



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux Electriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
MERABET ROKAIA

Le : lundi 8 juillet 2019

Etude des câbles électriques à isolation PRC et l'isolateur en verre

Jury :

M.	CHERIET Ahmed	Pr	Université de Biskra	Président
M.	MAHDAD Belkacem	Pr	Université de Biskra	Examineur
M.	MIMOUNE Soury Mohamed	Pr	Université de Biskra	Rapporteur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande Electrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Hamada Nacer-eddine

Le : Dimanche 7 juillet 2019

Détection en ligne de défaut de court-circuit entre spires statoriques dans les Moteurs Asynchrones à Cage (MAS)

Jury :

Dr. Khaled YAHIA	Pr	Université de biskra	Président
Dr. Salah Eddine ZOUZOU	Pr	Université de biskra	Examineur
Dr. Mohamed SAHRAOUI	MCA	Université de biskra	Rapporteur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux Electriques

Présenté et soutenu par :
MERABET Rokaia

Le : lundi 8 juillet 2019

Etude des câbles électriques à isolation PRC et l'isolateur en verre

Présenté par :
MERABET Rokaia

Avis favorable de l'encadreur :
Pr. Mohamed MIMOUNE *signature*

Avis favorable du Président du Jury

Pr. CHERIET Ahmed

Signature

Cachet et signature



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À ma famille pour les sacrifices dont ils ont
fait preuve et mon égard.*

*À tous mes amis et mes collègues et à tous
ceux que j'aime.*

*À tous qui m'ont aidé durant toutes mes
études.*

MERABET ROKAIA

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout-puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ça nous fait plaisir de prendre ces quelques lignes, si peu nombreuses, afin de remercier les personnes qui nous ont soutenus durant notre mémoire.

D'une façon spéciale, nous tenons à remercier monsieur MIMOUNE Sourî Mohamed pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous encadrer.

J'exprime ma gratitude au chef laboratoire de l'ENICAB pour son support et son professionnalisme ont rendu possible la réalisation des travaux de notre mémoire.

On tient également à remercier monsieur MAHDAD Belkacem, d'avoir accepté de présider le jury de notre soutenance.

On remercie monsieur CHERIET Ahmed d'avoir accepté d'examiner notre travail de mémoire.

Je vous remercie monsieur FETOUCHE Abdelhak et HAMOUIA Mohamed Elhabib, Etudiants à l'Université du Biskra pour leurs aides dans laboratoire HT.

Nous remercions aussi nos chers enseignants qui nous ont bien suivis pendant notre parcours de master.

Ainsi, nos remerciements pour administration et le service du département Electrotechnique.

En fin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à la construction de ce mémoire de près comme de loin.

Liste des figures :

Chapitre I : Généralités sur les câbles électriques

I.1 : Le tréfilage d'un conducteur.....	8
I.2 : Conducteur tréfilé.....	9
I.3 : Le câblage d'un conducteur.....	9
I.4 : Conducteur câblé.....	9
I.5 : Conducteur isolé.....	10
I.6 : Test de la couche isolante.....	10
I.7 : Assemblage et bourrage d'un câble.....	11
I.8 : Constitution d'un câble.....	12
I.9 : l'étape finale de la gaine.....	12
I.10 : Câble radial.....	14
I.11 : Différents type d'un câble radial.....	14
I.12 : Câble XLPE.....	15
I.13 : Câble papier.....	15
I.14 : Câble ceinture non radial.....	16
I.15 : Câble BT non radial.....	16

Chapitre II : Caractéristiques d'un matériau diélectrique

II.1 : Modélisation d'un diélectrique.....	20
II-2 : Schéma équivalent représentant un diélectrique.....	21
II. 3 : Allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique.....	25
II. 4 : Modèle proposé par Jonscher et al intégrant une action cumulative du champ et du temps.....	27
II.5 : Classification des décharges partielles a) internes ; b) de surface ; c) couronne et d) en arborescences.....	29

Chapitre III : Présentation de l'entreprise ENICAB Biskra

III.1 : Plan de l'entreprise.....	32
III.2 : Câble domestique au niveau de l'ENICAB.....	36
III.3 : Câble industriel au niveau de l'ENICAB.....	36
III.4 : Câble de distribution (réseaux) au niveau de l'ENICAB.....	37
III.5 : Câbles moyens tension au niveau de l'ENICAB.....	37

Chapitre IV : Techniques expérimentales sur le PRC

IV.1 : Molécule de Polyéthylène ramifiée.....	40
IV.2 : Schéma du câble 18/30kV isolé au PRC.....	43
IV.3 : Schéma de principe pour la mesure des décharges partielles.....	44
IV.4. Variation du facteur de pertes en fonction de la température d'essai avant et après 2000h de vieillissement.....	46
IV.5 : Variation du facteur de pertes en fonction de la tension avant vieillissement.....	47
IV.6 : Variation du facteur de pertes en fonction de la tension après 2000 h vieillissement...	47
IV.7. Tension seuil de décharges partielles en fonction du temps de vieillissement.....	48

Chapitre V : Mesure la tension de contournement d'un isolateur en verre

Figure V.1 : Profile de l'isolateur.....	51
Figure V.2 : Les caractéristiques d'un isolateur.....	51
Figure V.3 : Cellule de HT.....	52
Figure.V.4 Circuit d'essai à fréquence industrielle.....	52
Figure V.5 : Pupitre de commande et contrôle de mesure.....	53
Figure V.6 : Montage de circuit.....	54
Figure V.7 : l'isolant est leur épaisseur entre les deux électrodes.....	54
Figure V.8 : Evolution des étincelles.....	55
Figure V.9 : Evolution des arcs.....	56

Liste des figures

Figure V.10 : Evolution du contournement.....	56
Figure V.11: La variation de la tension en fonction de l'épaisseur en fixe le diamètre de disque 8 cm.....	57
Figure V.12: La variation de la tension en fonction de l'épaisseur en fixe le diamètre de disque 9 cm.....	58
Figure V.13: La variation de la tension en fonction de l'épaisseur en fixe le diamètre de disque 10 cm.....	58

Table des matières

Introduction Générale.....	6
Chapitre I. Généralités sur les câbles électriques.....	8
Introduction.....	8
I.1 Process de fabrication des câbles.....	8
I.1-1- Tréfilage.....	8
I.1.2- Câblage.....	9
I.1.3- Isolation.....	10
I.1.3.1- Processus extrusion.....	10
I.1.4- Assemblage des phases.	11
I.1.5- Gaine Bourrage.....	11
I.1.6- Protection supplémentaire.....	11
I.1.7- Gaine extérieur.....	12
I.2- Les différents types de câble.....	12
I.2.1- Câble à champ radial.....	13
I.2.2- Câble à champ non radial.....	15
I.3- Tensions maximales d'essais.....	16
I.3.1- En situation de recherche de défaut.....	17
I.3.2- Sur câbles neufs HTA avant-première mise en service.....	17
I.3.3- Sur câbles BT.....	18

I.3.4 Diagnostic des câbles.....	18
I.3.4.1- Mesure de l'angle du facteur de perte (tangente delta).....	18
I.3.4.2- Mesure de décharges partielles.....	18
Conclusion.....	19
Chapitre II : Caractéristiques d'un matériau diélectrique.....	20
Introduction.....	20
II.1 Définition.....	20
I.2 Propriétés d'un matériau diélectrique.....	20
I.2.1 Permittivité relative.....	20
II.2.2 Rigidité diélectrique.....	21
II.2.3 Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif.....	22
II.3 Rupture diélectrique.....	23
II.4 Claquage diélectrique.....	23
II.4.1 Claquage électrique.....	23
II.4.2 Claquage électrochimique.....	23
II.4.3 Claquage thermique.....	23
II.5 Claquage des isolants électriques dans le temps.....	24
II.5.1 Rupture à court terme.....	24
II.5.1.1 Effet de la tension et du système d'électrodes.....	24
II.5.1.2 Effet de la température.....	25

II.5.1.3 Effet de l'épaisseur de l'isolant.....	25
II.5.2 Rupture à long terme.....	26
II.6 Essais de rigidité électrique.....	27
II.7 Décharges partielles.....	28
II.7.1 Définition.....	28
II.7.2 Classification des décharges partielles.....	29
II.8 Les tests diélectriques.....	29
II.8.1 Les facteurs d'influence sur les tests diélectriques.....	29
II.8.2 Facteurs déterminants en tests industriels.....	30
Conclusion.....	31
Chapitre III : Présentation de l'entreprise ENICAB Biskra.....	32
Introduction.....	32
III.1 Généralités sur l'unité de l'ENICAB.....	32
III.2 Les différents halls de fabrication et les ateliers de l'entreprise.....	33
III.3 Différentes sections de l'unité.....	33
II.3.1 Section fabrication de granulé.....	33
II.3.2 Système de refroidissement.....	34
II.3.3 Système de production d'air comprimé.....	34
II.3.4 Système de production de vapeur.....	35
II.3.5 Salle de contrôle.....	35

II.4 Matières premières.....	35
III.5 Produits de l'entreprise.....	35
III.5.1 Câbles basse tension.....	35
III.5.2 Câbles moyenne tension.....	37
III.5.3 Câbles haute tension.....	38
Conclusion.....	38
Chapitre IV : Techniques expérimentales sur le PRC.....	39
Introduction.....	39
IV.1 Polyéthylène réticulé chimiquement.....	39
IV.2 Essai individuels et prescription d'essai.....	41
IV.2.1 Comment effectuer l'essai de tension sur câble moyenne tension.....	41
IV.2.1.1 Généralités.....	41
IV.2.1.2 Méthode d'essai pour les câbles unipolaires.....	41
IV.2.1.3 Méthode d'essai pour les câbles tripolaires.....	41
IV.2.1.4 Tension d'essai.....	42
IV.2.1.5 Exigence.....	42
IV.3 Techniques expérimentales.....	42
IV.3.1 Présentation du câble.....	42
IV.3.2 Mesure de la tension seuil d'apparition de décharges partielles.....	43
IV.3.3 Mesure du facteur de pertes diélectriques et de la permittivité relative.....	44

IV.3.4 Mesure de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction.....	45
IV.4 Résultats et discussion.....	45
IV.4.1 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température.....	45
IV.4.2 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension.....	46
IV.4.3 Influence du vieillissement thermique sur la tension seuil de décharges partielles.....	48
Conclusion.....	49
Chapitre V : Mesure la tension de contournement d'un isolateur en verre.....	50
Introduction.....	50
V.1 profil d'un isolateur.....	50
V.2 Caractéristiques d'un isolateur.....	51
V.3 Equipement de test et de mesure.....	52
V.3.1 Circuit d'essai au laboratoire de Haute tension (Université de Biskra).....	52
V. 4 L'effet de l'épaisseur et le diamètre de verre sur la tension de contournement.....	54
V. 4.1 Mode opératoire.....	54
V. 4.2 Les étapes de manipulation.....	55
V.4.3 L'observation.....	55
V. 4. 4 : Les résultats et discussion.....	56
Conclusion.....	59
CONCLUSION GENERALE.....	60
REFERENCES.....	62

INTRODUCTION GENERALE

Le transport et la distribution d'énergie électrique sont réalisés depuis le XIX^{ème} siècle sous forme de courant alternatif (AC) principalement en raison de la simplicité de la mise en place de systèmes de production d'électricité en AC et la possibilité d'ajuster le niveau de tension de manière relativement aisée par l'utilisation de transformateurs. Ainsi, Les câbles électriques représentent les éléments les plus importants dans le système transport et distribution, dont le rôle est d'assurer une alimentation continue des récepteurs.

En parallèle, les besoins en énergie électrique se sont accrus et les sources, distribuées, d'énergie renouvelable prennent une part croissante des ressources, ce qui implique la nécessité de multiplier, renforcer et interconnecter les réseaux électriques. Ceci requiert généralement la construction de longues lignes aériennes ainsi que des liaisons souterraines ou sous-marines, et/ou de relier des réseaux frontaliers asynchrones. Donc on a besoin à des câbles électrique puisse être en service durant de nombreuses années exige des procédés de fabrication complexes qui demandent du personnel hautement qualifié.

De plus, l'utilisation des matériaux synthétiques dans l'isolation des systèmes des réseaux électriques apporte des avantages certains en termes de coût, de température de fonctionnement, de risque de pollution ou encore de maintenance par rapport à l'isolation à base de papier imprégné. Dans ce projet, nous avons étudié le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC) à cause de sa structure, de ses excellentes qualités diélectriques et mécaniques et par suite de son bon comportement aux contraintes thermiques, est devenu un produit de remplacement du Polyéthylène (PE) dans la fabrication des câbles de transport d'énergie électrique. Cependant et malgré toutes les précautions prises lors de leur mise en œuvre, les câbles isolés au PRC connaissent, à travers le monde, certaines difficultés en termes de durée de vie. Les principales causes de leur vieillissement prématuré sont souvent associées au processus de fabrication. L'existence, dans l'isolation de vacuoles sièges de décharges partielles, d'impuretés et de l'humidité pourrait, plus au moins conjointement, contribuer, en présence des contraintes électriques et thermiques, à la dérive des propriétés diélectriques du matériau en fonction du temps de vieillissement. Les décharges partielles peuvent contribuer à l'augmentation des pertes diélectriques dans une isolation vieillie thermiquement. De nombreux travaux ont montré, dans une étude qualitative, que le PRC devient très sensible à la dégradation sous décharges partielles, pour des températures supérieures à celle du fonctionnement en service normal. Ce travail est organisé en quatre chapitres distincts.

Le premier chapitre donne une description sur les câbles électriques, leurs systèmes de fabrication et les différents types utilisés dans le transport. Nous évoquerons également les principaux tests de conformité mesure de DP s'est avéré être une méthode efficace pour l'identification de défauts technique pour les câbles et leurs accessoires.

Dans le second chapitre seront exposées les différentes caractéristiques d'un matériau diélectrique (Permittivité relative, Rigidité diélectrique et Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif), on aura traité aussi le problème de claquage de ce matériau et la rupture diélectrique.

Le troisième chapitre est consacré au présenter l'unité de l'ENICAB Biskra est une unité qui sert à produire des câbles électriques de divers types et natures. L'industrie des câbles électriques nécessitent des procédés de fabrication complexes et du personnel hautement qualifié pour produire des câbles électriques puissent être en service durant de nombreuses année.

Dans le quatrième chapitre, les résultats expérimentaux de Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température et en fonction de la tension sur le l'isolant PRC seront présentés en premier lieu pour avoir une vue précise sur le vieillissement de matériau, les résultats expérimentaux et ceux obtenus sont discutés.

Dans le dernier chapitre, nous parlerons de l'isolant qui porte le câble électrique. Nous avons choisi le verre, puis nous mesurerons la tension de contournement en fonction de l'épaisseur et du diamètre de l'isolant et nous discuterons des résultats obtenus.

Chapitre I. Généralités sur les câbles électriques :**Introduction**

Les conducteurs et les câbles représentent les éléments actifs des liaisons électriques, puisque leur rôle est de conduire le courant électrique et de le transporter pour assurer une alimentation des récepteurs sous une tension et une intensité nominale définie, sans chute de tension exagérée et sans échauffement excessif. Elles doivent en outre être capables de supporter un courant de court-circuit pendant un temps déterminé.

Il en existe une très grande variété, pour satisfaire à toutes les utilisations. Les conducteurs sous forme rigide, souple, distribués en câbles unipolaires, multipolaires, et avec des sections différentes.

