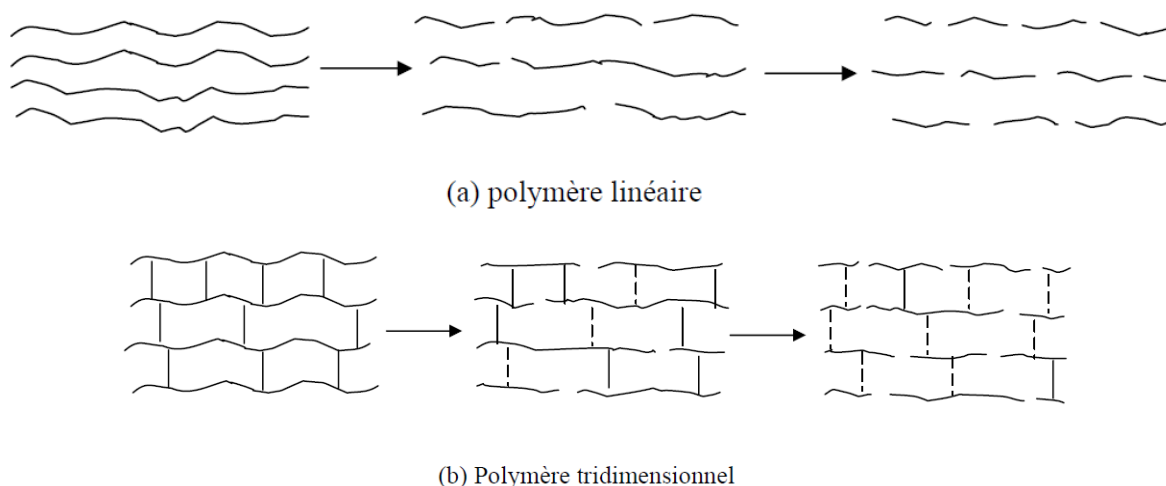


Figure II.3. Coupures de chaînes statistiques [28]

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 [16].

II.2.2.2 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 [16].

II.2.2.3 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 [33].

Les propriétés physiques des matériaux sont peu affectées à l'exception la solubilité qui diminue. Au plan des propriétés mécaniques, la réticulation conduit à une augmentation du module d'élasticité (figure II.6), de la contrainte à la rupture et de la température de ramollissement.

Dans le cas des polymères initialement linéaires, une réticulation modérée peut également conduire à une augmentation de l'allongement à la rupture [34,35]. 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 [16].

II.2.2.4 Oxydation

Le vieillissement thermique des polymères conduit à une oxydation de chaînes carbonées entraînant ainsi une dégradation des propriétés électriques [36,37] et mécaniques [38]. L'oxydation se manifeste au cours du vieillissement sous la forme d'une accumulation des groupes carbonyles (acides, cétone, aldéhydes,...) [39]. 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 [40].

Plusieurs facteurs affectent le phénomène d'oxydation des polymères, on peut citer : la non saturation du polymère, la présence des ions métalliques au cours de processus de fabrication, la présence des groupes chimiques tels que les groupes carbonyles, les hydroperoxydes, les catalyseurs et les antioxydants, avec ainsi la structure et la morphologie du matériau (densité, ramifications, cristallinité,...) [41].

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 [42].

II.3 Vieillessement électrique des câbles

La rigidité diélectrique des isolants polymères est naturellement limitée, comme celle de tout matériau. En outre la rigidité varie dans le temps et dépend des différents mécanismes possibles de dégradation des polymères sous le champ électrique [45].

Aucun isolant ne résiste à un champ électrique de plus de 10^3 kV/mm. Si un électron parvient à s'accrocher sur une molécule neutre, ce champ est suffisant pour ioniser le radical anion, puis accélérer l'électron, qui ionise des molécules et déclenche une rupture par avalanche. Ce processus intervient très rapidement, en $10^{-9} - 10^{-8}$ s dès que les conditions de claquage sont remplies (valeur de champ électrique) [45].

Les mauvais isolants claquent en général par effet thermique. Le courant qui passe chauffe le matériau, ce qui augmente sa conductivité, donc le courant,...etc. La rupture intervient par emballement thermique ce qui nécessite un temps compris entre 10^{-8} – 10^{-4} s.

Un matériau bon isolant électrique peut être peu résistant à la propagation des fissures. Dans ce cas, les forces électrostatiques peuvent provoquer la propagation d'une fissure jusqu'au moment où le champ provoque la rupture par avalanche (rupture électromécanique). En pratique, les défaillances proviennent du vieillissement du matériau sous l'action du champ électrique [45].

Les décharges partielles sont une cause habituelle du vieillissement des isolants polymères en champ alternatif. Les arborescences électriques sont une manifestation analogue du vieillissement sous champ mais plus lente à s'établir. Ces deux processus n'interviennent qu'à champ élevé supérieur à 10kV/mm [7].

Deux autres mécanismes interviennent pour expliquer, à long terme, les défaillances des isolants polymères : l'oxydation progressive du matériau et la diminution de la masse moléculaire des chaînes de polymère, ce qui augmente en général la conductivité ionique. En présence d'humidité ou de vapeur d'eau, les champs électriques, même relativement faibles, provoquent l'apparition d'arborescences humides qui croissent jusqu'au claquage [45].

Dans le cas pratique des câbles isolés aux matériaux synthétiques, le vieillissement électrique est une combinaison particulière de la conception des matériaux, des procédés de fabrication, des impuretés, de la quantité des interfaces et de la structure du matériau [46].

Un modèle de vieillissement électrique a été développé en 1984 par A.K. Jonscher et R.Lacoste [54]. Il s'agit d'un concept de percolation. Ce concept impliquerait que l'arborescence croît de façon préférentielle au travers des zones où se trouvent des vacuoles en voie d'élargissement par décharges partielles. Les différentes étapes du processus sont [47] (figure II.7) :

. **Etape 1** : Le matériau est en équilibre sous champ faible ou nul. En moyenne, le champ électrique n'a aucune action sur la structure : s'il y a création de défauts, ils le sont sous forme métastable. La structure peut donc revenir à son état initial.

. **Etape 2** : Le champ est suffisant pour créer de nouveaux défauts à partir de défauts initiaux de façon irréversible. Ce processus entraîne une augmentation de la densité de charges au sein du matériau.

. **Etape 3** : Sous l'action combinée du champ électrique et du temps, la densité de défauts est telle que la probabilité pour qu'ils se groupent en amas n'est pas nulle.

. **Etape 4** : Les porteurs dont le libre parcours moyen est de plus en plus grand, au sein de ces amas, sont susceptibles d'acquérir des énergies importantes donc de produire des défauts de dimensions plus importantes qui peuvent apparaître sous forme d'arborescences par exemple.

.**Etape 5** : La rupture se fait selon un mécanisme de percolation entre les amas des défauts.

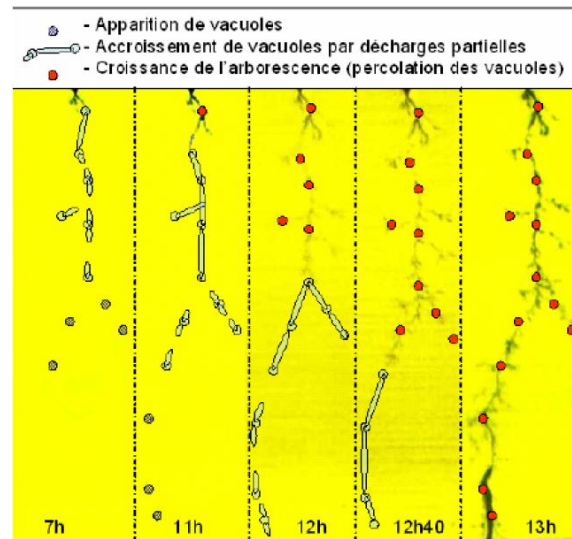


Fig.II.4 : Arborescence électrique observée dans le volume d'une résine époxy en configuration pointe/plan à laquelle a été superposée la théorie de la percolation de A.K. Joncher & R. Lacoste [48].

Ce modèle n'a pas reçu pour l'instant de développements analytiques donnant lieu à une expression quantitative du champ de rupture ou de durée de vie. Remarquons que c'est à l'étape 4 que les arborescences sont susceptibles d'apparaître. Les signes précurseurs de la rupture sont susceptibles de se développer au cours des étapes antérieures [49].

Au fil des années, plusieurs théories ont été développées dans le but d'avoir une bonne compréhension des phénomènes de dégradation sous le champ électrique. Notons que ces différentes théories sur le vieillissement électrique, qui coexistent à ce jour, ont toutes un dénouement commun : la dégradation électrique commence dans les zones qui présentent des densités importantes de contaminations, d'impuretés et de vacuoles [48,50]. La différence entre ces théories réside dans le mécanisme qui entraîne le processus de la rupture.

II.4. Endurance thermique des matériaux polymères

II.4.1 Introduction

L'endurance thermique des matériaux isolants électriques, c'est-à-dire leurs comportements lors d'une exposition prolongée à température élevée a toujours été le centre d'intérêt des chercheurs dans le domaine de l'isolation électrique [57,58-59]. En effet, une classification des matériaux en classe de température fut établie en vue de connaître leur tenue thermique [11].

Les méthodes d'essais d'endurance thermique sont destinées à déterminer les changements survenus dans les propriétés des matériaux par suite d'une longue exposition à une contrainte élevée, Cette contrainte peut être la température, la tension, le champ électrique

ou le rayonnement, de façon à s'assurer que le matériau présente tout au long de sa vie, les propriétés minimales requises dans son emploi [60,62].

La caractéristique du vieillissement, ou la stabilité à long terme des isolants solides doit permettre de répondre à l'une des questions simples suivantes [61] :

- Pendant quel temps t , peut-on maintenir un matériau isolant sous une contrainte C_0 ?
- Si l'on désire une durée de maintien ou durée de vie donnée t_0 , quelle contrainte maximale est autorisée ?

Pour y répondre, il suffit de connaître la relation contrainte – temps [61] (figure II.5).

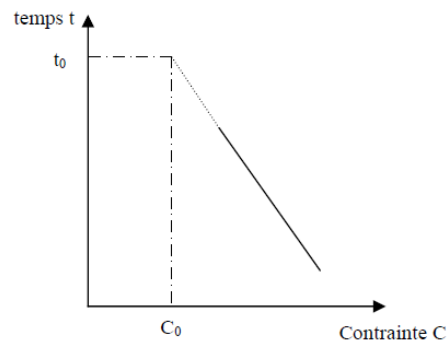


Fig.II.5 : Variation du temps de vieillissement en fonction de la contrainte appliquée.

Généralement, on détermine les variations d'une propriété du matériau en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ de la contrainte C [61] (figure II.6).

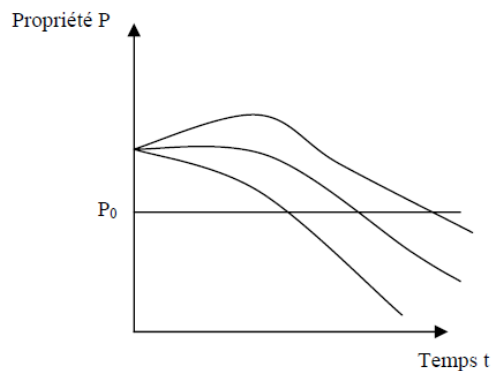


Fig.II.6 : Variation de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour les différentes valeurs de la contrainte C .

Si l'on fixe une valeur de la propriété P_0 choisie en fonction des critères d'emploi, on obtient la relation $C(t)$ relative à la valeur de la propriété P_0 . Cette courbe est appelée courbe de durée de vie [7].

La propriété peut être électrique (rigidité diélectrique, résistivité transversale,...), mécanique (allongement à la rupture, résistance à la traction,...) ou une perte de masse [7].

II.4.2 Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides

Les travaux relatifs à l'endurance thermique des isolants solides ont pour objet la mise au point de méthodes générales de détermination de leur stabilité. Les essais consistent à soumettre les matériaux à l'action prolongée de la chaleur, puis à déterminer la variation d'une ou plusieurs de leurs propriétés en fonction du temps de vieillissement, ce qui permet de tracer les caractéristiques $P = f(t)$ [63] (figure II.7).

