

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

*Genie Electrique*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

## SUJET

*Influence du vieillissement sur  
l'apparition des décharges partielles  
dans un câble MT isolé au P.R.C*

Proposé par :

A. BOUBAKEUR

Etudié par :

S.M. SEKHRI  
K. NOUASRI

Dirigé par

A. BOUBAKEUR

PROMOTION  
*Juin 1995*

# Dédicace

*A ceux qui se sont privés même du plus nécessaire pour qu'ils m'assurent le bonheur et m'ont offert un soutien moral et matériel, au détriment de leurs nécessités pour me voir aujourd'hui à leurs cotés comme étant un cadre ...*

*ma mère, mon père, mes freres et soeurs.*

*A ma grand-mere;*

*A tous mes amis, en particulier MADJID, KRIMO, OKBA, NADIR, YAHIA, SAMIR, RACHID, ABDELKRIM, HAMID et DJAMEL .*

NOUASRI KHALED

### REMERCIEMENTS

Ce travail est dédié à tous les enseignants du département de Génie électrique de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Ce travail a été effectué sous la direction de Mr. A. BOUBAKEUR, Docteur es-sciences techniques, Chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Qu'il nous soit permis de lui exprimer nos meilleurs sentiments de gratitude pour son abrégiation, sa disponibilité à tout moment ainsi que sa grande patience envers nous.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à M<sup>lle</sup> N. KHALECHE et M. TEGUAR pour leurs aide, leurs précieux conseils ainsi que leurs encouragements prodigués tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous exprimons nos plus vifs remerciements 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 leur aide qu'ils nous ont apporté durant cette étude et de nous avoir facilité l'accès aux matériels durant notre stage.

Nous tenons à exprimer nos sentiments de gratitude à S. OURARI 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 un climat d'amitié.

Que Mr. CHABANI, chef du centre de documentation de l'unité d'E.N.I.CAB de Gué de Constantine, trouve ici l'expression de notre gratitude pour l'aide constante qu'il nous a apporté durant cette étude.

Il nous est agréable de remercier tout le personnel de la câblerie de Biskra.

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

المدسة الوطنفة السعدة السقنفاا  
BIBLIOTHEQUE — المكنفة  
Ecole Nationale Polytechnique

## INTRODUCTION

## INTRODUCTION:

L'industrie électrique est confrontée depuis de nombreuses années à la réalisation des câbles de transport d'énergie de plus en plus performants. Ceci donne aux matériaux isolants une importance technique et économique qui n'est plus à démontrer.

L'isolation des câbles de transport d'énergie a été pendant longtemps réalisée avec du papier imprégné d'huile. Cependant, le développement de la technologie des polymères a fait émerger dans le temps des solutions plus adéquates.

L'apparition sur le marché des isolants synthétiques (élastomères, thermoplastiques) avec leur facilité de mise en oeuvre ajouté à leurs excellentes propriétés (électriques, mécaniques, chimiques, ...) font que ces derniers remplacent de plus en plus les isolants au papier imprégné d'huile. Cependant, la chaleur, le champ électrique ainsi que les radiations peuvent avoir à plus ou moins long terme, un effet néfaste sur eux. Ainsi, au cours de leur utilisation, ces isolants sont amenés à perdre leurs qualités. Ce phénomène est connu sous le nom de vieillissement de matériaux.

On appelle vieillissement toute évolution lente et irréversible dans les conditions d'utilisation d'une ou plusieurs propriétés du matériau considéré. Cette évolution peut résulter de modifications de la structure des macromolécules qui assurent la cohésion mécanique du matériau [1].

L'effet de la chaleur sur les polymères peut se manifester de deux manières différentes. La première concerne l'effet instantané sur le matériau d'une forte élévation de la température et la seconde l'effet d'une température pas trop élevée pendant une longue durée.

Le vieillissement des systèmes d'isolation solides sous l'action des décharges partielles fait l'objet depuis plusieurs années de nombreux travaux. Les problèmes posés par ces décharges et leur nocivité, demeurent d'autant plus important que les contraintes imposées aux isolants sont sévères [2].

Le polyéthylène est actuellement le polymère le plus utilisé dans l'isolation électrique à haute tension.

Sous l'action séparée ou combinée du champ électrique et de la chaleur, ce matériau réticulé chimiquement, aura ses qualités d'isolant dégradées dans le temps.

Dans ce présent travail, il sera question d'étudier l'influence des vieillissement thermique et électrique sur les propriétés diélectriques ainsi que sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles dans un câble de moyenne

tension isolé au PRC produit par la câblerie de BISKRA. Ce travail entre dans le cadre d'un projet de recherche effectué conjointement par le laboratoire de l'Ecole Nationale Polytechnique et l'E.N.I.CAB.

Afin d'étudier les phénomènes inhérent au vieillissement thermique et électrique du PRC, il nous a semblé judicieux de déterminer les causes des dégradations subies afin d'essayer ensuite d'en apprécier les effets.

Notre travail comprend deux parties:  
la première partie est constituée des trois premiers chapitres:

le premier est consacré à l'utilisation des polymères en haute tension. Nous nous sommes particulièrement intéressés au PRC dont on a présenté la formulation, la mise en oeuvre ainsi que les propriétés physico-chimiques et l'utilisation dans l'isolation des câbles de haute tension. Dans le deuxième chapitre nous exposerons le phénomène de décharges partielles, notamment leur origine, les méthodes de détection et de mesure ainsi que le phénomène d'arborescences. Le troisième chapitre traite essentiellement du vieillissement thermique et électrique des isolants solides (polymères). C'est à partir de cette étude bibliographique que nous essayerons par la suite d'interpréter les résultats expérimentaux.

La seconde partie est constituée par le chapitre IV qui comprend les travaux expérimentaux réalisés et relatifs aux essais des vieillissements thermique et électrique sur câble.

Enfin, dans la conclusion sont rassemblés tous les résultats expérimentaux obtenus et des propositions d'interprétation émises. Il sera également question à ce niveau des perspectives de travail concernant une meilleure approche du vieillissement du polyéthylène réticulé chimiquement.

PREMIERE PARTIE  
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

UTILISATION DES POLYMERES  
DANS LA HAUTE TENSION

## GENERALITES:

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 polymères synthétiques. En effet, par rapport au câble à base de papier imprégné, cette isolation présente des caractéristiques qui se sont traduites par des avantages techniques et économiques.

### I-1 CARACTERISTIQUES GENERALES DES CABLES HT ET THT A ISOLATION SYNTHETIQUE:

Par rapport aux câbles à isolation papier imprégné, les câbles à isolation synthétique présentent un certain nombre d'avantages que nous rappellerons brièvement [3]:

- la suppression du problème de la migration des matières d'imprégnation;
- une température de fonctionnement et une température admissible après un court-circuit plus élevée en MT;
- la facilité de pose des câbles et de montage des accessoires qui complète l'avantage procuré par leur légèreté;
- élimination des problèmes de surveillances et de maintenance;
- propriétés électriques et mécaniques ainsi qu'une durée de vie largement supérieure à celle des isolants naturels.

Il ne faut cependant pas perdre de vue que les progrès constants de la chimie en matière de synthèse augmentent sans cesse les chances d'apparition sur le marché de nouveaux produits d'isolation qui pourraient s'imposer et supplanter les polymères actuellement utilisés en câblerie [4].

### I-2 ORIGINE DES POLYMERES:

Il existe deux types de polymères à savoir les polymères naturels et les polymères synthétiques.

#### A/ Les polymères naturels:

Tel que le bois et dérivées, les textiles (coton et soie), le caoutchouc, le cuir et la laine; mais pour l'isolation électrique on utilise surtout la soie et le papier imprégné [5,6].