I.1 Process de fabrication des câbles :

La technologie dont on a besoin pour qu'un câble électrique puisse être en service durant de nombreuses années exige des procédés de fabrication complexes qui demandent du personnel hautement qualifié [8].

Pour cela Le contrôle qualité est établi en trois étapes :

- Contrôle des matières premières utilisées dans la fabrication des câbles
- Contrôles en cours de production
- Essais électriques finaux.

I.1.1 Tréfilage :

La première étape de fabrication d'un conducteur est le tréfilage. Elle consiste à réduire le diamètre du fil de cuivre de manière progressive jusqu'au diamètre final.

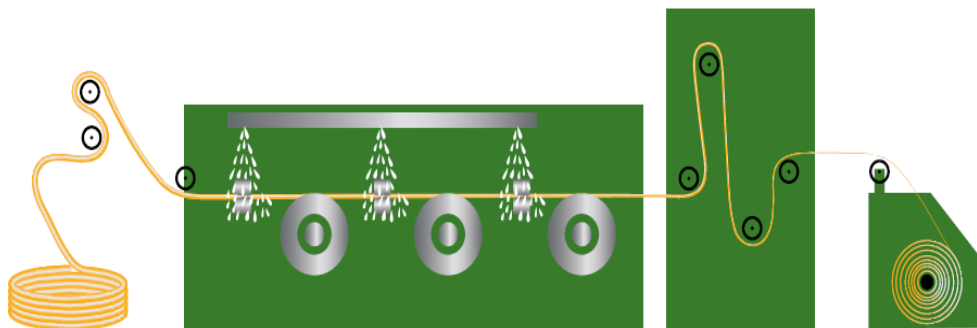


Figure I.1 : Le tréfilage d'un conducteur.



Figure I.2 : Conducteur tréfilé.

I.1.2 Câblage :

Après le tréfilage, les fils de cuivre recuit obtenus sont regroupés afin de former les conducteurs. Ce processus s'appelle câblage.

- 1- Mesure de la résistance linéique
- 2- Mesure de la masse linéique des conducteurs
- 3- Pas et rapport de câblage
- 4- Diamètre des conducteurs

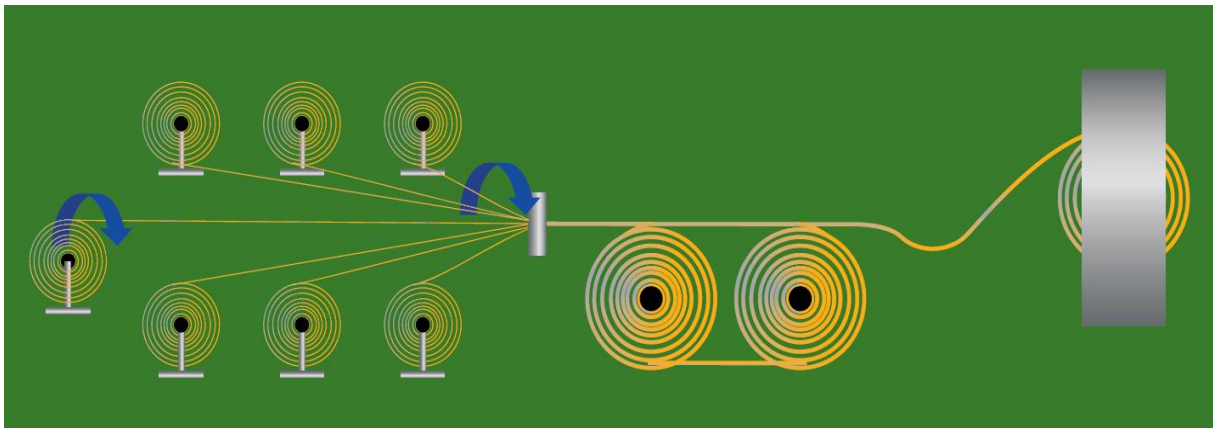


Figure I.3 : Le câblage d'un conducteur.

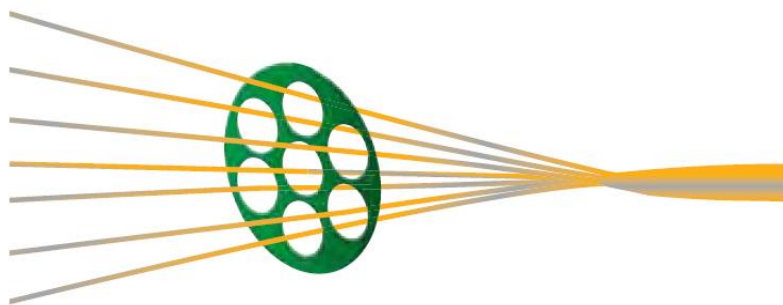


Figure I.4 : Conducteur câblé.

I.1.3 Isolation :

L'isolation est le recouvrement du conducteur par une enveloppe isolante. En fonction des caractéristiques du câble, les matériaux d'isolation sont prédéfinis selon le type et la construction des câbles.

La capacité d'isolation du matériau (PVC- PRC - PRS) et son épaisseur détermineront la tension maximale de service du câble selon les normes international [7].

L'enveloppe isolante est appliquée sur le conducteur par extrusion pour les câbles BT [8].



Figure I.5 : Conducteur isolé.

I.1.3.1 Processus extrusion :

- Epaisseur de l'isolant
- Prévention des défauts /Spark Test
- Couleur de l'isolant /marquage en câs de produit fini.
- Essais d'allongement à chaud pour isolant
- Diamètre extérieur

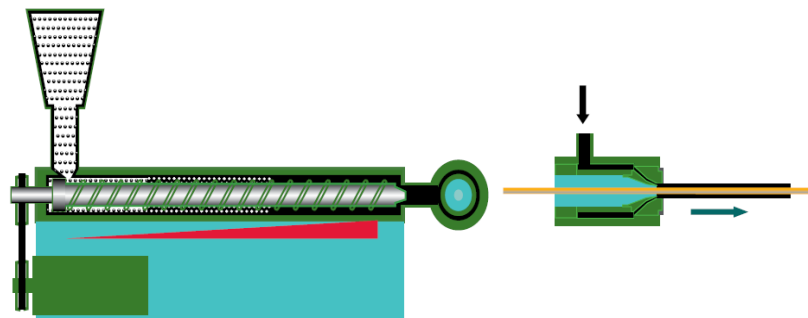


Figure I.6 : Test de la couche isolante.

Le câble est soumis à un contrôle de voltage durant le processus afin de garantir que la couche d'isolation ne présente aucun défaut.

I.1.4 Assemblage des phases :

L'assemblage des phases consiste à regrouper différents conducteurs isolés afin de former un câble multi- polaire.

1- Diamètre

2- Pas d'assemblage

I.1.5 Gaine Bourrage

Le contrôle est de s'assurer que les espaces entre les câbles sont scellés recueilli par un matériau blanc PRC. Pour une forme circulaire lisse [7].

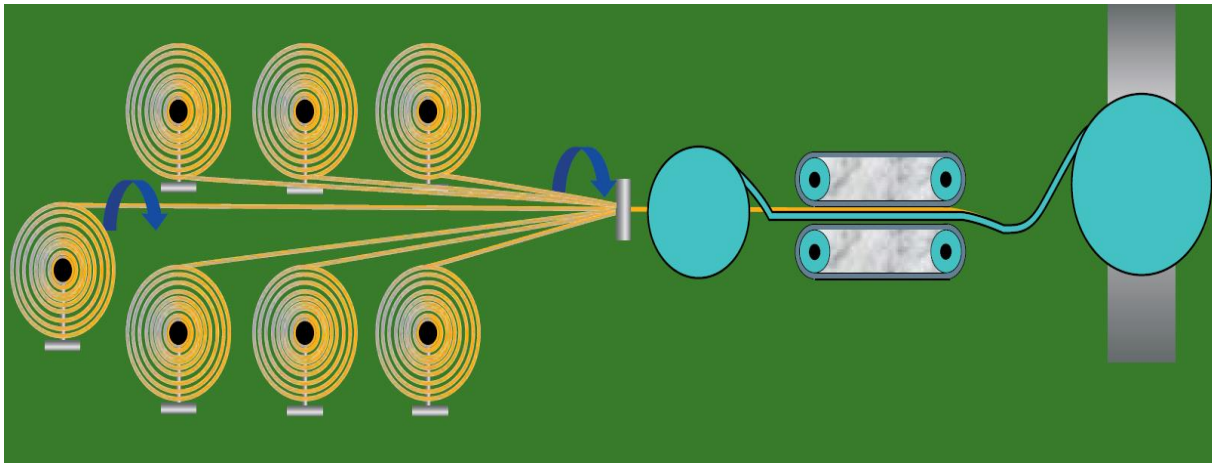


Figure I.7 : Assemblage et bourrage d'un câble.

I.1.6 Protection supplémentaire :

A ce stade, le câble est isolé par un blindage mécanique dont la fonction est de protéger le câble des influences extérieures (chocs, des attaques de rongeurs, ...) en observant l'épaisseur et la qualité du préservatif ainsi que la qualité de l'emballage lui-même [7].

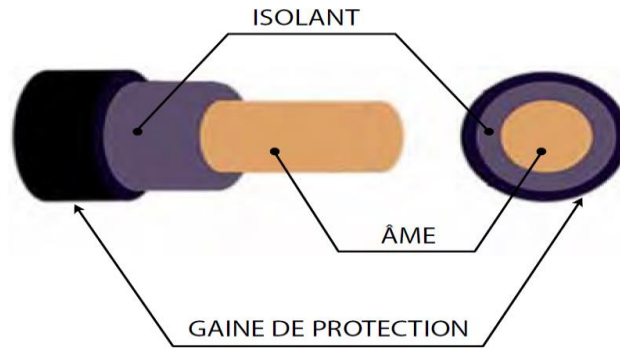


Figure I.8 : Constitution d'un câble.

I.1.7 Gaine extérieur :

Les câbles portent un recouvrement polymérique extérieur pour leur protection ; Appelée gaine extérieure.

Cette gaine protège les phases isolées du câble



Figure I.9 : l'étape finale de la gaine.

Notre câble est marqué comme suit :

- L'entreprise de fabrication
- Section
- Désignation
- Norme
- Année de fabrication.

I.2 Les différents types de câble :

On peut classer selon différents critères.

- Par niveau de tension : hormis les cas particuliers des câbles à huile ou à gaz en HTB, on note que tous les câbles à isolement papier ou synthétique, quels que soient leurs

niveaux de tension, bénéficieront des mêmes méthodes de pré-localisation et de localisation de défauts.

- Par type de réseau : arborescents en basse tension, à coupure d'artère avec ou sans dérivation ou en double dérivation en HTA ou encore strictement sans dérivation en HTA, la structure des réseaux va seulement conditionner le choix de certaines méthodes de pré-localisation en raison du rapport efficacité/sécurité.
- Par structure de câble : avant d'en arriver aux câbles unipolaires à isolation synthétique posés aujourd'hui, nous avons connu diverses isolations en passant par les câbles tripolaires métallisés, les câbles « tri plomb », ceux à ceinture, etc. La structure des câbles influence directement le nombre des mesures à réaliser pour caractériser le du défaut [3].

I.2.1 Câble à champ radial :

D'une manière générale, un câble unipolaire se présente sous la forme d'un condensateur cylindrique (figure I.10) constitué essentiellement de :

- Une **âme conductrice** câblée ou segmentée, en cuivre ou en aluminium (les sections variant entre 0.35 et 1600 mm²).
- Un **écran semi-conducteur interne** (pour les câbles dont la tension d'utilisation est supérieure à 3 kV), extrudé ou rubané, dont le rôle est d'homogénéiser le champ électrique.
- Une **enveloppe isolante en matériau polymérique** (polyéthylène, polyéthylène réticulé, caoutchouc, polychlorure de vinyle, les enveloppes isolantes en papier imprégné n'étant plus utilisées que pour les câbles haute tension courant continu) dont l'épaisseur varie entre 0.5 et 30 mm selon la tension d'utilisation et la nature du matériau [3].
- Un **écran semi-conducteur externe** (cas des tensions supérieurs à 3 kV), dont le rôle est d'homogénéiser le champ électrique au niveau des électrodes.
- Un écran métallique (en plomb, en aluminium ou en cuivre), dont le rôle est :
 - De constituer une électrode de référence.
 - De permettre l'évacuation des courants de court-circuit homopolaires.
 - D'assurer l'étanchéité radiale.
 - D'orienter et de canaliser les lignes de champ électrique.

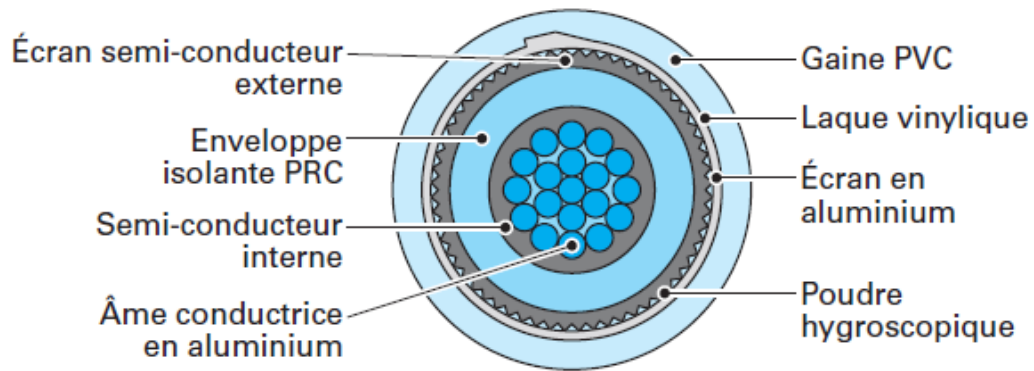


Figure I.10 : Câble radial.

- Enfin, une gaine de protection externe en matériau polymérique, jouant un rôle de protection contre les corrosions, favorisant l'étanchéité, la protection mécanique à la pose et, lorsque cela est nécessaire, assurant une isolation électrique de l'écran par rapport au sol.

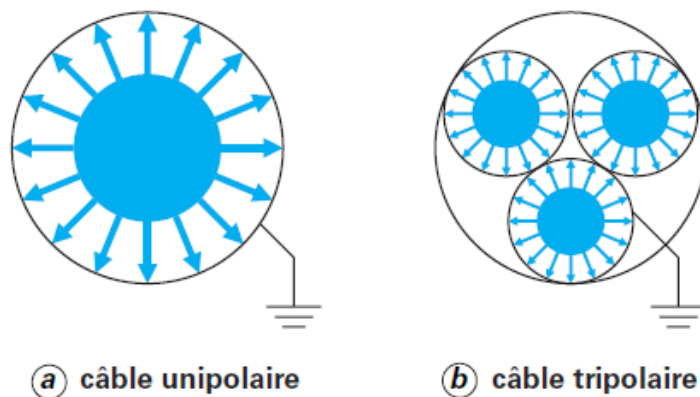


Figure I.11 : Différents type d'un câble radial.

Dans cette structure de câble, les écrans sont tous au même potentiel et reliés à la terre. Les lignes de forces sont toujours perpendiculaires aux couches de l'isolant (figure I.11a). Chaque conducteur dispose d'un écran individuel (figure I.11b). Ce câble ne peut donc avoir que des défauts phase/écran. Le défaut phase/phase direct est impossible par construction, en théorie.

Les utilisateurs disent que cela peut être une réalité. On ne pose, aujourd'hui, que des câbles torsadés (figure I.12) [3].

