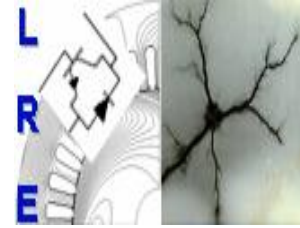


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire
pour l'obtention du diplôme de
Master en Electrotechnique

Intitulé

**Etude des propriétés électriques des câbles MT isolés
au PRC fabriqués par ELSEWEDY Cables Algeria
sous l'effet des vieillissements électrique et thermique**

Présenté par
Hani TERFA

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

Membres du Jury

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

ENP 2016

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

Dédicace

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ملخص:

هذه المذكرة تدخل في إطار مشروع بحث حول تأثير التشيخ الحراري والكهربائي على الخصائص الكهربائية للكوابل متوسطة التوتر المعزولة بالبوليثيلان المرتبط كيميائيا (PRC)؛ المعقد بين مخبر البحث في الإليكترو تقني للمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات ومؤسسة السويدي كابل-الجزائر بعين الدفلى. لقد اهتمنا بدراسة تطورات الخصائص 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 الكهربائية؛ الخصائص الفيزيوكيميائية؛ البوليثيلان المرتبط كيميائيا (PRC)؛ البوليكوريرفينيل (PVC)؛ الضغوطات الميكانيكية؛ الضغوطات الكهربائية؛ الضغوطات الحرارية.

Abstract:

This memory is a part of a research project about the influence of electrical and thermal ageing's on the electrical properties of the 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 electrical and physico-chemical properties of the Cross-Linked polyethylene (XLPE) and polyvinyl chloride (PVC) versus different mechanical, electrical and thermal constraints that may influence them during their use.

Key's words:

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

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur l'influence des vieillissements électrique et thermique sur les propriétés électriques des câbles MT 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 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 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 |
| Bibliographie : | 2 |

Chapitre I : Les polymères et leurs vieillissements électrique et thermique

| | |
|---|----|
| I.1 Polymère : | 4 |
| I.2 Polymérisation : | 4 |
| I.3 Propriétés électriques des polymères : | 4 |
| I.3.1 Rigidité diélectrique : | 4 |
| I.3.2 Propriétés électriques superficielles : | 4 |
| I.3.3 Résistivité transversale : | 4 |
| I.4 Utilisation des polymères dans l'isolation des câbles électriques : | 5 |
| I.4.1 Polychlorure de Vinyle (PVC) : | 5 |
| I.4.1.1 Présentation du PVC : | 5 |
| I.4.1.2 Propriétés du PVC : | 5 |
| a. Propriétés électriques : | 5 |
| b. Propriétés physico-chimiques : | 5 |
| c. Propriétés mécaniques : | 6 |
| I.4.2 Polyéthylène (PE) : | 6 |
| I.4.3 Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) : | 6 |
| I.4.3.1 Présentation du PRC : | 6 |
| I.4.3.2 Réticulation du PRC avec le peroxyde : | 6 |
| I.4.3.3 Propriétés du PRC : | 7 |
| a. Propriétés électriques : | 7 |
| b. Propriétés physicochimiques : | 8 |
| c. Propriétés mécaniques : | 8 |
| d. Propriétés thermiques : | 8 |
| I.5 Vieillissement électrique et thermique des polymères : | 8 |
| I.5.1 Introduction : | 8 |
| I.5.2 Vieillissement thermique des isolants à base de polymères : | 8 |
| I.5.2.1 Processus physique : | 9 |
| I.5.2.2 Processus chimique : | 9 |
| I.5.3 Vieillissement électrique des câbles : | 9 |
| Bibliographies : | 12 |

Chapitre II : Techniques expérimentales

| | |
|--|----|
| II.1 Présentation du câble 18/30 kV : | 15 |
| II.1.1 Présentation des laboratoires : | 15 |
| II.1.2 caractéristiques du câble : | 15 |

| | |
|---|----|
| II.1.3 Composants du câble 18/30 kV :..... | 16 |
| II.1.4 Présentation de la matière XLPE..... | 16 |
| II.1.5 Présentation de la matière PVC :..... | 16 |
| II.2 Essai de décharges partielles sur les tronçons de câbles (avant et après vieillessement thermique) | 17 |
| II.2.1 Introduction :..... | 17 |
| II.2.2 Echantillonnage :..... | 17 |
| II.2.3 Appareillage :..... | 18 |
| II.2.4 Mode opératoire :..... | 19 |
| II.3 Essai de tension pendant 3h (vieillessement électrique) :..... | 19 |
| II.4 Essai de décharges partielles en fonction de la tension sur les câbles 18/30 kV (avant et après dégazage) | 20 |
| II.4.1 Introduction :..... | 20 |
| II.4.2 Echantillonnage :..... | 20 |
| II.4.3 Appareillage :..... | 20 |
| II.4.4 Mode opératoire :..... | 20 |
| II.5 Test de décharges partielles après essai d'enroulement :..... | 21 |
| II.5.1 Introduction :..... | 21 |
| II.5.2 Appareillage :..... | 21 |
| II.5.3 Mode opératoire :..... | 21 |
| II.6 Mesure de la résistance linéique des âmes conductrices :..... | 21 |
| II.7 Essai d'absorption d'eau pour le PRC :..... | 22 |
| II.7.1 Introduction :..... | 22 |
| II.7.2 Echantillonnage :..... | 22 |
| II.7.3 Appareillage :..... | 22 |
| II.7.4 Mode opératoire :..... | 23 |
| Bibliographie :..... | 24 |