#### B/ Les polymères synthétiques:

Obtenus par synthèse chimique à partir d'éléments intermédiaires tels que la cellulose, le beurène, l'acétylène... tirés à partir de produits naturels dont les

principaux sont la houille, le pétrole et le bois [5].

### I-3 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES POLYMERES:

#### I-3-1 Structure chimique et morphologie:

Les molécules des polymères sont construites à partir d'atomes d'hydrogène et de carbone. On les dénomme composés "hydrocarbonés".

Les atomes de carbone sont les piliers de l'organisation moléculaire.

Leurs quatre électrons périphériques permettent quatre liaisons covalente avec les atomes ou groupes voisins.

Les liaisons covalentes ne sont pas dissociables en ions chargés électriquement comme dans le cas des liaisons électrovalentes.

Ce fait permet d'expliquer les propriétés isolantes des composés hydrocarbonés.

La composition chimique des monomères caractérisée par certains groupements fonctionnels détermine l'activité chimique du polymère en particulier sa résistance à l'eau et aux acides.

Le nombre de liaisons intermoléculaires ainsi que leur nature déterminent une partie des propriétés mécaniques et thermiques [5].

#### I-3-2 Polymérisation:

Certaines molécules simples ont la propriété, sous des conditions physico-chimiques appropriées de s'unir les unes aux autres pour former des molécules plus grandes constituant une répétition dans l'espace de la molécule initiale. On appelle polymérisation ce type de réaction.

Par terme de monomère, on désigne la molécule et donc la substance de départ.

Un polymère formé d'un seul type de monomère est appelé homopolymère, s'il comprend deux monomères différents ou d'avantages c'est un copolymère [7].

#### I-3-3 Structure des polymères:

La structure moléculaire des polymères influence de façon décisive leurs propriétés mécaniques et électriques [8].

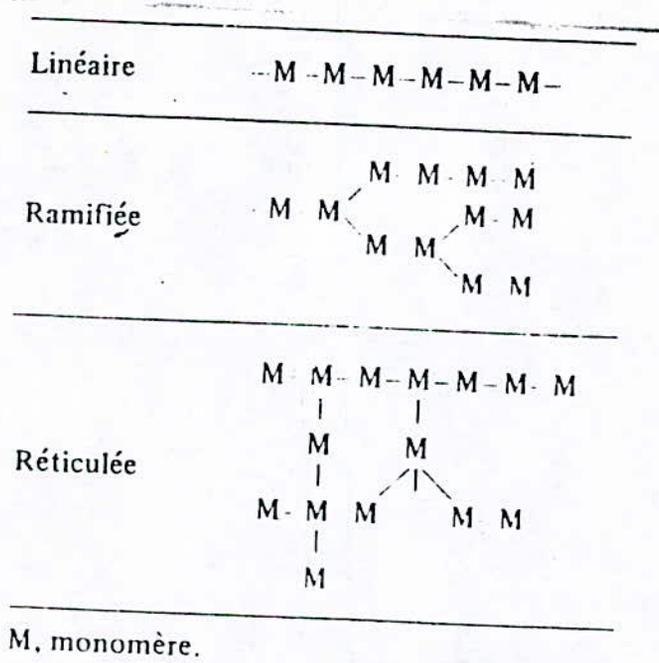


Fig.I-1 Représentation schématique des structures d'un homopolymère [7].

Plus les chaînes sont longues plus elles sont déformables. Suivant la tenue à la chaleur, on classe les polymères en thermoplastiques et thermodurcissables.

Aux structures linéaires et faiblement ramifiées correspondent les thermoplastiques. Comme leur nom l'indique, ces substances se déforment facilement quand la température augmente, ce qui s'explique par des liaisons faibles (type VAN DER WALLS) reliant les chaînes voisines [7].

Aux structures faiblement réticulées, c'est à dire formant un réseau à mailles larges, correspondent les élastomères dont le comportement mécanique est comparable à celui du caoutchouc [7].

Lorsque les mailles du réseau deviennent serrées, l'élasticité disparaît. Le matériau est appelé thermodurcissable car la formation du réseau serré est accélérée par une élévation de température [7].

#### I-4 COMPORTEMENT CHIMIQUE DES POLYMERES:

Au contact des liquides ou des gaz, le comportement des polymères varie suivant leur nature et leur composition. Il peut y avoir diffusion, absorption avec gonflement ou gélification, dissolution ou destruction, selon l'agressivité des produits en présence. Ceci peut donc causer d'importantes contraintes qui peuvent être catastrophiques pour le matériau [8].

#### I-5 PROPRIETES MECANIKES DES POLYMERES:

Vu leurs excellentes propriétés mécaniques, leur aptitude aux déformations et leur grande sensibilité aux variations de la température les polymères se distinguent généralement par leur [8]:

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

#### I-6 PROPRIETES ELECTRIQUES DES POLYMERES:

La plupart des propriétés électriques sont d'une façon ou d'une autre liées aux structures moléculaires du polymère. Il faut cependant tenir compte lors de l'étude de ces propriétés, de la présence de charges et d'adjuvants, de l'absorption éventuelle d'humidité et enfin de la morphologie [8].

##### I-6-1 Polarisation et constante diélectrique

La constante diélectrique ou la permittivité relative est définie par le rapport  $C_r / C_0$  ou  $C_r$  est la capacité d'un condensateur plan rempli d'un diélectrique et  $C_0$  celle d'un condensateur à vide, dans la pratique, l'air,  $C_r$  étant supérieure à  $C_0$ .

On définit aussi une permittivité relative complexe :

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (I-1)$$

Il a été remarqué qu'en général  $\epsilon$  augmente brutalement lorsque la température  $T$  augmente ou bien lorsque la fréquence  $f$  décroît.

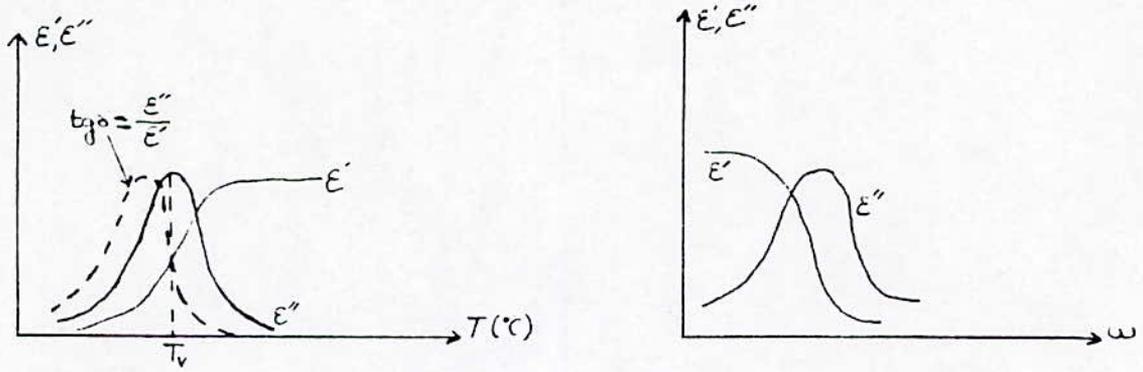


Fig.I-2 Variation de  $\epsilon$  et de  $\tan\delta$  en fonction de la température et de la fréquence [10].

Aussi au voisinage de la transition vitreuse (passage de l'état solide à l'état caoutchoutique),  $\epsilon$  présente un maximum [8]. On explique l'augmentation de la capacité  $C$  par différents mécanismes de polarisation du matériau que l'on peut classer en quatre groupes:

les polarisations électronique, atomique, d'orientation et interfaciale [9].

