

20/96

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

SUJET

**Influence du vieillissement thermique sur
les propriétés du PRC utilisé dans
l'isolation des câbles MT**

Proposé par :

A. BOUBAKEUR

Etudié par :

A. HALASSA
K. BADACHE

Dirigé par :

A. BOUBAKEUR

PROMOTION
JUN 1996

E.N.P 10, Avenue Hassen Badi - EL - HARRACH - ALGER

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

SUJET

**Influence du vieillissement thermique sur
les propriétés du PRC utilisé dans
l'isolation des câbles MT**

Proposé par :

A. BOUBAKEUR

Etudié par :

A. HALASSA
K. BADACHE

Dirigé par :

A. BOUBAKEUR

PROMOTION
JUN 1996

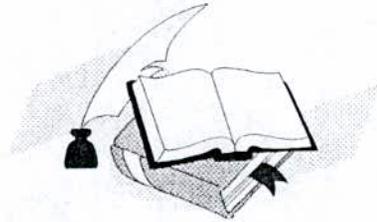
E.N.P 10, Avenue Hassen Badi - EL - HARRACH - ALGER

DEDICACE

- *A ma très chère mère*
- *A mon très cher père*
- *A ma soeur*
- *A mes frères*
- *A tous mes très chers Amis(ies)*

Je dedie ce travail

KAMEL BADACHE



DEDICACE

--A mes parents qui ont tout fait pour que je réussisse

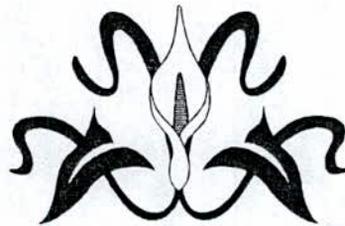
-- A mes frères et soeurs

-- A toute ma grande famille

--A tous mes Amis

- A tout les membres de l'association culturelle des étudiants
de l'Ahaggar.

HALASSA ABDELGHANI



DEDICACE

--A mes parents qui ont tout fait pour que je réussisse

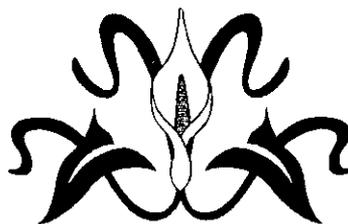
-- A mes frères et soeurs

-- A toute ma grande famille

--A tous mes Amis

*- A tout les membres de l'association culturelle des étudiants
de l'Ahaggar.*

HALASSA ABDELGHANI



REMERCIEMENTS

Ce travail à été effectué sous la direction de Mr A. BOUBAKEUR Docteur es-sciences techniques , charge de cours à l'Ecole national polytechnique d'Alger qu'il nous soit permis de lui exprimer nos meilleurs sentiments de gratitude pour son abrégation , ainsi que sa grande patience envers nous

Nous adressons nos plus vifs remerciements à Mrs : A.MEDJDOUB et Y.MECHRI leurs précieux conseils ainsi que leurs encouragements prodigués tout au long de la préparation de ce mémoire

Nous exprimons nos plus vifs remerciement à Mrs A. RAHMOUNE et M. BOUMERZOUG respectivement chef du département et chef de service assurance -qualité à L'E.N.I CAB de Biskra pour l'aide qu'ils nous ont apporté durant cette étude et de nous avoir facilité l'accés aux materiels durant notre stage.

Nous tenons à exprimer nos sentiment de gratitude a A. RAZIG et S. BOUDJEMAA techniciens au laboratoire d'essai de moyenne tension à L'E.N.I CAB / Biskra qui ont su nous faire bénéficier de leur expérience afin d'accomplir ce travail dans climats d'amitié .

Que Mr YOUNI chef du centre de documentation de l'unité d'E.N.I . CAB /Biskra et l'ensemble des cadres du département DRD trouvent l'expression de notre gratitude pour l'aide constate qu'ils nous ont apportés et le climats de fraternité dont ils ont entourés durant notre séjour à Biskra

Il nous est agréable de remercie tout le personnel de câblerie de biskra

Enfin nous remercions toute personne qui à participé de prés ou de loin quant à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Introduction	
CHAPITRE I: polymères et polymérisation.	3
Généralité	3
I- 1 polymère et polymérisation	3
I-2 Classification des polymères	3
I-2-1 Origine du matériaux	3
I-2-2 La structure chimique et la fonctionnalité des motifs	4
I- 2-3 La géométrie de la macromolécule.	4
A°/ L' ordre atomique	5
B°/ Distribution spatiale des liaisons	5
I-2-4 Type de polymérisation utilisé.	6
A°/ Réaction de polycondensation	6
B°/ Réaction de polyaddition.	6
I-2-5 Techniques de polymérisation	7
- Polymérisation en masse	7
- Polymérisation en suspension	7
- Polymérisation en solution	7
- Polymérisation en émulsion	7
I-2-6 Comparaison entre les différents méthodes de polymérisation	8
I-3 Caractéristiques des polymères	8
I-3-1 Comportement chimiques des polymères ..	8
I-3-2 Propriétés mécaniques des polymères	9
I-3-3 propriétés électriques des polymères	9
A°/ Rigidité diélectrique	9
B°/ Propriétés électriques superficielles ...	9
C°/ Résistance transversale	10

I-3-4 Polarisation et constante diélectrique	10
A°/ Polarisation électrique	11
B°/ Polarisation ionique	12
C°/ Polarisation dipolaire ou d'orientation ..	12
D°/ Polarisation intercalaire	12
E°/ Polarisation par charge d'espace	12
CHAPITRE II : Les polymères utilisés pour l'isolation des cables de H.T.	
Généralités	14
II-1 Le polychlorure de vinyle P.V.C	14
Les propriétés du P.V.C	14
II-2 L'éthylène propylène diène monomère EPDM	15
Les propriétés du l'EPDM	15
II-3 Le polyéthylène PE	15
II-3-1 Procédé de polymérisation	17
II-3-2 Structure des différents polyéthylènes (PEBD et PEHD)	17
A°/ Le PE basse densité PEBD	17
- Homopolymères radicalaires	17
- Procédé de fabrication	17
- Les propriétés du PEBD	18
B°/ Le PE haute densité PEHD	18
- Généralité	19
- Procédé de fabrication	19
- Les propriétés du PEHD	19
II-3-3 Procédé de réticulation	20
Différents procédé de réticulation	20
II-4 Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)	22
II-4-1 Procédés de fabrication	22
II-4-2 Les propriétés du PRC	23
II-4-3 Procédé de fabrication à L'ENICAB/ BISKRA	24
A°/ Extrusion	24
B°/ Réticulation	24

CHAPITRE III : Vieillessement des isolants solides / polymères.

Généralités	26
III-1 Vieillessement	26
III -1-1 Vieillessement physique	27
A°/ Vieillessement physique avec transfert de masse ..	27
-Vieillessement par absorption de solvant ..	27
- Vieillessement par migration d'adjuvants ..	27
B°/ Vieillessement physique sans transfert de masse ..	28
III-2 Vieillessement thermique	30
III-2-1 Le vieillessement thermique des isolants solides	30
III-2-2 Processus physiques intervenants	30
III-2-3 Processus chimiques intervenants	31
A°/ Oxydation	31
B°/ Depolymensation	32
C°/ Réticulation	32
D°/ Hydrolyse	33
III-3 Endurance thermique des isolants solides/ polymère	
III-3-1 Détermination de critère de l'endurance	
thermique des polymères	33
III-3-2 Choix des propriétés et des méthodes d'essai	
III-3-3 Choix des critères de dégradation	35
III-3-4 Choix des températures et de la durée	
d'exposition	35
III-3-5 Conditions d'environnement	35
III-3-6 Critère de fin de vie	36
III-3-7 Vitesse de dégradation	36
III-4 Vieillessement électrique	37
III-5 La dégradation mécanique des polymères	37

CHAPITRE IV: Résultats expérimentaux

Généralité	39
IV-1 Présentation du câble	39

IV-2 Essai de vieillissement thermique	42
IV-2-1 Dispositifs expérimentaux	42
IV-2-2 Essai mécanique	43
IV-2-3 Influence du vieillissement thermique sur l'indice de pertes et de la résistivité	43
IV-2-4 Variation de l'indice de pertes en fonction de la température	49
IV-2-5 Influence du vieillissement thermique sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles ...	50
IV-2-6 Variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la tension avant et après vieillissement	50
IV-3 Vérification des propriétés mécaniques	52
Interprétation et conclusion	53
Références bibliographiques	55

INTRODUCTION

Introduction

Le développement des zones urbanisées conduit à une introduction de plus en plus large des câbles souterrains dans les réseaux électriques.

- Au cours des dernières années, l'isolation électrique des câbles avec du papier imprégné d'huile laisse peu à peu la place à une isolation faisant appel à des isolants secs (élastomères, thermoplastiques) appelés polymères synthétiques qui possèdent des propriétés très diverses leur ouvrant sans cesse de nouveaux champs d'application.

Les câbles à isolation synthétique à base de polymères, présentent des avantages non négligeables à la fois sur le plan technique et sur le plan économique. Parmi ces avantages nous pouvons citer la grande facilité de mise en œuvre, leur volume réduit, leur exploitation et la non nécessité de leur entretien. Ajoutés à ces qualités, les propriétés électriques et mécaniques ainsi qu'une durée de vie largement supérieure à celle des isolants naturels, font des isolants en polymères ceux qui répondant le mieux exigences actuelles [1].

Tout au long de leur utilisation, les matériaux isolants solides peuvent être soumis à plusieurs contraintes : électriques, mécaniques, thermiques, chimiques, rayonnement, etc.

Malgré les avantages qu'ils présentent, les polymères se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de ces contraintes auxquelles ils sont soumis pendant la mise en service des câbles ou ils sont utilisés.

La dégradation des matériaux au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement.

Les problèmes posés par le vieillissement des matériaux isolants sous contraintes précitées datent des débuts de l'utilisation de ces matériaux dans le domaine de l'électrotechnique.

On appelle vieillissement tout phénomène se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériau. Cette évolution peut résulter de modifications de la structure des macromolécules.

L'étude du phénomène de vieillissement thermique d'un isolant solide a deux buts principaux . Le premier est l'évolution de la durée de vie de ces isolante sous l'effet des contraintes thermiques , le second but est de trouver une éventuelle corrélation entre le processus de vieillissement et les contraintes qui le provoquent [2].

Le vieillissement thermique peut être cyclique ou continu, nous nous intéresserons à l'étude du deuxième type où le polymère est exposé continuellement à la chaleur .

- Depuis 1940 le polyéthylène a été et continue d'être largement utilisé dans la fabrication des câbles , en raison de son faible coût et la facilité de sa mise en oeuvre . Il est caractérisé par une très bonne rigidité et de faibles pertes diélectriques .

- Ce matériau pourra voir ses propriétés améliorées par un procédé de réticulation chimique .

- L'étude qui nous était proposée s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche effectué en collaboration entre le laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) et l'Entreprise Nationale de l'Industrie des Câbles (E.N.I.CAB)

Le but de ce travail est d'étudier l'influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques des câbles moyennes tension isolés au polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) , produit par la câblerie de Biskra

Notre travail comprend deux parties :

- La première partie est subdivisée en trois chapitres :

Dans le premier chapitre , nous faisons le point sur les connaissances concernant les polymères et la polymérisation . Le deuxième chapitre est consacré à l'utilisation des polymères pour l'isolation des câbles haute tension .

Nous nous sommes particulièrement intéressés au PRC dont on a présenté la formulation , la mise en oeuvre ainsi que les propriétés physico-chimique .

Dans le troisième chapitre , nous traitants essentiellement du vieillissement thermique des isolants solides (polymères) .

La deuxième partie est réservé à la présentation des travaux expérimentaux réalisés et relatifs aux essais de vieillissement thermique sur câble .

INTRODUCTION

Nous nous sommes intéressés aux variations des propriétés diélectriques et mécaniques du PRC durant un vieillissement thermique d'une durée globale d'environ 1300 h les propriétés étudiées sont : l'indice de pertes diélectriques partielle , la résistivité et la tension seuil d'apparition des décharges partielles.

Les propriétés mécaniques sont: l'allongement à la rupture et le résistance à la traction

- Nous terminons notre travail par une discussion suivie d'une conclusion générale .

CHAPITRE I
POLYMERES ET POLYMERISATION

Généralité :

Au cours de ces dernières années , les applications des matériaux synthétiques se sont fortement développées et étendues a plusieurs domaines particulièrement électriques [3] .

Les polymères de synthèse sont des matériaux largement utilisés en technique de haute tension , en remplacement progressif d'autres isolants solides , autrefois utilisés , tel que le papier imprégné [4] .

I.1 Polymère et polymérisation :

Un polymère est une macromolécule obtenue par la répétition d'une unité constitutive comportant un groupe d'atomes , cette unité est appelée monomère .

Les polymères sont synthétisés en reliant des molécules de monomères entre elles par des liaisons chimiques convolantes .

Cette réactivité chimique des monomères résulte de la présence des groupes fonctionnels capables de former des liaisons chimiques avec les groupes fonctionnels d'autres molécules de monomère .

Pour démarrer une réaction de polymérisation on a besoin généralement d'un amorceur de polymérisation qu'est une substance qui possède ou moins une liaison chimique susceptible de générer par rupture homolytique des radicaux libres. Il existe deux types d'amorceurs : les peroxydes et les dérivés azoïques [5] .

I.2 Classification des polymères :

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

I.2.1 origine du matériau

- polymères naturels tels que : le bois , le coton , le cuir , la laine ,... etc

- polymères synthétiques: appelés aussi résines synthétiques , du fait des similarités observées entre leur structure et celle de la résine naturelle [4].
- polymères artificiels : qui résultent de la transformation chimique des polymères naturels [6].

1.2.2 La structure chimique et la fonctionnalité des motifs :

Suivant que le motif principal du polymère comprenne un ou plusieurs types de monomères , on distingue : les homopolymères et les copolymères.