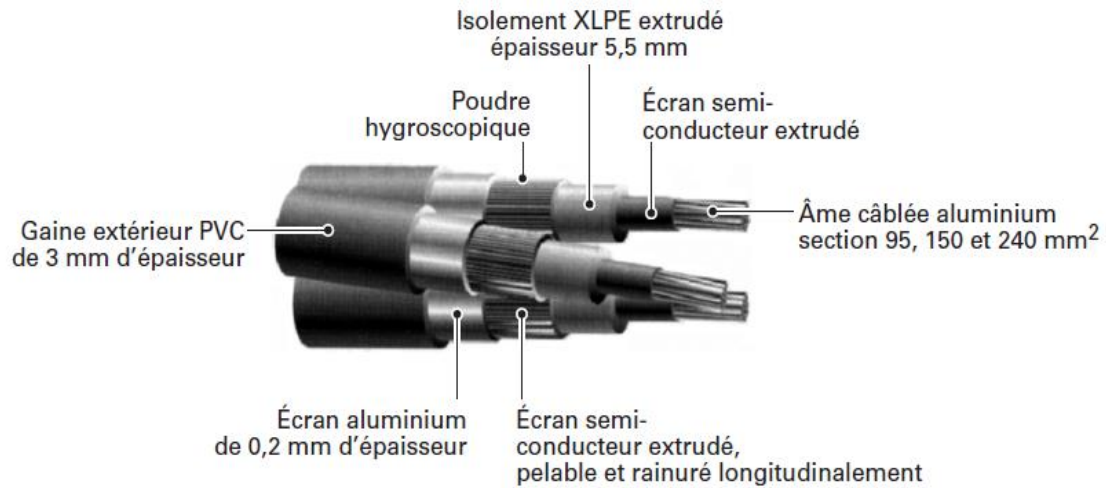


Figure I.12 : Câble XLPE.

I.2.2 Câble à champ non radial :

Cette structure concerne essentiellement les câbles bas tension. Cependant, il y a quelques dizaines d'années, on a posé en réseau des câbles à champ non radial jusqu'à des tensions de service de 15 kV. L'isolant est principalement du papier imprégné d'huile, migrante ou non (figure I.13).

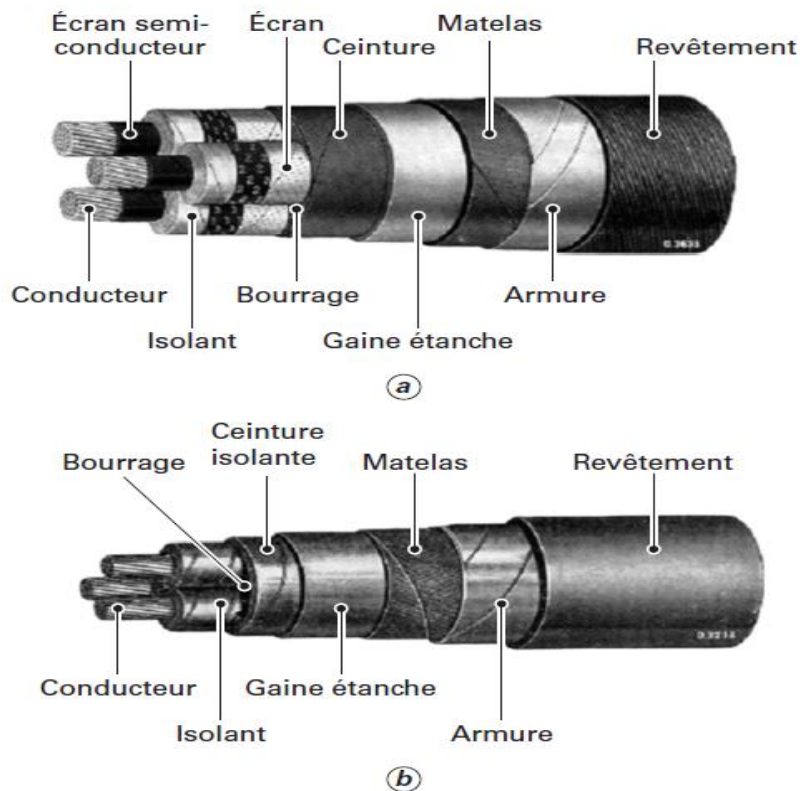


Figure I.13 : Câble papier.

Faute d'écran individuel, on constate que les isolants sont le siège de contraintes importantes. En effet, le champ électrique en un point quelconque de l'isolant est constamment variable en grandeur et en dimension. Les lignes de force peuvent être tangentielles. Si des bulles de gaz (vacuoles) sont emprisonnées entre les couches de papier, on risque la destruction de l'isolant (figure I.14 et I.15).

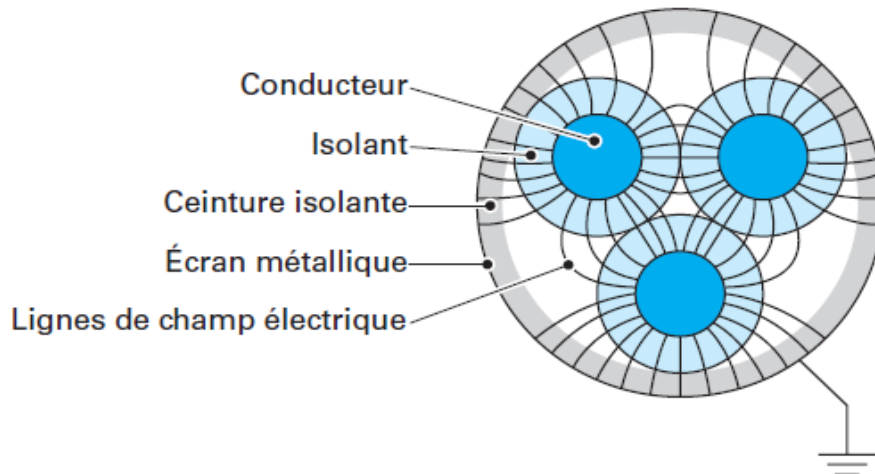


Figure I.14 : Câble ceinture non radial.

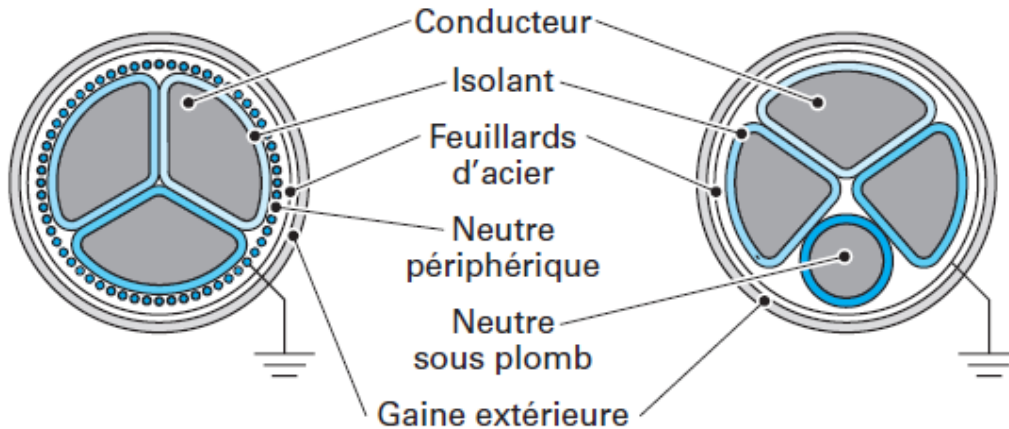


Figure I.15 : Câble BT non radial.

Ce câble ne dispose que d'un seul écran, collectif. Les défauts phase/écran, mais aussi ceux entre phases sont possibles [3].

I.3 Tensions maximales d'essais :

La tension assignée est un ensemble de trois valeurs exprimées en kV qui s'écrivent habituellement sous la forme suivante :

- U_0 est la tension efficace entre phase et écran.

- U est la tension efficace entre deux phases.
- U_M est la tension efficace entre phases, pour laquelle le câble et ses accessoires ont été conçus.

C'est la valeur de U_0 qui sert à définir l'épaisseur de l'isolant, la tension d'essai diélectrique et la tension maximale à mettre en œuvre en situation de recherche de défauts. Ce qu'on a appelé « tension spécifiée » il y a quelques années correspond à U_0 [3].

I.3.1 En situation de recherche de défaut :

L'expérience a montré que pour les ouvrages BT et HTA, il ne fallait pas dépasser trois fois la valeur de la tension assignée U_0 du câble ou de la liaison en essai.

$$\text{Tension limite maximale d'essais} = 3 U_0$$

Cette prescription s'applique à toutes les étapes d'une recherche de défauts : essais diélectriques, méthodes de mesure, localisation par ondes de choc, etc.

Exemples :

- Câble BT : $U_0 = 0,6 \text{ kV} \rightarrow U_{\max} \leq 1,8 \text{ kV}$
- Câble BT : $U_0 = 1 \text{ kV} \rightarrow U_{\max} \leq 3 \text{ kV}$
- Câble HTA 5,5 kV à ceinture : $U_0 = 5,5 \text{ kV} \rightarrow U_{\max} \leq 16,5 \text{ kV}$
- Câble HTA 20 kV à champ radial : $U_0 = 12 \text{ kV} \rightarrow U_{\max} \leq 36 \text{ kV}$

I.3.2 Sur câbles neufs HTA avant-première mise en service :

À ce jour, c'est la norme internationale CEI 60502 qui régit ces essais pour les câbles HTA et HTB.

Si on les réalise en tension continue, la limite des essais est fixée à $4 U_0$ et la durée de l'essai est de 15 min appliqué entre chaque conducteur et l'écran. On doit faire autant d'essais que le câble comporte de phases.

La norme prévoit une alternative pour réaliser les essais à fréquence industrielle en appliquant :

- Soit un essai pendant 5 min à la tension entre phases du réseau ;
- Soit un essai pendant 24 h à la tension nominale de service du réseau.

Concernant les réseaux d'Électricité, au lieu d'appliquer ce type d'essais nécessitant des équipements nouveaux, c'est l'état de la gaine extérieure qui est contrôlé. Un appareil agréé,

le TESTECRAN, mesure la résistance de la gaine (entre l'écran et la terre). Dans le cas où cette valeur est inférieure à $2 \text{ M}\Omega$, on se retrouve dans le cas d'une recherche de défauts classique, avec une suspicion d'incident. La limite des essais retombe à $3 U_0$. Si on est au-dessus de cette valeur, le câble est considéré comme bon.

I.3.3 Sur câbles BT :

Aucun essai particulier n'est à appliquer hormis une vérification à l'ohmmètre sur une position $500 \text{ V} - 10 \text{ mA}$. Cependant, l'essai à $3 U_0$ reste possible.

I.3.4 Diagnostic des câbles :

Les techniques de diagnostic des câbles visent à apprécier l'état d'un réseau et par extension se prononcer sur sa pérennité. Ces techniques sont l'objet de développements permanents mais on peut ici donner les potentialités de certaines d'entre elles à la recherche et développement.

I.3.4.1 Mesure de l'angle du facteur de perte (tangente delta) :

Cette mesure peut être réalisée à une très basse fréquence fixe ($0,1 \text{ Hz}$ ou en balayant un spectre basse fréquence entre $0,001$ et 100 Hz) permettant de déceler les altérations de tronçons de câbles qui sont dues à une pénétration d'humidité (isolation en PE ou en papier imprégné).

I.3.4.2 Mesure de décharges partielles :

Cette mesure permet d'identifier et de localiser, par réflectométrie, des points faibles d'un tronçon qui sont le siège de micro décharges dans l'isolant, révélatrices d'un travail électrique qui induit la dégradation de ce dernier.

On peut donc, à partir de ces mesures, déceler les tronçons les plus critiques et hiérarchiser leur remplacement préventif ou tout du moins celui des points faibles localisés (accessoires de jonction, par exemple).

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la procédure de fabrication des câbles électriques et les essais de conformité. Pour ce là, La détection et la reconnaissance de défauts pendant un essai du système de câble HT et MT non destructif sont très importants pour éviter d'éventuelles défaillances pendant le fonctionnement du système de câblage. Les tests comme mesure de DP s'est avéré être une méthode efficace pour l'identification de défauts technique (sensible, précise et non destructive) pour les câbles HT et MT et leurs accessoires. Les accessoires de câble représentent la partie critique du système de câble. Ils peuvent générer des défauts qui entraînent la génération des activités de DP.

Chapitre II : Caractéristiques d'un matériau diélectrique

Introduction :

Le matériau diélectrique c'est la partie la plus sensible dans les équipements et les câbles électrique. Donc l'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

II.1 Définition :

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à $10^{16} \Omega \cdot m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif [4].

Les isolants sont utilisés pour :

- Assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés.
- Protection des personnes et des équipements.
- Supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre.
- Remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

I.2 Propriétés d'un matériau diélectrique :

I.2.1 Permittivité relative :

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) :

$$\text{Sa capacité est : } C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{II.1})$$

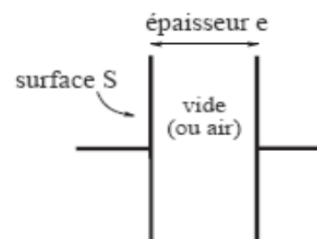


Figure II.1 : Modélisation d'un diélectrique.

Où $\epsilon_0 = 8,85.10^{-12}$ F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air). Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$C = \epsilon_r C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{II.2})$$

La permittivité relative est définie par le rapport : $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ (II.3)

Pour l'air, les gaz et le vide, $\epsilon_r = 1$. Donc, $\epsilon_0 = \epsilon = 8,85.10^{-12}$ F / m. Pour tous les autres isolants, $\epsilon_r > 1$.

Matériau	Constante diélectrique $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
Polymère thermoplastique	
Polyéthylène (PE)	2.3
Polychlorure de vinyle (PVC)	3.7
Polystyrène (PS)	2.5
Poly-méthacrylate de méthyle (PMMA)	3.7
Polycarbonate (PC)	2.9
Polymère thermodurcissable	
Résine époxyde	2.8 à 4.7
Elastomères	
Caoutchouc	2.6
Verre	
Pyrex	4 à 6
Verre au plomb	19
Céramique	
Al ₂ O ₃	8 à 10
Porcelaine	6 à 7
Diamant	5.5
Eau	80

Tableau 1 : Constante diélectrique relatives à 25°C.

II.2.2 Rigidité diélectrique :

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au-delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparaît un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui-même. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons). Par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des

surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale.

La rigidité diélectrique dépend de :

- La fréquence, la forme et la durée d'application de la tension.
- La température, la pression et l'humidité de l'atmosphère.
- La présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, la pollution, ...).

Numériquement, la rigidité diélectrique est le rapport entre le potentiel appliqué et la distance entre les électrodes au moment où la rupture s'effectue :

$$E_d = \frac{Ud}{e} \quad (\text{kV/cm ou kV/mm})(\text{II.4})$$

II.2.3 Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif :

Un isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée par le circuit équivalent suivant : C représente la capacité entre les deux conducteurs et la résistance R est la résistance d'isolement de l'isolant, elle est toujours $\geq 10^{12} \Omega$.