Type de polarisation	$E = 0$	$\xrightarrow{E}$
Electronique		
Ionique		
par orientation		
interfaciale		

Fig.I-3 Différents types de polarisation.

#### A/ Polarisation électronique

Sous l'action d'un champ électrique constant, le nuage électronique de chaque atome se déplace immédiatement par rapport au noyau créant ainsi un moment dipolaire et une polarisation dont le temps d'établissement est très court (de l'ordre de  $10^{-15}$  s) [11].

## B/ Polarisation atomique

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 créant ainsi sous contrainte extérieure un moment de liaison. Si on superpose un champ électrique les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres donnant naissance à une polarisation atomique.

Notons que pour les deux types de polarisation déjà cités la température est peu influente, il s'en suit que les pertes diélectriques ainsi causées ne sont pas importantes à fréquence industrielle [6].

## C\*/ Polarisation d'orientation

En général, les molécules hétérogènes présentent un moment dipolaire dit spontané, il est omniprésent, même en l'absence d'un champ électrique, l'orientation de ces dipôles est alors aléatoire [6].

Sous l'effet d'un champ électrique chaque dipôle est soumis à un couple créant une polarisation résultante dans le sens du champ [9].

Dépendant de la température, ce type de la polarisation donne lieu à des pertes diélectriques significatives [6].

## D\*/ Polarisation par charge d'espace

Ce type de polarisation intervient dans le cas de matériaux hétérogènes, soit constitués de composés différents (charges, impuretés) soit constitués de conglomerats de différents éléments de volume macroscopique ayant des conductivités et des constantes diélectriques différentes.

Dans ce cas, des charges d'espace peuvent alors s'accumuler aux interfaces créant des distorsions macroscopiques du champ appliqué.

## I-6-2 Rigidité diélectrique:

La rigidité diélectrique des polymères est généralement comprise entre 150 et 500 kV/cm [8].

Plusieurs paramètres peuvent influencer sur la rigidité diélectrique, parmi lesquels:

- la structure du polymère;
- le temps d'exposition à la haute tension;
- la morphologie: présence de vides, bulles, ....

### I-6-3 Propriétés superficielles:

La résistivité superficielle est fortement influencée par l'humidité.

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 [8].

### I-6-4 Résistivité transversale:

La résistivité transversale d'un matériau, est le quotient du gradient de potentiel par la densité de courant qui le traverse. Elle caractérise le pouvoir isolant du matériau. La valeur de la résistivité transversale pour la plupart des polymères est supérieure à  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  à la température ambiante [8].

La résistivité transversale des polymères en fonction de la température suit la loi d'ARRHENIUS [12].

$$\rho = \rho' \cdot \exp \left( - \frac{E}{R \cdot T} \right) \quad (\text{I-2})$$

où:

$\rho'$  est la Résistivité limite du polymère à la température infinie,  $E$  l'énergie d'activation du phénomène,  $T$  la température absolue, et  $R$  la Constante des gaz parfaits.

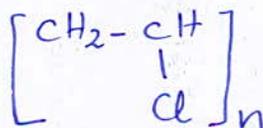
### I-7 LES POLYMERES UTILISES POUR L'ISOLATION DES CABLES DE HAUTE TENSION:

Ces dernières années certains polymères se sont imposés dans l'isolation électrique [3]. Dans cette partie nous allons exposer succinctement leurs caractéristiques. Ces polymères sont respectivement le PVC, L'EPDM, le PE et le PRC.

On s'intéressera plus particulièrement au PE et au PRC car ce dernier fait l'objet de notre étude.

#### I-7-1 Le polychlorure de vinyle pvc

Le PVC est une matière thermoplastique de synthèse obtenue par polymérisation du monochlorure de vinyle [13]. Sa formule générale est [6]:



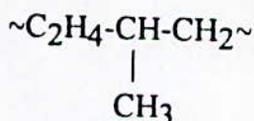
Le polychlorure de vinyle est très utilisé comme isolant (jusqu'à 10 kV environ) et matériau de gaine de protection des câbles de haute tension, d'une part pour son faible prix de revient et d'autre part pour ses bonnes qualités d'isolement électrique [13].

**\* Propriétés physico-chimiques et électriques du PVC:**

- Bonnes propriétés isolantes, mais pertes diélectriques assez importantes.
- Le PVC a une résistance exceptionnelle à l'ozone, il possède une résistance moyenne aux hydrocarbures aliphatiques, aux acides et aux bases.
- Le PVC a un bon vieillissement thermique.
- Le PVC transmet mal la flamme mais sa combustion entraîne un dégagement de gaz et de fumées.
- La température de transition vitreuse du PVC est élevée, elle se situe entre 75 et 80°C.
- Excellente rigidité jusqu'à sa température de transition vitreuse.

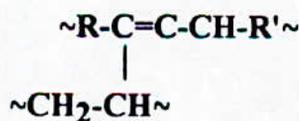
**I-7-2 L'éthylène propylène diène monomère EPDM**

Le copolymère obtenu par réaction de concentration égales d'éthylène et de propylène est désigné EPR (éthylène propylène rubber). Sa formule générale est:



L'absence de double liaisons montre la bonne résistance à l'oxydation du matériau.

En ajoutant à l'EPR une concentration de 2 à 3% de diène (hydrocarbure possédant une double liaison), on obtient de l'éthylène propylène diène modifié EPDM. Sa formule générale est:



Structure de l'EPDM.

Ce qu'il faut retenir de cette structure, c'est l'absence totale d'insaturation dans la chaîne principale du polymère. De ce fait l'EPDM aura une bonne résistance à l'attaque de l'oxygène, de l'ozone et de beaucoup d'autres produits chimiques tels que les acides, les alcools...etc [8].

#### \* Propriétés physico-chimiques et électriques de l'EPDM:

Les principales caractéristiques de l'EPDM se résument à [14] :

- une bonne tenue au vieillissement à la chaleur;
- une bonne résistance à l'action de la vapeur;
- une bonne résistance à l'ozone et aux intempéries;
- une souplesse à basse température;
- une bonne résistance aux radiations et au cheminement;
- de bonnes propriétés électriques;
- une facilité de mise en oeuvre.

En outre, l'EPDM brûle facilement et propage la flamme, mais ne produit pas de gouttes enflammées et ne dégage pas de gaz corrosifs ou toxiques, à l'exception de CO et CO<sub>2</sub> et parfois d'une faible quantité de SO<sub>2</sub> provenant de certains agents de vulcanisation.

#### I-7-3 Le polyéthylène PE:

##### Généralités:

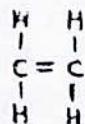
Le polyéthylène PE est aujourd'hui largement utilisé comme isolant pour les câbles souterrains de distribution et de transport. En effet, ces propriétés diélectriques et mécaniques font de lui un matériau de choix pour de telles applications.

##### A/ Structure et morphologie:

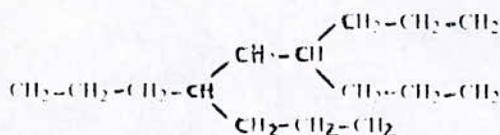
Les polyéthylènes PE sont obtenus par polymérisation de l'éthylène CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>, gazeux très pur, en présence de catalyseur dans certaines conditions de température et de pression [3].

La molécule de polyéthylène se présente sous la forme d'une chaîne d'atomes de carbone dont les valences libres sont occupées par des atomes hydrogène.

La molécule de polyéthylène peut présenter des ramifications [8].



Molécule d'Ethylène.



Molécule de polyéthylène ramifiée.

Ces ramifications provoquent une diminution de la densité du matériau et de sa cristallinité [8].