A°/ Les homopolymères sont des polymères constitués par des liaisons covalentes entre un nombre de monomères de même structure (même monomère)



avec A: le monomère , n :le nombre de monomère

B°) les copolymères : les monomères sont de structure différentes [5]
suivant leur architecture moléculaire on distingue plusieurs types :

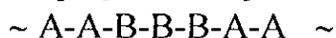
- copolymère statistique : les monomères A et B sont repartis aléatoirement dans la chaîne.



- copolymère alterne : A et B reparties alternativement



- copolymère séquencé .



1.2.3 La géométrie de la macromolécule :

La géométrie de la macromolécule peut être caractérisée par l'ordre atomique et la distribution des liaisons [4].

A°/ L'ordre atomique :

on distingue selon cette caractéristique plusieurs types :

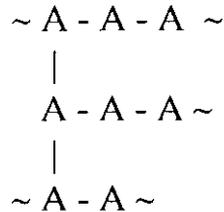
- polymère amorphe : où les atomes sont désordonnés le long de la chaîne du polymère .
- polymère cristallin : suite à certaines conditions (refroidissement lent après fusion ,...) les polymères peuvent posséder une structure semi-ordonnée , et donner lieu a une cristallisation partielle [7].

Dans cette même classification on peut faire une deuxième distinction :

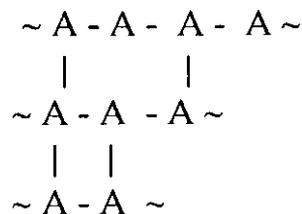
B°/ Distribution spatiale des liaisons

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

- polymères linéaires : il peuvent être des homopolymères ou des copolymères .
- polymères ramifié : leur structure est toujours planaire mais sa macromolécule est constituée de branches liées chimiquement



- polymères tridimensionnels :
pour des raisons de stabilité des liaisons relie les divers branches [4] .



aux structures linéaires et faiblement ramifiés correspondent les thermoplastiques, et aux structures faiblement réticulées (réseau à mailles larges) correspondent les élastomères quand les mailles du réseau deviennent serrées le matériau est appelé thermodurcissable [8].

I-2-4 Type de polymérisation utilisé :

Il existe deux types de polymérisation ; réaction de polycondensation et réaction de polyaddition

A°/ Réaction de polycondensation:

La réaction se produit par simple chauffage en présence d'un catalyseur (amorçeur) convenable : on passe des molécules monomères puis aux molécules polymères formées et enfin aux macromolécules [6].

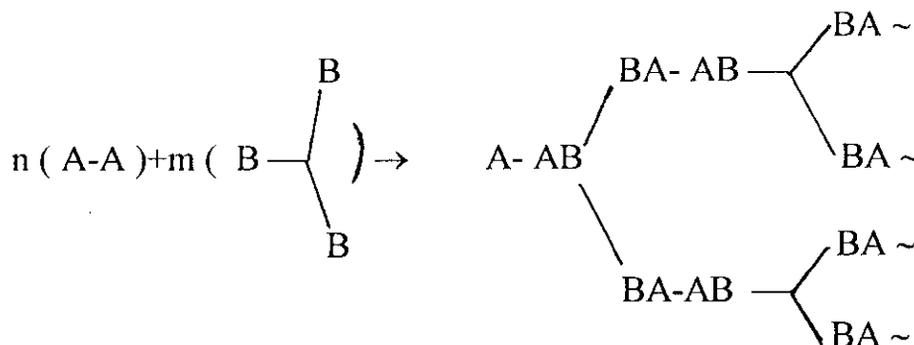
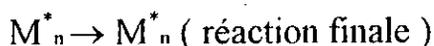
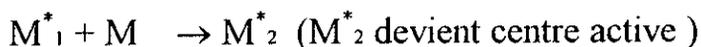
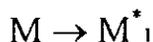


FIG I.1 : polymérisation par réaction de polycondensation

B°/ Réaction de polyaddition :

Elle est appelée aussi polymérisation proprement dite : une molécule monomère M s'ajoute à un centre actif de la chaîne macromoléculaire en cours de formation [6].



FIGI.2 : polymérisation par réaction de polyaddition

Il existe quatre types de polyaddition :

- radicalaire - anionique - cationique - ionique coordonnée

Les réactions de synthèse industrielle des polymères sont effectuées selon quatre techniques :

1-2-5 Techniques de polymérisation :

A°/ polymérisation en masse :

L'amorçage de la polymérisation s'effectue dans le monomère liquide à l'aide d'amorçeur radicalaires conventionnels [6] .

cette méthode permet d'obtenir des masses moléculaires élevées indispensables aux bonnes propriétés mécaniques .

B°/ Polymérisation en suspension :

Dans ce cas le polymère est insoluble dans un milieu dispersant tel que l'eau , l'amorceur n'est soluble que dans le monomère .

Chaque gouttelette de la suspension peut être considérée comme un système isolé de polymérisation en masse.

A la fin de la réaction le polymère se trouve sous forme de perles si le polymère et le monomère sont solubles l'un dans l'autre ou sous forme de granulés si ils ne le sont pas [5] .

C°/ Polymérisation en solution :

Elle est effectuée cette fois en présence d'un solvant , dont le rôle essentiel est de permettre un contrôle de dégagement thermique lors de la réaction [6] .

D°/ Polymérisation en émulsion :

Le monomère presque insoluble dans le milieu dispersant est maintenu sous forme d'émulsion , grâce à un agent tensioactif et à une agitation énergétique .cette fois le système catalytique est soluble dans l'eau et non plus dans le polymère [4].

I-2-6 : Comparaison entre les différentes méthodes de polymérisation
 [6]:

Méthode	avantages	inconvénients
polymérisation en masse	- polymère contenant un minimum d'impurtés	- Difficulté du contrôle des échanges de chaleur . - difficulté du contrôle de degré de polymérisation.
polymérisation en solution	- contrôle aisé du dégagement thermique	- Difficulté pour débarrasser totalement le polymère du solvant résiduel - réaction relativement lente
polymérisation en suspension	- contrôle aisé du dégagement thermique - séparation aisée des impurtés du polymères	- relation relativement lente - contrôle critique de l'agitation
polymérisation en émulsion	- polymérisation rapide - degré de polymérisation élevé - contrôle aisé du dégagement thermique	- contamination du polymère par l'emulifiant ou l'agent de l'émulsion - contrôle critique de l'agitation

I-3 CARACTÉRISTIQUES DES POLYMÈRES :

I-3-1 : Comportement chimique des polymères:

Au contact des liquides où des gaz le comportement des polymères varie suivant leur nature et leur composition , il peut y avoir diffusion , absorption avec gonflement où gelatinisation, dissolution où distinction selon l'agressivité des produits en présence , ceci peut donc causer

d'importantes contraintes qui peuvent être catastrophiques pour le matériau [9].

I-3-2 Propriétés mécaniques des polymères :

Vu leurs excellentes propriétés mécaniques , leur aptitude aux déformations et leur grande sensibilité aux variations de la température , les polymères se distinguent généralement par [10].

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

I-3-3 Propriétés électriques des polymères:

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

- la présence de charge
- la présence d'adjuvants
- l'absorption éventuelle d'humidité
- la morphologie du polymère.

A°/ Rigidité Diélectrique:

On trouve généralement pour les polymères des valeurs comprises entre:

150 kV/cm et 500 kV/cm .Cette rigidité est influencée par plusieurs paramètres dont les plus importants :

- la structure du polymère;
- le temps d'exposition à la haute tension;
- présence du vide , bulles,etc.

B° / Propriétés électrique:superficielles

La résistance à la décharge superficielle est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le matériau , et en le carbonisant, le rendre conducteur . La résistance superficielle est fortement influencée par l'humidité .

C°/ Résistance transversale :

La résistance transversale d'un matériau est le quotient du gradient de potentiel par densité du courant qui le traverse . Elle caractérise le pouvoir isolant du matériau . Pour la majorité des polymères la valeur de la résistivité transversale est supérieure à $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ à la température ambiante [10].

I-3-4 Polarisation et constante diélectrique:

Le modèle des bandes d'énergie établit la différence entre l'état d'un matériau isolant et un matériau conducteur . Par exemple pour les isolants qui gravitent autour du noyau restent fortement liés à ce dernier [8].

La transition des électrons vers les bandes de conduction est fortement liée à la température.

constatant que lorsqu'un diélectrique remplace le vide entre les armatures d'un condensateur , ce dernier voit sa capacité s'accroître alors la notion de la permittivité relative a été introduite [11].

celle- ci est définie par.

$$\epsilon_r = C/C_0 \dots\dots\dots(I-1)$$

C: capacité du condensateur comprenant un diélectrique

C₀ : capacité du condensateur comprenant le vide entre ses armatures

la permittivité vaut alors :

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \dots\dots\dots(I-2)$$

ϵ_0 : permittivité du vide

On définit ainsi la permittivité relative complexe:

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' \dots\dots\dots(I-3)$$

et le facteur de pertes diélectriques est donné par :

$$\text{tg}\delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \dots\dots\dots (I-4).$$

la variation de ε est influencée (augmente) par l'augmentation de la température T où le décroissement de la fréquence f.

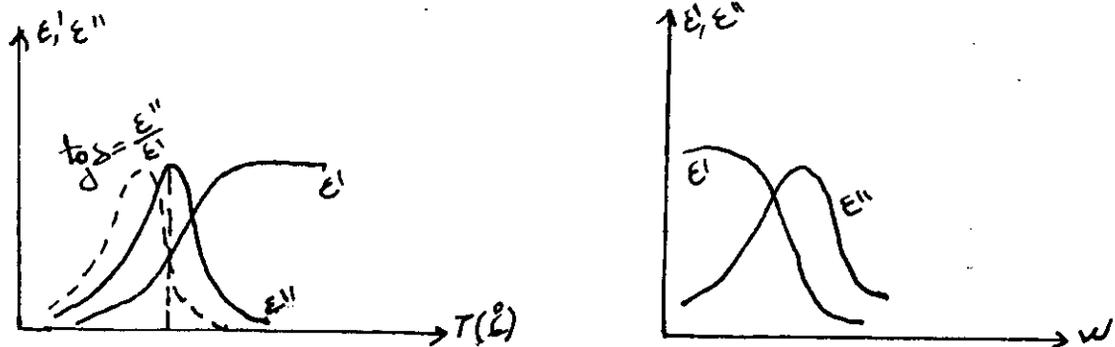


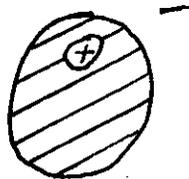
FIG.I.3: Variation de ε' , ε'' et $\text{tg}\delta$ en fonction de la température T et f

On explique l'augmentation de la capacité C par différents mécanismes de polarisation du matériau que l'on peut classer en plusieurs groupes [4].

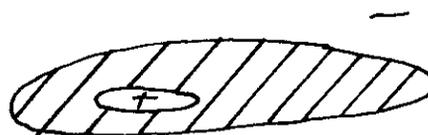
A°/ Polarisation électronique:

A l'échelle atomique du diélectrique sous l'effet d'un champ électrique constant, électrons se déplacent par rapport au noyau.

Le déplacement des électrons, par rapport au noyau d'un atome fait apparaître ainsi un moment dipolaire et une polarisation dont le temps d'établissement est très court (de l'ordre de 10^{-15} s) [10].



sans champ électrique



Après application d'un champ

FIG.I.4: polarisation électronique

B°/ Polarisation ionique :

Lorsque différents atomes sont présents dans une molécule (cas des polymères)

Les électrons participant aux liaisons de covalence se déplacent préférentiellement vers l'atome le plus électronégatif

La polarisation ionique est due au déplacement en sens opposé des ions des signes contraires , sous l'effet du champ électrique [10].

son temps d'établissement est de l'ordre de 10^{-13} S à 10^{-12} S

Ces deux types de polarisation ne sont pas affectés par la température pour des fréquences industrielles .

C°/ Polarisation dipolaire ou d'orientation:

Elle apparaît dans les gaz , les liquides et les corps amorphes très visqueux, elle consiste dans l'orientation des molécules sous l'action du champ électrique [11].

Ce qui donne une polarisation par orientation.

Ce type de polarisation dépend de la température et donne lieu à des pertes diélectriques significatives.

D°/ Polarisation intercalaire:

MAX WELL à établi une théorie de l'absorption qui concerne les milieux diélectriques hétérogènes. L'association de deux diélectriques homogènes possédant des permittivités et des conductivités différentes et à l'origine du phénomène d'absorption , un matériau seul peut être également concerné à condition que sa structure soit hétérogène (le polyéthylène , par exemple)

L'influence d'un champ électrique entraîne la migration , des porteurs de charges vers les défauts existants dans le matériau

(les interfaces), son temps d'établissement est assez long.

E°/ Polarisation par charge d'espace :

sous l'influence d'un champ élevé, il peut se produire une injection de charge à partir des armatures du condensateur constitué par un isolant apparemment homogène .

Dans ce cas des charges d'espace peuvent alors s'accumuler aux interfaces créant des distorsions microscopie du champ appliqué [10].

CHAPITRE II

**LES POLYMERES UTILISES
POUR L'ISOLATION DES CABLES
HT**

II- Les polymères utilisés pour l'isolation des câbles de haute tension

Généralité

Dans cette partie , nous allons exposer succinctement les caractéristiques de certains câbles isolés aux polymères tels que le PVC, l'EPDM, le PE et le PRC.

Nous nous intéressons plus particulièrement au PE et au PRC car ce dernier fait l'objet de notre étude .

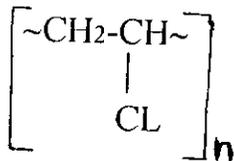
II-1 LE Polychlorure de vinyle PVC :

Le PVC est obtenu par polymérisation en masse , en émulsion ou en suspension de chlorure de vinyle [4].