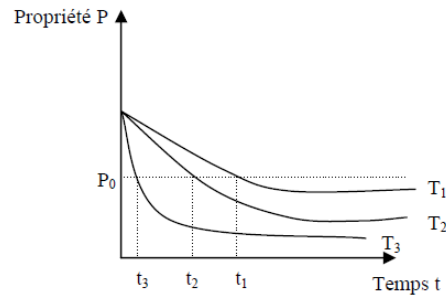


Fig.II.7 : Variation de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes températures.

Le choix d'une valeur limite de propriété P_0 permet de déterminer les temps pour lesquels cette limite est atteinte ou durée de vie, et ceci pour plusieurs températures de vieillissement. En répétant les essais on peut tracer la courbe d'endurance thermique ou durée de vie $t = f(T)$ [63] (figure II.8).

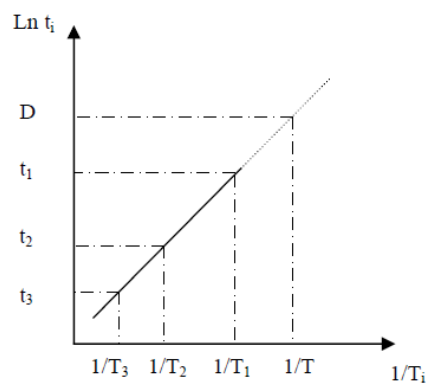


Fig.II.8 : Variation du logarithme de la durée de vie des polymères en fonction de l'inverse de la température.

Le but de ces essais est de simplifier les résultats et de les exploiter sous formes abrégées représentant le comportement thermique du matériau. Deux formules sont proposées [62,64], il s'agit :

- d'une part du **profil d'endurance thermique** ; celui-ci est composé de deux nombres égaux aux températures, exprimés en °C, qui correspondent sur le graphique d'endurance thermique à 20000h et 5000h.

- d'autre part, dans une formule encore plus abrégée, de l'**indice de température** ; celui-ci est le nombre égal à la température, exprimé en °C, qui correspond sur le graphique d'endurance thermique, à un temps donné, normalement égal à 20000h. Certains chercheurs prennent ce temps égal à 25000h et même 40000h [65,66]. Les matériaux isolants solides sont classés suivant leur indice de température.

II.4.3 Choix des critères de dégradation (critère de fin de vie)

La publication CEI 216 [60] donne deux façons de définir le critère de dégradation, toutes les deux étant également valables :

- Par le pourcentage d'augmentation ou de diminution de la valeur initialement mesurée pour la propriété qui est généralement 50% de la valeur initiale de la propriété mécanique ou électrique. Pour la perte de masse, le critère peut être choisi égal à 3% de la valeur initiale comme dans le cas d'étude du vieillissement de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) [70].
- Par une valeur fixe de la propriété. Cette valeur peut être choisie en fonction des exigences normales en service.

II.4.4 Vitesse de dégradation

Dans un domaine expérimental restreint, on peut considérer que la vitesse de dégradation V des polymères varie avec la température de vieillissement T selon la loi d'Arrhenius. Cette vitesse est donnée par la relation suivante [27] :

$$V = V_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

Avec :

E : énergie d'activation du phénomène.

R : constante des gaz parfaits.

V_0 : constante.

T : température absolue.

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

BIBLIOGRAPHIES

- [1] CEI 505, «Evaluation and identification of electrical insulation systems, Part 1: General principals and guide to applications», 1975.
- [2] IEEE Standard 1064-1991, «Guide for multifactor stress functional testing of electrical insulation systems», 1991.
- [3] B. FALLOU, C. STEVENS, A.G. DAY, «Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants», CIGRE, Groupe 15-05, Septembre 1982.
- [4] J. GOSSOT, «Les matières plastiques. Fabrication et technologie», Edition Dunod, Paris, 1977.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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, Juin 2007.
- [8] M. Gamez-Garcia, R. Bartnikas, M.R. Wertheimer, «Synthesis reactions involving XLPE subjected to partial discharges», IEEE, Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-22, pp. 199-205, 1987.
- [9] M. Gamez-Garcia, R. Bartnikas, M.R. Wertheimer, «Modification of XLPE exposed to partial discharges at elevated temperatures», IEEE, Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-25, pp. 688-692, 1990.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] A.L. NEMMOUR et A. KHELIFI « Utilisation des réseaux de neurones au vieillissement des polymères utilisés dans les câbles MT ». Projet de Fin d'Etudes, ENP d'Alger, promotion Juin 1999.
- [13] N. NANDAKUMAR, «Ageing and stabilisation of PVC electrical insulation... a review», Popular Plastics, pp. 3-9, May 1982.
- [14] M. CHATIN, «Plastiques», Techniques de l'Ingénieur, Publication A3000, 1986.
- [15] J. VERDU, «Comportement à long terme», Techniques de l'ingénieur A 3150, A 9 I, 1980.
- [16] J. VERDU, «Vieillessement des plastiques», AFNOR technique, Edition Eyrolles, Paris 1984.
- [17] J .P. TROTIGNON, «Précis de matières plastiques - Structures, propriétés, mise en oeuvre et normalisation», Edition Nathan, 1982.
- [18] J. VERDU, «Vieillessement physique», Techniques de l'Ingénieur, Publication A3150, 1980.
- [19] L. C. E. STRUIK, «Physical Aging in Amorphous Polymers and other Materials», Elsevier, Amsterdam, 1978.

- [20] J. VERDU, «Effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques», EDP Sciences, Echanges physique-Industrie, N°. 5, pp. 19–23, 2000.
- [21] H. BURELL, B. IMMERGUT, «Polymer Handbook», Chap. IV, Wiley Interscience, New York, pp. 341–388, 1968.
- [22] A.MARCILLA, S. GARCIA, J.C. GARCIA-QUESADA, «Study of the migration of PVC plasticizers», Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 71, pp. 457-463, 2004.
- [23] I.JAKUBOWICZ, N. YARAHMADI, T. GEVERT, «Effects of accelerated and natural ageing on plastized polyvinyl chloride (PVC) », polymer Degradation and Stability, Vol. 66, pp.415-421, 1999.
- [24] A.JIMÉNEZ, L. TORRE, J.M. KENNY, «Thermal degradation of poly(vinyl chloride) plastisols base on low-migration polymeric plasticizers», Polymer Degradation and Stability, Vol. 73, pp. 447-453, 2001.
- [25] A.BOUBAKEUR, M. NEDJAR, R. KHAILI, «Etude des propriétés électriques du polychlorure de vinyle avant et après un vieillissement thermique», Numéro Spécial AJOT Journal, Proceeding of CEA'94, Vol.1, Alger, Mars 1995.
- [26] A.BOUBAKEUR, M. NEDJAR, R. KHAILI, «Influence du vieillissement thermique sur les propriétés des câbles isolés au PVC», 1^{ère} Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT), Béjaia, 1995.
- [27] J. VERDU, «Comportement à long terme», Techniques de l'Ingénieur, Publication A3150, 1975.
- [28] J. VERDU, «Vieillessement chimique», Techniques de l'Ingénieur, Publication A3151, 1980.
- [29] J. P. MERCIER, E. MARECHAL, «Chimie des Polymères - Synthèse, Réaction, Dégradation», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1988.
- [30] M. FONTANILLE, Y. GNANOU, «Chimie et physico- Chimie des Polymères», 2ème et 3ème cycles, Ecole d'ingénieurs, Edition Dunod, Paris 2002.
- [31] H. SAWADA, «Depolymerization», Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Wiley-Interscience, Vol. 4, pp. 719, New York, 1986.
- [32] S. STIVALA, J. KIMURA, S. M. GABAY, «On Degradation and Stabilization of Polyolefins», Ed. N.S. Allen, Applied Science Publishers, pp. 63, London, 1984.
- [33] X. BUCH, «Dégradation thermique et fluage d'un adhésive structural époxyde», Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2000.
- [34] M. NEDJAR, «Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PVC utilisé dans l'isolation des câbles de H.T», Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Décembre 1991.
- [35] M. NEDJAR, A. BOUBAKEUR, A. BEROUAL, M. BOURNANE, «Thermal aging of Polyvinyl Chlorideused in electrical insulation», Annales de Chimie, Science des Matériaux, Vol. 28, pp. 97-104, 2003.
- [36] A.T. BULINSKI, S.S. BAMJI, R.J. DENSLEY, «Influence of the oxidation on water treeinitiation and growth in XLPE cables», IEEE, Proceeding of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 422-426,1989.
- [37] H.M. BANFORD, R.A. FOURACRE, A. FAUCITANO, A. BUTTAFAVA, «Correlation of dielectric behaviour with chemical structure in aged polypropylene», IEEE, Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 385-390, 1994.

- [38] V. LANGLOIS, L. AUDOUIN, J. VERDU, M. MEYER, «Vieillessement thermique du polyéthylène réticulé», Journées d'études des polymères, JEPO18, Groupement Français d'études et d'applications des polymères (G.F.P), Septembre 1990.
- [39] J.P. CRINE, H.ST. ONGE, «Evaluation of ageing in transmission and distribution extruded dielectric cables», R.G.E., N°3, Mars 1988.
- [40] 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.
- [41] J.V. GULMINE, L. AKCELRUD, «Correlation between structure and accelerated artificial ageing of XLPE», European Polymer Journal, Vol.42, Issue 3, pp. 553-562, March 2006.
- [42] 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.
- [43] A.RIVATON, S. CAMBON, J.-L. GARDETTE, «Radiochemical ageing of ethylene propylenediene elastomers. 4. Evaluation of some anti-oxidants», Polymer Degradation and stability, Vol. 91, pp. 136-143, 2006.
- [44] F. OLDERVOLL, E. ILDSTAD, «Space charge, oxidation and morphology changes in Low Density Polyethylene during high voltage DC ageing», IEEE, Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation, pp. 477-480, Anaheim, CA USA, April 2-5, 2000.
- [45] J.-F. FAUVARQUE, «Polymères pour isolants électriques», CNAM, pp. 273-318, Paris, 1993.
- [46] A.MEDJDOUB, «Influence des vieillissements thermique et électrique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans les câbles de moyen tension», Thèse de Magister, Université de Bejaia, 1997.
- [47] A.K. JONSCHER, R. LACOSTE, «On a cumulative model of dielectric breakdown insolds», IEEE, Transaction, on Electrical Insulation, Vol. EI-19, N°6, pp. 567-577, December 1984.
- [48] O. GALLOT-LAVALLEE, «Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension», Thèse de Doctorat ès sciences, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2004.
- [49] C. LAURENT, «Contribution à l'étude des mécanismes de la rupture à long terme des polymères», Thèse d'Etat Science Physique, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1984.
- [50] J.C. FOTHERGILL, G.C. MONTANARI, G.C. STEVENS, C. LAURENT, G. TEYSSEDRE, L.A.DISSADO, U.H. NILSSON, G. PLATBROOD, «Electrical, microstructural, physical and chemical characterization of HV XLPE cable peelings for an electrical aging diagnostic data base», IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, N° 3, pp. 514-527, June 2003.
- [51] H.R. ZELLER, «Breakdown and prebreakdown phenomena in solid dielectrics», IEEE, Proceeding of 2nd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectric, pp. 98-109, 1986.
- [52] G. BAHDER, T. GARRITY, M. SOSNOWSKI, R. EATON, C. KATZ, «Physical model of electric aging and breakdown of extruded polymeric insulated power cables», IEEE, Transactions on PAS, Vol. 101, pp. 1378-1388, 1982.
- [53] T.W. DAKIN, «Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon», AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 113-122, 1948.