#### B/ Procédé de polymérisation:

Le mode de polymérisation est très important quant à la structure finale du polyéthylène PE. Il existe principalement deux procédés dits de basse (procédé PHILIPS PETROLIUM, procédé ZIGLER) et de haute pression conduisant respectivement à du polyéthylène de haute densité et de basse densité [7]. Cette polymérisation peut être obtenue soit [3]:

- à haute pression, pouvant dépasser 3000 bars à une température élevée (jusqu'à 400°C); les polyéthylènes ainsi obtenus sont dits "à haute pression" ou "à basse densité (environ 0.92)";
- à basse pression, inférieure à 50 bars à une température inférieure à 180°C; les polyéthylènes ainsi obtenus sont dits "à basse pression" ou "à haute densité (environ 0.95)".

#### C/ Les polyéthylènes PEBD et PEHD

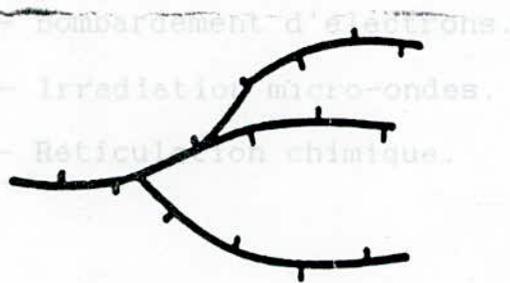
Les polyéthylènes susceptibles d'être utilisés en câblerie se divisent en deux familles [4]:

- Les polyéthylènes basse densité (PEBD).
- Les polyéthylènes haute densité (PEHD).

Ces produits diffèrent par la longueur et l'arrangement de leurs chaînes.

Les PEBD sont schématiquement composés de chaînes macromoléculaires principales éloignées les unes des autres par des chaînes latérales de position aléatoire. Ils sont plus souples que les PEHD. Ces polymères sont peu cristallins et ont une zone de fusion entre 90 et 110°C.

Les PEHD sont très linéaires. Ils possèdent quelques chaînes latérales, mais de dimensions réduites par rapport au PEBD et en plus petit nombre. Leur densité est plus élevée (0.95 environ). Ils sont également plus cristallins que les PEBD et fondent vers 135°C [4].



- Polyéthylène basse densité radicalaire.  
Procédé haute pression.
- Indice de branchements longs et taux de branchements courts élevés.



- Polyéthylène basse densité linéaire.  
Procédé basse pression.
- Pas de branchements longs. Beaucoup de branchements courts.

Fig. I-4 D'après [15].



- Polyéthylène haute densité.  
Procédé basse pression.
- Peu de branchements courts. Pas de branchements longs.

A/ Fabrication:

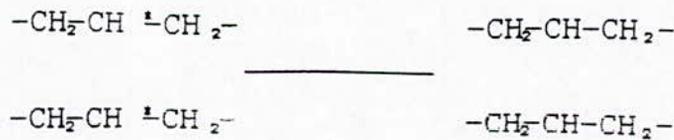
Le point de fusion relativement bas du PEBD (95-100°C) limite sa température d'utilisation dans le câble à 70°C à la corde et sa température admissible en court-circuit à 150°C. Le moyen utilisé pour remonter ces limites et les amener au niveau du PEHD est la réticulation.

Fig. I-3 D'après [15].

A partir du polyéthylène on peut obtenir par réticulation D\*/ Propriétés physico-chimiques et électriques du polyéthylène PE:

- Très bonne stabilité chimique.
- Pratiquement insoluble pour des températures inférieures à 60°C.
- Excellent isolant électrique pour des conditions d'ambiances variées.
- Faible facteur de pertes diélectriques.
- Rigidité diélectrique élevée.
- Bonnes propriétés de frottement.
- Assez perméable aux hydrocarbures (essences, ....).

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



Le taux de réticulation est caractérisé par le nombre de ces pontages [3].

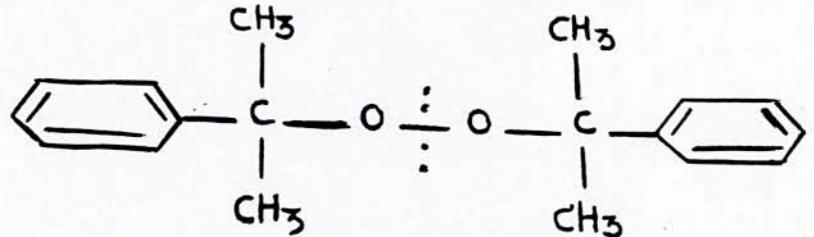


Fig.I-5 Péroxyde de dicumyle [15].

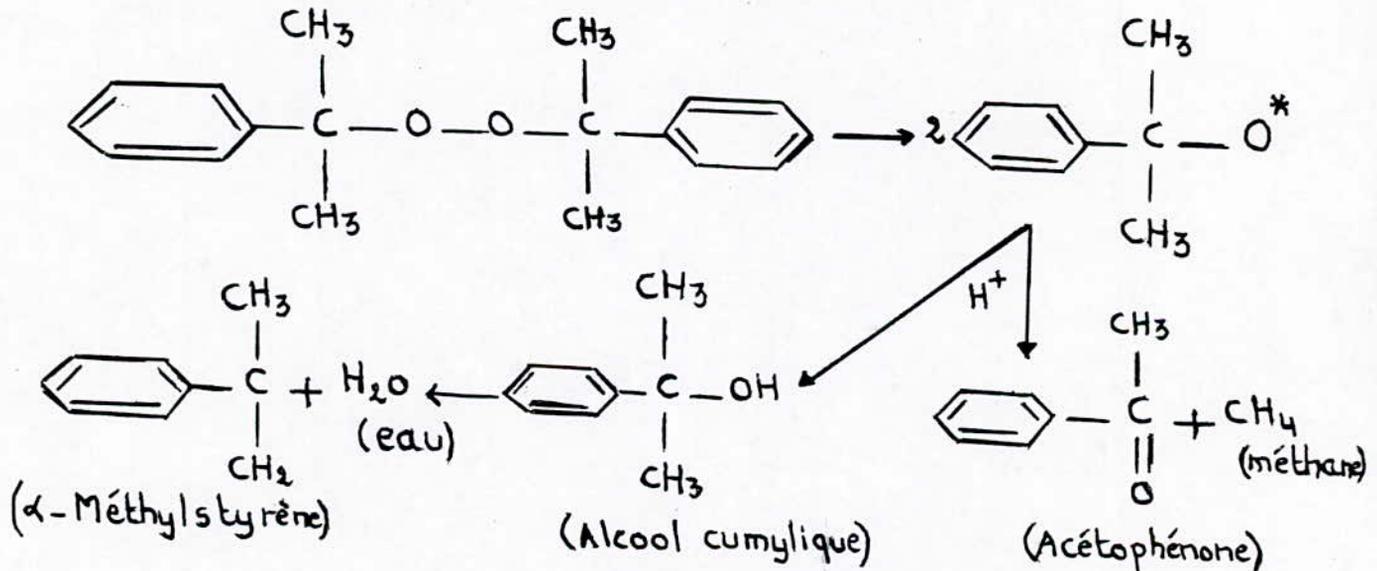


Fig.I-6 Schéma de décomposition du peroxyde de dicumyle [16].

Pour réticuler un câble il faut:

- choisir une température supérieure à 150°C pour décomposer le peroxyde et le rendre actif;
- opérer sous pression pour empêcher les produits volatils formes lors de la décomposition du peroxyde de s'échapper du polymère en formant des vacuoles ou des défauts de surface.

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 DUPPERAY [3]:

$$P = \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (I-3)$$

Avec :

T : Température en (°C).

P : Pression en bars.

Les conditions retenues pour les câbles sont T=200°C et p=20 bars [3].