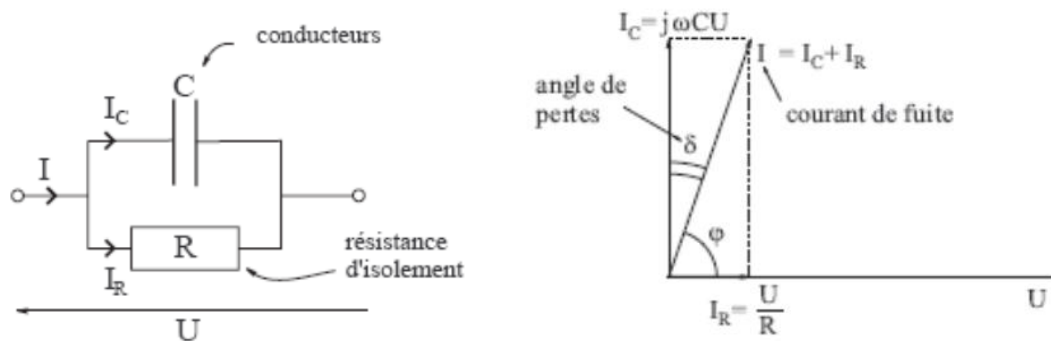


Figure II-2 : Schéma équivalent représentant un diélectrique.

L'angle de pertes δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le courant de fuite I traversant l'isolant. On a :

$$\tan \varphi = \frac{CU\omega}{U/R} = RC\omega \quad \implies \quad \tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi} = \frac{1}{RC\omega}$$

La valeur $\tan \delta$ est appelée facteur de dissipation diélectrique. L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant :

- Bon isolant \rightarrow résistance d'isolement R élevée et δ faible.
- Mauvais isolant \rightarrow résistance d'isolement R faible et δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation $\tan \delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4} .

II.3 Rupture diélectrique :

Un claquage n'est jamais la conséquence directe du champ électrique appliqué au milieu isolant (contrairement à l'extraction des électrons par exemple). Ce phénomène est dû à l'accumulation d'énergie (thermique, cinétique, élastique) que le matériau ne peut compenser.

L'étude de la rupture diélectrique étant très complexe puisqu'elle fait appel à des lois fondamentales sur la matière, on ne regarde dans ce qui suit que les phénomènes disruptifs en tension continue (certains comportements aux fréquences industrielles pouvant être très proches) [20].

Plusieurs types de claquage existent. Mais, on distingue généralement le claquage électronique et le claquage thermique tout en notant que la distinction n'est pas forcément évidente car un claquage électronique conduit toujours à une destruction locale du matériau par fusion thermique et inversement un claquage thermique est principalement la conséquence d'un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électronique.

II.4 Claquage diélectrique :

La rigidité diélectrique est l'une des caractéristiques principales des matériaux isolants. L'intensité du champ électrique sous laquelle un diélectrique peut fonctionner ne doit pas dépasser un certain seuil bien déterminé. Dans le cas contraire, le diélectrique sera perforé par une étincelle et perd ainsi ses propriétés isolantes, car sa résistance diminue fortement et les pièces conductrices précédemment séparées par l'isolant deviennent court-circuitées : c'est le claquage diélectrique [1].

II.4.1 Claquage électrique :

IL est caractérisé par le développement rapide d'un processus électrique suite à l'ionisation par choc, où les électrons forment des avalanches et par conséquent des canaux de décharge. Ce genre de claquage est caractérisé par son développement rapide $t = 0$ à 10 secondes.

II.4.2 Claquage électrochimique :

Il apparaît souvent lors du fonctionnement du diélectrique dans des conditions ambiantes sévères ; à savoir des températures élevées et à des taux d'humidité élevés de l'air ambiant. Dans ce cas, c'est un processus électrolytique qui provoque la diminution progressive de la résistance d'isolation. On appelle souvent ce phénomène vieillissement du diélectrique. Il réduit par conséquent la rigidité diélectrique et termine par un claquage à une tension inférieure à celle du claquage électrique. Ce phénomène touche généralement les diélectriques organiques. Il exige un temps plus au moins long pour son développement.

II.4.3 Claquage thermique :

Ce genre de claquage est provoqué par l'échauffement du diélectrique dans un champ électrique jusqu'à une température qui correspond à la destruction de l'isolant. Ce phénomène a lieu si la quantité de l'énergie dégagée dans un diélectrique dépasse celle dissipée dans le milieu ambiant

(mauvaise ventilation). Dans ces conditions, la température augmente et atteint les valeurs critiques. La quantité d'énergie dégagée s'écrit :

$$Q_{\text{dég}} = C \cdot \omega \cdot U^2 \cdot \text{tg}\delta \quad (\text{II.5})$$

La quantité d'énergie dissipée :

$$Q_{\text{dis}} = \sigma S (t_1 - t_2) \quad (\text{II.6})$$

U : Tension entre les électrodes.

ω : Fréquence angulaire de la tension.

C : Capacité de l'isolant.

σ : Coefficient de transmission de chaleur.

$\text{tg}\delta$: Facteur de dissipation d'énergie.

S : Surface du diélectrique.

t_1 : Température de la surface du diélectrique :

t_0 : température du milieu ambiant.

Ces différentes contraintes se répercutent par un dégagement de chaleur qui aura une influence sur la longévité.

II.5 Claquage des isolants électriques dans le temps :

II.5.1 Rupture à court terme :

La rupture est un phénomène localisé. L'introduction d'électrons chauds dans la structure des polymères s'accompagne d'une dégradation du matériau résultant de l'impact de ces porteurs sur les molécules du milieu. Sous des champs de 1 à 10 MV/cm, les temps de rupture restent inférieurs à la seconde : c'est la rupture diélectrique à court terme. L'effet de la charge d'espace est important dans les phénomènes de claquage. Cette dernière dépend de la morphologie du matériau. La rigidité diélectrique des polymères polaires est plus importante que celle des polymères non polaires. La tenue diélectrique des polymères dépend de plusieurs paramètres.

II.5.1.1 Effet de la tension et du système d'électrodes :

La tension de rupture dépend :

- De la distance inter électrode ;
- De la géométrie des électrodes qui déterminent la configuration du champ électrique ;
- De la forme de l'onde de tension, de la fréquence et de son mode d'application par palier ou par rampe. Des essais effectués sur des échantillons de câbles ont montré que la tension de claquage est plus importante en continue que en alternatif.

- Souvent du métal des électrodes ;
- De l'état de la surface des électrodes.

II.5.1.2 Effet de la température :

L'allure générale de la dépendance de la température de la rigidité diélectrique en courant continu pour des polymères non polaires, tel que le polyéthylène d'après Ieda montre 3 régions on observe une décroissance de la rigidité diélectrique des basses températures vers les hautes températures.

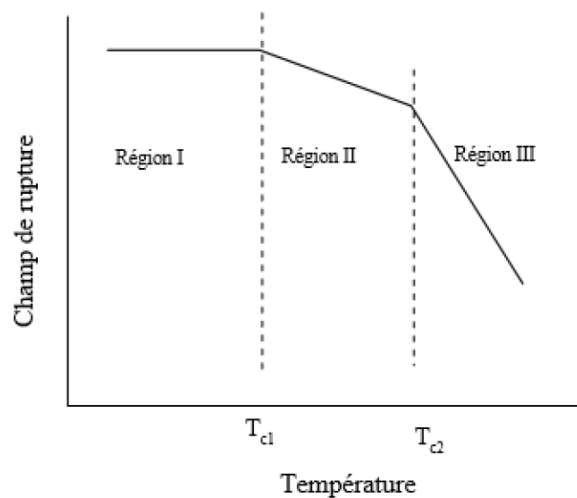


Figure II. 3 : Allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique.

Dans le cas du polyéthylène, sous champ alternatif uniforme, le gradient électrique de rupture diminue en fonction de la température.

II.5.1.3 Effet de l'épaisseur de l'isolant :

Généralement le champ de claquage diminue quand l'épaisseur augmente la rigidité diélectrique d'un matériau est liée à l'épaisseur e [mm] de l'isolant par la relation suivante :

$$E = K e^{-n}$$

Où :

K : constante dépendant des conditions de mesure, de la géométrie et des propriétés des électrodes.

e : épaisseur de l'isolant.

n : constante, $0.5 < n < 0.7$ suivant le matériau considéré.

II.5.2 Rupture à long terme :

Il est difficile de faire une distinction entre le claquage à court terme et le claquage à long terme. Il n'est pas aisé de définir cette frontière temporelle. Dans le cas de la rupture à long terme, on parle plutôt de vieillissement électrique du matériau. Le vieillissement d'un isolant est, en général, tout phénomène qui se traduit par une évolution lente et irréversible de ses propriétés avec le temps. Les mécanismes qui interviennent sont: l'oxydation, l'hydrolyse, la photoxydation, ...

La rupture à long terme peut être différée dans le temps, de quelques secondes à quelques heures voire quelques années.

Le problème de la rupture se résumant à un transfert d'énergie entre le champ électrique et les porteurs de charge, une théorie de rupture à long terme doit pouvoir expliquer comment sous un champ relativement faible, les porteurs peuvent gagner l'énergie de quelques électron-volts nécessaires à la rupture de liaisons dans un isolant. Dans la littérature, il n'existe pas à proprement parlé de théorie de rupture à long terme. Un modèle a été développé par Jonscher et al [22] qui s'applique aussi bien à la rupture aux temps courts qu'aux temps longs. Le modèle repose sur 2 hypothèses qui résultent d'une analyse détaillée des caractéristiques générales de la rupture dans une large gamme de matériaux de structures différentes. Les différentes étapes du processus sont [22] :

Stade 1

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

Stade 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.

Stade 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.

Stade 4

Les porteurs dont le libre parcours moyen est de plus en plus grand, au sein de cesamas, sont susceptibles d'acquérir des énergies importantes donc de produire des défauts dedimensions plus importantes qui peuvent apparaître sous forme d'arborescence par exemple.

Stade 5

La rupture se fait selon un mécanisme de percolation entre les amas des défauts.

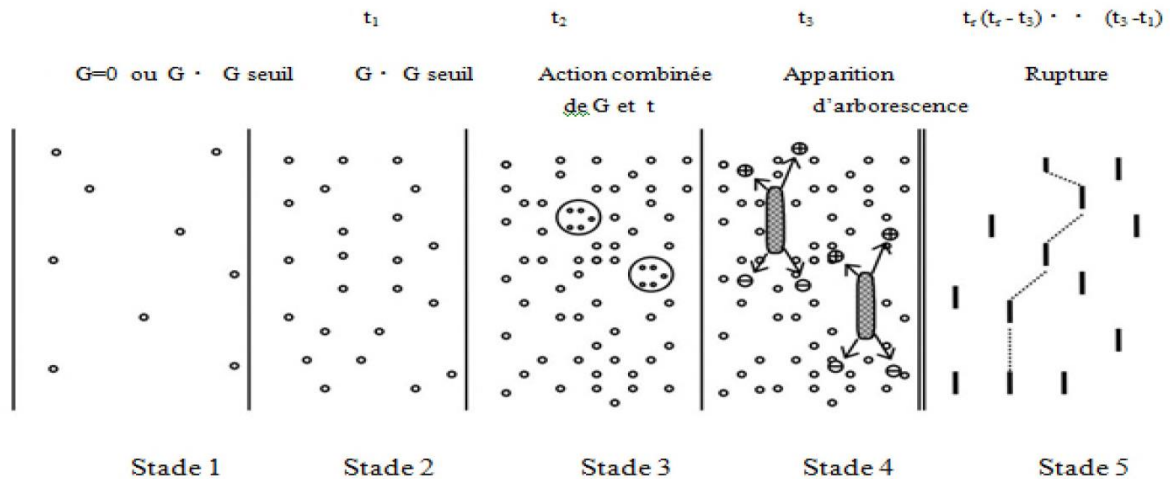


Figure II. 4 : Modèle proposé par Jonscher et al intégrant une action cumulative du champ et du temps.

Le modèle présenté sous forme schématique à la figure II.2 repose sur l'hypothèse qu'il faut apporter moins d'énergie pour étendre les défauts initiaux de la structure que pour en créer de nouveaux. Il propose donc la création de défauts au sein du matériau à partir de défauts initiaux liés à sa structure désordonnée. Ce sont les porteurs de charge qui sont à l'origine de l'extension des défauts initiaux. En l'absence de porteurs, il ne peut y avoir aucune évolution.

II.6 Essais de rigidité électrique :

Il faut distinguer les essais effectués afin de déterminer la tension de rupture (ou claquage) d'un milieu isolant, des essais normatifs qui sont utilisés pour détecter d'éventuels défauts sur un produit. Au cours de ces essais normatifs les isolants sont soumis à des tensions généralement très en dessous de leurs limites de rupture : le rapport entre les deux tensions représente en quelque sorte le coefficient de sécurité demandé pour la conception du matériel.

Il existe plusieurs types d'essais de rigidité diélectrique et ils se distinguent principalement par la nature des tensions d'épreuves et des conditions d'applications (durée, vitesse d'évolution, forme, etc...) [20].

II.7 Décharges partielles :

II.7.1 Définition :

Les décharges partielles sont des décharges électriques localisées, résultant d'une ionisation partielle du gaz compris entre au moins deux conducteurs imposant à l'intervalle les séparant un champ électrique, sans toute fois conduire à un court-circuit entre ces conducteurs.

Ces décharges sont caractérisées par une tension élevée et un courant moyen d'intensité faible. Le comportement non-disruptif des décharges partielles peut résulter des conditions de pression du gaz, de la géométrie des conducteurs, ou encore de la présence d'un isolant solide entre ces conducteurs. Dans les systèmes d'énergie électrique en exploitation, ces décharges sont dues en particulier à des imperfections (cavité, décollement, contaminants ...) des diélectriques solides, liquides ou gazeux et apparaissent dès qu'une tension suffisante est appliquée. Généralement de telles décharges apparaissent sous la forme d'impulsions ayant des durées très inférieures à 1 μ s [10].

Des systèmes d'isolations électriques (SIE) initialement conformes à l'utilisation prévue peuvent avec le temps présenter des défauts dus à des vieillissements homogènes de l'isolant résultant de différents facteurs d'influence :

- facteurs d'environnement (température, humidité, type de gaz, corrosion...)
- facteurs électriques (profil de tension, fréquence, courant, ...)
- facteurs mécaniques (torsion, flexion, vibrations...)

Mais il existe aussi des vieillissements prématurés du SIE dus à des défauts tels que des aspérités de conducteur, la présence de contaminants ou de cavités dans l'isolant. Ces imperfections sont des défauts ponctuels présents lors de la fabrication de ces systèmes, mais au cours du temps, et donc du fonctionnement, ces imperfections peuvent se développer et à terme mener à la rupture de l'isolant.

Toutes ces imperfections peuvent être des sites favorables pour l'apparition de décharges partielles. Par exemple, dans le cas d'une cavité, l'air qui y règne atteint sa limite de tenue diélectrique et perd ses propriétés isolantes à un champ beaucoup plus faible que le solide environnant. Ceci s'explique tout d'abord par le fait que l'air présente une rigidité diélectrique plus faible que celle des isolants solides. De plus, le champ électrique est renforcé aux niveaux des cavités gazeuses dans l'isolant, car la permittivité des isolants solides est toujours plus élevée que celle du vide (ou gaz), et donc le champ électrique dans la cavité sera

proportionnellement plus élevé. Les décharges partielles ainsi produites peuvent alors conduire à une dégradation progressive du matériau et à terme à un claquage de l'isolant [10].

II.7.2 Classification des décharges partielles :

Kreuger [11] a proposé une classification des types de décharges en 4 groupes selon leur localisation [10] :

a) Les décharges internes : elles apparaissent à l'intérieur du matériau isolant, dans des volumes où la rigidité diélectrique est faible, par exemple une cavité dans un solide, ou une bulle dans un liquide.

b) Les décharges rampantes (ou de surface) : elles se manifestent lorsqu'un champ électrique tangentiel intense existe à la surface d'un diélectrique.

c) Les décharges couronnes : elles apparaissent dans un gaz au niveau des renforcements localisés du champ électrique (effet de pointes, câble aérien THT,...). La décharge est dans ce cas restreinte à une zone très réduite à l'immédiate proximité du conducteur à faible rayon de courbure.

d) Décharges en arborescence : elles se produisent suite à un défaut dans l'isolant solide.