- [54] A.L. MACKEAN, D. TSUJI, M.C. DOEPKEN, A. ZIDON, «Breakdown mechanism studies in XLPE cable», IEEE, transactions PAS, Vol. 97, pp. 1167-1175, 1978.
- [55] J.-P. CRINE, AND K. VIJH, «A molecular approach to the physico-chemical factors in the electric breakdown of polymers», Applied Physics Communications, Vol. 5, pp. 139-163, 1985.
- [56] J.-L. PAPPAL, J.-P. CRINE, C. DANG, «Electrical aging of extruded dielectric cables: A physical model», IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, N° 2, pp. 197-209, April 1997.
- [57] P. CYGAN, J. R. LAGHARI, «Models for Insulating Aging under Electrical and Thermal Multi-stress», IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, N° 5, pp. 923-934, October 1990.
- [58] M. FOLIE, «Contribution à l'étude du vieillissement des matériaux macromoléculaires synthétiques», Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, EDF, Série B, N° 2, pp. 115–146, 1963.
- [59] K. KAMINAGA, AL., «Long Term Test of 500 kV XLPE Cables and Accessories», CIGRE Report, N° 21-202, 1996.
- [60] IEC 216, «Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials», Part1, 1990.
- [61] B. FALLOU, «Comportement spécifique des matériaux isolants soumis à diverse contraintes (chaleur, champ électrique, radiation) », R.G.E., N°10, pp. 756-767, Octobre 1985.
- [62] B. FALLOU, «Nouvelles règles pour la détermination de l'endurance thermique des matériaux», R.G.E., Tome 83-N° 7/8, pp. 445-452, Juillet/Août 1974.
- [63] B. FALLOU, «Caractéristiques des isolants solides, méthodes de mesure, valeurs et signification», Techniques de l'Ingénieur, Publication D214, 1970.
- [64] B. FALLOU ET AL., «Essais d'évaluation et méthodes de diagnostic pour estimer la durée de vie et détecter les défaillances des matériels électriques», Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, EDF, série B, N°4, pp. 45-59, 1988.
- [65] R.A. Dixon, «Thermal ageing predictions from an Arrhenius plot with only datapoint», IEEE, Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-15, pp. 331-334, 1980.
- [66] M.L. HUY, G. HVRARD, «Methodologies for lifetime predictions of rubber using Arrhenius and WLF models», Die Angewandte Makromolekulare Chemie 261/262, pp. 135-142, 1998.
- [67] 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.

Chapitre III

Techniques expérimentales

Ce 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, afin de s'approcher d'une caractérisation électrique 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.

III.1 Présentation du câble 18/30 kV

III.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 et l'allongement à chaud, absorption d'eau.

III.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), et il a 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 mm².
- 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.

III.1.3 Composants du câble 18/30 kV

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



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

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

III.1.4 Présentation de la matière XLPE

- Constante diélectrique : 2,3.
- Rigidité diélectrique : 30 kV/mm.
- Facteur de dissipation : 0,0003 ;
- Densité : 922 kg/m³.
- 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.

III.1.5 Présentation de la matière PVC

- Densité : 1,54 mg/cm³.
- Couleur : noir.
- Résistivité à 23°C : 10¹².
- Allongement à la rupture : 200 %.
- Résistance à la traction : 13 N/mm².
- Perte de masse à 100°C après 7 jours : 1,5 mg/cm².

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

III.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.

III.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 III.2

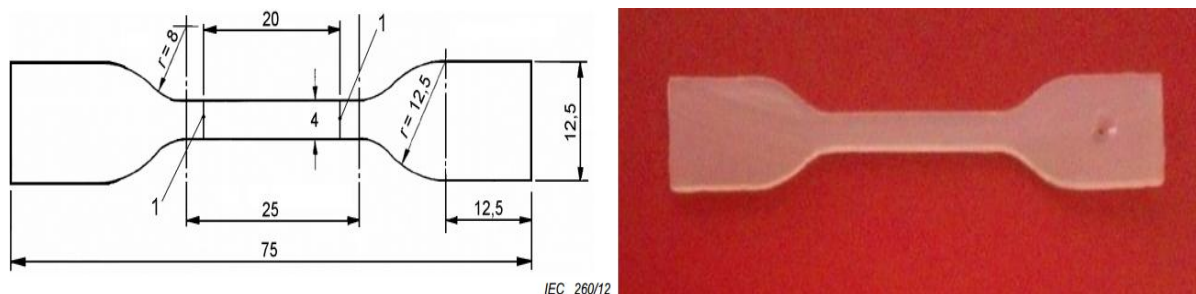


Fig. III.2 – Epreuve en forme d'haltère

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.

III.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 présenté sur la figure III.3:

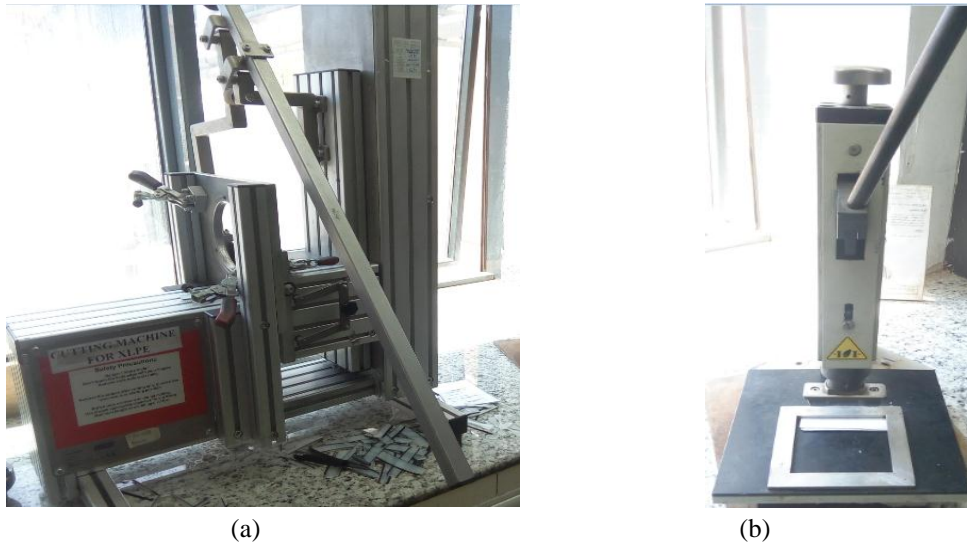


Figure III.3: (a) Machine pour la préparation des bandes, (b) Emporte-pièce

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 III.4 présente la machine de traction Zwick-Roell.

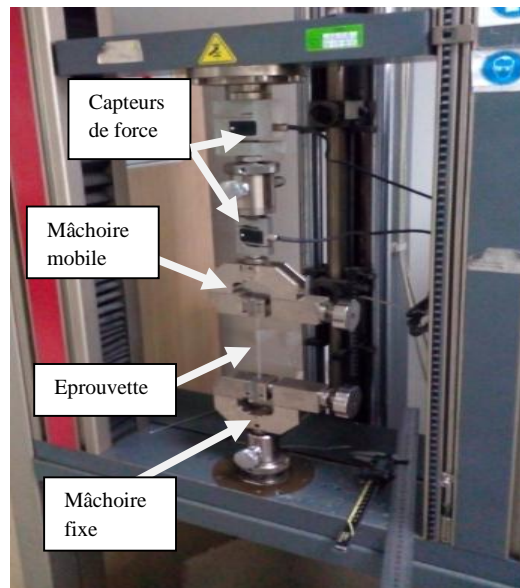


Fig III.4 : Machine de traction

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.

III.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 ± 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 tronçons de câble**

Nous avons mis quatre tronçons de câbles avec gaine d'une longueur suffisante environ de 200 mm dans l'étuve à air pour des températures bien spécifiées (80°C, 100°C, 120°C, 140°C), puis chaque deux jours, nous retirons un tronçon, et nous le mettons à une température ambiante pendant au moins 16 heures.

L'échantillonnage de l'enveloppe isolante du tronçon du câble retiré en éprouvettes en forme d'haltère et l'essai de traction de ces dernières sont effectués comme indiqué précédemment dans le mode opératoire.

- **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].

III.3 Essai de pertes de masse du PVC et du PRC

III.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.

III.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 d'enveloppes isolantes et de la gaine au PVC du câble 18/30kV préparées comme il est spécifié en (1.2) sauf que nous avons choisi celles qui ont des épaisseurs égales à $(1,0 \pm 0,2)$ mm.

III.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.

III.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.

III.4 Essai d'absorption d'eau pour le PRC

III.4.1 Introduction

Les essais d'absorption d'eau doivent être effectués rapidement et de manière fiable afin de pouvoir intervenir dans le procédé de fabrication et d'éviter des interruptions de production prolongées. Par conséquent, en vue d'assurer la qualité de leurs produits, de nombreux fabricants déterminent directement dans la ligne de production le taux d'absorption d'eau des matières premières, des produits intermédiaires et finis. Ces essais sont généralement applicables aux mélanges réticulés et thermoplastiques utilisés dans les matériaux d'isolation et de gainage.

III.4.2 Echantillonnage

Dans cet essai, nous avons coupé, conformément à la norme [IEC 60811-402], des tranches de 0,6 mm à 0,9 mm d'épaisseur dans l'enveloppe isolante. Les surfaces doivent être approximativement parallèles et sans aspérités. Des éprouvettes en forme rectangulaire de 80 mm à 100 mm de long et de 4 mm à 5 mm de large doivent ensuite être découpées dans les tranches.

III.4.3 Appareillage

L'appareillage utilisé pour cet essai est le même que celui spécifié en (III.3.3).

III.4.4 Mode opératoire

Selon la norme [IEC 60811-402], le mode opératoire de cet essai comporte trois étapes [5]:

- Nous avons mis les éprouvettes préparées en (II.4.2), dont les surfaces ont été soigneusement nettoyées, dans l'étuve à l'air à une température (70 ± 2) °C sous vide (pression résiduelle voisine de 1 mbar) pendant 72 h. Après ce traitement, les éprouvettes doivent être refroidies pendant 1 h dans un dessiccateur et pesées à 0,1 mg près (masse M1).
- Ensuite, nous avons immergé ces éprouvettes dans l'eau distillée à la température 80°C et durant une période du temps (7 jours, 14 jours et 21 jours), afin de voir l'évolution du taux d'eau absorbée par le PRC en fonction du temps de vieillissement. Après ce traitement du vieillissement, nous avons refroidi les éprouvettes dans l'eau distillée à la température ambiante. Chaque éprouvette doit ensuite être sortie de l'eau, secouée pour enlever les gouttes d'eau, séchée avec un papier filtre spécial sans peluche, et pesée à 0,1 mg près (masse M2).
- Enfin, l'éprouvette doit être traitée dans les mêmes conditions que celles utilisées avant immersion. Soit M3 la masse finale en milligrammes.

III.5 Essai d'allongement à chaud

III.5.1 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 [9].

L'essai d'allongement à chaud, généralement applicable aux mélanges réticulés utilisés pour les matériaux d'isolation et de gainage [9]. Le but de cet essai est la détermination des propriétés mécaniques.

III.5.2 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.

III.5.3 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. III.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.

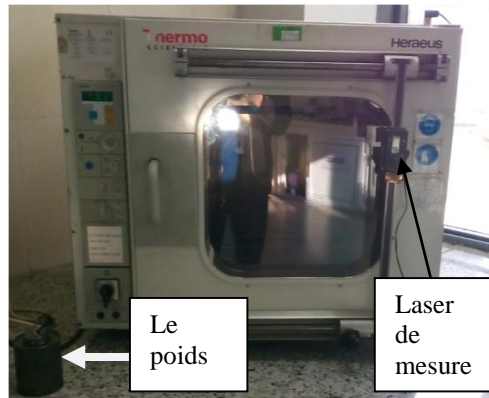


Figure III.5 : Etuve utilisée pour l'essai d'allongement à chaud

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.

III.5.4 Mode opératoire

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

Conformément aux normes CEI 60811-507, CEI 60811-501, nous avons utilisé cinq éprouvettes en 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 $(20 \pm 0,5)$ N/cm². 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 III.6.

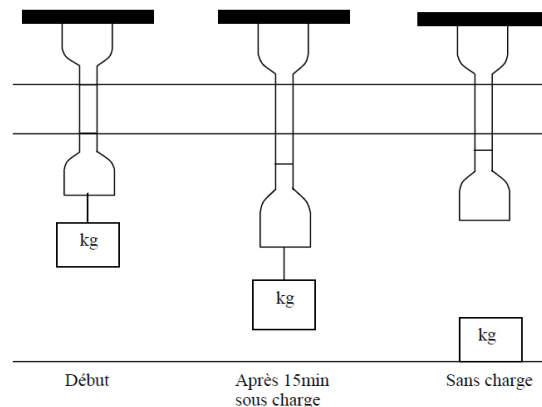


Fig. III.6 : Essai d'allongement à chaud [1]

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.