La réticulation s'effectue sous vapeur, puis le câble passe dans un tube rempli d'eau à la sortie duquel sa température est inférieure à 90°C. Il devra encore être refroidi avant d'être mis sur touret.

La réticulation par peroxyde peut s'effectuer dans d'autres milieux que la vapeur d'eau; de nouveaux procédés sont apparus, notamment la réticulation sous atmosphère inerte (N<sub>2</sub>); le chauffage se fait soit par radiation (T=300 à 350°C) soit par circulation d'azote chaud à grande vitesse [3].

On peut également réticuler dans des bains de sels eutectiques sous pression d'azote à une température comprise entre 200 et 250°C [3]. Ces nouveaux procédés ont pour avantage:

- d'éliminer l'eau qui n'est pas nécessaire au processus de réticulation et qui pénètre dans l'isolant d'autant plus que la pression est élevée;

- de séparer les deux paramètres; température et pression, ce qui permet une plus grande souplesse de mise en oeuvre.

#### B\*/ Propriétés du PRC

La réticulation confère au PEBD des propriétés mécaniques améliorées et en particulier une meilleure résistance au fluage.

Celles-ci peuvent également être améliorées par l'incorporation de charges renforçantes au polymère [4]. Le produit obtenu est un thermoélastique. Sa tenue au vieillissement thermique est améliorée par rapport à celle du PEBD [4].

Les propriétés thermiques du PRC ne sont pas très différentes de celles du PE.

Du fait de la réticulation, la température d'utilisation à la corde est de 90°C et la température tolérée en court-circuit de 250°C [4].

Le taux de cristallinité des PRC est de 35 à 40% et la température de fusion cristalline est de 100 à 105°C [3].

Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celle du PEBD. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE [4].

Le gradient de potentiel maximal admissible avec le PRC est aujourd'hui de 8 kV/cm. La rigidité diélectrique des PRC diminue avec la température.

En ce qui concerne les pertes diélectriques, elles sont comparables à celles des PEBD et PEHD dans les PRC chargés mais sont nettement plus élevées dans les PRC non chargés, dans lesquelles elles peuvent atteindre  $40 \cdot 10^{-4}$  [3].

Les PRC résistent bien aux solvants aliphatiques, aromatiques ainsi qu'à la propagation de la flamme et ont un faible dégagement de fumée et de gaz toxique.

CHAPITRE II

DECHARGES PARTIELLES

## INTRODUCTION:

Le phénomène de décharges partielles joue un rôle très important dans les isolants en générale et dans les isolants de qualité technique (liquide et solide) en particulier. En effet, l'apparition des décharges partielles annonce l'imminence de la fin de vie d'une isolation solide [17].

L'importance des décharges partielles dans les isolation électriques a conduit les chercheurs s'intéressant à ce domaine, à proposer des techniques divers afin d'étudier le phénomène. En effet, l'étude des décharges partielles peut être entreprise sous bien des aspects: celui de la détection et de la localisation des défauts correspondants, celui des conséquences électriques, celui de la prévision de la rupture, celui de la durée de vie des isolants, celui enfin des processus de dégradation dus à tous les phénomènes complexes dont les décharges sont le siège [18,19].

Nous commençons par définir ce phénomène puis nous citons les méthodes de mesure et de détection et enfin nous consacrons un paragraphe à l'étude des arborescences qui constituent une des conséquences des décharges partielles [20].

### II-1 ORIGINE DES DECHARGES PARTIELLES:

Une décharge partielle est une décharge électrique dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'intervalle isolant séparant les deux conducteurs [21].

Les décharges partielles apparaissent au voisinage des inhomogénéités du champ électrique due à certaines configurations, ou à la présence de plusieurs diélectriques.

Sur une longue période, elles peuvent conduire à un claquage complet de l'isolant, en particulier pour les tensions alternatives.

Un premier classement des décharges partielles est possible suivant leur origine [22]:

- Décharges externes
- Décharges superficielles
- Décharges internes

#### II-1.1 Décharges externes:

Les décharges externes regroupent l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension.

Bien qu'il n'ait aucune influence sur la durée de vie de l'isolant [23], l'effet couronne a une signification particulièrement pratique pour les lignes haute tension, ou on cherche à minimiser les pertes énergétiques qu'il engendre, et les perturbations électromagnétiques produites par les impulsions de courant.

Les décharges partielles externes apparaissent aussi dans les circuits d'essais et de contrôle non destructif (haute tension) où elles interfèrent avec la détection des décharges partielles internes.

### II-1.2 Décharges superficielles:

Comme indiqué à la figure (II-1), une décharge est dite superficielle lorsqu'elle se développe à l'interface de deux isolants (diélectriques) dans des états différents d'agrégation.

Le champ électrique donnant lieu à ce type de décharges a sa composante principale tangentielle à la surface du matériau.

Ces décharges partielles peuvent prendre de l'ampleur à des tensions modérées s'il s'agit d'une mauvaise interface.

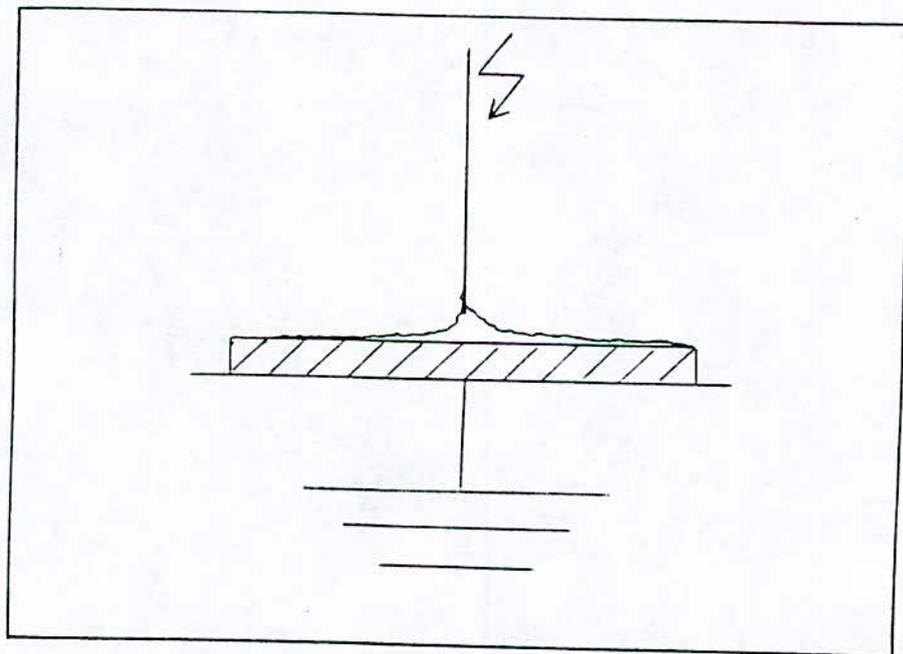


Fig.II-1 Dispositif présentant des décharges superficielles [22].

### II-1.3 Décharges internes:

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et de vacuoles gazeuses.

Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle, on constate que le champ électrique est plus élevé dans les vacuoles gazeuses ( $E_0$ ) que dans l'isolant ( $E_1$ ) (voir Fig.II-2).