Chapitre III Résultats et discussions

| | |
|--|----|
| III.1 Essai de décharges partielles sur les tronçons de câbles (avant et après vieillessement thermique) | 26 |
| III.2 Essai de tension pendant 3h (vieillessement électrique) :..... | 27 |
| III.3 Essai de décharges partielles en fonction de la tension sur les câbles 18/30 kV (avant et après dégazage) | 28 |
| III.4 Essai d'enroulement suivi d'un test de décharges partielles :..... | 29 |
| III.5 Essai d'absorption d'eau :..... | 30 |
| III.6 Mesure de la résistance linéique des âmes conductrices :..... | 32 |
| III.7 Conséquences de dégradation dues au vieillissement thermique :..... | 32 |
| III.7.1 Changement de couleur du PRC :..... | 32 |
| III.7.2 Changement de couleur du PVC :..... | 32 |
| Bibliographies :..... | 34 |
| Conclusion générale :..... | 35 |

Annexe

Listes des figures

| | |
|---|----|
| Fig. I.1 : Polymérisation [4] | 4 |
| Fig. I.2 : 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 [23] | 11 |
| Fig. II.1 : Schéma du câble 18/ 30 kV isolé au PRC | 16 |
| Fig. II.2 : l'objet d'essai 18/30 kV | 17 |
| Fig. II.3 : circuit d'essai | 18 |
| Fig. II.4 : Laboratoire des essais électriques | 19 |
| Fig. II.5 : appareil de mesure de la charge apparente des DP | 19 |
| Fig. II.6 : Micro-ohmmètre | 21 |
| Fig. II.7 : (a) Étuve à air, (b) Balance de sensibilité de 0,1 mg | 22 |
| Fig. III.1 : les décharges partielles en fonction du temps de vieillissement thermique | 26 |
| Fig. III.2 : variation des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement électrique | 27 |
| Fig. III.3 : Décharges Partielles en fonction de la tension. | 28 |
| Fig. III.4 : Un ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé [12] | 29 |
| Fig. III.5 : Décharges partielles en fonction du rayon de courbure | 30 |
| Fig. III.6 : La variation de masse en fonction du temps du vieillissement | 31 |
| Fig. III.7 : La résistance linéique en fonction du temps de vieillissement | 32 |
| Fig. III.8 : Tronçons de câble complet 18/30 isolés par le PRC après vieillissement | 33 |
| Fig. III.9 : Tronçons de câble complet avec la gaine du PVC après vieillissement | 33 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tab. III.1 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau | 31 |
|--|----|

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

Le câble électrique actuel, un objet d'apparence simple, est en fait l'aboutissement de près de deux siècles de recherches, jalonnés de découvertes scientifiques. Celles-ci ont permis de franchir à chaque fois de nouveaux paliers, améliorant ainsi la fiabilité et la performance du transport d'électricité [1].

Le grand problème des câbles souterrains est l'isolation des conducteurs électriques. Depuis 1940 le polyéthylène (PE) a été et continu d'être largement utilisé dans la fabrication des câbles, Cet excellent matériau d'isolation 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. C'est ainsi qu'a été introduite la méthode de réticulation qui offre au PE un comportement à long terme amélioré [2]. Le résultat de la réticulation du PE est le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), ce dernier est devenu un matériau de choix dans l'isolation des câbles haute tension (HT) de nouvelle génération à cause de ses performances diélectriques, physico-chimiques, mécaniques et thermiques [3].

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 [4].

Comme tous les autres polymères, le PRC et le PVC peuvent avoir comme conséquences, sous l'action des différentes contraintes thermique, électrique et mécanique, une dégradation des propriétés électriques, ainsi qu'une influence sur les propriétés physiques comme par exemple un changement de couleur. Afin de mettre en évidence et de constater tous ces phénomènes, nous avons réalisé des essais aux laboratoires de contrôles et de qualités de l'entreprise ELSESEDY CABLES Algeria. Trois chapitres constituent notre travail ;

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les polymères synthétiques et leurs vieillissements électrique et thermique.

Le second chapitre est consacré aux techniques expérimentales où nous donnons une description détaillée des câbles 18/30 kV isolés au PRC et le PVC comme gainage, des dispositifs de mesure et de caractérisation ainsi que les techniques expérimentales que nous avons utilisées.

Les résultats et discussions relatifs à nos essais sont exposés dans le troisième 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] Y.MECHERI, « influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, Algérie, octobre 1998.
- [3] Y.MECHERI, « influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, Algérie, Mai 2008.
- [4] M.NEDJAR, « Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, Algérie, Décembre 1991.

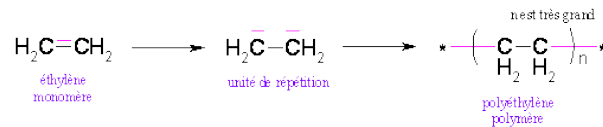
Chapitre I

Les polymères et leurs vieillissements électrique et thermique

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) [1].

• Exemple [2] :



"-CH₂-CH₂-" est l'unité du polymère.

I.2 Polymérisation

La polymérisation désigne la réaction chimique par lesquels des petites molécules (monomères) réagissent entre elles pour former des molécules de masses molaires plus élevées [3].