III.6 Essai de décharges partielles sur les tronçons de câbles (avant et après vieillissement thermique)

III.6.1 Introduction

L'isolation d'un câble souterrain n'est jamais parfaite. Non seulement, on y trouve des défauts qui dérivent directement de la production du câble mais en outre, l'isolation vieillit inéluctablement. Lorsqu'un câble est en service, son isolation est le siège de contraintes thermiques, électriques, mécaniques et enfin de contraintes liées à l'environnement [6]. Le terme décharge partielle est défini selon la norme IEC 60270 comme une décharge électrique localisée qui ne traverse que partiellement un isolant compris entre deux électrodes. En d'autres termes, elle ne court-circuite pas l'entièreté de cet isolant.

Dans cet essai, nous avons mesuré les décharges partielles des tronçons de câbles vieillis et non vieillis en fonction du temps de vieillissement pour plusieurs températures (80°C, 110°C, 120°C et 140°C).

III.6.2 Echantillonnage

Nous avons mis quatre tronçons de câbles complets 18/30 kV d'une longueur suffisante environ de 500 mm dans l'étuve à l'air pour des températures différentes (80°C, 110°C, 120°C, 140°C), puis chaque deux jours, nous retirons un échantillon, et nous le mettons à une température ambiante pendant au moins 16 heures.

Nous avons enlevé les semi-conducteurs extérieurs de chaque extrémité (environ 150mm) pour chaque tronçon de câble, puis nous avons utilisé une peinture isolante pour empêcher le

déplacement des décharges sur la surface de l'isolant, comme il est représenté sur la figure III.7:

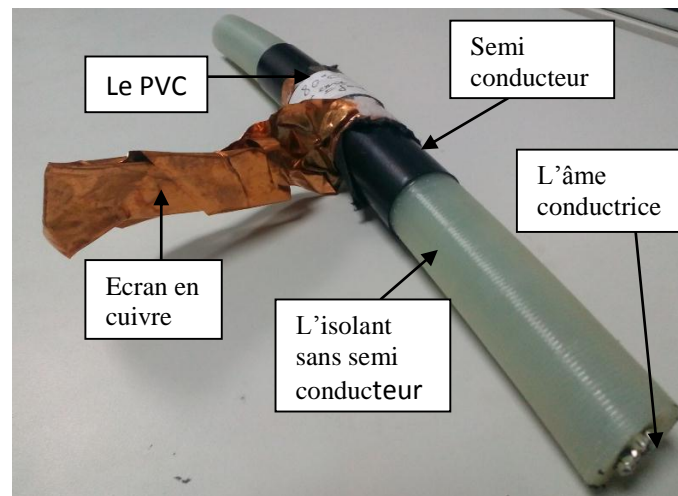


Fig III.7 : Objet d'essai

III.6.3 Appareillage

Cet essai est fait dans le laboratoire électrique qui est composé essentiellement de :

- Un régulateur de tension qui reçoit la tension du réseau à l'entrée et délivre une tension variable de 0V jusqu'à 220 V à la sortie ;
- Une source de haute tension constituée d'un transformateur de puissance 2500 kVA, 220 V/ 200 kV qui permet d'élever la tension à la sortie du régulateur;
- Un filtre comportant une bobine avec deux capacités en parallèle. La bobine est utilisée pour empêcher que les impulsions dues aux décharges soient court-circuitées par la source à haute tension, protéger le système contre les court circuits et pour réduire les perturbations provenant de la source. Par contre, la capacité a pour rôle de réduire la tension et la rendre rentable aux mesures ;
- Un objet en essai (figure III.7) qui, dans de nombreux cas, peut être considéré comme une capacité C ;
- Un appareil de mesure de marque siemens (SIMATIC HMI) pour mesurer les décharges partielles. Cet appareil est associé à un ordinateur en utilisant un logiciel spécial (voir la figure III.10).

Le circuit d'essai est représenté à la figure III.8.

Nous avons réalisé cet essai à l'intérieur d'une cabine blindée correspondante à une cage de Faraday, afin de protéger contre les perturbations électromagnétiques extérieures.

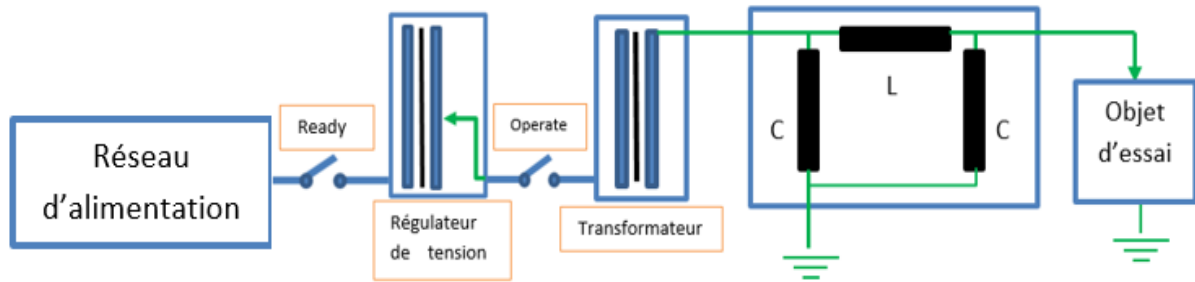


Fig. III.8 : Circuit d'essai

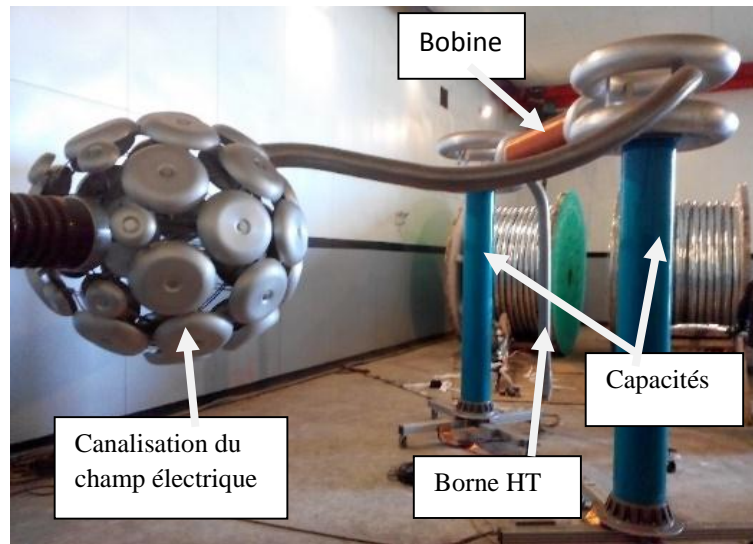


Fig. III.9 : Laboratoire des essais électriques

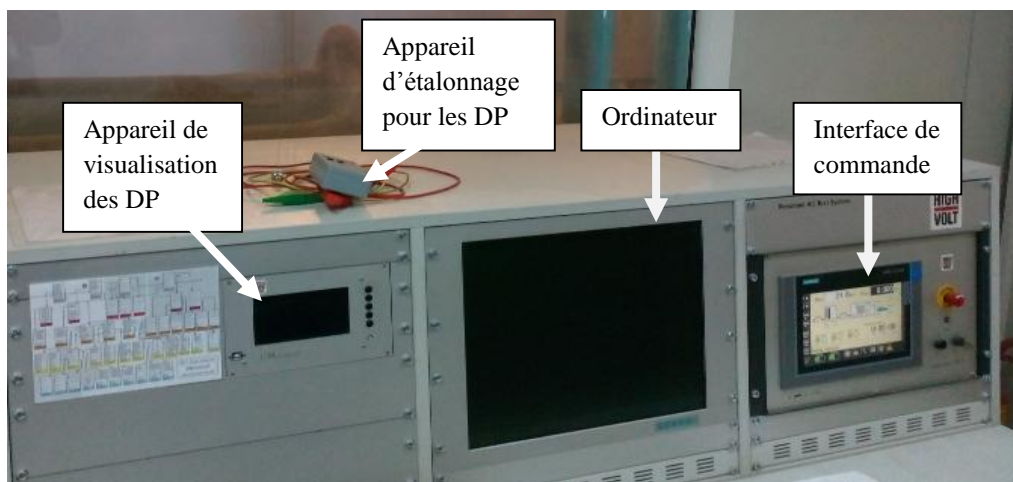


Fig. III.10 : Appareil de mesure de DP

III.6.4 Mode opératoire

Pour chaque tronçon du câble vieilli et non vieilli, nous avons placé la borne de haute tension du transformateur sur l'âme et la terre sur l'écran, puis nous avons augmenté progressivement la tension d'essai jusqu'à 20 kV à fréquence industrielle. Cette tension doit être maintenue pendant 10s. Après 10s nous prenons la valeur des décharges partielles correspondante à température ambiante.

III.7 Essai de tension pendant 3h (vieillessement électrique)

Cet essai n'est applicable qu'aux câbles de tension assignée supérieure à 3,6/6 kV [8]. Conformément à la norme CEI 60502-2, nous avons pris un tronçon de câble complet 18/30 kV, de 9 m de longueur (>5m entre les extrémités d'essai), puis nous avons enlevé environ de 1.5 m de semi-conducteur externe pour chaque extrémité afin d'augmenter la longueur du chemin de contournement (pour ne pas avoir un contournement entre l'âme et le semi-conducteur externe), et nous avons mis à la place une couche de peinture isolante afin d'empêcher le déplacement des décharges dans la surface de l'isolant.

Une tension de $4xU_0 = 72$ kV à fréquence industrielle a été appliquée pendant 3h (vieillessement électrique) à la température ambiante, entre l'âme et le revêtement métallique, puis chaque 15min nous avons pris la valeur des décharges partielles.

Le circuit d'essai et l'appareillage utilisés sont les mêmes que III.6.3.

III.8 Essai de décharges partielles en fonction de la tension sur les câbles 18/30 kV (avant et après dégazage)

III.8.1 Introduction

L'isolation des conducteurs est faite au moyen d'extrudeuse. Ces machines comportent une vis fine qui tourne avec un jeu très faible dans une chambre, en refoulant le mélange isolant dans une tête. Lorsque l'isolation du câble est achevée, selon la norme, le câble doit être laissé à l'air libre pendant 72 heures afin de dégager les bulles d'air et les gaz produits de la réticulation. Cette étape s'appelle le dégazage. Ensuite nous mettons les quatre autres couches autour des premières couches qui sont installées progressivement.

Dans cet essai, nous avons pris deux échantillons de câbles de même longueur, l'un avant le dégazage et l'autre après, dans le but de voir l'influence des bulles d'air sur l'évolution des décharges partielles en fonction de la tension.

III.8.2 Echantillonnage

Nous avons pris deux échantillons de câbles d'une longueur de deux mètres, l'un avant le dégazage et l'autre après, puis nous avons enlevé les semi-conducteurs extérieurs de chaque extrémité (environ 750mm) pour chacun des deux câbles.

III.8.3 Appareillage

L'appareillage utilisé dans cet essai est le même que celui spécifié en III.6.3.

III.8.4 Mode opératoire

Pour chacun des deux câbles, nous avons appliqué une tension alternative variable de 10kV jusqu'au claquage de câble, à fréquence industrielle et à la température ambiante, et pour chaque tension appliquée, nous prélevons la valeur des décharges partielles qui lui correspond.

III.9 Essai d'enroulement suivi d'un test de décharges partielles

III.9.1 Introduction

Dans cet essai, nous nous intéressons à l'étude de l'influence d'une contrainte mécanique qui est l'enroulement d'un même échantillon de câble complet autour de plusieurs tourets de différents diamètres afin de voir les variations des décharges partielles en fonction du rayon de courbure.

III.9.2 Appareillage

L'appareillage utilisé dans cet essai est le même que celui spécifié en III.6.3.

III.9.3 Mode opératoire :

L'échantillon est un câble complet, unipolaire 18/30 kV, de 50 m de longueur. Conformément à la norme CEI 60502-2 [8], nous avons enroulé le câble autour de trois tourets (forme cylindrique) de plusieurs diamètres (700, 550, 350) mm à la température ambiante. Ensuite, l'échantillon doit être déroulé et l'opération se répète trois fois, sauf que la courbure de l'échantillon doit être de sens contraire et sans rotation axiale.