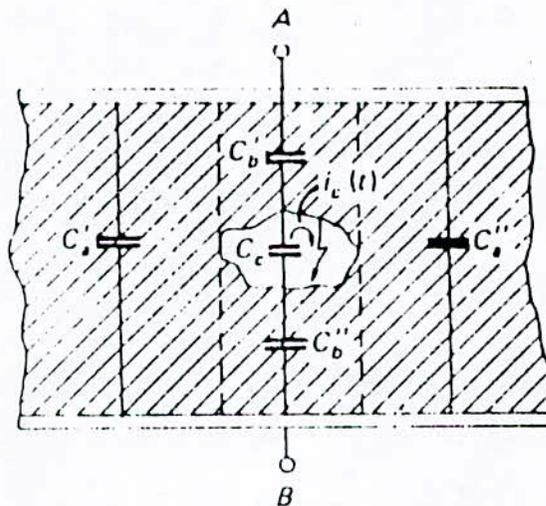


Fig.II-2 Isolant comportant une inclusion gazeuse [23].

Etant donné la continuité du vecteur induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on trouve pour un cas d'une stratification série:

$$\frac{E_0}{E_1} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{rg}} \quad (\text{II-1})$$

### II-2 LE PHENOMENE DE DECHARGES PARTIELLES DANS LES ISOLANTS ELECTRIQUES:

Deux facteurs contribuent à faire apparaître des décharges partielles dans les isolants:

- d'une part la permittivité relative des isolants solides étant toujours plus élevée (2 à 6 fois) que celle des gaz ( $\epsilon_r=1$ ), le champ électrique est proportionnellement plus élevé d'après l'équation (II-1),

- et d'autre part la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse (environ 10 fois) que celle des solides [24]. Ces deux constatations, allant dans le même sens, font que les décharges partielles apparaissent dans les vacuoles de gaz pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celles qui entraîneraient la perforation du diélectrique solide [24].

### II-3 CIRCUIT EQUIVALENT D'UN MATERIAU ISOLANT AVEC DECHARGE PARTIELLE:

La mesure des décharges partielles n'étant pas possible simplement, étant donné qu'elles sont internes à l'isolant, on s'intéresse à calculer les effets électriques vus de l'extérieur de l'isolant et dus à celle-ci [24].

Pour faire ce calcul, un circuit équivalent simplifié peut être utilisé (voir Fig.II-3).

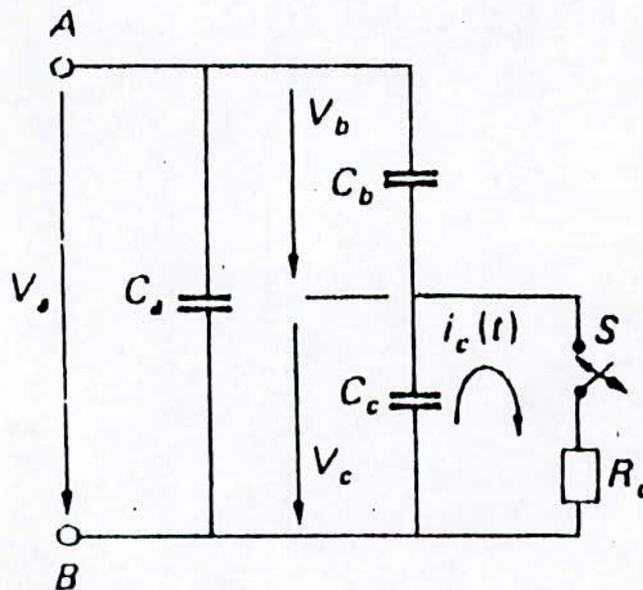


Fig.II-3 Circuit équivalent d'un matériau avec décharge partielle [23].

La capacité  $C_c$  correspond à la cavité, la capacité  $C_b$  tient compte des lignes de champ provenant des électrodes et se terminant dans la vacuole [23].

Le reste du diélectrique, exempt de vacuoles est représenté par la capacité  $C_d$ . Pour de petites cavités on a

toujours  $C_d \gg C_b \gg C_c$  [23,24].

Si une certaine tension critique est dépassée aux bornes de  $C_1$ , ce condensateur se décharge à travers  $R$  qui limite seulement l'amplitude du courant de décharge [23]. pour de faibles défauts, la durée d'une telle décharge est de l'ordre de la nanoseconde.

La figure (II-4) montre la relation qui existe entre la tension appliquée à l'échantillon et la tension en travers la cavité, la courbe en pointillée nous donne la tension qui existerait à travers la cavité si aucun claquage ne se produirait.

On note qu'il peut se produire plusieurs décharges partielles pendant un seul cycle. Le nombre de décharges augmente généralement très rapidement avec l'augmentation du niveau de tension [15,23].

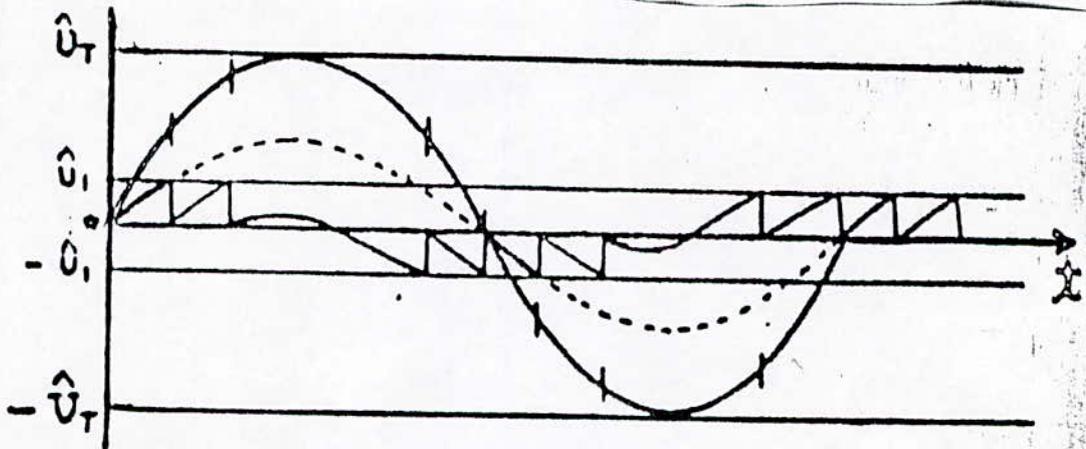


Fig.II-4 Tension dans le circuit équivalent [15].

Remarquons cependant que la situation présentée ici est hautement idéalisée car le niveau de la tension de claquage à l'intérieur de la cavité varie continuellement à cause du changement de la pression des gaz et la production de nouveaux gaz ainsi que la carbonisation progressive de l'intérieur de la cavité [15].

## II-4 MESURE DES DECHARGES PARTIELLES:

### II-4.1 Pourquoi detecter et mesurer les décharges partielles ?

Un ingénieur concevant un équipement en haute tension essaiera toujours d'obtenir un produit de faible coût de

fabrication et de la plus petite taille possible. Aussi il essaiera de minimiser l'épaisseur des isolants utilisés ce qui l'amènera à travailler avec des contraintes électriques très fortes.

Si, du fait d'erreur de conception ou de défauts de fabrication, des décharges partielles surviennent dans son équipement, elles apparaîtront à chaque cycle de tension secteur.

Chaque impulsion de décharge contient une certaine énergie qui est dissipée sur les surfaces isolantes par bombardement ionique ce qui peut entraîner une augmentation locale de la température et amener la création de sous-produits chimiques dérivés. Cette action peut dégrader localement l'isolant et augmenter encore le défaut. Il peut ne pas y avoir de problèmes pendant de nombreuses années, mais il s'agit souvent d'équipement ayant une durée de vie supérieure à 20 ans. Ce processus peut donc exister jusqu'à ce que l'isolation soit rompue complètement ce qui peut être dangereux, cher à réparer et gênant pour l'utilisateur [25].

#### II-4.2 Comment mesurer les décharges partielles ?

La méthode de mesure est fondée sur la séparation entre les impulsions de courant de décharges, engendrées dans un circuit de mesure par le phénomène de décharges partielles, et tous les courants de nature différente tels que courants de déplacement à la fréquence du réseau ou courants de «bruit» à haute fréquence [26].