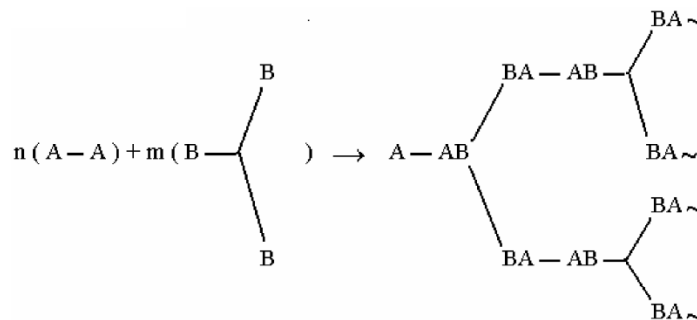


Fig. I.1 : Polymérisation [4].

I.3. Propriétés électriques des polymères

I.3.1 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.3.2 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 rendre conducteur [4].

I.3.3 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 Utilisation des polymères dans l'isolation des câbles électriques

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

I.4.1 Polychlorure de Vinyle (PVC)

I.4.1.1 Présentation du PVC

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

A l'état pur, le PVC est cassant, d'où la nécessité de lui ajouter des produits auxiliaires appelés adjuvants. Ces adjuvants sont de types stabilisants, plastifiants, lubrifiants ou charges. 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 [6] 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 [7]. Quant aux plastifiants, leur rôle est de rendre le matériau moins cassant en donnant une souplesse permanente aux produits finis. L'amélioration des propriétés diélectriques, comme la résistance électrique aux chocs ou à la chaleur [8], est assurée par l'ajout des charges telles que : le carbonate de calcium, le kaolin calciné et la silice [6]. 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 [8].

I.4.1.2 Propriétés du PVC

a. 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 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ [7].

b. Propriétés physico-chimiques

- La masse volumique des compositions du PVC varie entre 1 et 2 g/cm³ à la température ambiante [9] ;
- Le PVC transmet mal la flamme, mais sa combustion entraîne le dégagement de gaz corrosifs et de fumées [9] ;
- 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) [7] ;
- Le PVC rigide résiste bien aux agents chimiques inorganiques [9] ;
- 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 [7].

c. Propriétés mécaniques :

- Le PVC a une bonne résistance à la traction qui est de l'ordre de 5.5 à 6 kg/mm^2 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 [10] ;
- Les propriétés mécaniques sont fortement dépendantes de la température. Au-dessus de 140°C à 150°C , le PVC perd toutes ses propriétés mécaniques [7].

I.4.2 Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène résulte de la polymérisation du gaz éthylène C_2H_4 , en présence de catalyseur, dans certaines conditions de température et de pression [11].

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

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

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

I.4.3 Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)

I.4.3.1 Présentation du PRC

Afin d'améliorer les propriétés thermiques et mécaniques du polyéthylène, on procède à une opération dite réticulation [11].

La réticulation consiste à lier les chaînes de molécule par des liaisons radiales 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 [9].

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 [12].

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

I.4.3.2 Réticulation du PRC avec le peroxyde

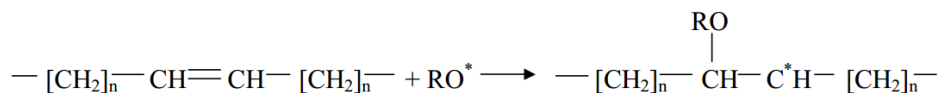
La réticulation par voie thermo-chimique de polyéthylène basse densité est pratiquée dans le contexte industriel au moyen des peroxydes organiques. Le plus couramment employé est le peroxyde de dicumyle (DCP) [12]. Ce dernier est un matériau organique cristallin dont la formule chimique générale est de type **R-O-O-R**.

Sous l'effet de la température, le DCP se décompose en deux radicaux cumyles très actifs [11].



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] :

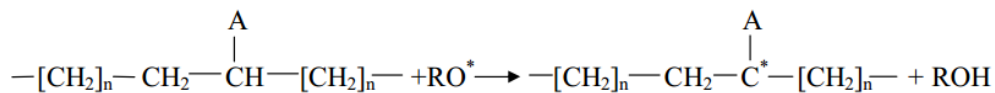
a) **Attaque sur des doubles liaisons**



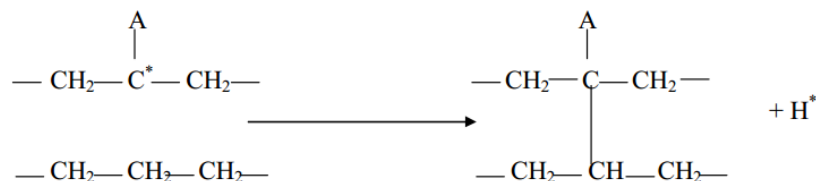
• **Pontage sur deux chaînes adjacentes :**



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



• **pontage**



I.4.3.3 Propriétés du PRC

a. **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;
- 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].

b. 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].

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 Vieillissement électrique et thermique des polymères

Nous nous intéressons dans ce qui suit aux interactions entre les différents facteurs de vieillissement : d'une part la contrainte thermique (vieillissement thermique), d'autre part la contrainte électrique (vieillissement électrique), qui constituent les deux plus importants facteurs de dégradation des câbles électriques

I.5.1. Introduction

La CEI [13] et IEEE [14] 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.