Puis nous avons soumis l'échantillon à un essai de décharges partielles pour chaque rayon de courbure dans le laboratoire des essais électrique.

III.10 Mesure de la résistance linéique des âmes conductrices

Afin de voir la variation de la résistance linéique (Ω/km) des âmes du câble 18/30 kV en fonction du temps de vieillissement, nous avons réalisé un traitement de vieillissement de 200h sur les âmes conductrices seules. Après la mesure de la résistance des âmes avant vieillissement, nous avons mis ces âmes en aluminium dans l'étuve à l'air à des températures spécifiées (80°C, 140°C) pendant 200h.

Après chaque 2 jour, nous retirons un échantillon. Cet échantillon doit être maintenu à une température ambiante pendant au moins 12 h avant la nouvelle mesure de la résistance.

Bibliographie

- [1] CEI 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] 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.
- [5] CEI60811-402, « Câbles électriques et à fibres optiques – Méthodes d’essai pour les matériaux non-métalliques – Partie 402: Essais divers – Essais d’absorption d’eau », Edition 1.0, 03-2012.
- [6] P.LEBAS « diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles », projet de fin d’étude, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège, 2008.
- [7] BOREALIS « Borlink LS4201R, Cross linkable Insulation Compound », 14.06.2013 Ed.1.
- [8] 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.
- [9] 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.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux caractérisant l'influence du vieillissement thermique, électrique et les contraintes mécaniques 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 et électrique de ces matériaux. Nos résultats sont valables pour un Vieillissement accéléré ne dépasse pas 240h.

IV.1 Allongement à 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 IV.1 pour sept échantillons du PRC vieillis à 120°C après 192h (8 jours).

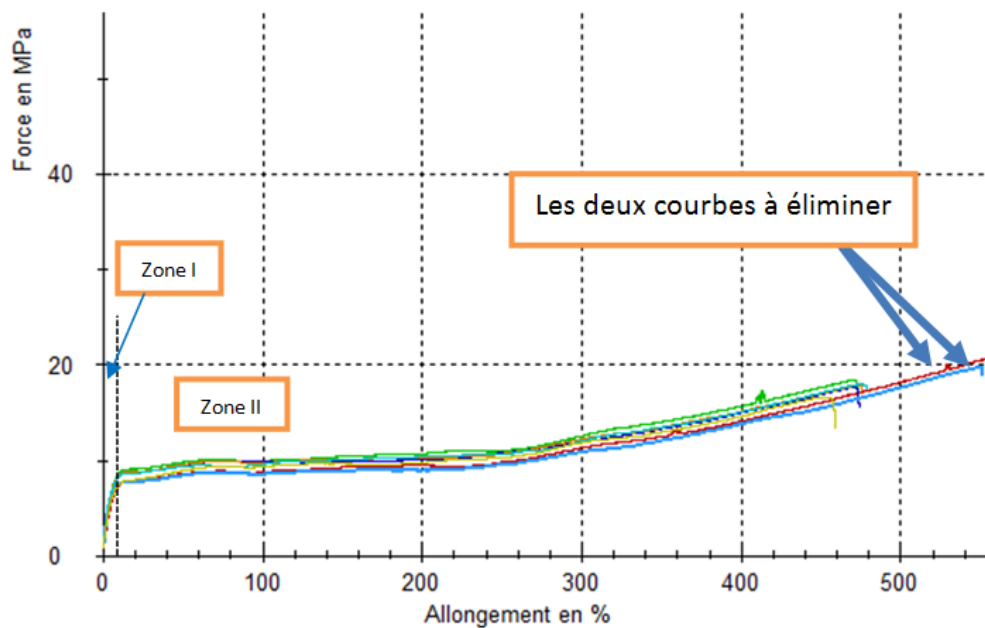


Fig. IV.1 : Résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture du PRC

Nous observons 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, 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, nous pouvons 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 n'influe pratiquement 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.

Ces matériaux peuvent être également caractérisés par leur énergie de rupture. Si σ est la traction de l'échantillon correspondant à l'allongement, alors, l'énergie de rupture W , est donnée par :

$$W = V \int_0^{\varepsilon_r} \sigma d\varepsilon$$

ε_r est l'allongement à la rupture et V est le volume de l'échantillon déformé. Cette valeur représente la surface sous la courbe de traction.

Les valeurs de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction sont présentées au tableau IV.1. Conformément aux recommandations de la CEI 60811-501, nous ne devons pas tenir compte des mauvais résultats obtenus sur des éprouvettes rompues à la suite d'une détérioration provoquée par les mâchoires; dans ce cas, nous devons 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 IV.1 : Les valeurs de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture du PRC à 120°C pour 192h :

N_r	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

Nous tirons 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.

IV.1.1 Allongement à la rupture

La figure IV.2 représente les variations de l'allongement à la rupture du PRC en fonction du temps de vieillissement pour 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.

Nous remarquons 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 vinyloxy et vinyloxydes ou d'autres groupes non saturés dans les chaînes du polyéthylène [4].

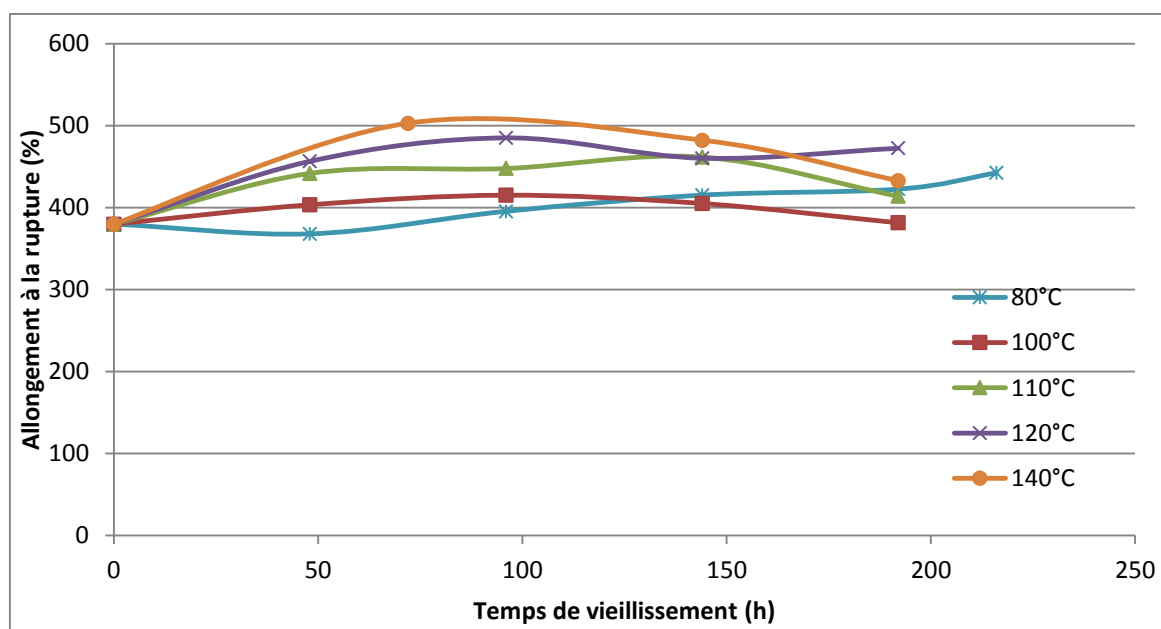


Fig. IV.2 : Allongement à la rupture du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique

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 [10]. Mais souvent la présence de l'oxygène (oxydation) entraîne une prédominance des coupures du squelette par rapport aux réticulations [5].

IV.1.2. Résistance à la traction

La figure IV.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.

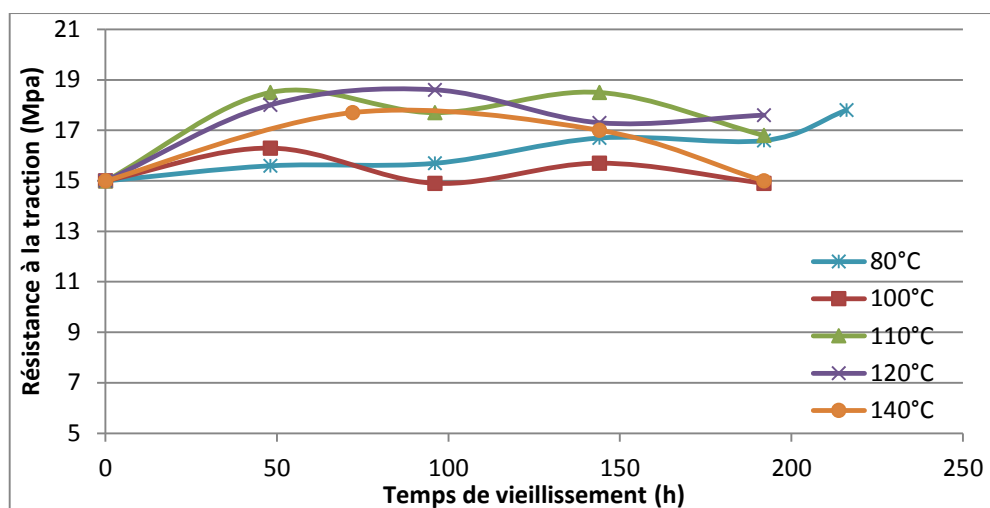


Fig. IV.3 : Résistance à la traction du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique

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].

IV.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 IV.4 pour huit échantillons vieillis à 140°C après 72 h (3 jours).

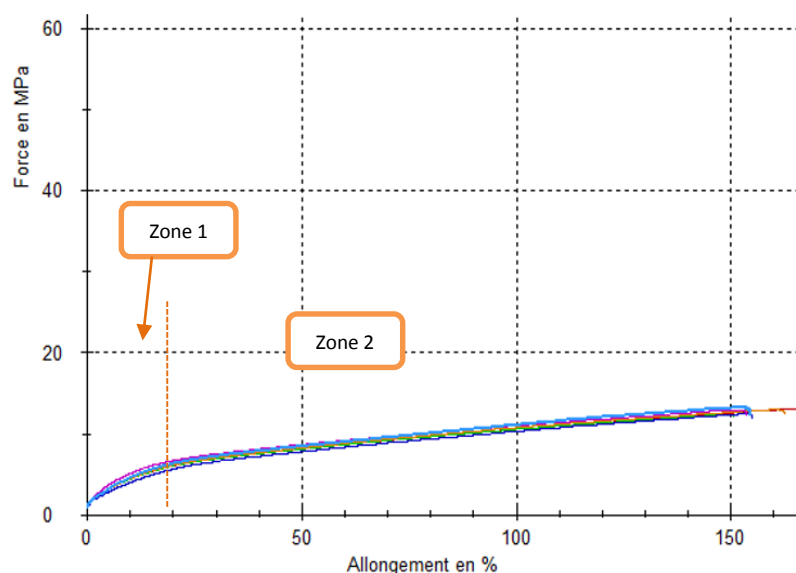


Fig. IV.4 : Résistance à la traction en fonction de l'allongement à la rupture du PVC

La courbe IV.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.

IV.2.1. Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture du PVC en fonction du temps de vieillissement est représenté à la figure IV.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.

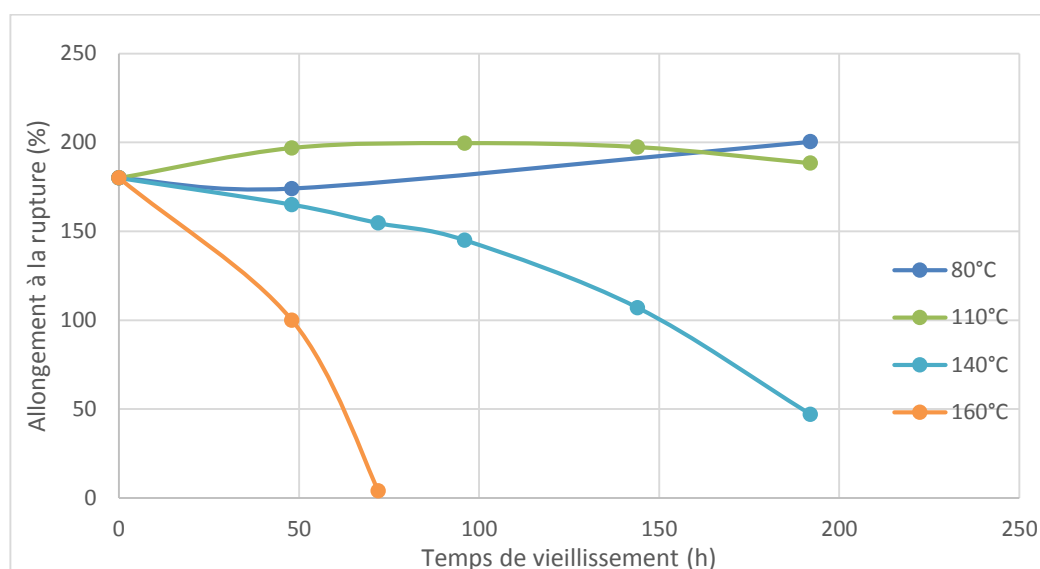


Figure IV.5 : Allongement à la rupture du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique

IV.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 IV.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.