D'autre part, les difficultés rencontrées dans la mesure des courants de décharges partielles [23], ont poussé les chercheurs à quantifier les décharges partielles par la charge injectée lors du phénomène des décharges partielles [21,23,27]. Toute fois, l'intégration des impulsions de courants de décharges est indispensable à la quantification de la «charge apparente» [26].

#### II-4.3 Montages de base:

Avant de donner les montages de bases de mesure de la charge apparente, on a préféré commencer par définir cette grandeur qu'on veut mesurer.

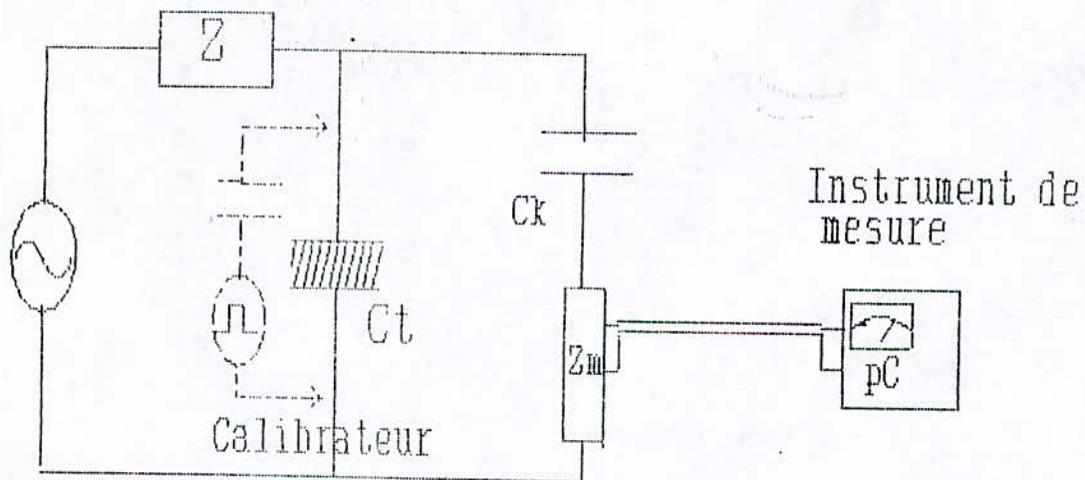
##### A\*/ Définition:

La charge apparente «Q» d'une décharge partielle est la charge qui, si elle était injectée instantanément entre les bornes de l'objet en essai, changerait momentanément la tension entre ses bornes de la même quantité que la décharge partielle elle même [21].

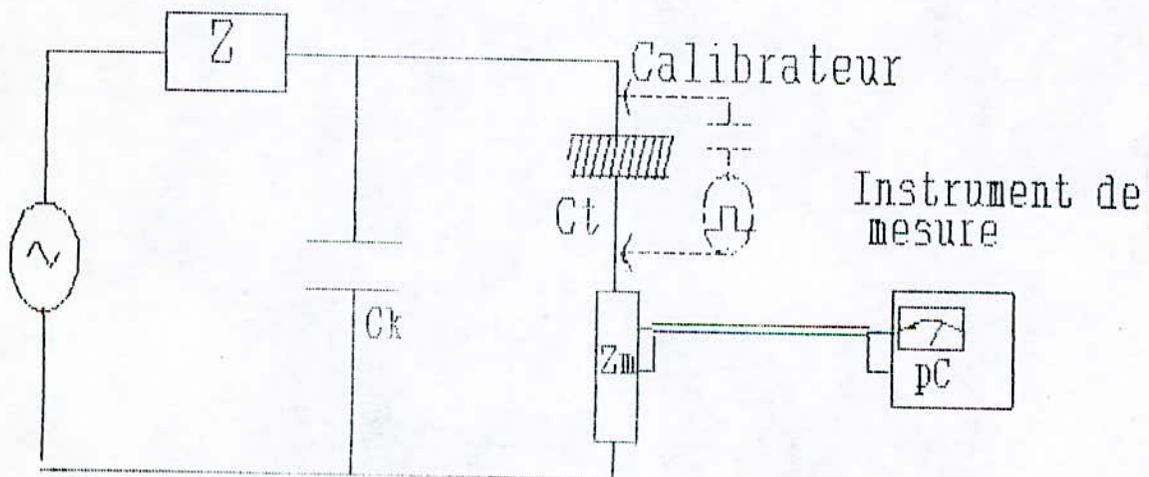
La charge apparente est exprimée en pico-coulombs.

**B\*/ Montages:**

Quelque soit l'appareil de mesure utilisé, on peut considérer que les différents montages d'essais possibles sont dérivés de l'un des deux types suivants.



circuit a



circuit b

Fig.II-5 détecteur directe D'après [28].

Les éléments essentiels de ces circuits comprennent l'objet ou le système d'isolation à l'essai;  $C_t$  que l'on assimile à un simple condensateur, le condensateur de couplage  $C_k$  (dit parfois «filtre de séparation de la tension du

secteur\*), et enfin le circuit de mesure de décharges partielles proprement dit. Ce dernier comprend l'impédance de mesure  $Z_m$ , le câble de liaison et l'appareil de mesure.

Une tension alternative à la fréquence du secteur alimente le circuit d'essai, dans lequel le filtre Z interdit le passage d'impulsions de courants de décharges partielles  $i_{dp}(t)$  par la source de tension et réduit les perturbations à haute fréquence provenant de cette source.

Il reste à noter que dans le cas de la figure (II-5-a), le circuit de mesure peut être endommagé si l'objet en essai est perforé. Cet inconvénient est éliminé par l'utilisation du montage de la figure (II-5-b), c'est pourquoi ce dernier est le plus utilisé.

#### II-4.4 Considérations pratiques:

Le phénomène de décharges partielles est généralement influencés par de nombreux paramètres tels que; les bruits radioélectriques; les décharges partielles dans le circuit d'essai (transformateur ou autres), ... [21,27].

La mesure des décharges partielles comporte également des erreurs plus importantes que d'autres types de mesures effectuées lors d'essais à haute tension [21].

#### A\*/ Perturbations:

##### \* Sources de perturbations:

Les perturbations qui peuvent interférer avec les indications des appareils de mesure des décharges partielles se classent en deux catégories:

1°/ Les perturbations qui se produisent même lorsque le circuit d'essai n'est pas alimenté. Elles proviennent par exemple de manoeuvres dans d'autres circuits, de machines à collecteur, d'essais à haute tension exécutés dans le voisinage, d'émissions radioélectriques, ... , y compris le bruit de l'appareil de mesure lui même.

2°/ Les perturbations qui n'existent que lorsque le circuit est alimenté mais qui ne se produisent pas dans l'objet en essai. Généralement croissantes avec la tension, les perturbations peuvent comprendre par exemple, des décharges partielles dans le transformateur d'essai, sur les conducteurs à haute tension, dans les traversées ou des perturbations provenant d'étincelles dues à une mise à la terre imparfaite d'objets voisins, ....

##### \* Réduction de la perturbation:

On peut obtenir une réduction des perturbations par une

mise à la terre convenable de toutes les structures conductrices proches de l'aire d'essai et par un filtrage des réseaux d'alimentation des circuits d'essai et de mesure. Mais la meilleure réduction est obtenue par les méthodes qui seront décrites dans les paragraphes qui suivent.