Elles peuvent donc résulter des décharges dans les cavités internes. Une croissance de différentes branches de l'arborescence produira des conditions propices à l'apparition de nouvelles DP.

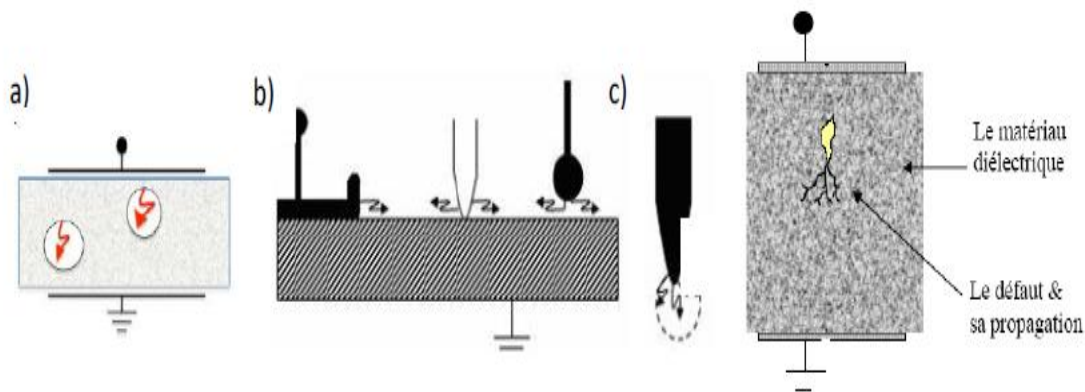


Figure II.5 : Classification des décharges partielles a) internes ; b) de surface ; c) couronne et d) en arborescences.

II.8 Les tests diélectriques :

II.8.1 Les facteurs d'influence sur les tests diélectriques :

De très nombreux phénomènes physiques, électriques et chimiques déterminent les propriétés diélectriques des isolants et des composants ou équipements qui les utilisent. On appelle

facteurs d'influence sur les essais de rigidité et d'isolement, tous les éléments qui peuvent modifier ces propriétés. Parmi les facteurs d'influence on peut citer [20] :

a) les facteurs physiques :

- Température,
- Humidité,
- Contraintes mécaniques : vibrations, chocs, déformations, pression...

b) les facteurs électriques :

- Tensions,
- Courant continu : polarité,
- Courant alternatif : fréquence,
- Chocs électriques : impulsions.

c) les facteurs chimiques :

- Impuretés,
- Oxydation.

Il est important de noter qu'en pratique ses facteurs n'agissent jamais seuls (sauf en laboratoire au cours d'expériences spécialement mises en œuvre pour étudier un facteur particulier), bien souvent ils interagissent en modifiant les lois qui les caractérisent et rendent ainsi plus complexes leurs analyses.

II.8.2 Facteurs déterminants en tests industriels :

Cette partie traite d'une façon succincte et non exhaustive les facteurs d'influence :

- Température,
- Pression,
- Hygrométrie.

Car dans les tests industriels classiques, ces facteurs sont parmi les plus variables et les plus importants pour l'interprétation des tests.

La température est un élément non négligeable dans les conditions d'essais de rigidité et de mesure d'isolement. Si des températures assez constantes et connues sont respectées dans la plupart des laboratoires d'études et de recherches (+15°C à +35°C) ou dans les salles de métrologie (+20°C ou +23°C), il n'en est pas de même dans les lieux de production généralement non climatisés soumis à de grandes variations (exemple: +5°C à +55°C).

La température ambiante n'est pas la seule à prendre en considération car un équipement testé en fonctionnement peut présenter, sur des parties soumises aux contraintes, des "points chauds" qui modifient localement les propriétés diélectriques des isolants.

La pression a une influence très variable suivant la nature du milieu isolant. Il faut également, pour ce facteur, distinguer l'influence autour de la pression atmosphérique, aux basses pressions (allant vers le vide) et aux hautes pressions (normales ou accidentelles).

L'hygrométrie est un troisième facteur important et parfois déterminant sur les résultats des tests diélectriques. C'est le plus difficile à quantifier et celui dont l'influence est la plus délicate à interpréter. Ces effets peuvent être rapides (effet de surface, condensation) ou lents et pernicieux (imprégnation, réaction avec le milieu isolant).

Conclusion

Lors de l'étude de la tenue diélectrique des isolants, souvent les valeurs de rupture obtenues sont caractérisées par une forte dispersion au niveau des tensions et des temps de rupture. Alors, les causes du claquage des solides sont diverses :

- Causes d'origine électrique : des charges électriques sont injectées par les électrodes ou proviennent par dissociation de particules dans le volume du matériau.
- Claquage d'origine thermique : à l'origine il existe un phénomène électrique conduisant à un échauffement du matériau.
- Claquage dû à des effets parasites : des défauts dans le matériau sous forme d'inclusions solides ou gazeuses, qui provoquent une distorsion du champ électrique.
- Claquage électromécanique : sous l'action d'un champ électrique E , un matériau de permittivité ϵ est soumis à une pression qui a tendance à rapprocher les électrodes et donc d'exercer une contrainte de compression, sur le matériau.

Les diélectriques poreux contenant de nombreuses vacuoles d'air ont une rigidité plus faible que le diélectrique lui-même. Quand ces diélectriques poreux sont associés avec des isolants liquides ou des isolants solidifiant, leur rigidité augmente largement.

Chapitre III Présentation de l'entreprise ENICAB Biskra :**Introduction**

L'Entreprise Nationale des Industries des Câbles de Biskra (E.N.I.C.A.B) est considérée comme l'un des grands projets et investissements à l'échelle nationale dans la production des câbles électriques. L'ENICAB est une entreprise, qui a obtenu la certification internationale de la qualité ISO 9001 et ISO 9002 par un engagement ferme de la direction de l'entreprise et de l'ensemble du personnel par la maîtrise de la qualité y compris la mise en application du Système Qualité conforme à la norme ISO 9002 reconnu mondialement [2].

III.1 Généralités sur l'unité de l'ENICAB :

Depuis sa création en 1986 et de sa filialisation au groupe GENERAL CABLE en 2008, l'ENICAB (Entreprise Nationale des Industries des Câbles de Biskra), s'est bâtie une position d'acteur principal au niveau nationale et africaine dans la production des câbles électriques.

Elle est située dans la zone industrielle à l'est de Biskra. Elle occupe une superficie de 44 ha, dont 12 ha sont couverts et dallés et disposent d'une infrastructure importante ; les halls de production des câbles occupent 7,5 ha (Figure III.1).



Figure III.1 : Plan de l'entreprise.

L'objectif principal de cette entreprise est la fabrication, le développement, et la commercialisation des câbles d'énergie basse, moyenne et haute tension.

L'unité fabrique parallèlement des composés PVC granulés pour divers usages industriels, alimentaires et domestiques [2].

III.2 Les différents halls de fabrication et les ateliers de l'entreprise :

AE	Atelier d'entretien
BC/BE	Bâtiment commande électrique de l'usine
CM1	Bâtiment stockage préparation
PVC CM2/CM3	Bâtiment stockage préparations plastifiants
GE/SD	Groupe électrogène station distribution
H1	Hall stockage métiers première (magazine)
H2	Hall tréfilage
H3	Hall gain age isolation PVC
H4	Hall gain age isolation PRS
H5	Hall réticulation PRC
H6	Hall champs d'essai
PA/PH	Bâtiment production d'air comprimé
PG/SD	Poste pompier station distribution
RD	Atelier récupération déchets câbles SH Stockage huile de graissage
ST1/ST2	Air de stockage avec pont roulant

III.3 Différentes sections de l'unité :

L'unité ENICAB comporte diverses sections dont l'intérêt et le contenu varient d'une section à une autre, celles qui nous intéressent le plus sont :

II.3.1 Section fabrication de granulé :**• Le pesage :**

Quatre systèmes de pesage entièrement automatiques pour l'alimentation de sept mélangeurs.

Chacun des quatre systèmes de pesage comprend :

- Une Balance pour PVC ;
- Une Balance pour Stabilisants, Lubrifiants et autres additifs ;
- Une Balance pour Plastifiant ;
- Une Balance pour le système de pesage avec colorant en noire.

Les quantités de produits souhaites seront pesées dans les balance et mises à la disposition pour être introduites dans le mélangeur.

Le dosage de Plastifiant se fait directement par les conduites sous pression en ouvrant les vannes de dosage.

• Le procédé de mélange

Lorsque le pesage des matières pulvérulents est terminé, le mélange est relâché dans le mélangeur, le dosage du Plastifiant s'effectue automatiquement lors du mélange.

Le procédé de mélange étant terminé, le charge tombe chute libre à travers des conduites vers une trémie intermédiaire dans l'extrudeuse à double vis.

• Fabrication des granulés

La fabrication du granulé se fait à l'aide d'une extrudeuse à double vis. L'extrudeuse est chargée continuellement de la matière à traiter par un dispositif de chargement. La patte plastique est poussée continuellement dans une tête d'extrusion.

Les granulés sont fabriqués à l'aide d'un outil granulation à lame rotatif. A l'aide d'une soufflerie, les granulés sont transportés pneumatiquement au dispositif de refroidissement. Ils sont menés par des silos intermédiaires de stockage de granulés.

II.3.2 Système de refroidissement

Un système de refroidissement (échangeur de chaleur) est prévu pour le refroidissement du cylindre et de l'entonnoir de remplissage afin d'éviter le collage du mélange de PVC. Un système de dégazage est prévu pour l'évacuation des gaz qui se produisent lors de plastification.

II.3.3 Système de production d'air comprimé

La section de production d'air comprimé est dotée de neuf compresseurs réglés et contrôlés automatiquement.

La quantité d'air comprimé produite se distribue aux différents consommateurs :

- Atelier de tréfilage, tournage, câblage, assemblage ;
- Extrudeuses PVC ;
- Extrudeuses PRC ;
- Atelier de fabrication de tourets en bois ;
- Atelier de fabrication de PVC.

Les sections de consommation sont alimentées en air comprimé à l'aide des tuyauteries.

II.3.4 Système de production de vapeur :

La production de vapeur est assurée par trois chaudières combinées. La vapeur est amenée aux différentes sections de consommation par des tuyauteries.

II.3.5 Salle de contrôle :

Cette section de commande garantit une exploitation de l'installation avec un maximum de sécurités et un grand confort de services. On peut bloquer les fonctions importantes de l'installation pour éviter toute erreur et exclure ainsi toute possibilité de panne [2].

II.4 Matières premières :

Les principales matières primaires utilisées par l'entreprise sont :

- Une matière chimique appelle Polyéthylène Réticule Chimiquement (PRC) sous la forme de granulée.
- L'aluminium sous la forme de fils de diamètre 9.5 mm
- Le cuivre sous la forme de fils de diamètre 8 mm
- Le bois.

Elle achète le cuivre des sociétés Turkey SARCUYSAN et Espagne TEKFEM, l'aluminium de la société de Bahrayn MIDALCABLE et d'une société Egyptienne et le PRC de plusieurs sociétés comme BOREALIS en Belgique, ASPELL en France et PLASCOM en Arabie Saoudite en plus de sociétés nationales. Quant au bois qui sert à la fabrication des tourets, il provient de l'entreprise ENAB de Skikda [2].

III.5 Produits de l'entreprise :

Une grande variété de câbles électriques est produite à l'unité, on peut citer :

III.5.1 Câbles basse tension

- Câbles domestiques (Figure III.2)

Fils et câbles rigides isolés au PVC ;

Fils et câbles souples isolés au PVC.

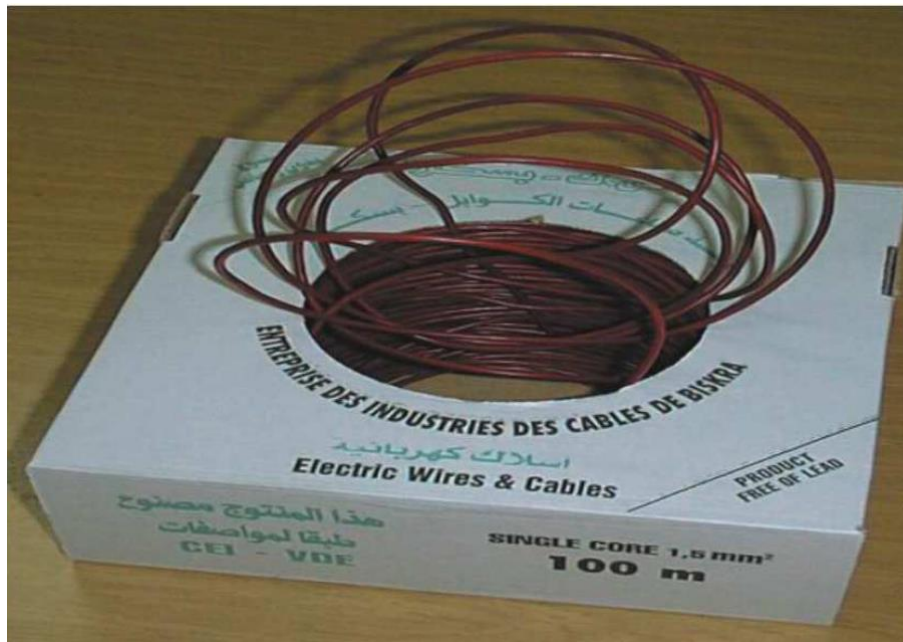


Figure III.2 : Câble domestique au niveau de l'ENICAB.

- Câbles industriels (Figure III.3)

Câbles industriels isolés au PVC ;

Câbles industriels isolés au PRC.



Figure III.3 : Câble industriel au niveau de l'ENICAB.

- Câbles isolés par distribution d'électricité (Figure III.4)

- Câbles de réseaux ;
- Câbles de branchement.



Figure III.4 : Câble de distribution (réseaux) au niveau de l'ENICAB.

III.5.2 Câbles moyenne tension (Figure 5).

- Câbles unipolaires.
- Câbles tripolaires.



Figure III.5 : Câbles moyens tension au niveau de l'ENICAB.

III.5.3 Câbles haute tension :

- Câbles nus en cuivre.
- Câbles nus en aluminium.
- Câbles nus en alliage d'aluminium.
- Câbles nus en alliage d'aluminium-acier.

Les différents granulés actuellement produits sont :

- Granulés pour production de câble (production semi-fini)
 - Granulés pour la gaine extérieure résistante à l'U.V ;
 - Granulés pour le bourrage ;
 - Granulés de PVC colorés (blanc, gris, vert, rouge, jaune...).

• Composé PVC cristal et naturel :

Conditionné dans des sacs de 25 kg pour les utilisations suivantes :

- Bouteille eau minérale ;
- Emballage alimentaire ;
- Semelle pour chaussures (souple et rigide) ;
- Tuyau de pression ;
- Tuyau souple d'arrosage. (ENICAB, 2008)

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'Entreprise Nationale des Industries des Câbles de Biskra (E.N.I.C.A.B), les différents produits fabriqués par cette unité (Câbles basse tension, Câbles moyenne tension et Câbles haute tension) ainsi que les différents halls de fabrication et les ateliers de l'entreprise et les différentes sections de chaque unité.