I.5.2 Vieillissement thermique des isolants à base de polymères

Dans le domaine de l'isolation électrique, la contrainte thermique constitue une contrainte sévère de service pouvant affecter sérieusement les propriétés du matériau polymère en les dégradant et réduisant ainsi la durée de vie des câbles électriques [11]. On traitera ici le vieillissement thermique des polymères ainsi que les mécanismes conduisant à leur dégradation.

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) [15;16].

I.5.2.1 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 [17,18,19].

Le processus physique peut résulter [9] :

- 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].

I.5.2.2 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 [18].

I.5.3 Vieillissement 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 [20].

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 [20].

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 [20].

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 [9].

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 [20].

Un modèle de vieillissement électrique a été développé en 1984 par A.K. Jonscher et R.Lacoste [21]. Les différentes étapes du processus sont [22]:

- . **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.

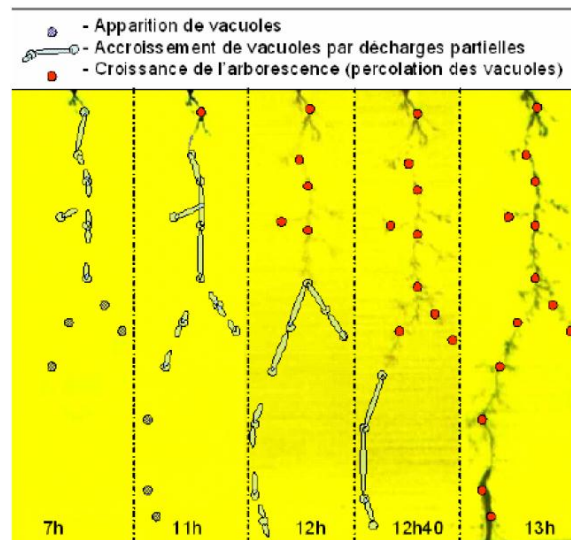


Fig.I.2 : Arborescence électrique observée dans le volume d'une résine époxy en configuration pointe/plan à laquelle a été superposée la théorie de la percolation de A.K. Joncher & R. Lacoste [23].

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 [23,24]. La différence entre ces théories réside dans le mécanisme qui entraîne le processus de la rupture.

Bibliographies

- [1] « GENERALITE sur LES POLYMERES Propriétés, synthèses, polymérisation, utilisations... » <http://www.chimie-sup.fr> (consulté le 01/05/2016)
- [2] S. FUSESSERRY, «Polyéthylènes basse densité», Techniques de l'Ingénieur, Publication A 3310, 1996.
- [3] M. FONTANILLE, Y. GNANOU «Chimie et physico-chimie des polymères» (2^eet 3^ecycles – Ecoles d'Ingénieurs), édition DUNOD, Paris, 2002.
- [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'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, Algérie, 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'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, Algérie, Juin 2007.
- [6] 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.
- [7] M.NEDJAR « Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, Algérie, Décembre 1991.
- [8] 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 ;
- [9] 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, Département d'Electrotechnique, Algérie, 19 Juin 2007.
- [10] D.AUSSEUR « Polychlorure de vinyle », technique de l'ingénieur, A 3325, 1990.
- [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, Département d'Electrotechnique, Algérie, Mai 2008.
- [12] Y.MECHERI « Influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, Algérie, Octobre 1998.
- [13] CEI 505, « Evaluation and identification of electrical insulation systems, Part 1: General principals and guide to applications », 1975.
- [14] IEEE Standard 1064-1991, « Guide for multifactor stress functional testing of electrical insulation systems », 1991.
- [15] N. NANDAKUMAR, «Ageing and stabilisation of PVC electrical insulation...a review», Popular Plastics, pp. 3-9, May 1982.
- [16] M. CHATIN, «Plastiques», Techniques de l'Ingénieur, Publication A3000, 1986.
- [17] J. VERDU, «Comportement à long terme», Techniques de l'ingénieur A 3150, A 9 I, 1980.

- [18] J. VERDU, «Vieillissement des plastiques», AFNOR technique, Edition Eyrolles, Paris 1984.
- [19] J .P. TROTIGNON, «Précis de matières plastiques - Structures, propriétés, mise en oeuvre et normalisation», Edition Nathan, 1982.
- [20] J.-F. FAUVARQUE, «Polymères pour isolants électriques», CNAM, pp. 273-318, Paris, 1993.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] J.C. FOTHERGILL, G.C. MONTANARI, G.C. STEVENS, C. LAURENT, G. TEYSSÉDRE, 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.

Chapitre II

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.

II.1 Présentation du câble 18/30 kV

II.1.1 Présentation des laboratoires

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

II.1.2 caractéristiques du câble

Tous les essais effectués dans ce projet ont été réalisés sur des échantillons de câble moyenne tension 18/30 kV fabriqué par ElSewedy Cables Algeria de Ain Defla, Ce câble est isolé au Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC), 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.

II.1.3 Composants du câble 18/30 kV

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



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

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

II.1.4 Présentation de la matière XLPE

- Constante diélectrique : 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.

II.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.

II.2 Essai de décharges partielles sur les tronçons de câbles (avant et après vieillissement thermique)

II.2.1 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 [1]. 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).