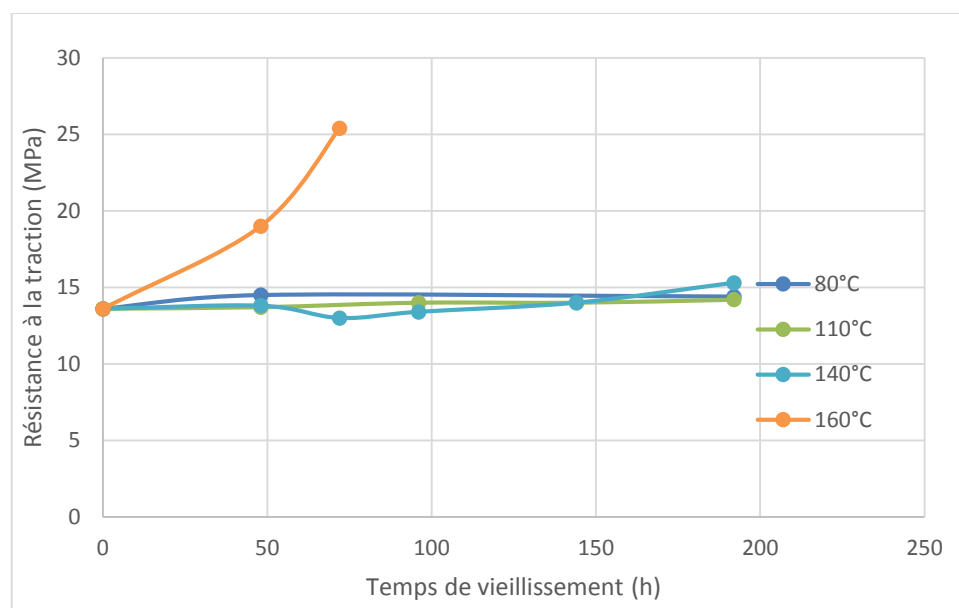


Figure IV.6 : Résistance à la traction du PVC en fonction du temps du vieillissement thermique

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].

IV.3 Comparaison entre le PRC et le PVC

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

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

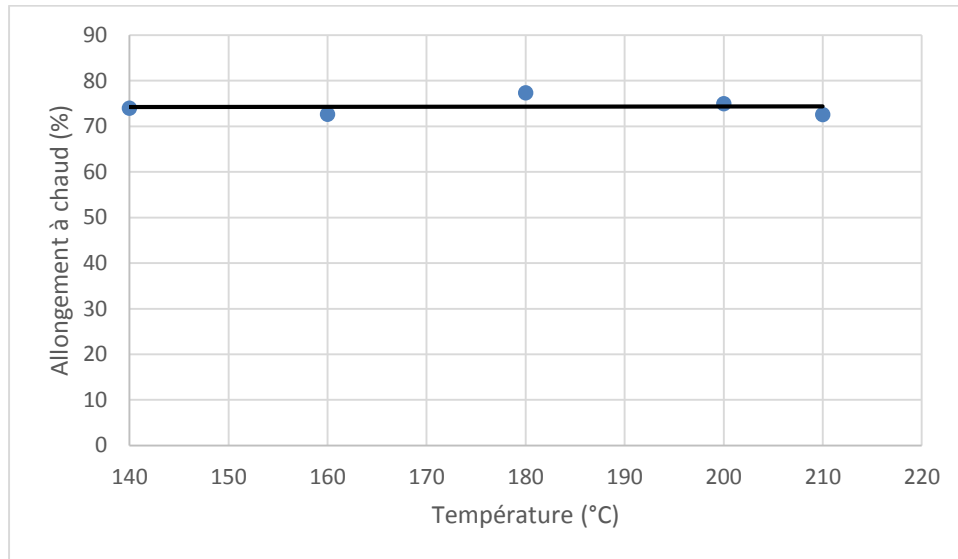


Fig. IV.7 : Allongement à chaud du PRC avec charge en fonction de la température d'essai

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 IV.8 :

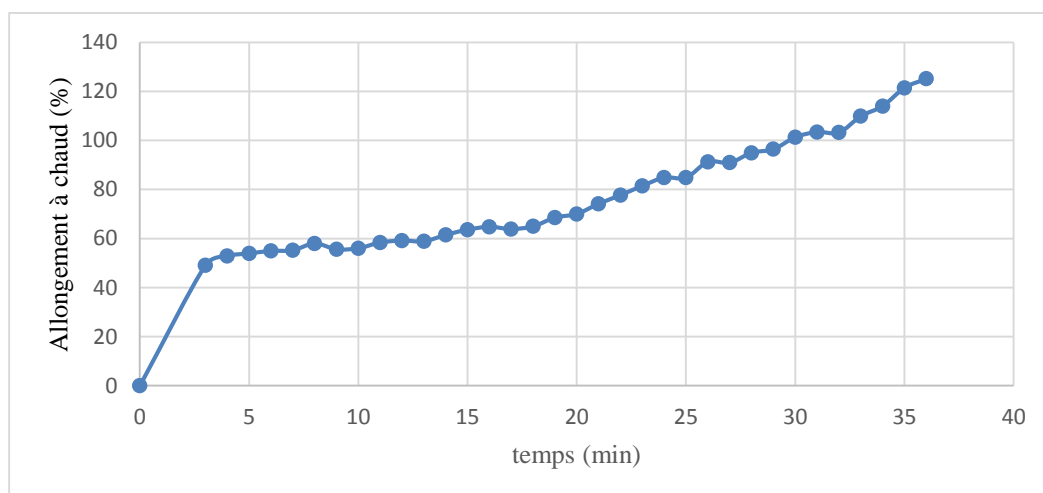


Fig. IV.8 : Allongement à chaud en fonction du temps d'essai pour T=210°C

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 car elles sont plus stables.

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.

IV.5 Conséquences de dégradation

IV.5.1 Changement de couleur du PRC

Au cours du vieillissement, nous observons un changement de couleur du PRC qui varie avec la température et avec le temps de vieillissement. Des photographies prises pour des éprouvettes et des tronçons des câbles complets sont présentées à la figure IV.9 après des temps de vieillissement différents pour chacune des températures du vieillissement.

Pour la température 80°C nous n'observons pratiquement pas aucun changement de couleur après 200h de vieillissement. Par contre, pour les autres températures (100°C, 110°C, 120°C et 140°C), une couleur marron apparaît au cours de vieillissement. Cette couleur s'est manifestée sur toute la surface des éprouvettes, et est devenue de plus en plus foncée au cours du vieillissement. En outre, plus que la température augmente plus que l'apparence de la couleur est plus rapide.

Le changement de couleur du PRC a été mis en évidence par C. Katz et *al.* [14] et S.O. Han et *al.* [15]. Des coupures de chaînes contribuent à la formation des groupes vinyloxy et vinyloxydène. Ces groupes sont responsables du changement de couleur du PRC durant le vieillissement aux hautes températures [7].

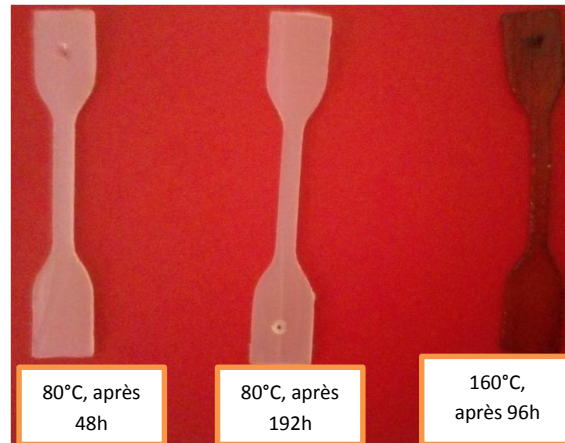


Fig. IV.9.a : Echantillons du PRC vieillis



Figure IV.9.b : Tronçons de câble complet 18/30 isolés par le PRC après vieillissement thermique

IV.5.2 Changement de couleur du PVC

Nous n'avons remarqué pratiquement pas aucun changement de couleur pour les températures (80°C, 100°C, 110°C et 120°C) au cours de vieillissement ; contrairement pour la température 140 °C, la couleur noir du PVC devient plus en plus moins sombre (claire). Ce changement de couleur peut être dû aux pertes de plastifiants et au dégagement d'acide chlorhydrique et à la formation de chaînes polyéniques [9].



Fig. IV.10 : Tronçons de câble complet avec la gaine du PVC après vieillissement thermique

IV.5.3 Perte de masse

Nous présentons sur les figures IV.11 et IV.12 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 δ est l’épaisseur moyenne des bandes, en millimètres.

- **Variation de la perte de masse du PRC**

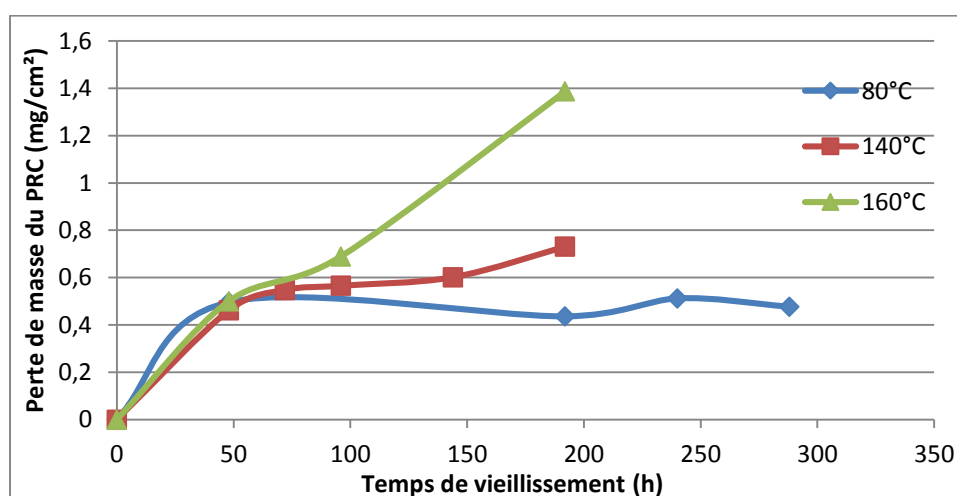


Fig. IV.11 : Perte de masse du PRC en fonction du temps de vieillissement thermique

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/cm²) à partir de 160h, par contre pour les températures 140°C et 80°C, le PRC n'a pas encore atteint cette limite.