Ce dernier est obtenu soit par addition de l'acide chlorhydrique de dichloroethane [8].

le PVC est disponible sous forme de poudre ou de granulés , il est généralement utilisé pour le gainage et isolant des câbles d'énergie jusqu'à une tension de 10 kV environ [4]

La formule générale du polychlorure de vinyle est [4] :



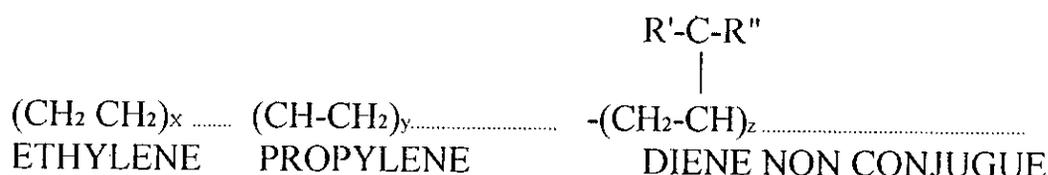
II-1-1 Les Propriétés physico- chimiques, électriques et mécaniques du PVC

- le PVC est colorable en couleurs vives , comporte une grande inertie chimique.
- le PVC transmet mal la flamme mais sa combustion entraîne un dégagement de gaz carbonés et de fumées.
- Bonnes propriétés isolantes , mais pertes diélectriques assez importantes.
- le PVC a un bon vieillissement thermique.

I -2 L'éthylène propylène diène monomère EPDM:

- L'EPDM est élastomère, obtenu par polymérisation en masse , ou en émulsion [4] .

-L' EPDM est constituée d'un terpolymère d'éthylène propylène - diène non conjugué , dont la structure est [9] :



les polymères d'EPDM ont trouvé de large débouchés dans les applications de l'industrie du caoutchouc . Le principale raison de leurs utilisation dans l'industrie électrique , réside dans le fait que lorsqu'on les mélange avec les charges et les agents de vulcanisation appropriés , il sont dotés d'excellentes caractéristiques électriques , d'une bonne résistance au cheminement et aux radiations ainsi que d'autres propriétés intéressantes [28] .

II -2-1 Propriétés physico-chimiques, électriques et mécaniques du EPDM

-Résistance à l'ozone aux intempéries , à l'action de la vapeur , au cheminement , aux radiations ;

-brûle au vieillissement à la chaleur [12] ;

-se dilate à basse température ;

IL présente de bonnes propriétés isolantes et un faible facteur de pertes [4] .

II-3 Le polyéthylène PE :

Les polyéthylènes sont obtenus par polymérisation de l'éthylène ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) gazeux très pur , en présence de catalyseurs [13] .

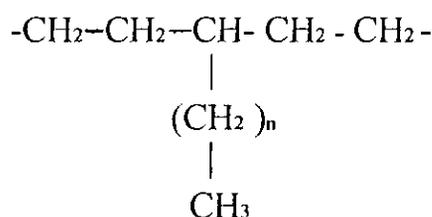
- l'éthylène est un gaz ayant une température critique 10°C dans les conditions de polymérisation , l'éthylène est dans un état supercritique avec une densité comprise entre 0,1 et 0,6 .

II-3-1 Procédé de polymérisation:

Il existe principalement deux procédés de polymérisation:
 -soit à haute pression ; pouvant dépasser 300 bars , à une température élevée ;
 (jusqu'à 400°C); les polyéthylènes ainsi obtenus sont dits " à haute pression" ou "basse densité " (environ 0,92)
 -soit à basse pression , inférieure à 50 bars , à une température inférieure à 180°C; les polyéthylènes ainsi obtenus sont dits " à basse pression" ou " haute densité " (environ 0,95) [13]
 les conditions optimales de polymérisation sont les suivants :
 pression d'environ 150 Mpa , température 200°C et une concentration en oxygène compris entre 0,03 et 0,1 %

III -3-2 Structure des différents polyéthylènes basse densité PEHD et haute densité PEHD**A°/ les polyéthylènes basse densité PEBD homopolymère radicalaires:**

Ils peuvent être représentés par la formule générale [14]



le polyéthylène basse densité radicalaire (PEBDR) est obtenu par polymérisation radicalaire de l'éthylène sous haute pression . les macromolécules obtenus sont toujours branchées (ramifiées) , et par conséquent , la cristallinité et la masse volumique du polymère sont relativement faibles (0,91 à 0,93 g/cm³) [14]

Procédé de fabrication

Le PEBD est réalisé suivant un procédé à haute pression . l'éthylène est injecté en continu dans le réacteur par l'intermédiaire d'hypercompresseurs . la pression de polymérisation se situe entre 1000 et 5000 bars et la température entre 150 et 400°C.

les catalyseurs de réaction utilisés sont du type peroxy. de ou oxygène pur le polymère est recueilli en continu par précipitation, le monomère éthylène comprimé jouant le rôle de solvant. le PE est ensuite extrudé avec incorporation éventuelle de quelques additifs du type antioxydant et mis sous forme de granules utilisables directement dans l'industrie [15].

Les propriétés physico - chimiques, électriques et mécaniques du PEBD

- La zone de fusion compris entre 90 et 110°C ;
- La densité de ces polymères variés entre 0,91 et 0,92 ;
- Les PEBD sont peut perméable à la vapeur d'eau

En général, les PEBD présentent une bonne résistance chimique: très résistants aux acides faibles, aux acides forts non oxydants, aux solvants organiques au-dessous de 80°C, mais perméables.

- Il peuvent être attaqués par des bactéries ou des micro-organismes.

-Les PEBD sont sensible a la lumière et de ce fait, pour des applications de longue durée (≥ 1 an), on les protège ;

-Les PEBD sont des substances non polaires, caractérisées par une permittivité relative et un facteur de dissipation diélectrique faible et une rigidité diélectrique élevée.

En conséquence, les PEBD sont largement employés en câblerie en tant qu'isolants, d'une part en basse et haute fréquence d'autre part en basse, moyenne et haute tension.

B°/ polyéthylène haute densité PEHD

Généralité

La formule du polyéthylène est [14].



Le polyéthylène réalisé par le procédé haute pression conduit à produit relativement branché : c'est le polyéthylène basse densité.

Le PEHD réalisé par des procédés où la pression est nettement plus faible, contient peu de branchements.

Procédé de fabrication

Le polyéthylène haute densité est obtenu selon un processus de synthèse basse pression. Les conditions de polymérisation sont les suivants:

température entre 50 et 180°C ; pression entre 30 et 40 bars

La réaction s'effectue en présence de catalyseurs.

- Les propriétés physico-chimiques, électriques et mécaniques du PEHD

Le PEHD est, par ailleurs très résistant aux produits chimiques, minéraux ou organique.

Le PEHD est sensible au phénomène de fissuration sous tension, la présence de tensio-actif liquides accentuant encore cette tendance.

Cependant, le choix judicieux d'un ou de plusieurs paramètres structuraux : masse moléculaire élevée, cristallinité moyenne, répartition moléculaire large, permet de présenter des qualités à haute niveau de résistance à la fissuration sous tension [14].

Le PEHD présentent grand intérêt pour l'isolation des câbles à haute tension.

Le PEHD comporte une rigidité diélectrique élevée, une permittivité relative faible par rapport au papier imprégné, pertes diélectrique faibles.

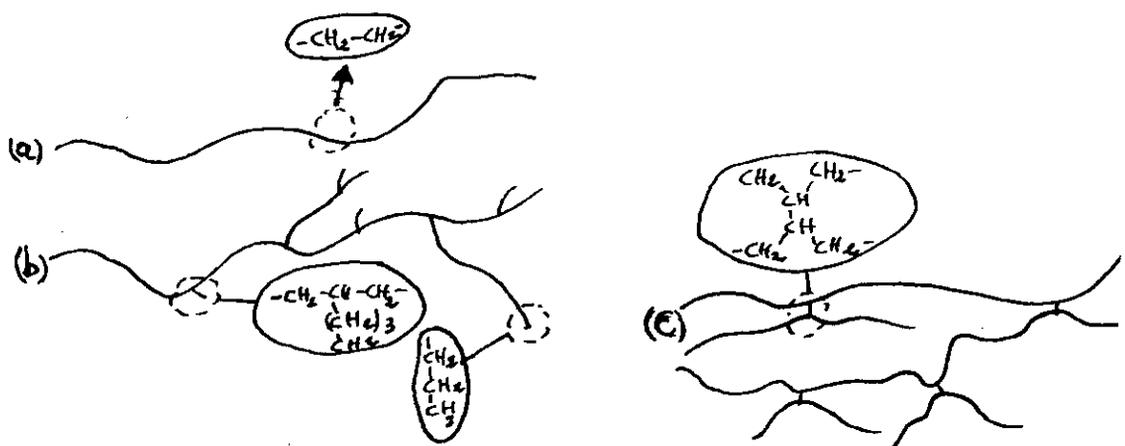


figure II-4 Représentation de divers polyéthylènes (5).
(a) linéaire, (b) ramifié, (c) réticulé

II-3-3 Procédé de réticulation :

Généralité:

La réticulation est la réaction conduisant à la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines .

on peut la schématiser comme suit : (fig .II .5) [16] :

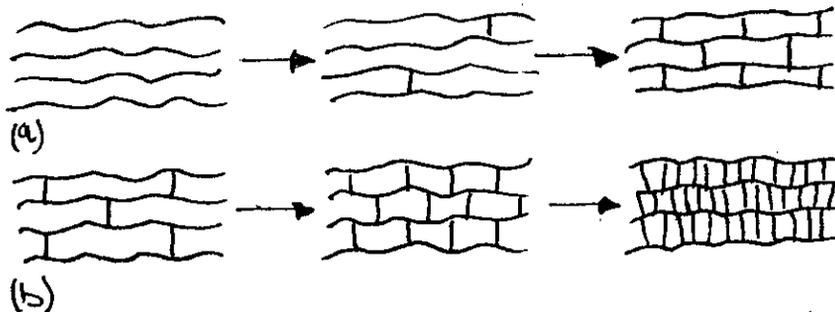


fig II.5: Réticulation ; (a) polymère linéaire ; (b) polymère tridimensionnel

-La réticulation consiste , après extrusion , à pontes les chaînes de molécules par des liaisons radiales , l'amélioration porte notamment sur [45] :

- La température maximale admissible par le matériau;
- La tenue mécanique ;
- La résistance aux intempéries .

A°/ Différents procédés de réticulation :

— Réticulation par peroxyde :

sous vapeur d'eau :

- Le câble est tiré dans un tube contenant de la vapeur d'eau sous pression . de façon que le câble soit correctement centré , le tube a la forme d'une chaînette .
- Le traitement thermique s'effectue obligatoirement sous pression élevée (paramètres habituels : $t=200$ à 200°C , $p=16$ à 23 bas)

-Le refroidissement s'effectue dans une deuxième partie du tube à la même pression, ce qui procède à l'inconvénient d'introduire de l'eau en quantité notable dans l'isolant, il est, par conséquent, limité aux câbles pour lesquels les champs électriques de fonctionnement sont peu élevés (≤ 6 kV/mm)

sous gaz ou fluide inerte :

-Le principe est le même que précédemment, mais on peut alors réticuler à des températures plus élevées (jusqu'à 280°C à la surface du câble) sous des pressions plus faibles (10 à 12 bars)

- Les taux d'humidité relevés dans l'isolant sont bien plus faibles, ce qui permet d'augmenter la contrainte électrique; on peut atteindre le champ électrique

la contrainte diélectrique de 14 à 15 kV/mm pour des câbles 400 kV. [17].

— Réticulation sous peroxyde :

dans ce procédé, la réticulation est réalisée soit par l'intermédiaire des silanes, soit par irradiation.

- Réticulation par les silanes :

deux procédures ont été développées

-La réticulation en deux étapes consiste d'abord à greffer sur le PE un dérivé organique du silicium, le vinyltriméthoxysilane.

- Les pontages entre chaînes de PE se font lors d'une opération ultérieure. La durée de réticulation dépend de l'épaisseur de l'isolant,

- La réticulation en une seule étape est comparable à la précédente, mais les réactions de greffage et de pontage sont faites en une seule phase à chaud. [17]

- La réticulation par les silanes est surtout utilisée pour les câbles BT

Réticulation par irradiation :

ce procédé consiste; par bombardement d'électrons ou de rayons γ , à produire des radicaux libres permettant le pontage des chaînes de molécules [17]

II-4 polyéthyléné réticulé chimiquement :

II-4-1 Procédés de fabrication:

Le PRC est obtenu par reticulation chimique de PE , le procédé le plus utilisé consiste à incorporer du peroxyde de dicumyle à une teneur de 2 % dans le polyéthyléne , avant ou pendant l'extrusion , puis à soumettre le mélange à une température supérieure à 150°C, sous une pression de vapeur d'eau ou d'azote [13] • On a été signalé précédament que le point de fusion ralativement bas du PEBD (95 - 100°C) limite sa température admissible en court-circuit à 150°C, le moyen utilisé pour remonter ces limites et les amener au niveau du PEHD est la réticulation . cette réticulation qui reticulant à basse de peroxyde .Le principe de la réticulation chimique est la suivant :

-La formule générale des peroxydes est :

R-O-O-R où R : est un radical quelconque aromatique ou aliphatique .