Chapitre IV : Techniques expérimentales sur le PRC**Introduction**

Le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC) à cause de sa structure, de ses excellentes qualités diélectriques et mécaniques et par suite de son bon comportement aux contraintes thermiques, est devenu un produit de remplacement du Polyéthylène (PE) dans la fabrication des câbles de transport d'énergie électrique. Cependant et malgré toutes les précautions prises lors de leur mise en œuvre, les câbles isolés au PRC connaissent, à travers le monde, certaines difficultés en termes de durée de vie. Les principales causes de leur vieillissement prématuré sont souvent associées au processus de fabrication. L'existence, dans l'isolation de vacuoles sièges de décharges partielles, d'impuretés et de l'humidité pourrait, plus au moins conjointement, contribuer, en présence des contraintes électriques et thermiques, à la dérive des propriétés diélectriques du matériau en fonction du temps de vieillissement. Les décharges partielles peuvent contribuer à l'augmentation des pertes diélectriques dans une isolation vieillie thermiquement. De nombreux travaux ont montré, dans une étude qualitative, que le PRC devient très sensible à la dégradation sous décharges partielles, pour des températures supérieures à celle du fonctionnement en service normal.

IV.1 Polyéthylène réticulé chimiquement :

Le matériau (PRC) constituant l'enveloppe isolante des câbles électriques 18/30kV fabriqués par la câblerie ENICAB (Algérie), est un produit UNION CARBIDE 4201 (USA), chargé d'un antioxydant de stabilisation thermique et de peroxyde de dicumyl l'agent réticulant. Le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC) est obtenu par la réticulation du Polyéthylène basse densité (PEbd), qui résulte à son tour, de la polymérisation du gaz éthylène C_2H_4 suivant un procédé à haute pression en présence de traces d'oxygène comme catalyseur. La pression de polymérisation se situe entre 1000 et 5000 bars et la température entre 150°C et 400°C. Le PEbd est constitué par des chaînes macromoléculaires comportant un certain nombre de ramifications de longueurs variables, disposées au hasard du squelette carboné de la molécule (figureIV.1). La réticulation par voie thermochimique du PEbd, pratiquée industriellement au moyen des peroxydes organiques, transforme les chaînes carbonées linéaires ramifiées en un réseau tridimensionnel, par création de liaisons latérales entre atomes de carbone voisins situés sur des chaînes différentes.

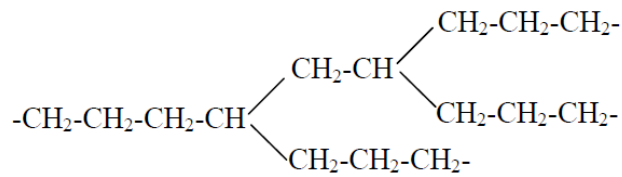
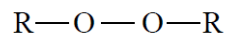
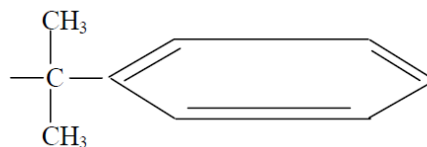


Figure IV.1 : Molécule de Polyéthylène ramifiée.

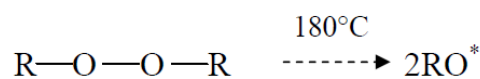
Le plus couramment employé est le peroxyde de dicumyl (2% en teneur massique). Les peroxydes organiques sont des composés dont la structure générale est :



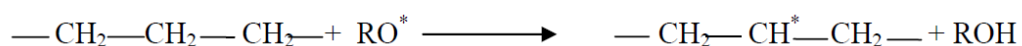
Où R est un radical quelconque aromatique ou aliphatique. Dans le cas du peroxyde de dicumyl, R présente la formule semi-développée suivante :



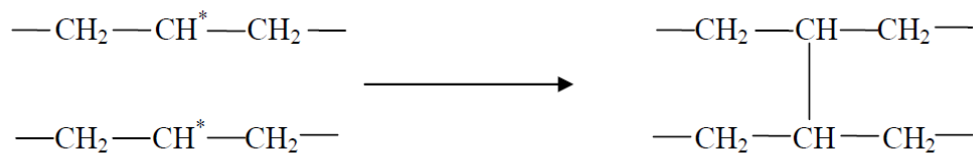
Porté à une température de l'ordre de 180°C et sous une pression de vapeur d'eau ou d'azote, le peroxyde se scinde au niveau des deux atomes d'oxygène pour donner des radicaux libres très réactifs suivant la réaction suivante :



Ces radicaux se combinent avec les hydrogènes de chaînes du polymère pour former des sites réactifs et un alcool :



Puis deux sites réactifs se combinent pour créer un pontage entre deux chaînes :



Le PRC est un matériau semi-cristallin avec un taux de cristallinité de 35 à 40% ; il est formé d'une phase amorphe hétérogène, de structure non ordonnée et d'une phase cristalline de structure ordonnée, ces deux phases étant fortement imbriquées l'une dans l'autre. Sa température de fusion cristalline est environ 100 à 105°C. La réticulation confère au PEbd des propriétés thermiques et mécaniques améliorées. En effet le PRC carbonise sans fondre à des températures comprise entre 250 et 300°C. Il se comporte comme élastomère du point de vue fluage à chaud et donc de la résistance aux courts-circuits. Du fait de la réticulation, la température d'utilisation à la corde est de 90°C et la température tolérée en court-circuit est de 250°C. La réticulation fait disparaître complètement la tendance qu'avait la résine mère à se fissurer au contact d'atmosphères agressives du type oxydante. Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celles du polyéthylène. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques et au stress-cracking qu'un polyéthylène [15].

IV.2 Essai individuels et prescription d'essai :

IV.2.1 Comment effectuer l'essai de tension sur câble moyenne tension (Essai de tension alternative) :

IV.2.1.1 Généralités

L'essai de tension doit être effectué à la température ambiante en appliquant une tension alternative à fréquence industrielle.

IV.2.1.2 Méthode d'essai pour les câbles unipolaires

Pour les câbles unipolaires, la tension d'essai doit être appliquée pendant 5 min entre l'âme et l'écran métallique.

IV.2.1.3 Méthode d'essai pour les câbles tripolaires

Pour les câbles tripolaires avec écran métallique individuel sur chaque conducteur, la tension d'essai doit être appliquée pendant 5 min entre chaque âme et le revêtement métallique.

Pour les câbles tripolaires sans écran métallique individuel sur chaque conducteur, la tension d'essai doit être appliquée pendant 5 min successivement entre chaque conducteur isolé et tous les autres conducteurs et les revêtements collectifs.

Les câbles tripolaires peuvent être essayés en une seule opération en utilisant un transformateur triphasé.

IV.2.1.4 Tension d'essai

La tension d'essai à fréquence industrielle doit être de $3.5 U_0$. Les valeurs des tensions d'essai monophasées pour les tensions assignées normalisées sont indiquées dans le tableau IV.1.

Tension assignée U_0 kV	3.6	6	8.7	12	18
Tension d'essai kV	12.5	21	30.5	42	63

Tableau IV.1 : Tension des essais individuels.

Dans le cas des câbles tripolaires, si la tension d'essai est appliquée par un transformateur triphasé, la tension d'essai entre phase du transformateur doit être de 1.73 fois les valeurs indiquées dans ce tableau.

Dans tous les cas, la tension d'essai doit être élevée progressivement à la valeur spécifiée.

IV.2.1.5 Exigence

Il ne doit pas se produire de perforation de l'enveloppe isolante.

IV.3 Techniques expérimentales :

IV.3.1 Présentation du câble :

Nos essais de vieillissement thermique ont porté sur des échantillons de câble moyenne tension 18/30kV isolés au PRC. Ce câble présente les caractéristiques suivantes:

- Câble à champ radial.
- Tension nominale U_n : 30kV.

- Tension spécifiée U_0 : 18kV.
- Section de l'âme : 185 mm² (en Aluminium).
- Épaisseur de l'isolant : 8mm.
- Norme de fabrication : CEI 60502
- Longueur d'essai : 1168 m
- longueur de livraison : 1168 m

Les différents constituants du câble utilisé sont présentés à la figure IV.1.

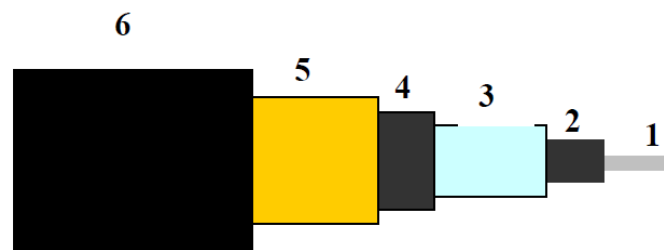


Figure IV.2 : Schéma du câble 18/30kV isolé au PRC.

- 1-Ame conductrice en Aluminium.
- 2-Ecran semi-conducteur interne extrudé sur âme.
- 3-Enveloppe isolante en PRC.
- 4-Ecran semi-conducteur externe extrudé sur isolant.
- 5-Ecran métallique en cuivre.
- 6-Gaine de protection en PVC.

IV.3.2 Mesure de la tension seuil d'apparition de décharges partielles :

L'essai de décharges partielles doit être effectué comme indiqué dans la norme CEI 60885-3, excepté que la sensibilité telle que définie dans la CEI 60885-3 doit être de 10 pC ou mieux.

Dans le cas des câbles tripolaires, l'essai doit être effectué sur tous les conducteurs isolés en appliquant la tension entre chaque âme et l'écran métallique.

La tension d'essai doit être augmentée progressivement et maintenue à 2 U_0 pendant 10 s puis ramenée lentement à 1.73 U_0 .

Le système de mesure de décharges partielles est représenté à la figure 3.

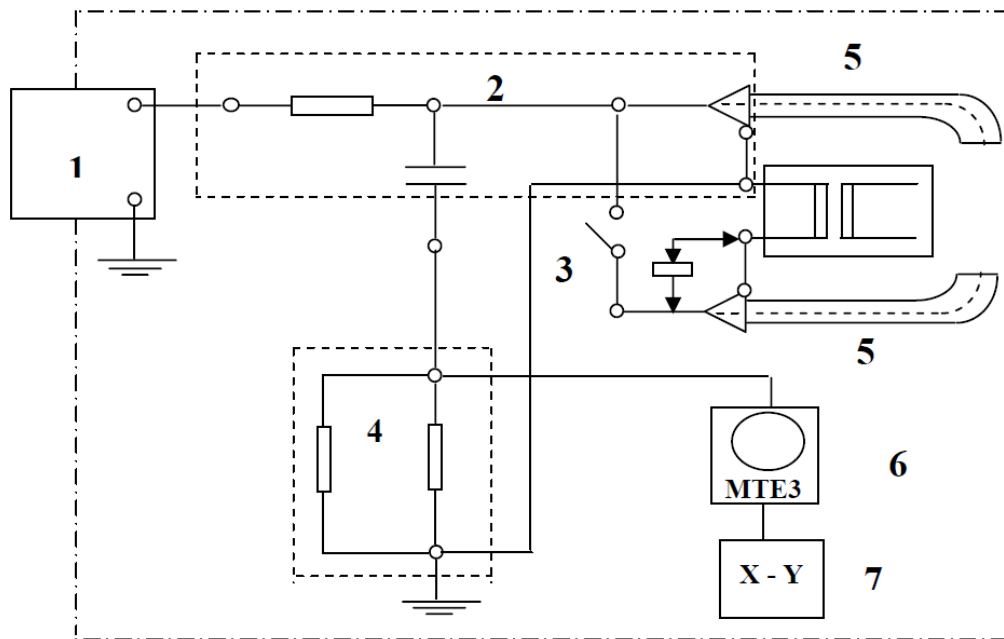


Figure IV.3 : Schéma de principe pour la mesure des décharges partielles.

- 1 Transformateur de haute tension
- 2 Condensateur de couplage
- 3 Interrupteur de court-circuit
- 4 Impédance de mesure
- 5 Boîtes d'extrémités
- 6 Détecteur d'impulsions de décharges
- 7 Oscilloscope à deux voies

Les essais de décharges partielles ont été faits en augmentant progressivement à partir d'une valeur inférieure la tension alternative 50Hz jusqu'à l'apparition des décharges partielles ayant une charge apparente de 1pC, conformément aux recommandations de la CEI 270 [13]. On relève la tension seuil d'apparition de décharges partielles U_i à la température ambiante.

IV.3.3 Mesure du facteur de pertes diélectriques et de la permittivité relative

Pour la mesure du facteur de pertes diélectriques $tg\delta$ et de la permittivité relative ϵ_r , nous avons utilisé un pont de Schering de type TETEX AG. Les essais ont été effectués à différents niveaux de tension alternative 50Hz, conformément aux recommandations de la CEI 540 [14].

IV.3.4 Mesure de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction

Pour la mesure de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction, nous avons fait un prélèvement de 5 éprouvettes en forme d'haltère de dimensions normalisées [14], de chaque câble vieilli et d'un câble n'ayant pas été soumis au vieillissement thermiquement. Ces éprouvettes ont été prélevées à des endroits différents de l'échantillon et à une même profondeur. L'appareil utilisé pour les essais mécaniques correspond à un dynamomètre muni de deux mâchoires exerçant un effort de traction croissant. On mesure simultanément l'allongement à la rupture et la résistance à la traction sur une même éprouvette, selon les recommandations de la CEI 540.

IV.4 Résultats et discussion :

IV.4.1 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température :

Nous avons mesuré le facteur de pertes diélectriques du PRC en fonction de la température d'essai, variant de 20°C à 140°C à la tension spécifiée de 18kV et ce, avant et après 2000 heures de vieillissement. Nous avons obtenu une augmentation rapide du facteur de pertes diélectriques à partir d'une température de 90°C qui est la température de service normal du PRC. Cette augmentation serait due à l'instabilité thermique du matériau, instabilité par laquelle le taux d'énergie engendrée par dissipation diélectrique devient supérieur à celui que le matériau peut évacuer par ses surfaces. Notons que le facteur de pertes diélectriques est d'autant plus important que la température de vieillissement est plus élevée (figure IV.3). Généralement, la vitesse du processus de dégradation thermo-oxydante des polymères augmente avec l'élévation de la température. Il est à noter qu'une augmentation de température de 10°C double la vitesse d'une réaction chimique [18]. L'augmentation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température est attribuée aux pertes ioniques dues à l'augmentation de la mobilité des porteurs de charges (réduction de la viscosité du matériau), aux pertes dues à l'oxydation et à la relaxation des dipôles dans les zones cristallines. L'oxydation conduit à la formation de composés carbonylés (groupes polaires) électriquement dissymétriques qui jouent souvent un rôle très important dans la dégradation des propriétés diélectriques [16].

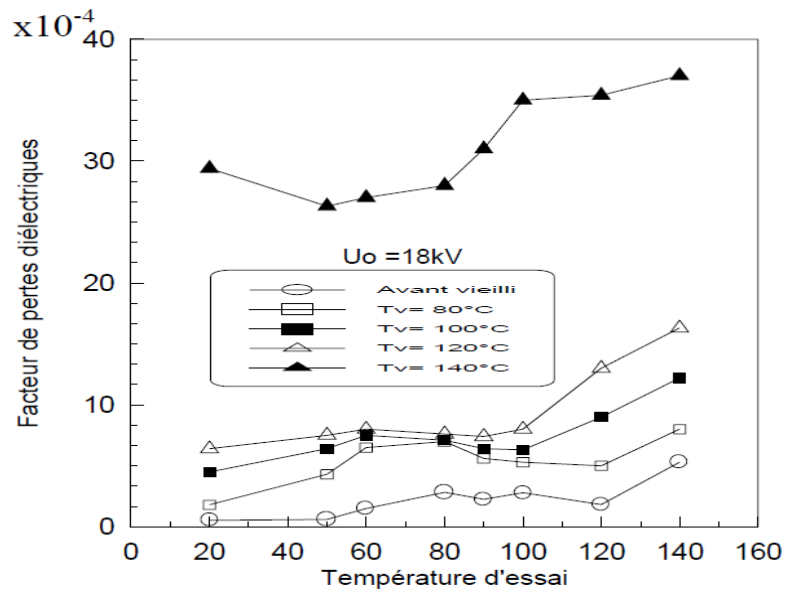


Figure IV.4. Variation du facteur de pertes en fonction de la température d'essai avant et après 2000h de vieillissement.