- **Variation de la perte de masse du PVC**

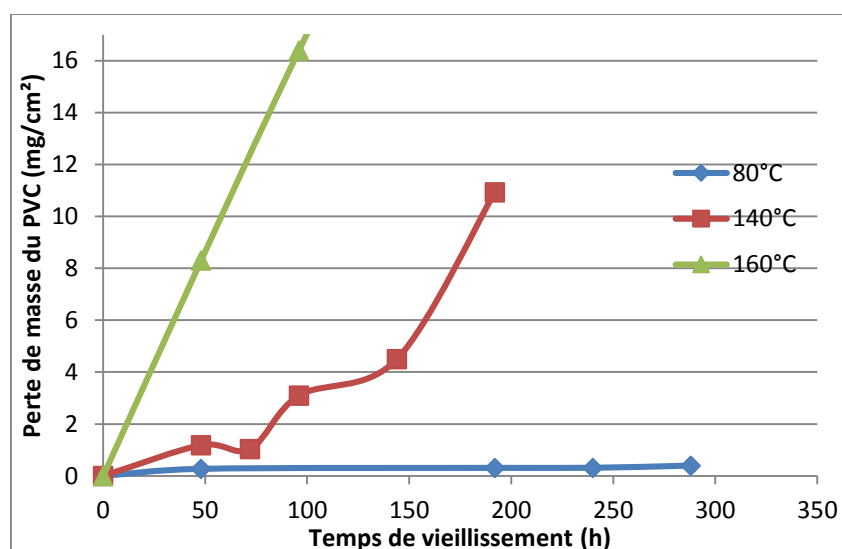


Fig. IV.12 : Perte de masse du PVC en fonction du temps de vieillissement thermique

Comme pour le PRC, nous remarquons une augmentation de la perte de masse surfacique du PVC en fonction du temps de vieillissement, 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.

IV.6 Essai d'absorption d'eau

Les polymères, en fonction de leur nature, peuvent plus ou moins absorber de l'eau de leur environnement (exp : humidité). Cette absorption conduit à un gonflement qui interagit avec les contraintes appliquées à celui-ci [10]. L'objectif de notre essai est de voir l'interaction eau-polymère au cours du temps et d'expliquer certaines observations expérimentales.

Selon la norme IEC 60811-402, la variation de masse en milligrammes des éprouvettes de l'enveloppe isolante (PRC) avant et après absorption d'eau doit être calculée par application de l'une des formules suivantes:

- Si la masse finale M3 est inférieure à la masse M1:

$$\Delta M = (M2 - M3)/A$$

- Si la masse finale M3 est supérieure à la masse M1:

$$\Delta M = (M2 - M1)/A$$

Où A est la surface totale de l'éprouvette immergée, en centimètres carrés avec :

$$A = L \cdot l + 2(L + l) \cdot e$$

L : Longueur de l'éprouvette.

l : largeur de l'éprouvette.

e : épaisseur de l'éprouvette

D'où : $A = 0,4 \cdot 10 + 2 \cdot (10 + 4) \cdot 0,075 = 6,1 \text{ cm}^2$.

Les valeurs obtenues pour l'essai d'absorption d'eau en fonction du temps de vieillissement sont présentées sur le tableau IV.1 :

Tab. IV.1 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau.

Temps (jour)	0	7	14
Masse M1 (g)	/	0,275	0,27745
Masse M2 (g)	/	0,27545	0,27795
Masse M3 (g)	/	0,27515	0,2778
$\Delta m = M2 - \min(M1, M3)$ (g)	0	0,00045	0,0005
ΔM : variation de masse (mg/cm ²)	0	0,07377	0,08198

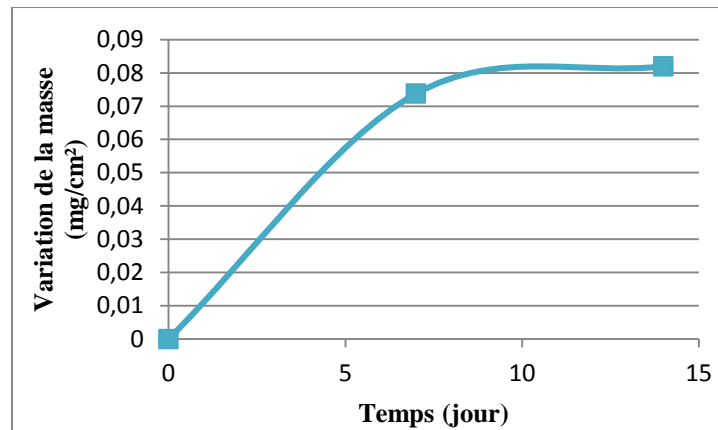


Fig. IV.13 : Variation de masse en fonction du temps du vieillissement

L'exploitation de la caractéristique représentée dans le graphe IV.13 revêt un intérêt grandissant du point de vue technique industrielle dans la mesure où cela pourrait nous renseigner sur la qualité de fabrication des câbles HT et la limite de leur utilisation en service.

Le graphe V.13 présente deux zones d'études :

- **Zone 1** : est la zone linéaire où les micropores du PRC absorbe une grande quantité d'eau.
- **Zone 2** : est la zone de saturation, où les micropores du polymère sont saturés.

L'eau absorbée augmente la mobilité des chaînes du polymère, ce qui se caractérise par la diminution de la température de transition vitreuse. Elle affecte aussi la densité des polymères.

Enfin, l'eau peut entraîner un vieillissement chimique des polymères appelé hydrolyse, ce dernier consiste en la réaction de l'eau sur des chaînes de polymères, réactions qui peuvent entraîner la scission des chaînes [11].

Ainsi, l'influence de l'eau sur les propriétés des polymères est un sujet qui a été abondamment traité. Toutefois, malgré la quantité de ces travaux, les scientifiques ne parviennent pas à expliquer de manière satisfaisante le phénomène qui est à la base du vieillissement humide des polymères [11]: l'absorption d'eau.

IV.7 Essai de décharges partielles sur les tronçons de câbles (avant et après vieillissement thermique)

Nous avons suivi, dans cet essai, les variations la charge apparente des décharges partielles des tronçons des câbles 18/30 kV en fonction du temps vieillissement pour les différentes températures (80°C, 120°C, 140°C). Cet essai a été effectué sous une tension alternative de 25kV à fréquence industrielle et à température ambiante.

Une décharge partielle apparaît lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, i.e. lorsque la tension appliquée au câble est supérieure à un niveau critique. Il s'agit du niveau de tension, lorsqu'il augmente progressivement, à partir duquel les premières DP sont observées.

La figure IV.14 illustre les différents résultats obtenus sur les variations de la charge apparente des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement thermique.

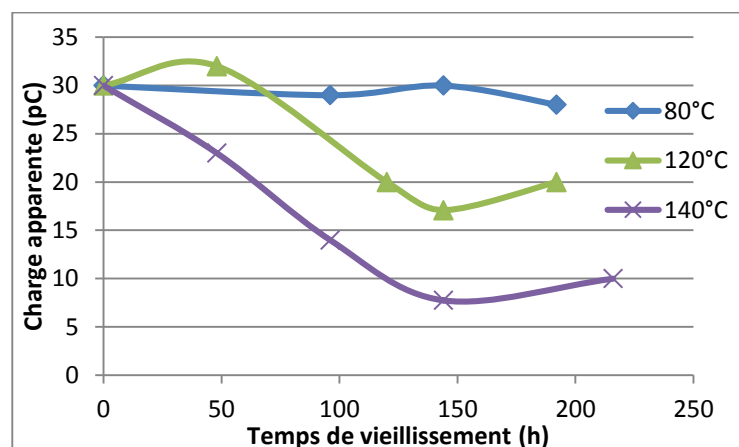


Fig. IV.14 : Charge apparente des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement thermique

Nous remarquons que la charge apparente des décharges partielles diminue en fonction du temps de vieillissement pour les températures (80°C, 120°C et 140°), nous pensons que cette diminution serait due probablement à un effet de réticulation et à la diminution du taux d'humidité, donc à une diminution de la mobilité des porteurs de charges.

Certains facteurs, comme la température, l'humidité et la pollution influencent sur l'apparition des décharges partielles. Après un certain temps de vieillissement environ 150h, la charge apparente commence à augmenter, cette augmentation peut être due à des ruptures des chaînes macromoléculaires, donc à l'augmentation de la mobilité qui est due à une facilité de déplacement des porteurs de charges, d'une part, et à l'existence de particules et d'impuretés d'une autre part.

Le phénomène de décharges partielles crée localement à la fois une érosion et une oxydation de l'isolant (par réactions chimiques). Une décharge partielle entraîne donc un vieillissement local qui a de grandes possibilités de s'étendre en fonction du temps. Il est même admis à ce jour que le phénomène de décharges partielles peut entraîner la destruction du matériel après un certain temps d'usage [12].

IV.8 Essai de tension pendant 3h (vieillissement électrique)

Les décharges partielles peuvent avoir lieu dans tous types d'isolant, qu'ils soient gazeux, liquide ou solide. Dans les solides les phénomènes liés à la forme du conducteur et à la présence d'une particule conductrice sont prépondérants. Dans cet essai, nous avons suivi la variation de la charge apparente des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement. La figure IV.15 illustre les résultats obtenus :

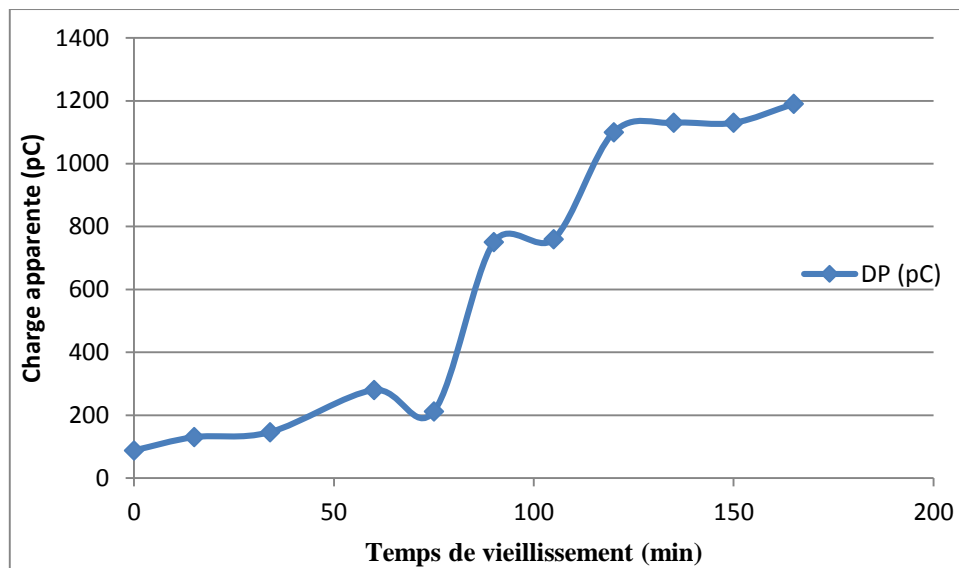


Fig. IV.15 : Variation de la charge apparente des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement électrique

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée [13]. Nous observons une augmentation de la charge apparente des décharges partielles relativement lente au début du vieillissement. Après un certain temps environ 60 minutes, la charge apparente augmente très rapidement, cette augmentation peut être due à la croissance de la mobilité des porteurs de charges qui aussi due à l'augmentation de la température du câble d'une part et aux fissures au niveau de l'isolant d'une autre part.

La dégradation est particulièrement accentuée par la présence d'impuretés de différentes natures, plus particulièrement des vacuoles de gaz au sein du diélectrique. Ces impuretés sont en général le siège de décharges partielles qui peuvent engendrer après un temps relativement long l'érosion du matériau et finalement la rupture diélectrique [13].

Au début de vieillissement, un courant de fuite très faible passe dans l'isolant permet de le chauffer ce qui engendre une augmentation de sa conductivité donc le courant augmente plus en plus et le processus se répète au cours du temps de vieillissement.

Nous pouvons dire aussi que les décharges partielles au niveau des vacuoles de gaz présentées accidentellement dans le volume du PRC, permet d'augmenter la température de gaz. Cette augmentation est suivie d'une augmentation de la pression du gaz engendrant l'érosion du matériau, qui conduirait de proche en proche, à la rupture totale du diélectrique [13].

IV.9 Essai de décharges partielles en fonction de la tension sur les câbles 18/30 kV (avant et après dégazage)

Dans le processus de fabrication des câbles électriques, lorsque l'isolation du câble est achevée, le câble doit être laissé à l'air libre pendant 72 heures afin de dégazer les cavités gazeuses et les gaz produits de la réticulation, cette étape s'appelle le dégazage. Ensuite on met les quatre autres couches autour des premières couches qui sont installées progressivement.

La figure IV.16 présente la charge apparente des décharges partielles en fonction de la tension d'essai des deux échantillons de câbles de même longueur, l'un avant le dégazage et l'autre après.