à haute température , ces produits se décompose selon la réaction :

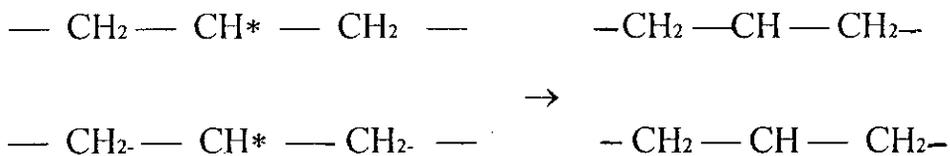


pour donner des radicaux libres réactifs.

ces derniers se combient avec les hdrogénes de chaines du polymére pour forme des sites reactifs et un alcool:



puis deux sites réactifs se recombinent pour créer un pontage entre deux chaines :



le taux de réticulation est caractérisé par le nombre de ces pontages [13]

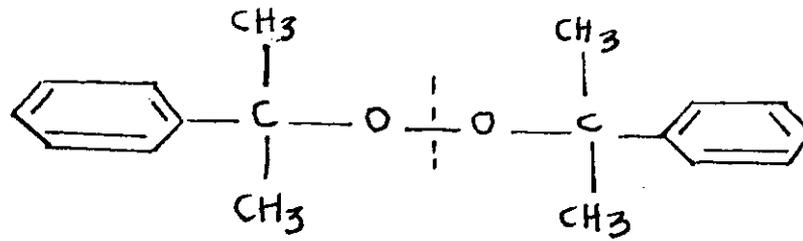


fig II-6 peroxyde de dicumly [16]

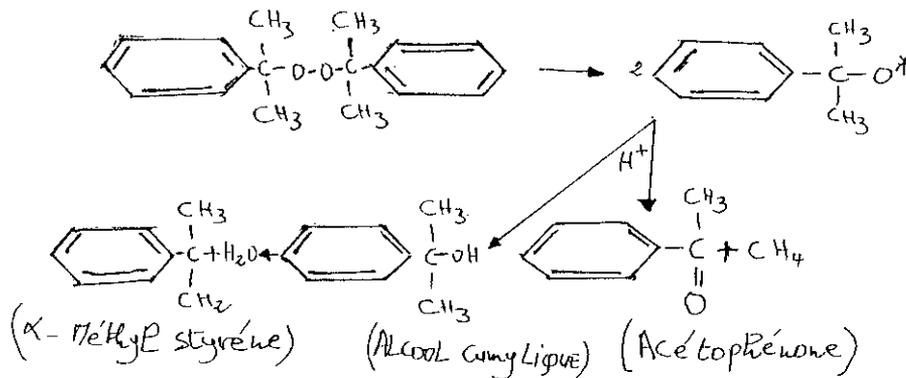


fig II-7 : schéma de découpage du peroxyde de dicumlye [10]

La technique la plus répandue est celle du tube vapeur d'eau pour laquelle les deux paramètres t et p sont liés par la loi empirique de du Perray [17] :

$$p \approx (t/100)^4 \dots \dots \dots (II-1).$$

II 4-2 - Les propriétés physico-chimiques, électriques, mécaniques

- La réticulation confère au PEBD des propriétés mécaniques améliorées et en particulier une meilleure résistance au fluage ;
- La tenue au vieillissement thermique est améliorée par rapport à celle d'un PEBD;
- Sa déformation sous contrainte de traction à 150°C sous 2 bars est faible, contrairement à celle du PEBD.
- La morphologie cristalline du PRC était de type spherulitique dans les câbles de puissance.
- Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celles du PEBD.

- Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE.
- le PRC est un matériaux moins rigide que le PE pour une température basse - les PRC sont largement utilisés en BT et MT
- le gradient de potentiel maximal admissible avec le PRC est aujourd'hui est de 8kV/cm .
- le PRC résiste bien aux solvants aliphatiques , aromatiques.
- la température d'utilisation à la corde est de 90°C et la température tolérée en court -circuit de 250°C.

II-4.3 Procédé de fabrication à l'E.N.I.C.A.B

La fabrication de PRC se fait généralement en deux étapes :

- L'extrusion
- La réticulation .

A° Extrusion :

L'isolation des conducteurs est faite au moyen " d'extrudeuse " ; ces machines comportent une vis fin qui tourne avec un jeu très faible dans une chambre, en refoulant le mélange isolant dans une tête .

Le conducteur à isoler , tiré par un cabestan , passe dans un poinçon creux et sort , à travers la filière, enveloppé par le mélange isolant .

Les extrudeuses , communément appelées boudineuses , sont munies de dispositifs de chauffage et de centrage .

A la sortie de la boudineuse , le conducteur isolé est refroidi progressivement , en général en traversant par balayage de gaz inerte (azote).

B° La réticulation :

La réticulation consiste , après extrusion .

A l'ENICAB la réticulation de PE se fait par peroxyde , sous gaz inerte (azote)

Le câble est tiré dans un tube contenant de gaz d'azote sous pression de façon que le câble soit correctement centré , le tube a forme d'une chaînette.

Le traitement thermique s'effectue sous pressions compris entre (10 et 12bars) et une température jusqu'à 280°C

Le refroidissement s'effectue dans une deuxième partie du tube ,à la même pression .

CHAPITRE III

**VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS
SOLIDES/ POLYMERES**

III- Vieillissement des isolants solides/polymères

généralités:

Une isolation électrique doit supporter , sans défaillance , des contraintes électriques , thermiques , mécaniques et chimiques , pendant une durée pouvant aller jusqu'à 40 ans .La réalisation et l'utilisation satisfaisantes dans un matériel ,d'une isolation nécessitent donc une connaissance précise du degré de dégradation qui se produit au cours de la vie du matériel dans lequel cette isolation est employée.[19]

-La dégradation des polymères est inséparable de leur préparation , de leur transformation et de leur utilisation .Elle intervient essentiellement au niveau de l'altération des propriétés des matériaux organiques et de la production de substances de faibles masses moléculaires [5]

III - 1 le vieillissement :

On appelle le vieillissement toute altération lente et irréversible des propriétés d'un matériau , résultant de son instabilité propre où de l'effet de l'environnement

cette altération peut concerner la structure chimique des macromolécules ou des adjuvants (vieillessement chimique) , la composition du matériau ou son état physique .

- les types de problèmes de vieillissement peuvent être classés dans les catégories suivantes:

-expertise : analyse de pièces défaillantes, recherche des causes de vieillissement et détection des anomalies

- optimisation : amélioration de la stabilité d'un matériau par modification de sa composition , essais comparatifs

- prédiction de durée de vie : essais de vieillissement accéléré , étude de modèles cinétique permettant la prédiction des durées de vie .

- Recherche de base sur les mécanismes de vieillissement et de stabilité .

Les différents mécanismes de vieillissement sont classés en deux grandes catégories , selon qu'ils impliquent ou non une modification chimique de la structure [16]

III - 1-1 vieillissement physique:

Il en globe tous les phénomènes dans les quels la structure chimique des macromolécules et autres constituants du matériau polymères n'est pas modifiée

nous avons distingué deux grandes catégories de phénomènes selon qu'ils impliquent ou non un transfert de masse [16]

A°/ vieillissement physique avec transfert de masse:

Les phénomènes de transfert de masse font essentiellement appel aux notions de solubilité ,de diffusion et de plastification pour établir des interactions plus fortes , polymère - solvant , il faut rompre les interactions polymère- polymère. Dans les polymères , il peut y avoir plastification accompagnée d'un gonflement ,où également pertes d'ajuvants [13]

vieillissement par absorption de solvant :

Les conditions pour qu'un polymère ait une interaction forte avec un solvant à la limite soit soluble dans ce solvant peuvent être établies à partir des lois de la thermodynamique , chaque substance est caractérisée par un paramètre de solubilité .

l'absorption de solvant a plusieurs conséquences physiques parmi elles : la plastification, le gonflement , l'endommagement sous contrainte .

vieillissement par imégration d'ajuvants :

Le départ de l'adjuvant se traduit par le perte des propriétés qu'il affecte au polymère .

Dans le cas de plastifiant on observe :

- une diminution de l'allongement à la rupture
- augmentation de la température de transition vitreuse .

Dans le cas de stabilisants:

- la stabilité chimique diminue

- la perte d'adjuvants par évaporation est le cas le plus fréquemment rencontré dans les applications électriques (isolations des câbles)
- greffage de longues chaînes sur la molécule d'adjuvant
- multiplication des fonctions d'adjuvant dans l'épaisseur
- utilisation d'adjuvant polymère
- copolymérisation

Vieillissement physique sans transfert de masse :

Vieillissement par relaxation du volume:

Il s'agit d'un phénomène lié à l'instabilité propre aux matériaux amorphes au dessous de leur température de transition vitreuse .

Relaxation d'orientation:

Ce type de vieillissement se traduit par les modifications dimensionnelles , on observe un retrait dans la direction d'orientation , et un gonflement dans les directions perpendiculaires .

Vieillissement physique interne :

Ce Vieillissement physique est uniquement lié à des causes-internes du matériau (lors de sa mise en oeuvre)

Il résulte alors d'une évolution plus ou moins lente vers un état plus stable [16]

III -1-2 Vieillissement chimique

Nous appelons Vieillissement chimique tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau sous l'influence de l'environnement . Dans la pratique le vieillissement chimique se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes interfèrent .

Les différents types de vieillissement chimique peuvent être classés selon six types [16]:

Vieillissement thermochimique (nonoxydatif)

On appelle vieillissement thermique non oxydatif tout phénomène traduisant une évolution qui ne fait intervenir que : la température , l'atmosphère et le matériau [10]:

vieillessement chimique thermo--oxydatif

Il se produit à des températures modérées (généralement $< 300^{\circ}\text{C}$) la présence d'oxygène a pour effet ;

- d'abaisser le seuil de température au -delà de laquelle un vieillissement thermochimique anaérobie démarre

- de provoquer une plus forte exothermicité.

- d'entraîner une prédominance des coupures de chaînes des polymères par rapport aux réticulations

- l'utilisation d'antioxygènes ou de noir de carbone peut inhiber le phénomène [13].

Vieillessement photochimique:

La photodégradation est un phénomène relativement complexe
Beaucoup de facteurs influencent son déroulement

- La nature des chromophores et la présence d'impuretés absorbantes; La nature de l'atmosphère environnante et la possibilité qu'elle va diffuser dans le matériau; La température à laquelle est étudié le phénomène; La forme de l'échantillon: poudre, éprouvette, granulé, solution ou film.

Vieillessement radiochimique

Dans les applications nucléaires, spatiales et médicales, les matériaux sont soumis à des radiations (α , β , γ , x , neutrons) de forte énergie.

Ce vieillissement est influencé par la température

Des adjuvants tels que le noir de carbone, les produits phénoliques ont un effet stabilisant.

Vieillessement biochimique :

Certains micro-organismes peuvent dégrader les polymères; plusieurs mécanismes de vieillissement sont connus : dégradation biochimique du matériau, consommation des adjuvants, attaque mécanique par les rongeurs.

Les principaux types des réactions chimiques sont: coupure de chaînes; dépolymérisation ; Réticulation ; Hydrolyse ; réaction conservant le squelette

III- 2 Vieillissement thermique:

On convient d'appeler vieillissement thermique tout phénomène traduisant une évolution qui ne fait intervenir que : le matériau l'atmosphère et la température et il peut faire intervenir des phénomènes physiques ou des phénomènes chimiques ; et il résulte d'une oxydation de chaînes carboniques qui entraîne une augmentation des pertes diélectriques et une chute des caractéristiques mécaniques.

L'oxydation des matériaux dépend de la solubilité et de la vitesse de diffusion de l'oxygène dans le matériau et de l'oxygène dans le matériau mais surtout de la qualité et de la répétition de l'anti oxydant incorporé [21].

III-2-1. Le vieillissement thermique des isolants solides / polymères

L'étude de phénomène de vieillissement thermique d'un isolant solide a deux buts principaux : le premier est l'évolution de la durée de vie de ces isolants sous l'effet des contraintes thermiques le second but est de trouver une éventuelle corrélation entre le processus de vieillissement et les contraintes qui le provoquent.

Le vieillissement thermique peut être continu ou cycliques . dans le premier cas :

le polymère est exposé continuellement à la chaleur , le second cas consiste à faire subir au matériau des cycles de chauffage et de refroidissement [1] .

III- 2-2 processus physiques intervenants dans la dégradation thermique des polymères.

Pour les polymères , un certain nombre de processus physiques peuvent affecter leurs propriétés , tel que les chocs thermiques et la variation de la température , peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle Deux mécanismes sont susceptibles, d'intervenir :

- Gradients de température dans l'épaisseur
- La dilatation différentielle , qui est due à la différence de coefficient de dilatation des phases en présence des contraintes dues à l'interface , peuvent alors être calculés en fonction des coefficients de dilatation ,

des écarts de température et des modules d'élasticité des phases en présence .

-une précontrainte apparait généralement au cours de la fabrication si celle-ci est réalisée à température élevée .

III-2-3 Processus chimiques intervenants dans la dégradation thermique des polymères:

Ces processus sont nombreux et peuvent influencer sur la rigidité mécanique , la fragilité , le volume , la résistance électrique , le facteur de dissipation diélectrique et la plus part des propriétés importantes des polymères.

Certaines définitions et règles empiriques permettent de caractériser la dégradation thermique d'un polymère, ont été proposées : nous définissons également une température de demi-vie ($T_{1/2}$) qui est la température à laquelle il faut chauffer un échantillon pour que la moitié en soit décomposée après 30 minutes de chauffage .La relation empirique suivante a été proposée [5]

$$T_{1/2} = 1,6 E + 140$$

E: est la valeur de l'énergie de repture , en $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
pour la scission primaire

Les travaux de B. FALLOU concernent les processus chimiques permettent de les regrouper :

A°/ oxydation :

Après une scission primaire , dans un atmosphère contenant de l'oxygène , on observe la réaction suivante : [5]

L'oxygène entrant en réaction est pratiquement toujours situé dans les zones amorphes .

Le radical peroxy formé dans la réaction (A-1) peut intervenir dans d'autres réactions que (A-2)

- L'oxydation directe par l'oxygène est un processus radicalaire en chaîne , en plus des étapes classiques ; amorçage ; propagation ; décomposition , conversation des radicaux , terminaison

-La diffusion de l'oxygène dans une zone donnée est d'autant plus facile que celle-ci est moins organisée .

- dans les domaines purement cristallins , l'oxygène ne diffuse pas .