II.2.2 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 jour, 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 dans la figure II.2:

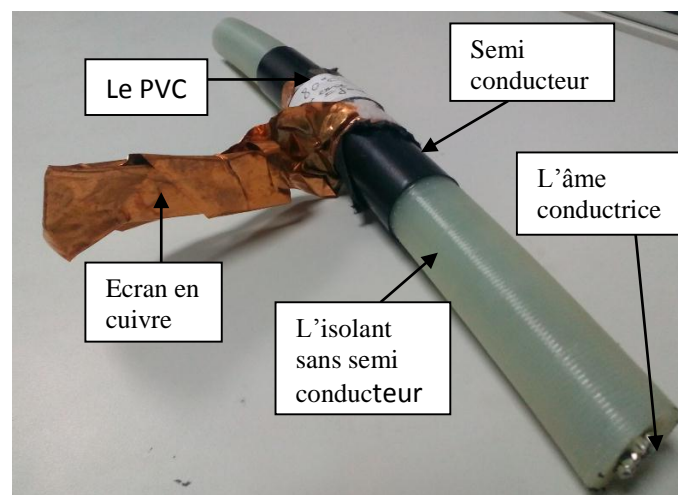


Fig II.2 : l'objet d'essai 18/30 kV

II.2.3 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 II.2) qui, dans de nombreux cas, peut être considéré comme une capacité C ;
- Un appareil de mesure de marque siemens (SIMATIC HMI) pour mesurer la charge apparente des décharges partielles, cet appareil est associé à un ordinateur en utilisant un logiciel spécial (voir la figure II.5).

Le circuit d'essai est représenté à la figure II.3.

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.

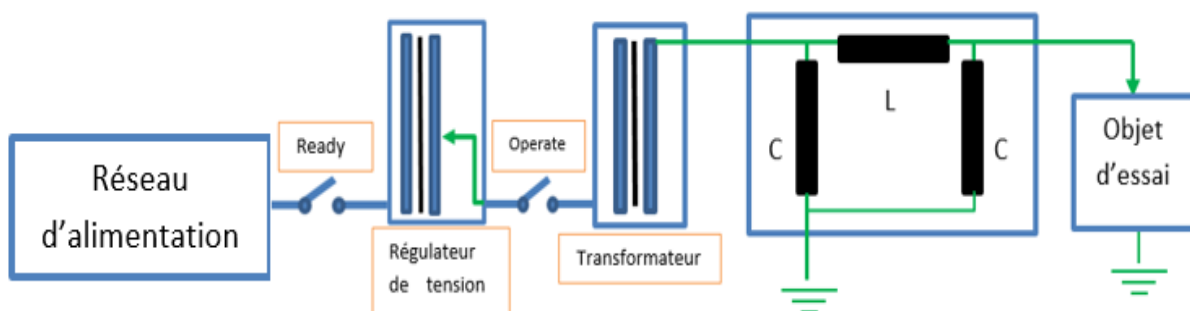


Fig. II.3 : circuit d'essai.

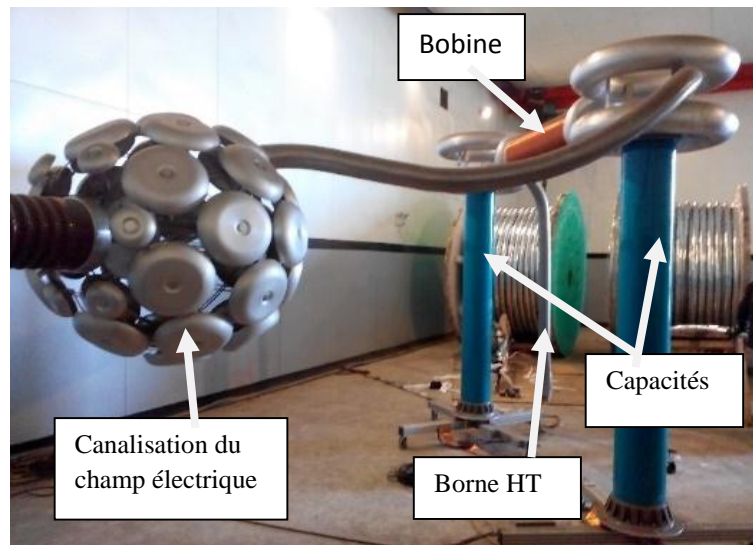


Fig. II.4 : Laboratoire des essais électriques.

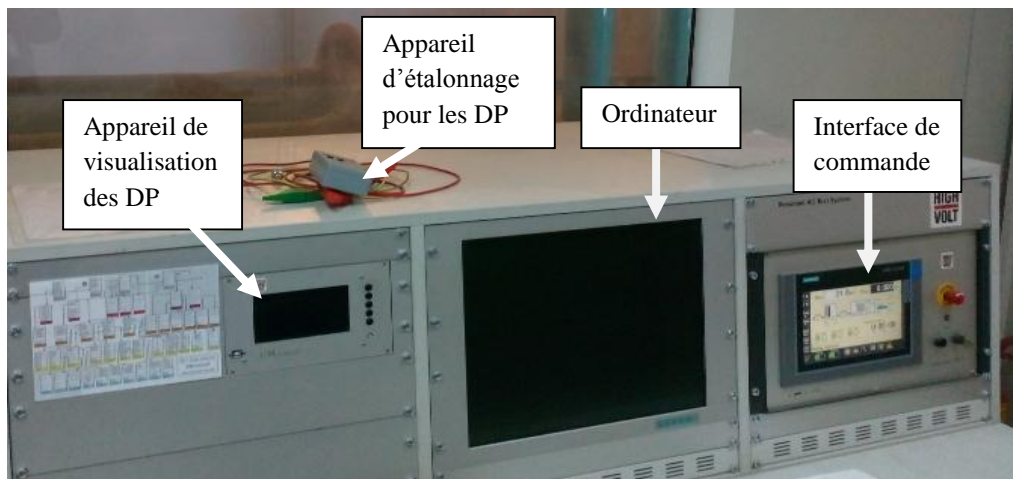


Fig. II.5 : appareil de mesure de la charge apparente des DP

II.2.4 Mode opératoire

Pour chaque tronçon de 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.