IV.4.2 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension :

Nous avons mesuré le facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension variant de 5kV à 35kV pour différentes températures d'essai. Les essais ont été faits avant et après vieillissement. Avant vieillissement, le facteur de pertes diélectriques augmente en fonction de la tension (figure IV.4). Cette augmentation est attribuée à l'énergie dissipée par les décharges partielles se produisant dans le matériau et est perceptible à partir d'un niveau de tension de 15kV. Ce dernier représenterait le seuil d'ionisation dans le matériau. La figure IV.5 montre la variation du facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$ en fonction de la tension d'essai après vieillissement aux différentes températures de vieillissement et d'essai.

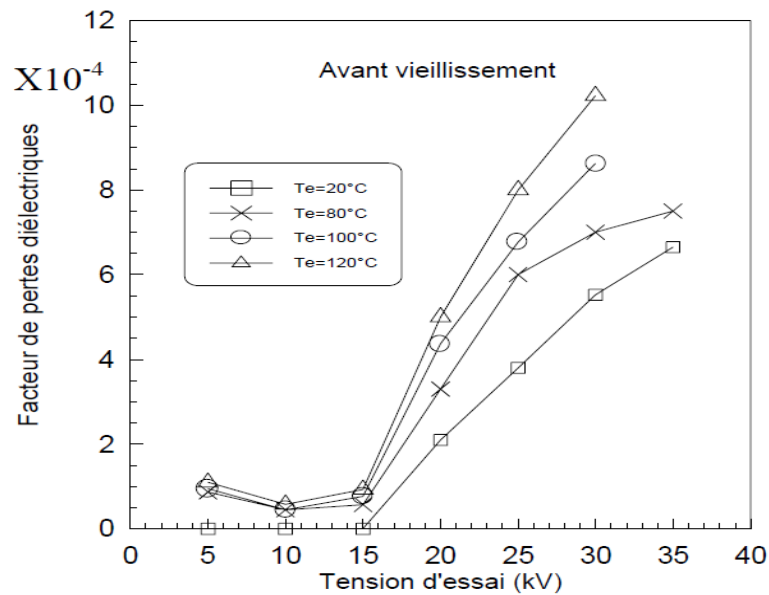


Figure IV.5 : Variation du facteur de pertes en fonction de la tension avant vieillissement.

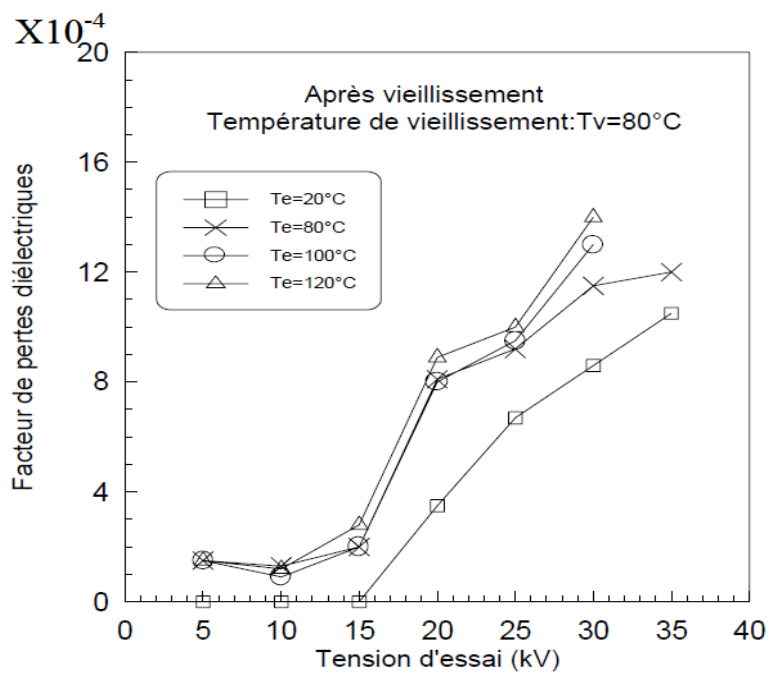


Figure IV.6 : Variation du facteur de pertes en fonction de la tension après 2000 h de vieillissement.

Le facteur de pertes diélectriques varie d'une façon similaire que celle obtenu avant vieillissement (augmentation brusque à partir d'un seuil de 15kV), avec cependant des amplitudes plus importantes après vieillissement. L'augmentation du facteur de pertes

diélectriques après vieillissement pourrait être attribuée à la dégradation chimique et aux phénomènes d'ionisation accompagnant le vieillissement thermique du matériau isolant.

IV.4.3 Influence du vieillissement thermique sur la tension seuil de décharges partielles :

En fonction du temps et de la température de vieillissement, nous avons obtenu une diminution de la tension seuil d'apparition de décharges partielles (figure IV.6). Ce résultat est similaire à celui obtenu par Shuppe et al. [13] sur des plaques de PR découpées dans des câbles vieillis en service pendant environ 10 ans. Cette diminution est attribuée à la variation des concentrations dans le temps, des produits de décomposition du peroxyde et de l'antioxydant sous l'effet combiné de la tension et la température [14]. La diminution de la tension seuil d'apparition de décharges partielles marque une dégradation de l'isolant qui au cours du temps, provoque le changement des propriétés aussi bien mécaniques, électriques que physico-chimiques du matériau. La dégradation des propriétés diélectriques sous l'effet de décharges partielles peut trouver son origine en des réactions chimiques telles que l'oxydation des parois des vacuoles incluses dans le matériau.

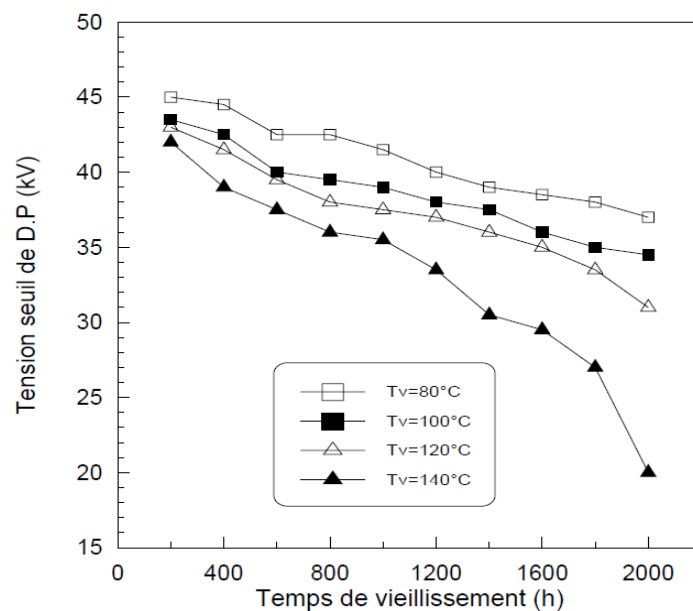


Figure IV.7. Tension seuil de décharges partielles en fonction du temps de vieillissement.

Conclusion :

Les résultats obtenus montrent que le vieillissement thermique influe considérablement sur les propriétés diélectriques, notamment le facteur de pertes et la tension seuil d'apparition de décharges partielles. Il a été aussi montré que la dégradation est d'autant plus accentuée que la température de vieillissement est élevée. En effet, nous avons obtenu une augmentation du facteur de dissipation diélectrique par rapport à celui du matériau n'ayant pas subi de vieillissement thermique. En fonction de la tension d'essai, cette augmentation devient rapide en dépassant un niveau de tension de 15kV qui représenterait le seuil d'ionisation dans le matériau. En fonction de la température, l'augmentation est perceptible à partir d'une température de 90°C qui est la température de service du PRC. Ces résultats sont très importants dans la mesure où ils constituent des paramètres déterminants de la qualité d'isolation du PRC utilisé. L'évolution de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement pour différents niveaux de tension a mis en évidence l'existence des phénomènes de relaxation. Nous avons constaté une diminution de la tension seuil d'apparition de décharges partielles en fonction du temps et de la température de vieillissement. Cette diminution marque une dégradation du matériau, qui risque au cours du temps de provoquer, le changement des propriétés aussi bien mécaniques, électriques que physico-chimiques de l'isolant.

Chapitre V : Mesure la tension de contournement d'un isolateur en verre :**Introduction**

La consommation d'énergie électrique augmente sans cesse toutes les années. Pour satisfaire la demande des consommateurs, il faut que les isolateurs jouent un rôle primordial dans la sécurité du transport et de la distribution d'énergie. Dans ces conditions, les isolateurs sont exposés aux diverses formes de pollution.

Les isolateurs des réseaux électriques à haute tension sont exposés en général à trois phénomènes distincts qui peuvent causer des arcs de contournement:

- surtension par la foudre.
- surtension de manœuvre.
- contournement électrique des isolateurs.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps décrire l'équipement de test et de mesure, la cellule de tests et les électrodes sur lesquelles sera déposé. Nous expliquerons ensuite la stratégie d'essais appliquée. Puis, nous détaillerons avec des tableaux et des courbes l'influence de l'épaisseur du matériau diélectrique (le verre) ainsi que leur diamètre sur le contournement électrique.

V.1 Profil d'un isolateur :

Dans les lignes de transport électrique, l'isolant principal est l'air.

Cependant, on utilise des isolateurs attachés à des pylônes afin de maintenir les câbles suspendus dans les airs. Dans ce cas, l'isolant joue un rôle essentiellement mécanique. Il n'en demeure pas moins que le matériau utilisé doit posséder d'excellentes propriétés d'isolation électrique en plus l'isolateur capot et tige en verre trempé ou porcelaine sont couramment utilisés sur les réseaux à courant alternatif (AC) jusqu'à 800kV et sur les réseaux à courant continu (DC) jusqu'à 600kV.

Pour assurer sa fonction, le profil de l'isolateur doit satisfaire les conditions suivantes voir Figure V.1 :

- une longueur de fuite maximum.
- un nombre optimum de nervures (pour une taille donné de l'isolateur) qui permet d'avoir une tension de contournement plus élevée.

- une géométrie de l'isolateur permettant le nettoyage naturel de ce dernier par le vent ou la pluie.
- des diamètres de l'isolateur différents assurant une contamination non uniforme et donc des tensions de contournement plus élevée.

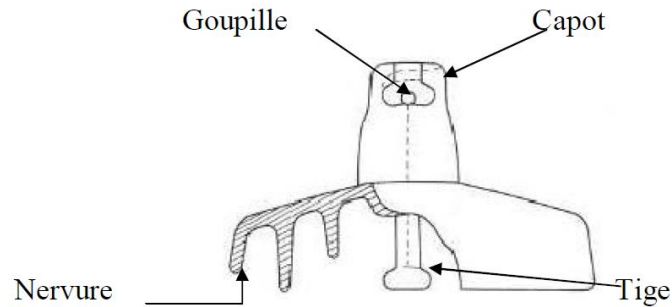


Figure V.1 : Profil de l'isolateur.

V.2 Caractéristiques d'un isolateur :

Parmi les valeurs spécifiées dans les normes d'essais d'isolateurs, nous pouvons citer :

- Le pas P : C'est la distance séparant deux parties homologues de deux isolateurs consécutifs dans une chaîne. La détermination de ce paramètre nous permet donc de connaître la longueur d'une chaîne ayant un nombre donné d'isolateurs.
- La ligne de fuite L_f : C'est la plus courte distance, suivant les contours de la surface extérieure des parties isolantes, mesurée entre les parties métalliques (armatures de l'isolateur).
- La ligne de contournement L_c : C'est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices.

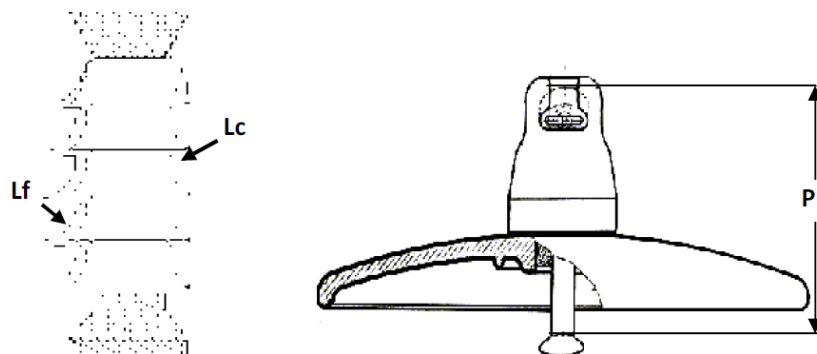


Figure V.2 : Les caractéristiques d'un isolateur

V.3 Equipement de test et de mesure:

V.3.1 Circuit d'essai au laboratoire de Haute tension (Université de Biskra) :

Dans laboratoire de la haute tension de l'Université Mohamed Khider de Biskra faculté des sciences et de la technologie Département Génie Electrique. Nous avons utilisés la liste des matériels suivants :

- La cage d'essai de faraday : d'une porte de 2m à peu près qui contient :

La cellule de HT : cette cellule compose des parois qui fabriqué avec matériau solide. L'intérieur on a des équipements électriques qui relit au circuit électrique qui est à l'extérieur de la cage.



Figure V.3 : Cellule de HT.

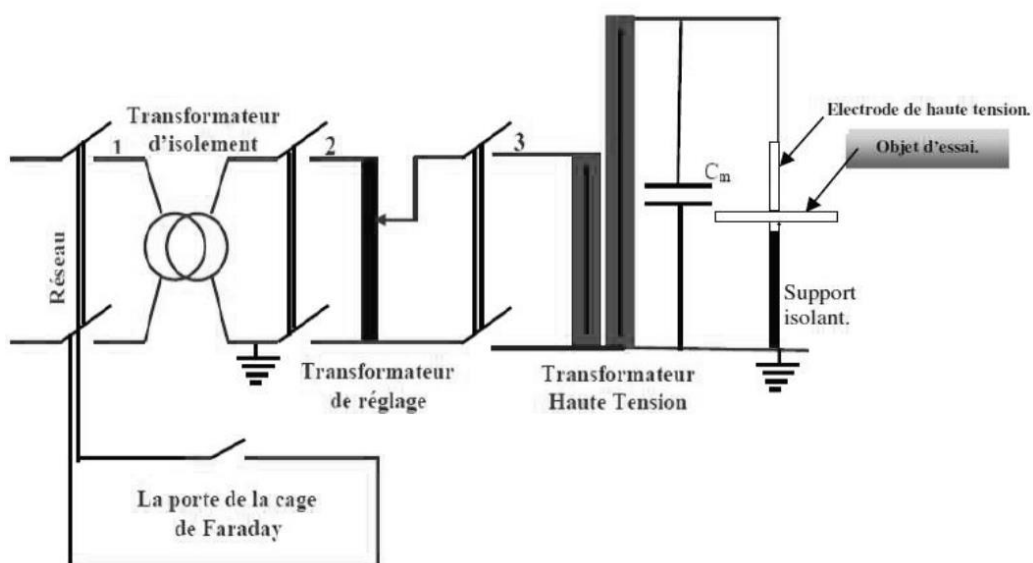


Figure.V.4 Circuit d'essai à fréquence industrielle.