La vitesse d'oxydation du polyéthylène est approximativement inversement

proportionnelle à son degré de cristallinité

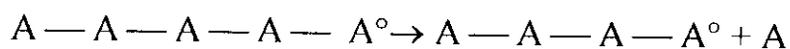
- La masse moléculaire a peu d'influence sur l'oxydation , sauf en solution par contre , la structure chimique a une grande influence [5]

B°/ Dépolymérisation

La dépolymérisation intervient de façon plus ou moins importante dans les divers types de dégradation

Les phénomènes mis en jeu et les relations qui les régissent présentent une très grande analogie avec ceux relatifs à la polymérisation (amorçage, propagation, transfert, terminaison)

La dépolymérisation est un cas particulier de la réaction de coupure de chaîne [5]



C°/ Réticulation

La réticulation est la réaction conduisant à la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines

- polymère linéaire : dans le cas des taux de réticulation modérés , la réticulation se traduit par l'apparition de chaînes plus ramifiées et de masse moléculaire plus élevée que les chaînes initiales mais dans le cas des taux de réticulation élevés , Le polymère perd partiellement sa solubilité .

- polymère tridimensionnel : La réticulation se traduit par une augmentation de la concentration en noeuds

Les propriétés physiques sont généralement peu affectées ,

La réticulation conduit à une augmentation du module d'élasticité, une augmentation de la contrainte à la rupture, et de la température de ramollissement

D°/ Hydrolyse:

Sous l'influence de l'humidité ($\geq 95\%$) et la température (au moins 100°C) certains polymères peuvent se dégrader

L'hydrolyse peut intervenir dans les liaisons latérales [16]

III-3 Endurance thermique des isolants solides /polymère

Les méthodes d'essais d'endurance thermique sont destinées à déterminer les changements survenus dans les propriétés des matériaux par suite d'une longue exposition à une température élevée [21]

La caractéristique du vieillissement thermique, ou la stabilité à long terme de ces isolants doit permettre de répondre à l'une des questions simples suivantes [23]:

-durant quel temps, peut-on maintenir un isolant sous une contrainte donnée

-quelle contrainte maximale est autorisée, si l'on désire avoir une durée de vie bien déterminée

Les essais d'évaluation comportent le vieillissement thermique accéléré dans l'ambiance spécifiée avec des expositions aux facteurs de diagnostic, cycliques,

ou continues ces procédures d'essais de systèmes ont pour premier objectif de déterminer les variations des caractéristiques essentielles des systèmes d'isolation dans différentes conditions [24]

III- 3-1 Détermination de critère de l'endurance thermique des polymères

Pour caractériser un vieillissement il faut chercher la relation entre la contrainte appliquée C et le temps t pour lequel on doit maintenir le matériau sous cette contrainte la relation :

$C = f(t)$ est représentée sur fig (III -1)

les isolants solides sont soumis à l'action des contraintes telles que le champ électrique, la chaleur, la tension ou les radiations [25]

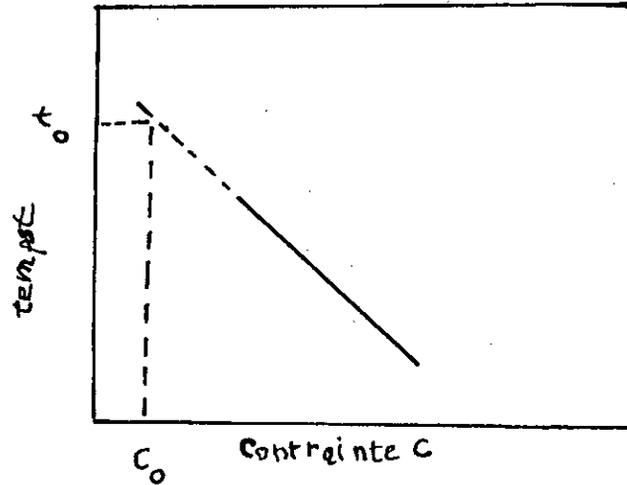


FIG .III -1 : évolution de la contrainte en fonction du temps de vieillissement

avant l'arriver à la détermination de la relation $f(t)=C$ on doit passer par la détermination des propriétés du matériau par rapport au temps $p= f(t)$ [1]

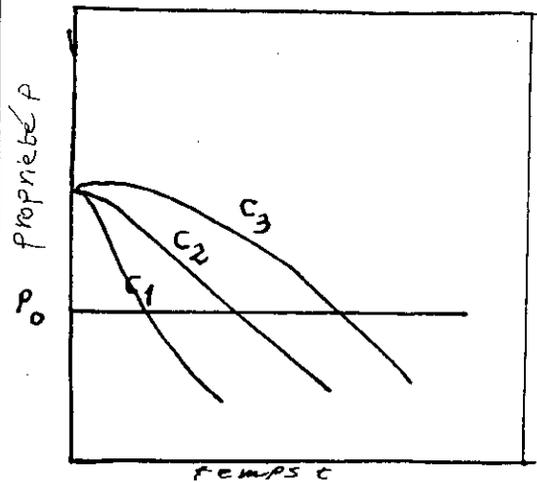


FIG .III -2: variation de la propriété en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de C

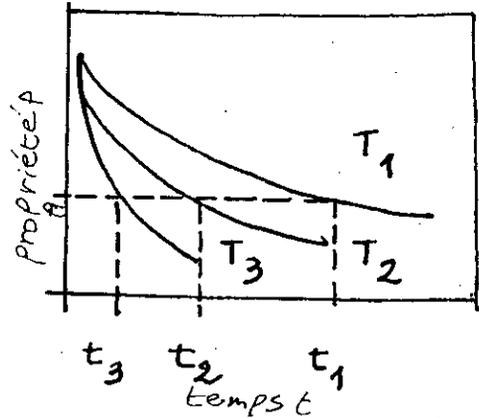


FIG .III -2: variation de la propriété en fonction du temps pour différentes températures

-si on fixe une valeur de la propriété p , on obtient la relation $C(t)$ relative à la valeur de la propriété p il s'agit de ce qu'on a continue d'appeler courbe de durée de vie

III-3-2 Choix des propriétés et des méthodes d'essai

le choix des propriétés a considérées depend donc , en principe de la fonction dévolue à un materiau dans un matériel donné . L'experience acquise dans divers pays , Permet de retenir que des propriétés permettent d'apprécier une évolution sensible au cours du vieillissement thermique

les propriétés etant choisies, il convenait de définir pour chacune d'elles , une méthode de mesure [19]

III-3-3 Choix des critères de dégradation

Le critère de dégradation doit être choisi afin de mettre en evidence un degré de détérioration du materiau isolant telqu'il soit plus apte . a supporter des contraintes rencontrées en service réel dans un système d'isolation .

le critère de dégradation ne doit pas , être choisi trop élevé afin de ne pas obtenir de très courtes durées jusqu'à la détérioration [26]

III-3-4 Choix des températures et de la durée d'exposition

Il convient donc de choisir un minimum de trois températures differentes chacune de la plus voisine d'environ 20°C et telleque le critère de dégradation soit atteint:

- en au moins 100h pour la température la plus élevée,
- en outre , cette dernier doit être telle que l'extrapolation qui sera faite ne s'étend sur une gamme superieure à 250°C . [19]

lorsqu'on choisi le vieillissement continu les températures doivent être tirées du tableau I, norme 216-1 C.E.I. [26]

III -3-5 Conditions d'environnement

Les conditons d'environnement ne doivent être incluses dans les méthodes d'essais des matériaux isolants que dans des cas particuliers .

III-3-6 Critère de fin de vie (ou durée de vie)

La durée de vie est le temps nécessaire pour qu'une propriété techniquement importante (comme l'élasticité, la charge à la rupture en traction ou le facteur de dissipation diélectrique) une valeur limite telle que le matériel puisse encore fonctionner de façon satisfaisante [19]

$$\ln t = A + E/RT \quad \text{---(III -1)}$$

AVEC:

A: Constante caractéristique du matériau

R: constante des gaz parfaits

T: température absolue [°K]

E: énergie d'activation expérimentale [J]

III-3-7 Vitesse de dégradation

La vitesse de dégradation chimique représente le phénomène de dégradation, des polymères avec la température de vieillissement T selon la loi d'ARRHENIUS cette vitesse est donnée par la relation suivante: [20]

$$V = V_0 \exp(-E/RT) \quad \text{.....(III - 2)}$$

avec :

E: énergie d'activation du phénomène [J]

R: constante des gaz parfaits

v: constante absolue

T: Température absolue [°K]

une relation identique à (VI -2) a été formulée:

$$\ln V = -A/T + B \quad \text{.....(III -3)}$$

Avec :

A et b : constantes caractéristiques du polymère

T: température absolue [°K]

III -4 Vieillissement électrique :

Dans les câbles isolés en matériaux synthétiques on doit considérer deux mécanismes du vieillissement électrique:

Le vieillissement normal qui conduit à la formation d'arborescences électriques et le vieillissement électrique dû à des liquides que l'on considère comme étant un stade intermédiaire de la formation des arborescences électriques [29]

Vieillissement par décharge partielles

Le vieillissement des systèmes d'isolation solides sous l'action des décharges électriques a fait l'objet depuis plusieurs années de nombreux travaux [32].

d'après certains auteurs et notamment B.FALLOU , les variations de la charge apparente (Q_p) que la source d'alimentation fournit au système d'isolation en présence de décharges partielles , ne suffisent pas pour bien caractériser les décharges partielles une grandeur beaucoup plus significative serait à l'origine des dégradations causées aux matériaux [30]

III-5 La dégradation mécanique des polymères

Les transformations chimiques mises en jeu dans un polymère par une contrainte mécanique couvrent un domaine très large pour éviter toute confusion, nous faisons une distinction entre la mécano-chimie et la dégradation mécanique .

Dans le premier , les coupures de chaîne par action d'une contrainte mécanique sont réalisées volontairement dans le but de produire de nouvelles structures .

Par contre , les phénomènes regroupés sous le nom dégradation mécanique ont le plus souvent des causes mal définies ou inconnus . elles sont très nombreuses:

déformation irréversible , microfissurations, fracture , fatigue sous contrainte dynamique ou statique , elles se produisent lors de la mise en oeuvre ou l'utilisation si celle-ci impose des contraintes mécaniques sévères ou prolongées.

- La dégradation mécanique est souvent accompagnée d'échauffement et il peut être difficile de séparer les dégradations thermiques et mécaniques.

Il est quelque fois possible de distinguer les deux phénomènes, en réalisant des expériences à diverses températures ;

si la vitesse de dégradation croît lorsque la température décroît, le phénomène est essentiellement mécanique .

si la dégradation mécanique se produit au contact de l'air , il est nécessaire de prendre en compte l'interaction de l'oxygène avec les radicaux formés [5].

processus de dégradation mécanique

La coupure primaire des chaînes constitue le fait essentiel; elle est cependant précédée par des modifications physicochimiques spécifiques de la dégradation mécanique : rupture ou établissement de liaisons secondaires, changement de conformation des chaînes , modification de leur enchevêtrement [5].

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Généralité :

Dans ce chapitre , nous avons présenté les essais effectués sur câble portant sur l'influence du vieillissement thermiques sur les propriétés du PRC, notre attention à été portée essentiellement sur les modifications pouvant affecter les caractéristiques sur les modifications pouvant affecter les caractéristiques :

électriques et mécaniques et mécaniques du materiau ainsi que sur la tension seuil d'apparition des décharges partiels

IV -1 Présentation du câble :

Nous avons effectué nos essais sur un câble de moyenne tension isolé au polyéthylène réticulé chimiquement PRC produit dans les ateliers de L'E.N.I-CAB/ BISKRA le câble a les caracteristiques suivantes : [33]

Propriétés physiques :

- densité à 23°C : 0,92 g/cm³
- resistance à la repture en traction : 100kg/cm³ (17, 7 MPa)
- allongement à la rupture : 500%
- degrés de la réticulation , extration a la décaline : 12%
- température de fragilité : -90°C

propriétés électriques :

- Constante diélectrique à 50 Hz : 2,3
- facteur de dissipation diélectrique à 50 Hz : $3 \cdot 10^{-4}$
- résistivité volumique en courant continu à 23°C : $10^{15} \Omega/\text{cm}$
- rigidité diélectrique courte durée : 22 kV/mm

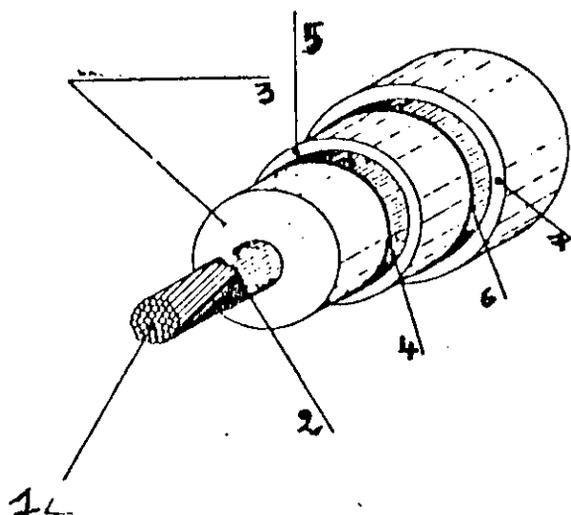
Dimensions et caractéristiques du câble :

le câble présente les caractéristiques suivantes:

- câble à champ radial
- tension nominal : U= 30kV
- tension spécifiée U= 18kV
- section nominale de l'âme ; 120 mm²
- diamètre de l'âme : 12,7mm
- nombre de brins : 35
- diametre d'un brin : 2,15mm

- nombre de brins :35
- diamètre d'un brin :2,15mm
- épaisseur de l'isolant : 8mm
- température assignée maximale de l'âme en service nominale:90°C
- température assignée maximale de l'âme en regime de court-circuit : 250°C (durée maximale 5 S)
- champ maximal à la surface de l'âme : 3,13 kV/mm