II.3 Essai de tension pendant 3h (vieillessement électrique)

Cet essai n'est applicable qu'aux câbles de tension assignée supérieure à 3,6/6 (7,2) kV [2]. Conformément à la norme CEI 60502-2 [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 II.2.3.

II.4 Essai de décharges partielles en fonction de la tension sur les câbles 18/30 kV (avant et après dégazage)

II.4.1 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 on met 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 cavités gazeuses sur l'évolution des décharges partielles en fonction de la tension.

II.4.2 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.

II.4.3 Appareillage

L'appareillage utilisé dans cet essai est le même que celui spécifié en II.2.3.

II.4.4 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.

II.5 Test de décharges partielles après essai d'enroulement

II.5.1 Introduction

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 les variations de la charge apparente des décharges partielles en fonction du rayon de courbure.

II.5.2 Appareillage

L'appareillage utilisé dans cet essai est le même que celui spécifié en II.2.3.

II.5.3 Mode opératoire :

L'échantillon est un câble complet, unipolaire 18/30 kV, de 50 m de longueur. Conformément à la norme CEI 60502-2 [2], 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.

II.6 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 48h, 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.



Fig.II.6 : Micro-ohmmètre

II.7 Essai d'absorption d'eau pour le PRC

II.7.1 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.

II.7.2 Echantillonnage

Dans cet essai, nous avons coupé, conformément à la norme IEC 60811-402 [3], 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.

II.7.3 Appareillage

Le matériel d'essai doit comprendre:

- 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.



(a)



(b)

Fig.II.7 : (a) Étuve à air, (b) Balance de sensibilité de 0,1 mg

II.7.4 Mode opératoire

Selon la norme IEC 60811-402 [3], le mode opératoire de cet essai comporte trois étapes :

- Nous avons mis les éprouvettes préparées en (II.7.2), 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), 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.

Bibliographie

- [1] P.LEBAS « diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles », Projet de Fin d'Etude, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège, 2008.
- [2] 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.
- [3] CEI 60811-402, « 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.

Chapitre III

Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux caractérisant l'influence des vieillissements thermique et électrique et les contraintes mécaniques sur les propriétés électriques des câbles MT isolés au PRC avec une gaine en PVC fabriqués par ELSEWEDY Cables Algeria, afin de s'approcher d'une caractérisation électrique de ces câbles.

III.1 Essai de décharges partielles sur les tronçons de câbles (avant et après vieillissement thermique)

Nous avons suivi, dans cet essai, les variations de la charge apparente des décharges partielles sur des tronçons de 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 III.1 illustre les variations de la charge apparente des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement thermique.

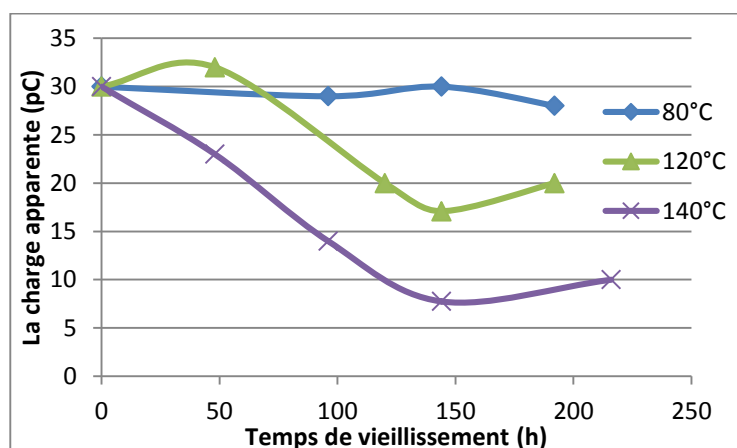


Fig. III.1 : les décharges partielles en fonction du temps de vieillissement thermique

Nous remarquons que les décharges partielles diminuent 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, les décharges partielles commencent 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 [1].

III.2 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 électrique. La figure III.2 illustre les résultats obtenus :