- Un transformateur d'essai



Des diodes



- Eclateur avec deux électrodes sphériques



Des résistances



- Un diviseur capacitif de tension $C_m=100$ pF.

- Un pupitre de commande et des appareils de mesure et de protection.



Figure V.5 : Pupitre de commande et contrôle de mesure.

Les appareils de mesure sont intégrés à l'ensemble de l'expérience, de sorte que l'on ne se préoccupe pas de savoir si leur présence change quelque chose en plus le danger des hautes tensions rend nécessaire l'éloignement des expérimentateurs avec leurs appareils de mesure.

V. 4 L'effet de l'épaisseur et le diamètre de verre sur la tension de contournement :

V. 4.1 Mode opératoire :

Le but de ces études se sont intéressées tout spécifiquement au processus de propagation d'un arc électrique à la surface d'une couche d'électrolytique dans le but de comprendre les phénomènes complexes inhérents au contournement des isolateurs.

Le principe des essais est d'appliquer une tension alternative sur les disques isolantes en verre entre les électrodes sphérique (éclateur), et on augmente la tension jusqu'à la tension de contournement ou de décharges disruptives dans le verre et chaque fois on refaire les mesures avec l'augmentation de l'épaisseur de disque.

La figure suivante montre le montage de circuit :



Figure V.6 : Montage de circuit.

Cette figure représente les deux électrodes et l'épaisseur de l'isolant :



Figure V.7 : l'isolant est leur épaisseur entre les deux électrodes.

V. 4.2 Les étapes de manipulation :

- ✓ On règle l'épaisseur entre les électrodes et chaque fois on varie cette distance en fonction de la tension de secondaire.
- ✓ On ferme bien la porte de cage.
- ✓ On ferme le sectionneur, après on ferme le disjoncteur.
- ✓ Démarrer le transformateur est en augmente la tension de secondaire jusqu'à la création de la décharge surfacique en prend cette valeur de tension.
- ✓ Après chaque manipulation il doit décharger les équipements.

V.4.3 L'observation :

Au cours de l'expérience, on observe l'évolution de la tension de contournement comme suit.

- 1- Apparition de l'effet couronne dans l'aire.
- 2- Observation des étincelles voir (photo V.8), qui varie avec la variation de la épaisseur et le diamètre.
- 3- Apparition des arcs voir (photo V.9), qui varie avec la variation de la épaisseur et le diamètre.
- 4- Contournement de l'isolateur voir (photo e V.10).



Figure V.8 : Evolution des étincelles.



Figure V.9 : Evolution des arcs.



Figure V.10 : Evolution du contournement

V. 4. 4 : Les résultats et discussion :

- Le Tableau V.1 montre les résultats obtenus pendant les mesures des tensions de contournement en fonction de l'épaisseur de verre, on prend le diamètre de disque 8cm.

e (mm)	3	6	9	12
d (cm)	8	8	8	8
U_{pc} (V)	60	65	70	75
U_{sc} (kV)	27.24	29.51	31.78	34.05

Tableau V.1 : Les mesures de la tension de contournement en fonction de l'épaisseur et en fixe le diamètre de disque 8 cm.

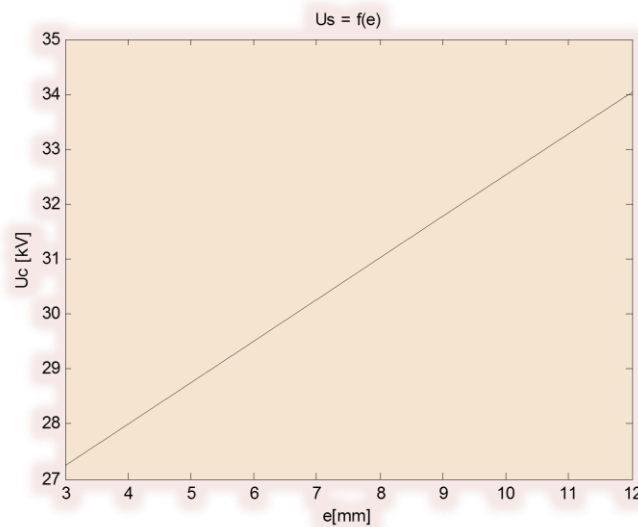


Figure V.11: La variation de la tension en fonction de l'épaisseur en fixe le diamètre de disque 8 cm.

- Le Tableau V.2 montre les résultats obtenus pendant les mesures des tensions de contournement en fonction de l'épaisseur de verre, on prend le diamètre de disque 9cm.

e (mm)	3	6	9	12
d (cm)	9	9	9	9
U_{pc} (V)	70	75	82	87
U_{sc}(kV)	31.78	34.05	37.22	39.49

Tableau V.2 : Les mesures de la tension de contournement en fonction de l'épaisseur et en fixe le diamètre de disque 9 cm.

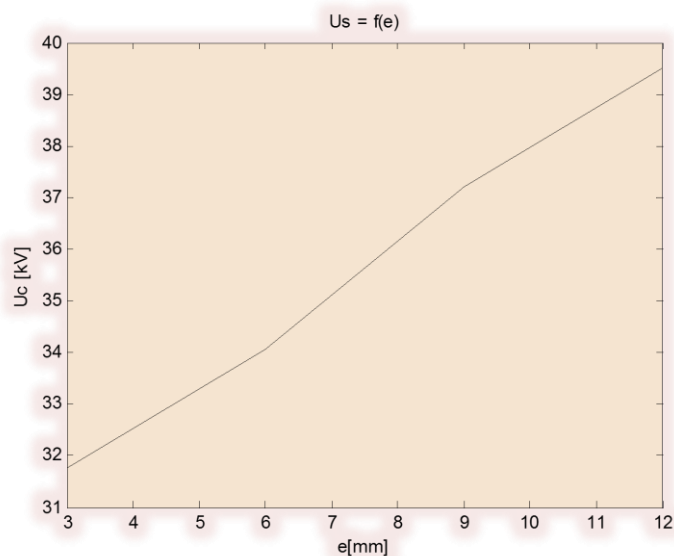


Figure V.12: La variation de la tension en fonction de l'épaisseur en fixe le diamètre de disque 9 cm.

- Le Tableau V.3 montre les résultats obtenus pendant les mesures des tensions de contournement en fonction de l'épaisseur de verre, on prend le diamètre de disque 8cm.

e (mm)	3	6	9	12
d (cm)	10	10	10	10
U_{pc} (V)	75	80	82	90
U_{sc} (kV)	34.05	36.32	37.22	40.86

Tableau V.3 : Les mesures de la tension de contournement en fonction de l'épaisseur et en fixe le diamètre de disque 10 cm.

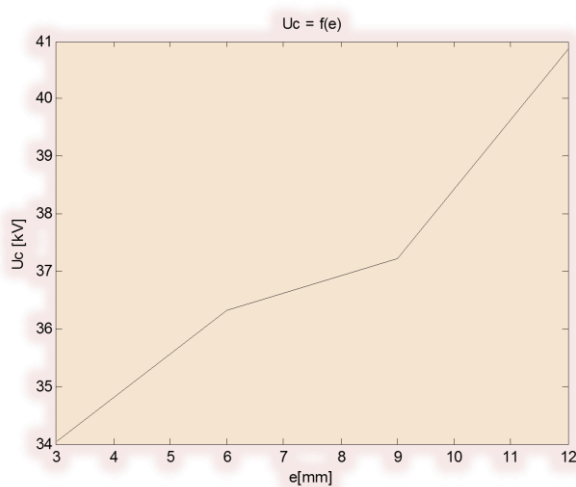


Figure V.13: La variation de la tension en fonction de l'épaisseur en fixe le diamètre de disque 10 cm.

Le contournement se produit sur la surface de l'isolateur verre lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur. Nous avons mesuré la tension de contournement en fonction de l'épaisseur variant de 3 à 12 mm pour différents diamètres de disque isolant. Nous remarquons que l'augmentation de l'épaisseur ne donne pas une marge importante de la tension de contournement. Par contre, lorsque on augmente le diamètre on trouve une marge plus grande de la tension de contournement 27.24 puis 31.15 jusqu'à 34.05 kV avec même épaisseur $e = 3\text{mm}$.

Conclusion

Ce travail nous a permis de prédire la tension de contournement de l'isolant en verre et de mieux comprendre les conséquences de la variation de l'épaisseur et le diamètre d'un isolateur et d'analyser des différents paramètres pouvant influencer la tension de son contournement. Notre travail a été consacré à la caractérisation électrique des décharges qui se propagent sur la surface de l'isolateur en tenant compte de la valeur efficace de la tension appliquée.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude est relative au phénomène de vieillissement et le contournement dans l'isolant synthétique de câbles électrique et le verre. Toutefois, lorsque soumise à des contraintes électriques, l'isolation est exposée à un certain nombre de problèmes en particulier l'accumulation de charge partielles dans l'isolant des câbles et à l'interface des jonctions de câbles induisant des distorsions du champ électrique et par voie de conséquence la réduction de la durée de vie de l'isolation.

La mesure de décharge partielle permet d'identifier et de localiser, par réflectométrie, des points faibles d'un tronçon qui sont le siège de micro décharges dans l'isolant, révélatrices d'un travail électrique qui induit la dégradation de ce dernier.

On peut donc, à partir de ces mesures, déceler les tronçons les plus critiques et hiérarchiser leur remplacement préventif ou tout du moins celui des points faibles localisés (accessoires de jonction, par exemple).

Les résultats obtenus montrent que le vieillissement thermique influe considérablement sur les propriétés diélectriques, notamment le facteur de pertes et la tension seuil d'apparition de décharges partielles. Il a été aussi montré que la dégradation est d'autant plus accentuée que la température de vieillissement est élevée. En effet, nous avons obtenu une augmentation du facteur de dissipation diélectrique par rapport à celui du matériau n'ayant pas subi de vieillissement thermique. En fonction de la tension d'essai, cette augmentation devient rapide en dépassant un niveau de tension de 15kV qui représenterait le seuil d'ionisation dans le matériau. En fonction de la température, l'augmentation est perceptible à partir d'une température de 90°C qui est la température de service du PRC. Ces résultats sont très importants dans la mesure où ils constituent des paramètres déterminants de la qualité d'isolation du PRC utilisé. L'évolution de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement pour différents niveaux de tension a mis en évidence l'existence des phénomènes de relaxation. Nous avons constaté une diminution de la tension seuil d'apparition de décharges partielles en fonction du temps et de la température de vieillissement. Cette diminution marque une dégradation du matériau, qui risque au cours du temps de provoquer, le changement des propriétés aussi bien mécaniques, électriques que physico-chimiques de l'isolant.

Conclusion Générale

D'après les mesures de la tension de contournement du verre, nous avons constaté que la variation du diamètre est plus efficace par rapport à la variation de l'épaisseur, car il donne une grande marge de sécurité en cas de pollution ou de dégradation de matériau.

Références bibliographiques

[1] : El Bahi AZZAG « Problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tension » Thèse de doctorat de l'université BADJI MOKHTAR – ANNABA en 2007.

[2] : Entreprise Nationale des Industries des Câbles de Biskra, 2008.

[3] : Techniques de l'ingénieur « Câbles d'énergie : recherche et identification de défauts».

Cet article est issu de : Énergies | Réseaux électriques et applications par Henri KUZYK.

Document téléchargé le : 01/01/2016, pour le compte : 7200092269 - cerist // 193.194.76.5

[4] : Amar TILMATINE « Chapitre 7 : Diélectriques ».

[5] : SAYAH Abdelkader « Analyse des Terminaisons d'Eau ». Thèse de Doctorat, Année Universitaire 2016 / 2017.

[6] : M. LAKHDAR MADANI « Etude du comportement diélectrique des isolateurs en composite ». Thèse de Doctorat, Année Universitaire 2016.

[7] : « دراسة ميدانية بمؤسسة صناعة الكوابل - ENICAB - بسكرة » بومعروف نسيمه

مذكرة مكملة لنيل شهادة الماجستير في علم الاجتماع تخصص علم النفس الاجتماع السنة الجامعية 2009-2010

[8] : Med - Câble Algérie « Industrie de câbles électriques » Direction Générale & USINE.

[9]: William A Thue. Electrical power cable engineering. CRC Press, 2011.

[10] : Marine Karadjian « Endurance et tenue diélectrique de l'isolation de câbles électriques pour l'aéronautique ». Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à Centrale Supélec, École doctorale n°575 Electrical, Optical, Bio : Physics and Engineering – EOBESpécialité de doctorat: génie électrique

Thèse présentée et soutenue à Gif-sur-Yvette, le mardi 18 décembre 2018.

[11] : Thi Thu Nga VU « Étude des phénomènes de charges d'espace dans des matériaux de câbles et câbles modèles destinés à des applications au transport d'énergie en Haute Tension Continue (HVDC) ».

Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier présentée le 16 Juillet 2014.

[12] : IBAUR ensuring the flow, Essai et diagnostic de câble.

Références bibliographiques

[13] : W. D. Schuppe, M. Saure, H. Andress, K. Möller, D. Meurer, K. Krause, Méthodes analytiques et physiques pour les modifications d'état dans des plaques ou des isolants de câbles en Polyoléfines, CIGRE Rapport 15-03 (1988) 1-10.

[14] : A. Boubakeur, A. Medjdoub, M. Boumerzoug, Influence du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques d'un câble de moyenne tension isolé au PRC, 1ère CNHT Conférence National sur la Haute Tension, Béjaïa, Algérie (1995) 47-51.

[15] : Documentation ENICAN Biskra Algérie.

[16] J. Verdu, Vieillissement des plastiques, Afnor Technique Edition Eyrolles, Paris (1984).

[17] : Megger « Le guide complet des tests d'isolation électrique ».

[18] P. Dubois, Les plastiques modernes, Masson et Cie Editeurs, Paris (1963).

[19] : Pr A.Boubakeur « Vieillissement du PRC ». Ecole Nationale Polytechnique - ahmed.boubakeur@g.enp.edu.dz.

[20]: Mr. ZERKAK Mounir Et Mr. SOUAMI Islam «ÉTUDE DE LA TENUE DIÉLECTRIQUE DU MATÉRIAU POLYÉTHYLÈNE UTILISÉ DANS L'ISOLATION ÉLECTRIQUE ». Mémoire de Fin d'Étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique 2016/2017.

[21] : ENICAB Entreprise des industries du câble de Biskra.

H07Z1-U (HS). Fils 750V à Ame Massive. NF C 32201-15 / EN 50363-7

[22] : A.K. Jonscher, R. Lacoste, On a cumulative model of dielectric breakdown in solids, IEEE. Trans. On Elect. Insul, Vol. EI-19, N°6, pp. 567-577, December 1984.

C H A P I T R E I

Généralités

sur les câbles

électriques

**C
H
A
P
I
T
R
E

I**

Caractéristiques

d'un matériau

diélectrique

**C
H
A
P
I
T
R
E**

I

Présentation

de l'entreprise

ENICAB Biskra

**C
H
A
P
I
T
R
E

I
V**

*Techniques
expérimentales
sur le PRC*

INTRODUCTION

GENERALE

CONCLUSION

GENERALE

**C
H
A
P
I
T
R
E

V**

Mesure la tension

de contournement

d'un isolateur en verre