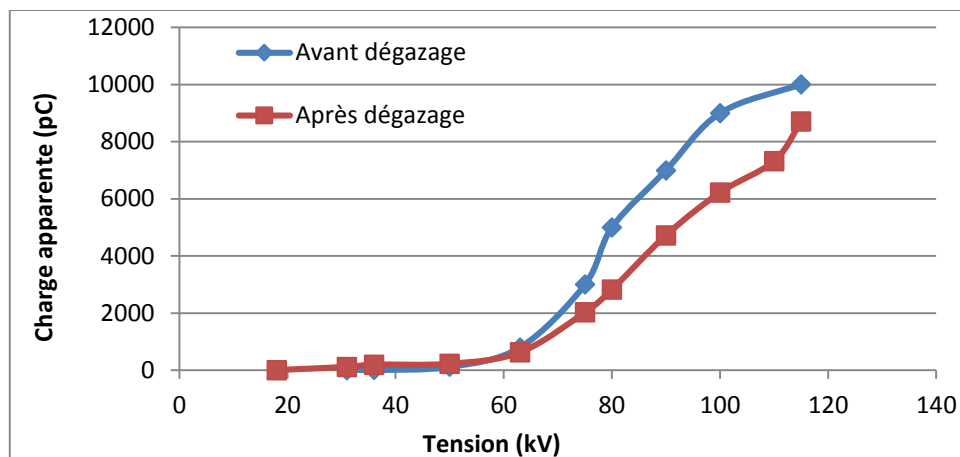


Fig. IV.16 : Charge apparente des décharges Partielles en fonction de la tension

Nous remarquons que la charge apparente des décharges partielles (les pertes diélectriques) augmente avec l'augmentation de la tension d'essai pour les deux cas, soit pour le câble avant le processus de dégazage ou pour le câble après le processus de dégazage. Les deux courbes possèdent la même forme de progression, tel que les deux câbles électriques présentent une résistance pratiquement grande aux tensions inférieures à 63 kV. Dans ce cas on ne voit pas l'influence des vacuoles de gaz sur les décharges partielles. Dès que la tension dépasse 63kV, la charge apparente augmente très rapidement en fonction de la tension, dans ce cas on voit bien que le câble testé avant le processus de dégazage présente une augmentation très rapide par rapport à l'autre câble.

L'augmentation de la charge apparente des décharges partielles est due à l'augmentation de la contrainte électrique appliquée (tension, champ électrique), provoquant la croissance de la mobilité des porteurs de charges. Selon le degré d'homogénéité et de pureté du matériau, on aura un certain transfert d'énergie entre les électrons de conduction et le réseau cristallin [13].

En pratique, les réseaux cristallins présentent certaines imperfections dans leur structure, dues à des atomes qui manquent ou plus fréquemment à la présence d'impuretés. Ces impuretés constituent des pièges pour les électrons libres. Dans les zones amorphes du diélectrique, les électrons acquièrent plus rapidement d'énergie qu'ils n'en fournissent. De ce fait, le nombre d'électrons piégés qui atteignent la bande de conduction augmente, engendrant l'augmentation de la conduction dans le matériau, et favorisant ainsi la rupture diélectrique [13].

Dès que le champ électrique (tension) dépasse un certain seuil (63 kV dans notre cas), les électrons acquièrent suffisamment d'énergie qui sera fournie au réseau cristallin, engendrant la rupture progressive de celui-ci, ce qui explique l'augmentation rapide des décharges partielles à partir de 63 kV.

La rupture diélectrique (claquage) est atteinte lorsque l'intensité du champ appliqué est supérieure ou égale à une valeur critique (E_c) [13].

La figure IV.17 illustre un ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé.

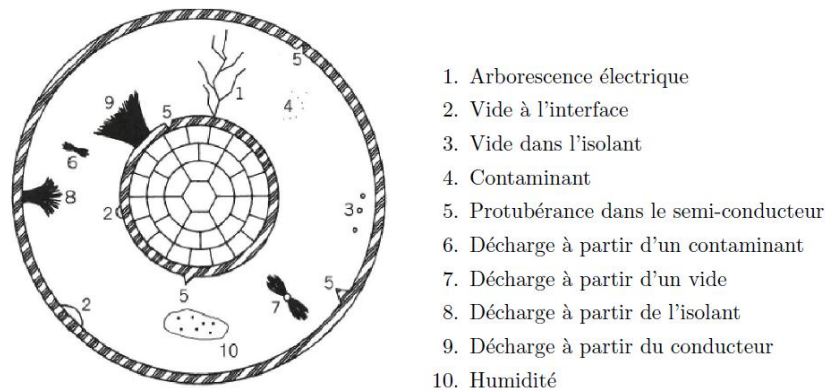


Fig. IV.17 : Ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé [12]

IV.10 Test de décharges partielles après essai d'enroulement

Dans cet essai nous intéressons à l'étude de l'influence d'une contrainte mécanique qui est l'enroulement d'un même échantillon de câble complet autour de plusieurs tourets de différents diamètres afin de voir la variation de la charge apparente des décharges partielles en fonction du rayon de courbure.

La figure IV.18 représente les variations des décharges partielles en fonction du rayon de courbure :

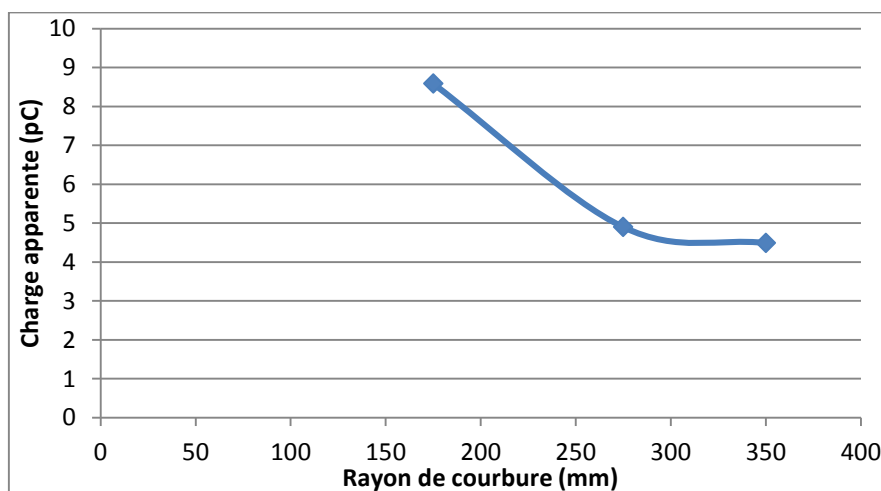


Fig. IV.18 : Charge apparente des décharges partielles en fonction du rayon de courbure

Nous remarquons plus que le rayon de courbure diminue plus que la charge apparente des décharges partielles augmente. Cette augmentation est due aux ruptures des chaînes macromoléculaires ce qui engendre des chemins de fuites pour le déplacement des charges électriques.

IV.11 Mesure de la résistance linéique des âmes conductrices

Dans cet essai, nous avons suivi le comportement de la résistance des âmes conductrices en aluminium en fonction du temps de vieillissement thermique à différentes températures (80°C, 140°C), la mesure se fait à la température ambiante. Le graphe IV.19 représente les résultats obtenus:

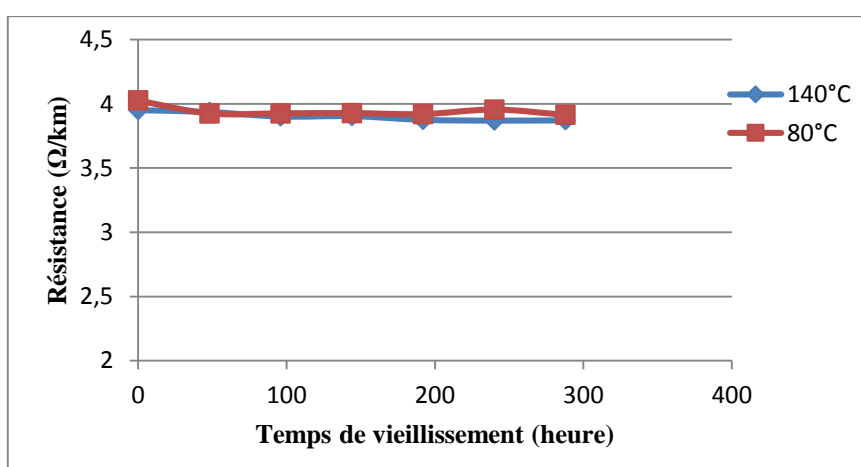


Fig. IV.19 : Résistance linéique en fonction du temps de vieillissement thermique

Sous le vieillissement thermique à des températures 80°C et 140°C, la résistance des âmes conductrices mesurée à la température ambiante reste constante en fonction de la durée de vieillissement et a pour valeur 3,9 Ω/km (figure IV.19), cela explique que le vieillissement thermique à 80°C et 140°C n'influe pas sur la résistance électrique des câbles 18/30 kV, nous pouvons expliquer ce résultat par la stabilité moléculaire de l'aluminium à des températures plus loin de sa température de fusion qui est de l'ordre de 660°C, donc les porteuses de charges restent pratiquement inchangées.

Bibliographies

- [1] V. LANGLOIS, L. AUDOUIN, J. VERDU, M. MEYER, « Vieillessement 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 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, « Vieillessement 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 Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département Electrotechnique, Décembre 1991.
- [10] A.L. DURIER, K. DERRIEN, P. GILORMINI, « Contraintes et saturation en eau dans un composite à matrice polymère », *ENSAM, France, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août 2007*.
- [11] G. MARQUE, « Absorption de l'eau par les polymères », Thèse de doctorat, université de Savoie *avril 200* ;
- [12] P. LEBAS « diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles », Projet de Fin d'Etude, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège, 2008.
- [13] A. BOUBAKEUR, « Vieillessement du PRC, 1- Claquage des isolants solides, 2- Vieillessement thermique du Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC) ; (PRC utilisé dans l'isolation des câbles produits par ENICABiskra) », Ecole Nationale Polytechnique, avril 2010.
- [14] C. Katz, A. Dima et al., « Emergency over load characteristics of extruded dielectric cables operating at 130°C and above », *IEEE. Transactions on Power Apparatus and Systems*, December 1984.
- [15] S.O. Han, D.W. Lee, O.H. Han, « Thermal degradation of Crosslinked high density polyethylene », *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 63, pp. 237-243, 1999.

Conclusion générale

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur l'influence du vieillissement thermique et électrique sur les propriétés 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, électriques et physico-chimiques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) et du polychlorure de vinyle (PVC) en fonction des différentes contraintes mécaniques, électriques et thermiques.

Dans notre projet, nous avons réalisé des essais de différentes natures sur des échantillons du PRC et du PVC et sur des tronçons de câbles complets, 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 vieillit 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. 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.

Dans le cas du vieillissement électrique, nous avons remarqué une augmentation des décharges partielles relativement lente au début de vieillissement, puis elles augmentent très rapidement, cette augmentation peut être due à la croissance de la mobilité des porteurs de charges qui aussi due à l'augmentation de la température du câble d'une part et aux fissures au niveau de l'isolant d'une autre part. Donc le vieillissement électrique est caractérisé par une

dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée.

Les bulles d'air et les cavités gazeuses jouent un rôle très important dans la dégradation des propriétés des câbles, tel que nous avons observé une augmentation des décharges partielles dans le câble avant le processus de dégazage en comparant avec le câble après le processus de dégazage.

Un vieillissement chimique du PRC est entraîné par l'absorption d'eau appelé hydrolyse, ce dernier consiste en la réaction de l'eau sur des chaînes de polymères, réactions qui peuvent entraîner la scission des chaînes et un gonflement qui interagit avec les contraintes appliquées. L'eau absorbée augmente la mobilité des chaînes de polymère, ce qui se caractérise par la diminution de la température de transition vitreuse.

En outre, la contrainte mécanique appliquée a une influence très importante sur la perte des propriétés d'isolation, tel que nous avons remarqué plus que le rayon de courbure diminue plus que les décharges partielles augmentent. Cette augmentation est due aux ruptures des chaînes macromoléculaires ce qui engendre des chemins de fuites pour le déplacement des charges électriques.

Enfin, cette étude nous permet de connaître un petit peu le comportement des isolateurs synthétiques (PRC, PVC) vis-à-vis les différentes contraintes qui peuvent 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 H_3O^+ et 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.