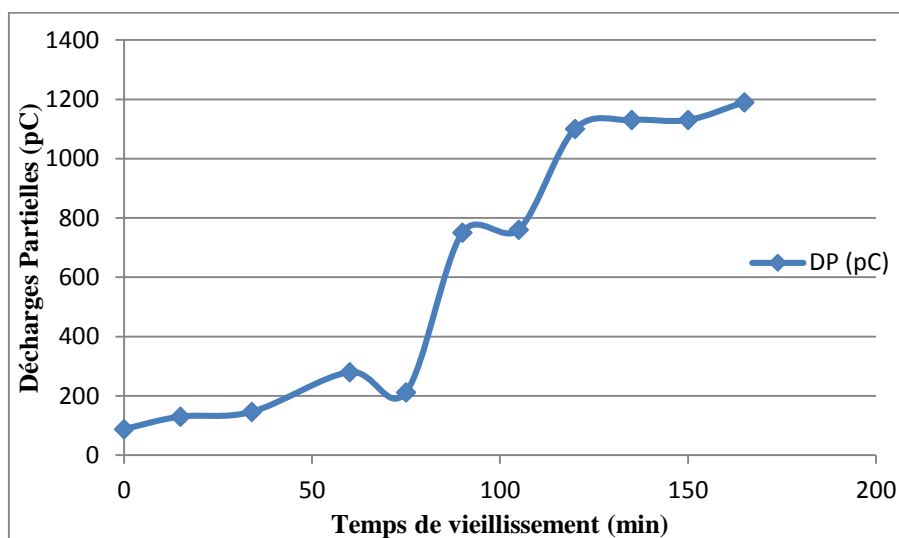


Fig. III.2 : variation des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement électrique.

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 [2]. Nous observons une augmentation des décharges partielles relativement lente au début du vieillissement. Après un certain temps environ 60 minutes, les décharges partielles 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.

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 [2].

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 [2].

III.3 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 dégager les bulles d'air 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 III.3 présente les 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.

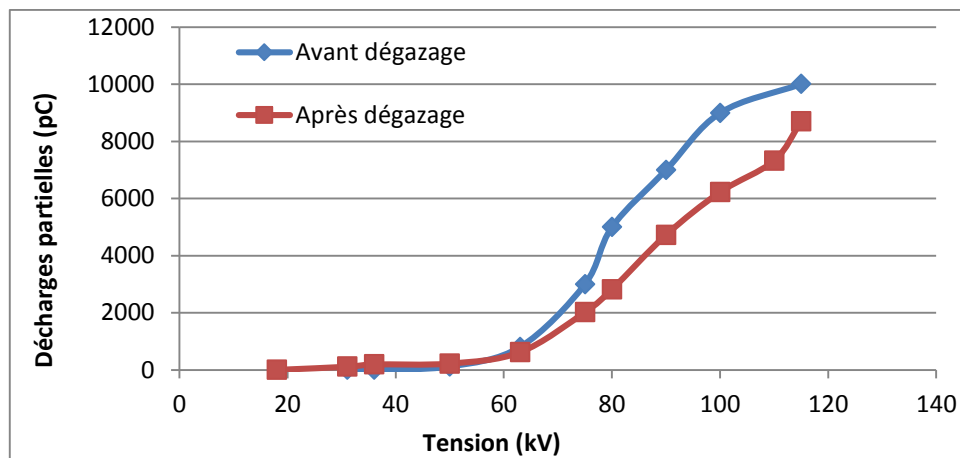


Fig. III.3 : Décharges Partielles en fonction de la tension.

Nous remarquons que les décharges partielles (les pertes diélectriques) augmentent 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, les décharges partielles augmentent 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 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 [2].

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 [2].

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) [2].

La figure III.4 illustre un ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé.

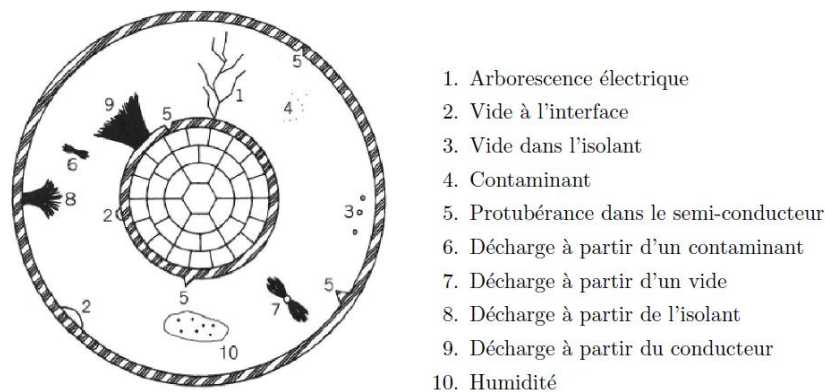


Fig. III.4 : Un ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble monophasé [12].

III.4 Essai d'enroulement suivi d'un test de décharges partielles

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 les variations des décharges partielles en fonction du rayon de courbure.

La figure III.5 représente les variations des décharges partielles en fonction du rayon de courbure :

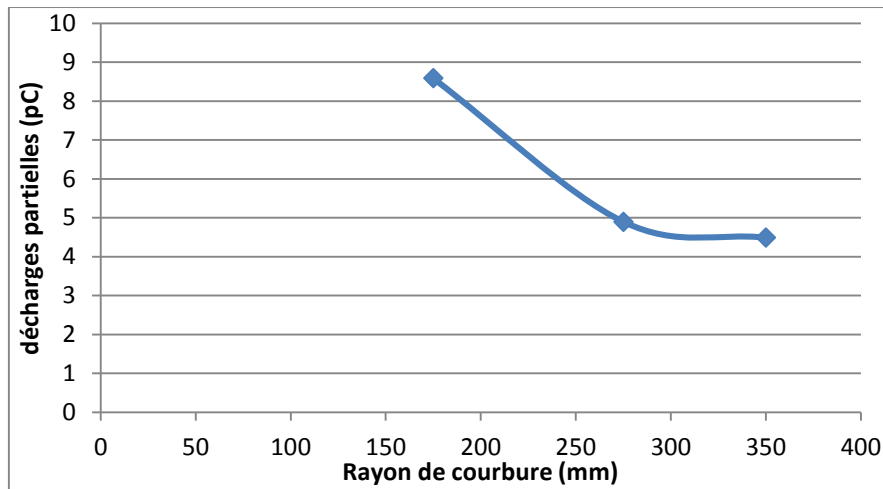


Fig. III.5 : Décharges partielles en fonction du rayon de courbure.