Différents constituants:



Les différents constituants du câble utilisé sont présentés à la (FIG IV-1)

- 1- Ame conductrice en Aluminium
- 2- Ecran semi conducteur interne extrudé
- 3- enveloppe isolante en PRC
- 4- Ecran semi conducteur externe extrudé
- 5- Ruban textile
- 6- Ecran métallique en cuivre
- 7- Gaine de protection en PVC

(FIG IV-1) constitution d'un câble 18/30kV isolé au PRC

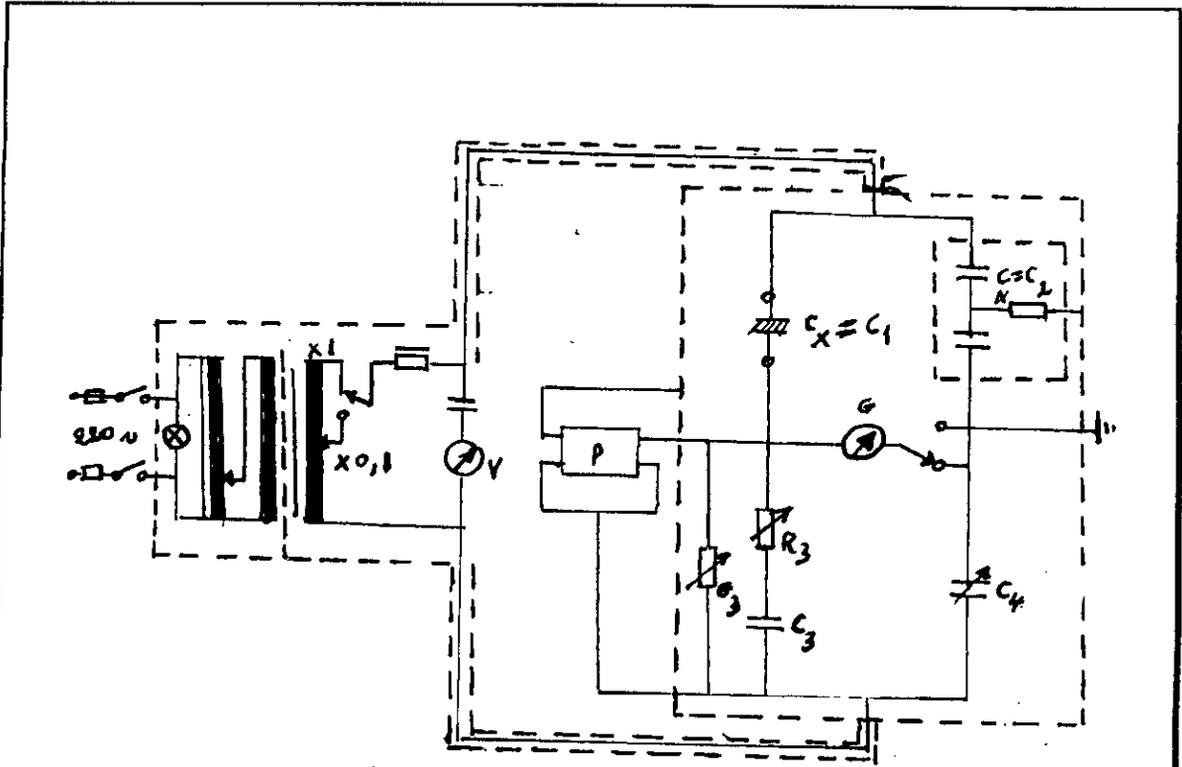


FIG.IV2 : schéma de principe du pont de schering

Détermination de la résistance transversale :

Pour la mesure de la résistivité transversale ,nous avons utilisé un Mégohmmètre (TERALOG) type G202 pour déterminer la resistance d'isolement .Les essais ont été effectuées à une tension de 500V entre âme et écran que nous maintenons pendant une durée suffisante comprise entre 1mm et 5 mm selon les recommandations de la CEI 502 .La resistivité transversale à été déterminé par la formule suivante [35] :

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R}{\ln \left(\frac{D}{d} \right)} \dots \dots \dots (IV.1)$$

Avec :

- P: résistivité transversaleen (Ω .cm)
- R: résistance d'isolement mesurée en Ω:
- l: longueur de câble en cm
- D : diamètre extérieur du câble en cm
- d : diamètre intérieur de l'isolation en cm

IV -2 Essais de vieillissement thermique :

IV-2-1 Dispositifs expérimentaux:

mode opératoire

Un échantillon de câble d'une longueur d'environ 12 m est exposé continuellement à la chaleur (à une température de 80°C).

Conformément aux recommandations des normes CEI 216,1 [26] et CEI 611[24] concernant le vieillissement continu nous avons relevé les valeurs des propriétés à des pas de 120 heures le long de la durée d'exposition, qui est de 1279 heures, en laissant le câble refroidir jusqu'à ce que sa température atteigne la température ambiante (20°C). le temps nécessaire pour atteindre cette température est environ 5 heures.

- Le chauffage se fait par circulation de courant dans l'âme conductrice jusqu'à ce que la température du câble atteigne la température de consigne (80 °C) qui est inférieure de 10°C à celle assignée maximale de l'enveloppe isolante.

Le chauffage est réalisé grâce à un transformateur de marque VEB type ETK 63 50Hz , 57kVA, 220/380V

-ce transformateur alimente la spire en court-circuit formée, par le câble fixé à ses deux extrémités par un accessoire en aluminium. au cours de nos essais , la tension d'essai est appliquée entre l'âme et l'écran métallique du câble . nous avons exposé notre câble à la température de vieillissement, pendant une durée de 1279 heures et nous avons relevé les propriétés (facteur de pertes diélectriques, indice de pertes diélectriques , résistivité transversale) et la tension seuil d'apparition des décharges partielles , à des intervalles d'environ 120 heures.

Mesure de l'indice de pertes diélectriques

La valeur de l'indice de pertes est obtenue à partir de la mesure de facteur de pertes diélectriques et de la permittivité relative nous avons utilisé un pont de SHERING TETTEX AG type 2801 [34] dont le schéma de principe qui est représenté à la (FIG.IV -2) , pour déterminer le facteur de pertes et la capacité de l'isolant . connaissant cette dernière valeur , on détermine la constante diélectrique .

IV -2-2 Essais mécaniques

Pour les essais mécaniques et pertes de masse conformément à la norme CEI 540 [35]

nous avons fait nos Essais sur plusieurs éprouvettes en forme d'haltère.

Mesure de l'allongement à la rupture et de la charge à la traction

Pour la mesure de l'allongement à la rupture et la charge à la traction nous avons utilisé une machine de traction de type ZE 400, a l'intermediaire d'un dynamomètre muni de machoires exerçant un effort de traction croissant .l'une des machoires est fixé, l'autre se deplace à une vitesse constante . ces machoires sont conçues de telle sorte que les éprouvettes ne peuvent ni glisser, ni se rompre à la machoire .

Mode opératoire :

Avant chaque éssai de traction , nous avons mesuré la section droite de l'éprouvette à essayer • Ensuite cette dernière a été soumise à l'éssai qui consiste à la rompre par traction • on note d'une part , la charge à la traction et d'autre part l'allongement à la rupture

-cette allongement est mesuré entre deux repères fixés avant l'étirement à une longueur donnée..

IV-2-3 Influence du vieillissement thermique sur l'indice de pertes diélectrique et la resistivité transversale:

A°/Influence du vieillissement thermique sur l'indice de pertes diélectriques:

Nous avons étudié la variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement. Les mesures ont été effectuées à plusieurs températures 20,80,100 et 120°C .Nous avons utilisé différents niveaux de tension d'éssai compris entre 9 et 36 kV .

Nous présentons les résultats obtenus par niveaux de tension et de températures donnés (FIG IV 4a , IV4b, IV 4c et IV 4d°)

Nous remarquons que :

- les caractéristiques du l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement présentent des pics de relaxation . Ces pics sont dûs à des mouvement (rotations , vibrations , translations) de segments plus ou moins longs de chaînes principales ou latérales [36].
- les pertes croits avec l'augmentation des niveaux de tension
- les pertes augmentes en fonction du temps de vieillissement.

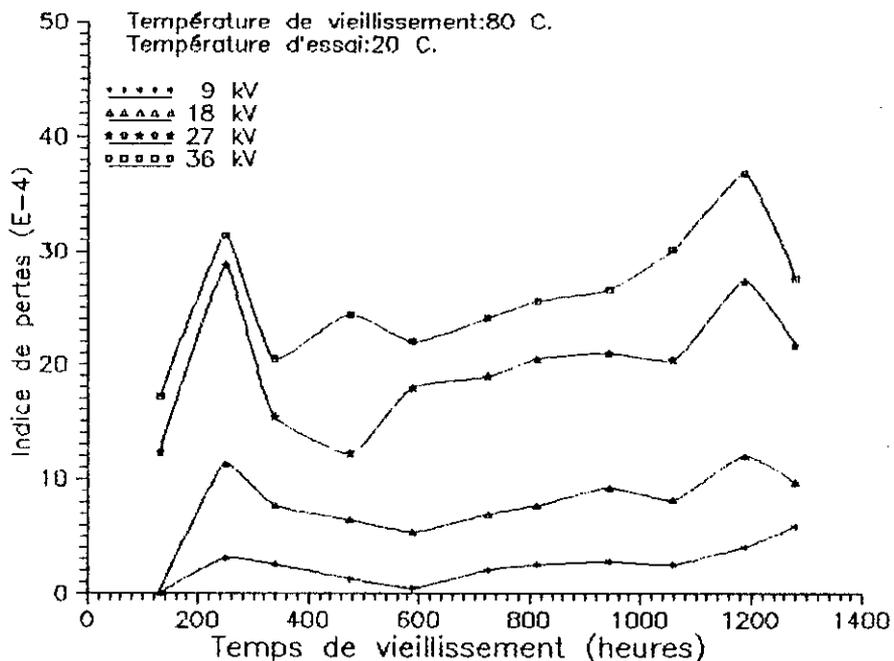


FIG.IV.3.a:variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement.

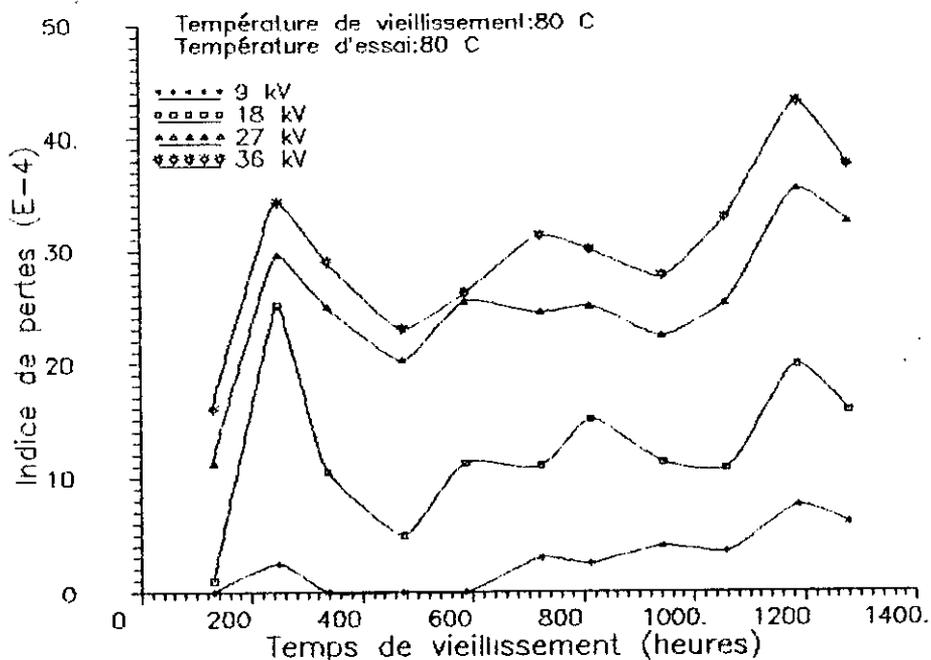


FIG.IV.3.b:variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement.

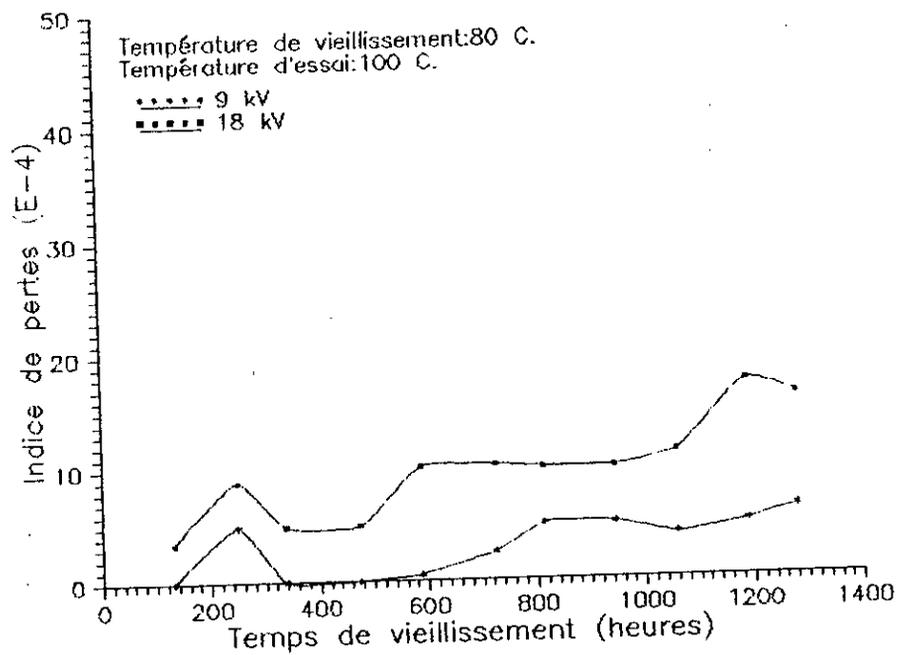


FIG. IV.4.c: variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement.