Nous remarquons 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.

III.5 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 [3]. 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 [4], 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 III.1 :

Tab. III.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 |

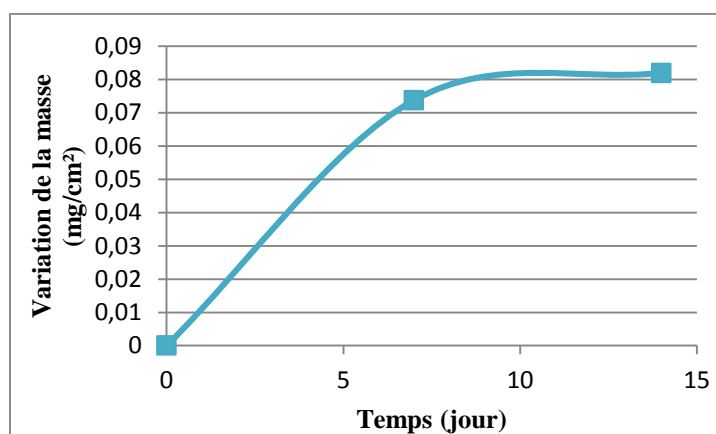


Fig. III.6 : La variation de masse en fonction du temps du vieillissement.

L'exploitation de la caractéristique représentée dans le graphe III.6 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 III.6 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 [5].

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 [5]: l'absorption d'eau.

III.6 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 III.7 représente les résultats obtenus:

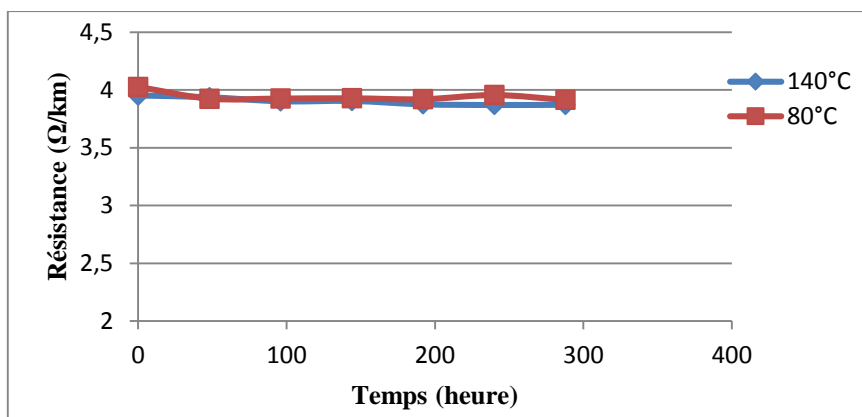


Fig. III.7 : La résistance linéique en fonction du temps de vieillissement.

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 III.7), 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.

III.7 Conséquences de dégradation dues au vieillissement thermique

III.7.1 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 thermique. Des photographies prises pour des tronçons de câble complet sont présentées à la figure III.8 après des temps de vieillissement différents pour chacune des températures du vieillissement thermique.

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 de l'isolant (PRC), 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.* [6] et S.O. Han et *al.* [7]. Des coupures de chaînes contribuent à la formation des groupes vinyloxy et

vinylidènes. Ces groupes sont responsables du changement de couleur du PRC durant le vieillissement aux hautes températures [8].



Fig. III.8 : Tronçons de câble complet 18/30 isolés par le PRC après vieillissement.

III.7.2 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. III.9 : Tronçons de câble complet avec la gaine du PVC après vieillissement

Bibliographies

- [1] P.LEBAS « diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles », Projet de Fin d'Etude, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège, 2008.
- [2] A.BOUBAKEUR, « Vieillissement du PRC, 1- Claquage des isolants solides, 2- Vieillissement thermique du Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC) ; (PRC utilisé dans l'isolation des câbles produits par ENICABiskra) », Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electrotechnique, Algérie, avril 2010.
- [3] 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.*
- [4] CEI 60811-402, « 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.
- [5] G. MARQUE, « Absorption de l'eau par les polymères », Thèse de Doctorat, université de Savoie, *avril 2000.*
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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, Département d'Electrotechnique, Algérie, 19 Juin 2007.
- [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, Département d'Electrotechnique, Algérie, Décembre 1991.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur l'influence des vieillissements thermique et électrique sur les propriétés électriques des câbles MT isolés au 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. Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution des propriétés 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 ce projet, nous avons réalisé des essais de différentes natures sur des tronçons de câbles complets 18/30 kV, nous avons constaté que dans le cas du vieillissement thermique, la charge apparente des décharges partielles diminue au début du vieillissement thermique, 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. Après un certain temps de vieillissement thermique, elle 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.

Dans le cas du vieillissement électrique, nous avons remarqué une augmentation de la charge apparente 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 électriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée.

Les cavités gazeuses jouent un rôle très important dans la dégradation des propriétés des câbles, tel que nous avons observé une augmentation de la charge apparente 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 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.

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.
- $U/U_0 = 18/30 \text{ kV}$ 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.