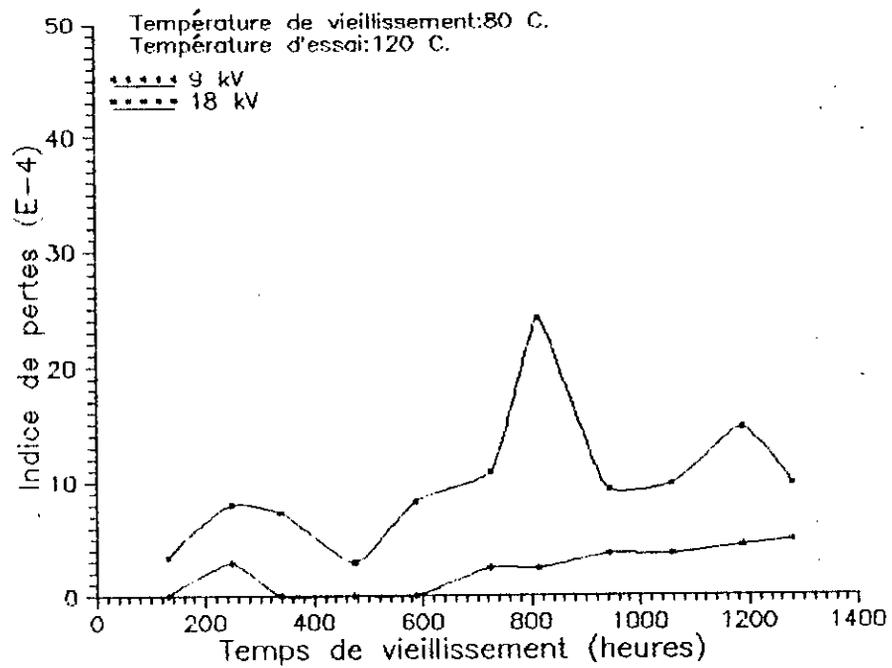


FIG. IV.4.d: variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de vieillissement.

b/ Influence du vieillissement thermique sur la résistivité transversale.

Après chaque 120 heures environ de chauffage continu, nous avons mesuré la résistivité transversale de l'isolant à différentes températures (20,80,100 et 120°C).

Nous remarquons que la résistivité transversale varie entre 10^{13} et 10^{17} et elle est pratiquement constante en fonction du temps de vieillissement (FIG. IV 5a ; IV.5b ; IV.5c ; IV. 5d)

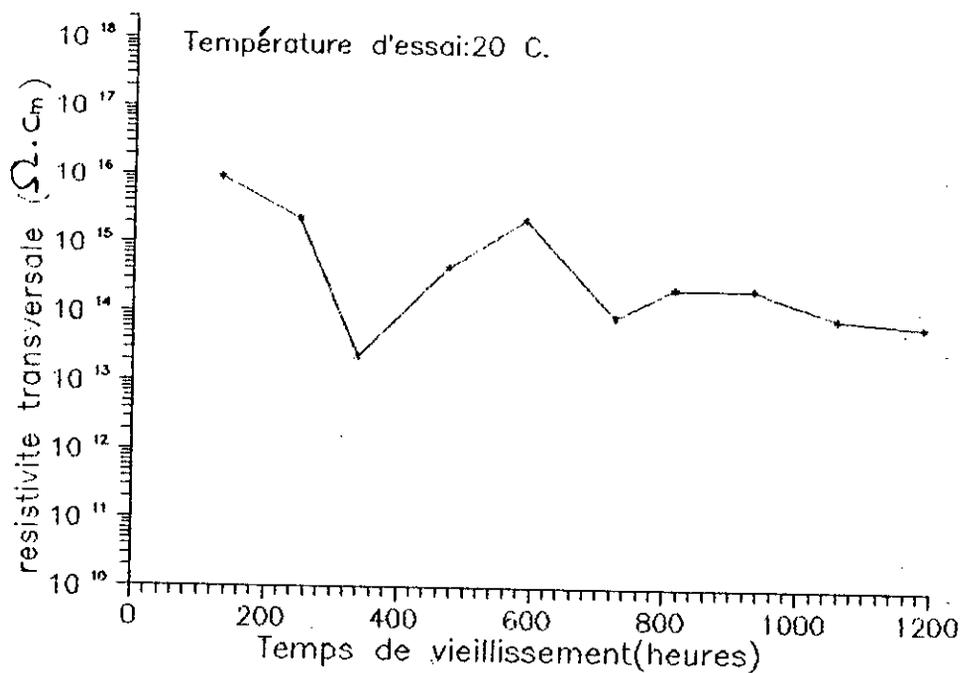


FIG.IV.5.a:Variation de la résistivité transversale en fonction du temps de vieillissement.

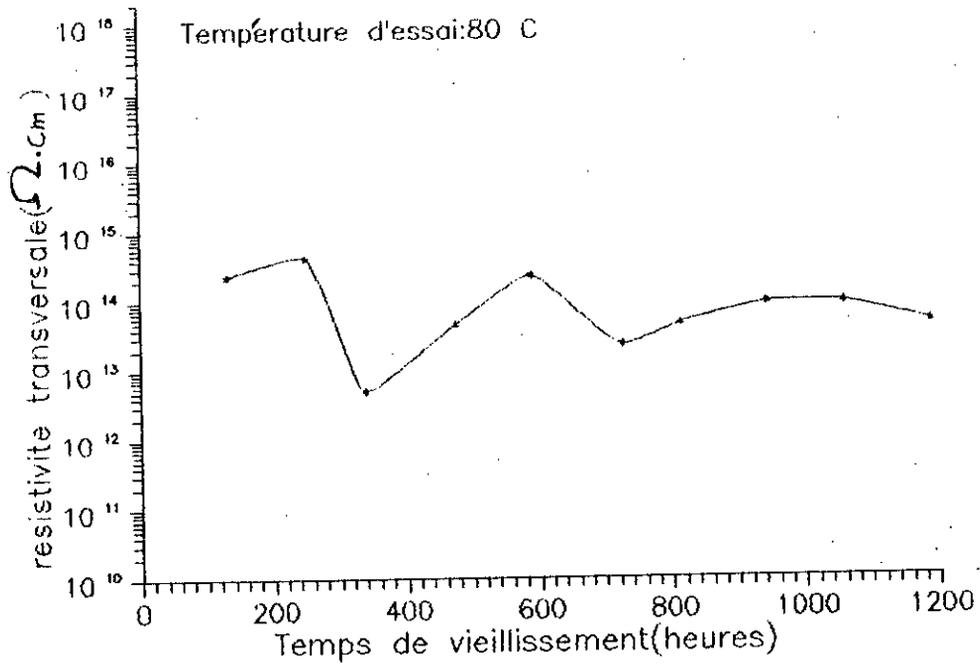


FIG. IV.5.b: variation de la resistivite transversale en fonction du temps de vieillissement.

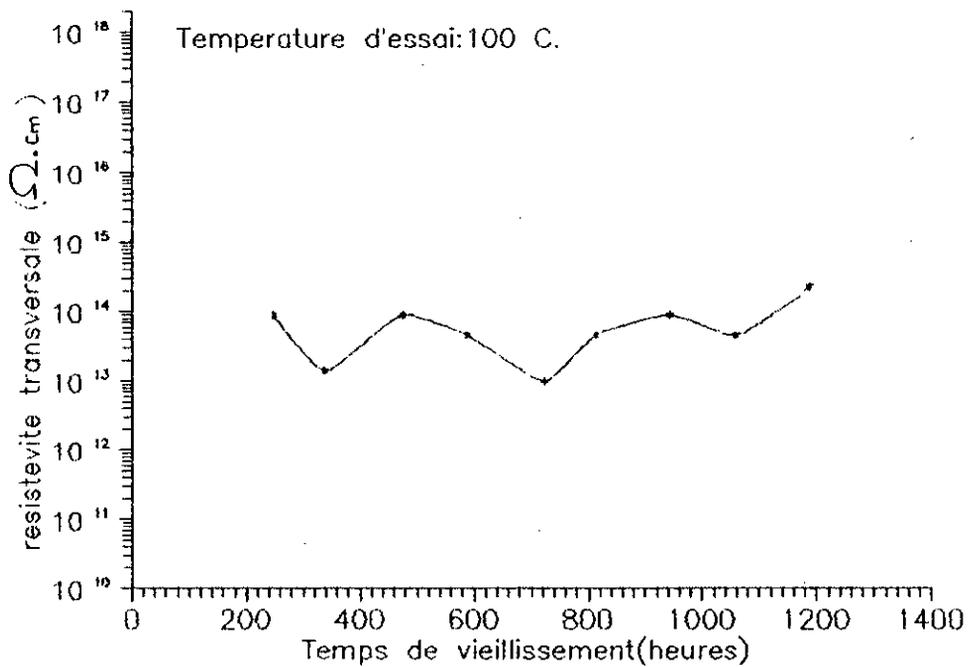


FIG. IV.5.C: Variation de la resistivite transversale en fonction du temps de vieillissement.

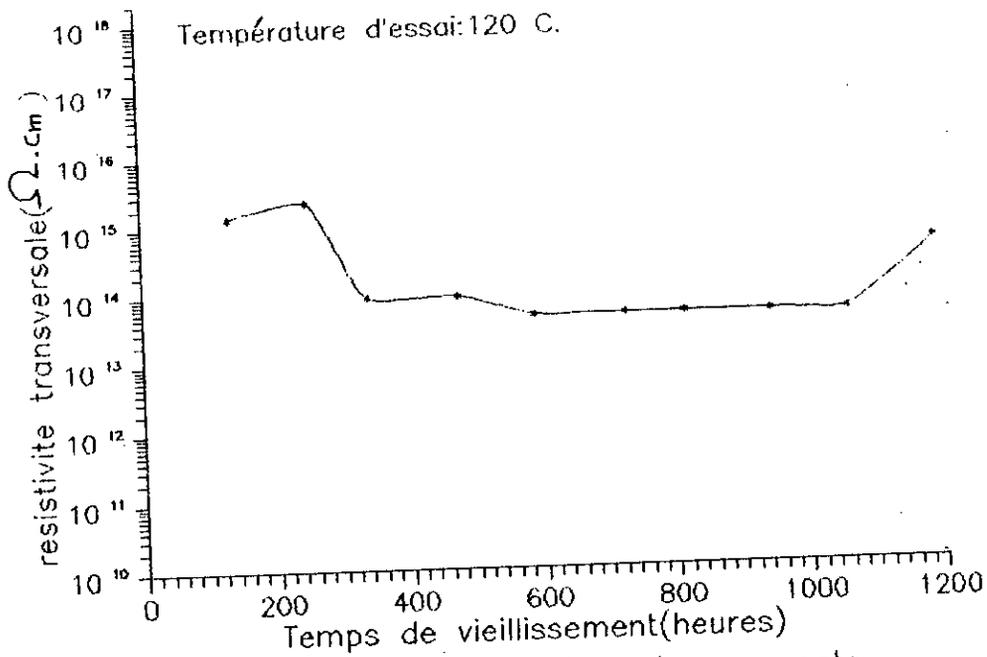


FIG.5.d:variation de la resistivite transversale en fonction du temps de vieillissement.

IV 2-4 Variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la température : à U= 18kV

Avant vieillissement

Nous constatons que l'indice de pertes diélectriques diminue en fonction de la température. D'après la caractéristique (FIG IV -6), nous remarquons que l'indice de pertes diminue, puis augmente et pratiquement pas des pertes à l'intervalle de la température de service nominale (90°C)

Après vieillissement :

Nous remarquons que l'indice de pertes diélectriques augmente en fonction de la température et il décroît de la température de 100°C. Notons aussi que après 1279 heures de chauffage continu cet indice est plus grand que celui d'avant vieillissement.

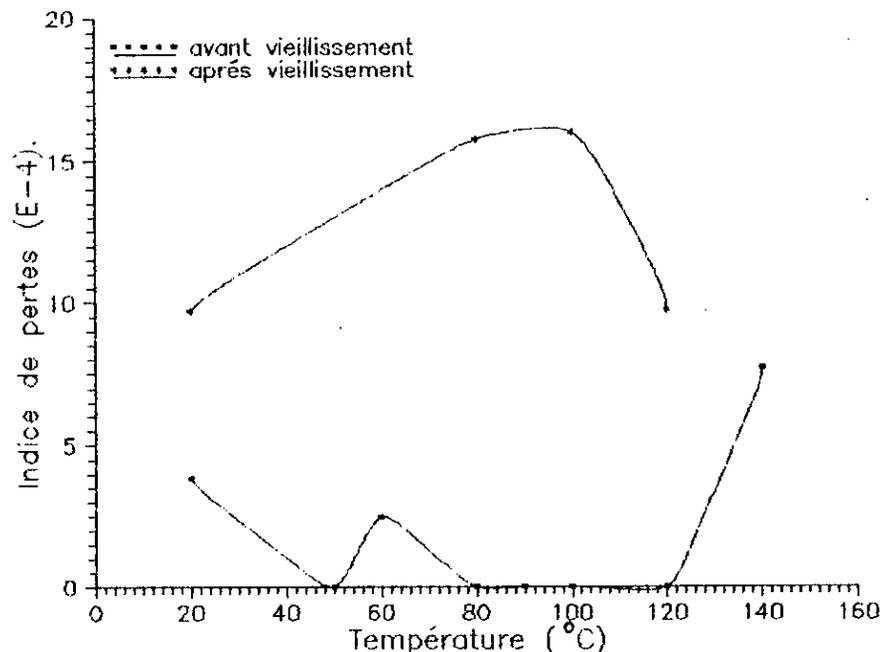


Fig.IV.6:variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la température.

IV-2-5 Influence du vieillissement thermique sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles . à T=20°C.

Après chaque 120 heures environs de chauffage continu nous avons mesuré la tension seuil d'apparition des décharges partielles .

Nous remarquons que cette tension diminue en fonction du temps(FIG IV-7)

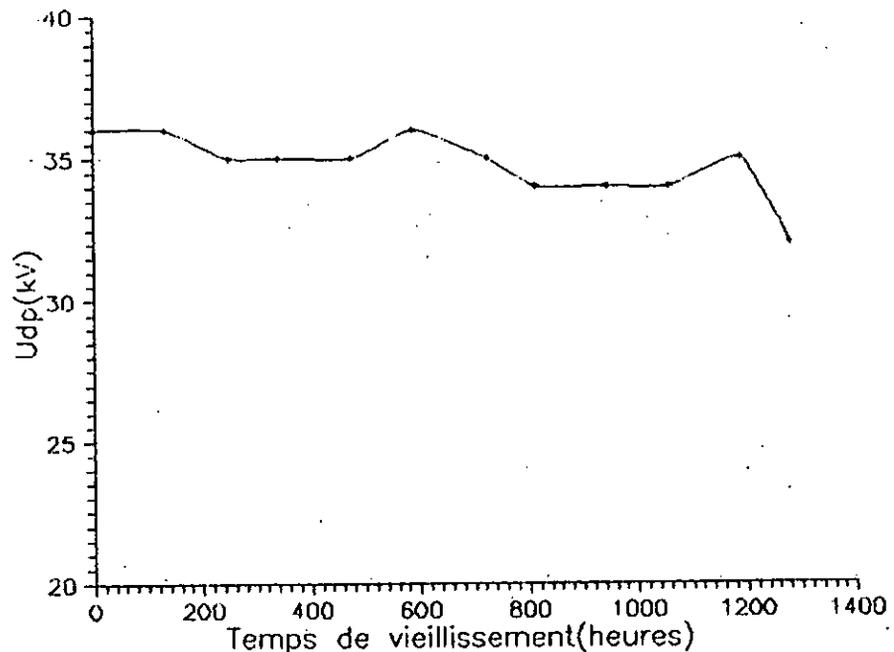


FIG.IV.7:variation de la tension seuil d'apparition des décharges partielles en fonction du temps de vieillissement.

IV-2-6 Variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la tension avant et après vieillissement:

Nous avons mesuré l'indice de pertes diélectriques en fonction de la tension pour deux températures (20°C et 80°C) avant et après vieillissement.

A) avant vieillissement :

Nous remarquons que pour la température de 20°C l'indice de pertes diélectriques augmente en fonction de la tension à partir de la tension spécifique (18kV) , mais pour la température de 80°C , pratiquement pas de pertes diélectriques (FIG IV 8)

B°) après vieillissement:

Après 1279 heures de chauffage continu , nous avons constaté que

- l'indice de pertes diélectriques est plus grand pour la température 20°C.
- l'indice de pertes diélectriques augmente en fonction de la tension.

(FIG : IV 9)

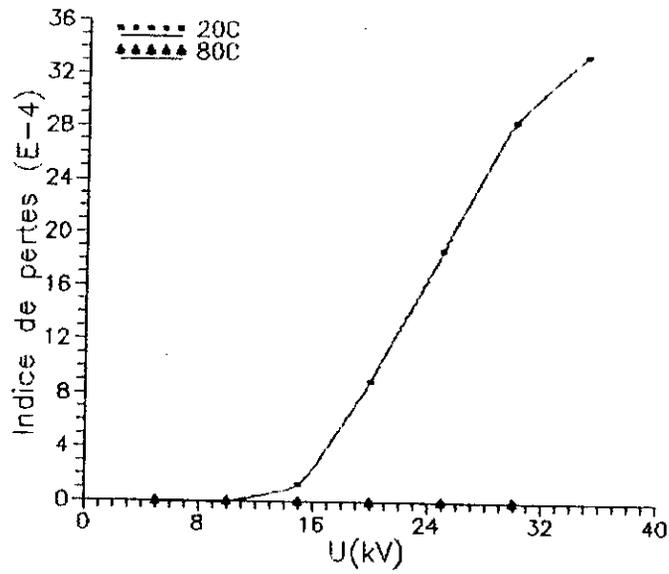


Fig.IV.8:variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la tension avant vieillissement.

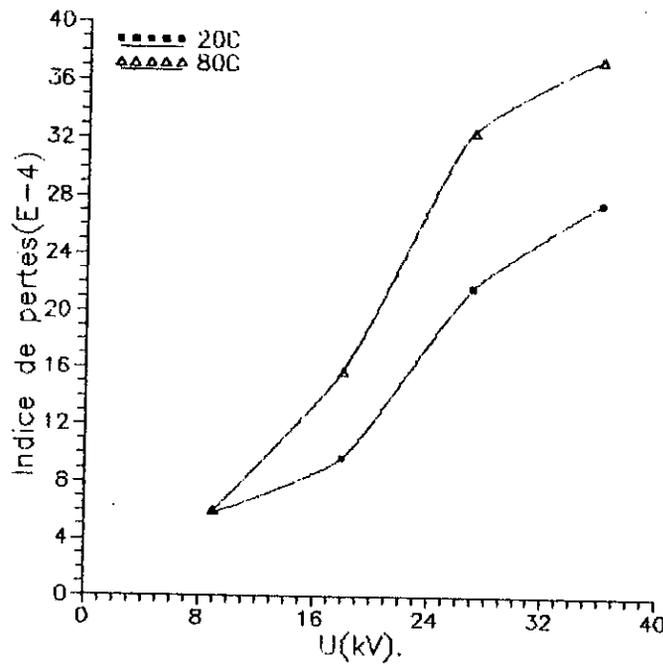


Fig.IV.9:Variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la tension après vieillissement.

IV -3 Verification des propriétés mécaniques

IV-3-1 L'influence du vieillissement thermique sur les propriétés mécaniques :

Le contrôle le plus courant après vieillissement est un essai de rupture sur éprouvette, à 20°C [13].

Essais avant vieillissement:

Nous avons effectué les essais sur 5 éprouvettes .
Nous avons obtenu un allongement à la rupture de 475% et une résistance à la traction de 17,5 M.Pa a la température ambiante .

Ces resultats sont conformes aux recommandations de la norme CEI 502 [35].

Essai après vieillissement

les essais ont été effectués aussi sur 5 éprouvettes à la température ambiante.

Nous avons obtenu un allongement a la rupture de 437,5%, soit une diminution de 7,89 % .

Nous avons déterminé une résistance à la traction de 15,57% M.Pa, soit une diminution de 11,04%.

Ces resultats sont conformes aux recommandations de la norme CEI 502 [35]

INTERPRITATION ET CONCLUSION

Dans notre travail , nous nous sommes intéressées à l'étude de l'influence de vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques et mécaniques du polyéthylène réticulé chimiquement et leur evolution en fonction du temps de vieillissement , et aussi la tension seuil d'apparition des décharges partielles.

Ainsi on a vu l'influence de la temperature sur les principales propriétés diélectriques (indice de pertes , résistivité) et aussi la variation de l'indice de pertes en fonction de la tension avant et après vieillissement .

Nous nous sommes intéressés au contrôle de la qualité de l'isolant en se référant aux recommandations des normes en vigeur.(C.E.I)

Le vieillissement thermique toute seule , par contre en pratique le câble est soumis à une action combinée les contraintes thermiques et électriques .

D'après nos resultats , pour le vieillissement thermique continu à 80°C, nous avons constaté l'apparition des pics de relaxation dans la variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement, ,et cela pour quatre niveaux de tension et pour différentes temperatures de mesure .

Par ailleurs la tension seuil d'apparition des décharges partielles est restée pratiquement constante le long du cycle de chauffage considéré et tend a diminuer après 1279 h de vieillissement .

Nous notons que les propriétés diélectriques avant vieillissement sont meilleurs que celles obtenues après vieillissement à (80°C).

les propriétés mécaniques (allongement à la ruture et la charge à la traction) sont conforme aux recommandations des normes; avant et après vieillissement (après 1279 heures d'exposition)

On peut conclure que le câble fabriqué par l'ENICAB / BISKRA à un bon vieillissement .

En perspective il serait intéressant de compléter notre étude en variant la température de vieillissement ce qui permettre de définir l'endurance thermique du matériaux après vieillissement continu , après les essais sur les propriétés électriques et mécaniques.

Références bibliographiques

- [1]: M.NEDJAR "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension", Thèse de Magister, 15 Décembre 1991, U-T-O
- [2]: N.KHALECHE "Rupture par arborescence électrique du PVC vieilli thermiquement", Thèse de Magister ENP d'Alger, 1993.
- [3]: A.BOUBAKEUR "Utilisation des polymères dans l'isolation des câbles H.T" cours de 4 année Electrotechnique 1994-1995 .ENP .
- [4]: A.M MERAD "Etude de la propagation des streamers aux interfaces liquides isolants / polymères sous tension alternatives 50 Hz", projet de fin d'études ENP d'Alger, 1993.
- [5]: J.P. MERCIER, E- MARECHA "Traité des matériaux 13 : chimie des polymères", presses polytechniques et universitaires ROMANDES 1993.
- [6]: M.FONTANILLE J.P VAIRON: " polymérisation, techniques de l'ingénieur, A 3070
- [7]: J.P TROTIGNON : " Précis des matières plastiques : structure, propriétés mise en oeuvre et normalisation", édition NATHAN 1982
- [8]: P.ROBERT "Matériaux électrotechniques " 1965 -1966 ENP d'Alger .
- [9]: J.GOSSOT "Les matières plastiques -fabrication -technologie collection" DURAND TECHNIQUE (1977)
- [10]:S.M .SEKHRI et K.NOUASRI "Influence du vieillissement sur l'apparition des décharges partielles dans un câble MTisolé au PRC".projet de fin d'études ENP d'Alger, juin 1995.
- [11]: R.FOURNI"Les isolants en électrotechniques concepts et theorie", édition EYROLLES 1986.
- [12]:M. CHEBREK et M.HAMIA " Conception et réalisation d'un câble de 30kV isolé à l'EPDM ", projet de fin d'études ENP d'Alger, 1983
- [13]:R.FOURNIE"Les isolants en électrotechniques:essais mécanismes de dégradation";applications industrielles, edition EYROLLES 1990.
- [14]:J.VERDU " Adjuvants", Techniques de l'ingénieur, A3230, 1992
- [15]:J.N DEMAY et J.C BOB " Câbles haute tension au polyéthylène" RGE N°9, Septembre 1976.
- [16]: J.VERDU" Vieillissement des plastiques", Afnor technique
- [17]:M.PAYS" câble de transports d'énergie technologie caractéristiques techniques de l'ingénieur D.1520.juin 1994.

- [18]: G. GARCIA "Le comportement du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à l'action des décharges partielles" Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle , (Toulouse) 25 Novembre 1980 .
- [19]: C. STEVENS, A. G. DAY et B. FALLOU, "Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants " , CIGRE , groupe 15-05 1-9 septembre 1982 .
- [20]: J. VERDU, "plastiques-plasturgie (fissuration en milieu tensioactif)" techniques de l'ingénieur , A 3150 , 1992 .
- [21]: M. NEDJAR, A-BOUBAKEUR et R- KHAILI " Etude des propriétés électriques du polychlorure de vinyle avant et après un vieillissement thermique , journal of technologie , 2^{ème} colloque sur l'electrotechnique et l'automatique , CEA ' 94 , Algiers , Novembre 1994 .
- [22]: B. FALLOU , "L'endurance thermique des isolants et système d'isolation, incidence dans la construction des matériels , nouvelles règles pour détermination de l'endurance thermique des matériaux" RGE , tome 83, N°7/8 , juillet /Août 1994
- [23]: A-BOUBAKEUR , M. NEDJAR et R. KHAILI, "Endurance thermique du PVC utilisé dans les câbles de haute tension " , 3^{ème} journées Maghrébines des sciences des matériaux , Alger , Avril 1992
- [24]: CEI 611 , "Guide pour la préparation de procédures d'essais pour l'évaluation de l'endurance thermique des systèmes d'isolation électrique " .
- [25]: B. FALLOU , "Comportement spécifiques des matériaux isolants solides soumis à divers ses contraintes " , RGE , Octobre 1985
- [26]: CEI 216-1 , "Méthode générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique" , édition 1974
- [27]: H. HASNI et M. ACHOUR , "Etude et conception d'un câble de 30kV isolé au PRC " , projet de fin d'études ENP d'Alger , 1991 .
- [28]: Le trefile 4(1882) , "EPDEM" , ISSN O374- 2261
- [29]: C. T. JACOBSEN , R. ATTERMO et . B. DELLBY , "Expérience sur les câbles à haute isolés au PRC réticulé à sec .
- [30]: A. BOUBAKEUR , "Cours de haute Tension , 4 année , ENP d'Alger , 1993-1994.
- [31]: N. ROUHA, "Etude et modélisation de la dégradation des polymères par le phénomène d'arbrescence , Thèse de Magister 1994 , ENP d'Alger.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [32]: A.GADOUM, "Dégradation des matériaux diélectriques sous champ électrique Alternatif très intense " , Thèse de Doctorat es sciences , USTHB , Alger
- [33]: B.P POLYETHYLENE , " Wire and câble compounds " technigram WP14/1f décembre 1984
- [34]: TETTEX .AG .INSTRUMENTS, "Pont de schering type 2801 , pont de mesure de précision commutable pour la haute et basse tension , selon prof Dr.H. SCHERING .
- [35]: CEI 502 : " Câbles de transport d'énergie isolés par diélectriques massifs extrudés pour les tensions assignées de 1kV à 30kV " , édition 1983.
- [36]: J.F .MAY et G.VALLET: " contribution à l'étude des propriétés électriques de certains types de polymères à l'état solide " , RGE N°4,Avril 1972