**\*\* Cage de Faraday :**

Les blindages métalliques (cage de FARADAY) permettent d'atténuer les perturbations rayonnées [24]. Ces cages devront bien entendu être munies de filtres 50Hz à travers lesquels se feront toutes les alimentations. Malheureusement, cette solution est difficilement applicable aux mesures sur des objets volumineux tels que, les grands transformateurs, les alternateurs, ... Pour ces matériels, on doit avoir recours à certains artifices permettant, sinon d'éliminer, du moins d'atténuer considérablement le niveau des perturbations.

**\*\* Système de mesure en pont :**

Le montage de la figure (II.6) représente un circuit équilibré (pont) dans lequel le mesureur est branché entre les impédances  $Z_m$  et  $Z_{m1}$ .

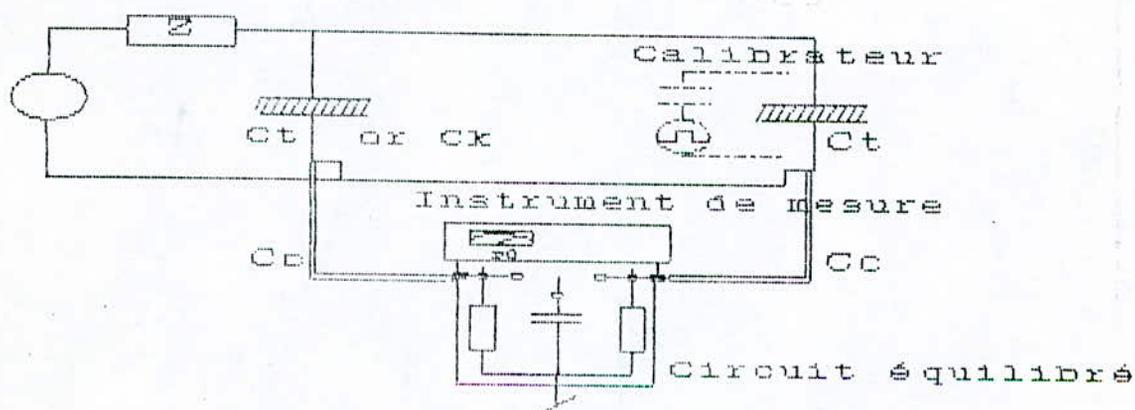


Fig.II-6 détecteur indirecte (circuit équilibré)  
D'après [23].

Ce circuit a l'avantage de réduire les perturbations extérieures.

Pour en effectuer le réglage, on peut brancher une source de décharges artificielles entre la borne à haute tension et la terre et faire varier les impédances  $Z_m$  et  $Z_{m1}$  de façon à rendre minimale la valeur indiquée par l'appareil de mesure [21].

## II-4.5 Autres quantités caractérisant les décharges partielles:

La quantification des décharges partielles par leur charge apparente  $q$  en (pC) selon la norme CEI 270, tend de plus en plus à représenter la grandeur essentielle à mesurer dans la méthode de mesure des décharges partielles.

La mesure de  $q$  par la méthode de mesure des décharges partielles se justifie par une excellente raison: la charge apparente  $q$  permet de quantifier d'autres grandeurs importantes qu'elle intègre partiellement, telles que le courant de décharges moyen  $I$ , la puissance de décharge  $P$  et le débit quadratique  $D$ .

## II-5 ARBORESCENCES:

Malgré les précautions prises lors de leur mise en oeuvre, les polymères synthétiques utilisés pour isoler les câbles de transport d'énergie électrique présentent toujours des impuretés et des défauts qui sont à l'origine de leur dégradation.

Ces impuretés et ces défauts provoquent une distorsion et une concentration du champ électrique dont l'intensité peut atteindre des valeurs élevées, parfois voisines de la rigidité diélectrique intrinsèque du matériau.

Ceci peut entraîner la dégradation de l'isolant à court ou à long terme, par un mécanisme appelé "arborescence" pouvant aller jusqu'à la perforation de l'isolation [29].

### II-5.1 Définition et origine des arborescences:

L'arborescence est un phénomène de préclaquage électrique.

Ce terme est attribué à un type de dégradation qui progresse à travers une section d'un diélectrique sous des contraintes électriques.

Elle se présente sous forme d'arbre [13] comme indiquée sur la figure (II-7)).

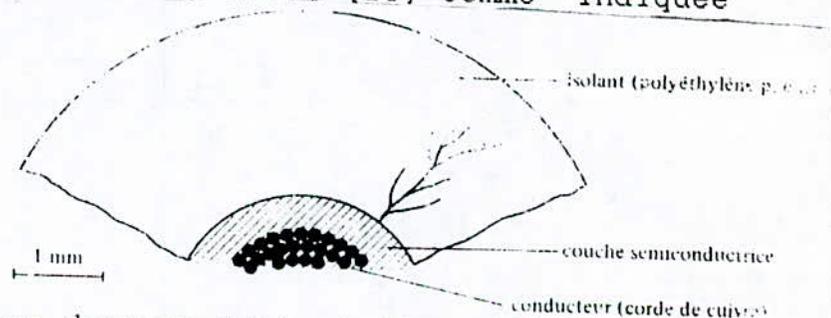


Fig. II-7 Arborescence dans un isolant d'un câble de haute tension [7].

Le développement de l'arborescence est favorisé par la présence de défauts: hétérogénéités à l'interface des parties isolantes et conductrices, impuretés ou occlusion gazeuses au sein du matériau. Ce n'est qu'après un temps de gestation appelé aussi temps d'incubation plus au moins long qu'elle se manifeste. Ce dernier dépend du défaut ou elle est issue [13].

L'arborescence n'apparaît qu'en des points ou des conditions critiques sont atteintes. Elle est révélatrice d'un stade très avancé de la dégradation du matériau [13].

On distingue deux types d'arborescences [29]:

- Les arborescences ouvertes (vented trees) qui sont issues de défauts de contact écran/isolant.
- Les arborescences en noeud-papillon (bow-tie-trees) qui se développent à partir de microcavités ou des inclusions internes.

Le phénomène d'arborescence a été observé sous des tensions alternatives, continues ainsi que des tensions impulsionnelles [13].

## II-5.2 Classification des arborescences:

Il est d'usage de classer les arborescences selon deux grandes catégories [29]:

- Les arborescences électriques.
- Les arborescences électrochimiques dans lesquelles on distingue les arborescences d'eau et les arborescences chimiques.

### A\*/ Arborescences électriques:

#### Généralités:

Depuis 1951, de nombreuses études ont été consacrées aux phénomènes d'arborescences apparaissant dans les isolations synthétiques, notamment celles des câbles.

On s'est rendu compte, surtout aux USA, mais aussi au JAPON et en Europe, que des câbles en service pouvaient présenter des dégradations localisées, dues à des arborescences plus ou moins développées.

#### Formation et propagation des arborescences électriques:

Ces arborescences sont observables dans les isolants synthétiques anhydres [13].

Les arborescences électriques ont pour origine des défauts dans l'isolation (vacuoles, particules organiques ou minérales) ou au contact écran isolant, tels qu'il se produit une concentration importante du champ électrique. Elles peuvent aussi apparaître lorsqu'une dégradation par des décharges partielles entraîne la formation de trous acérés à la pointe desquels le champ atteint des valeurs élevées [30].

Les arborescences électriques apparaissent après un certain temps d'application de la tension, dit temps d'initiation ou d'induction. Elles sont constituées de canaux dont le diamètre est de l'ordre de quelques microns [13].

Lorsque des arborescences ont été formées, elles peuvent se développer sous une tension inférieure à celle de leur formation; pour cette raison, des surtensions peuvent être dangereuses en service [30].

La propagation des arborescences se fait généralement dans la direction du champ électrique.

Leur forme et leur densité sont très variables suivant les conditions d'essai et la nature des isolants [30].

Le processus de propagation des arborescences électriques est mieux compris. On admet généralement que des décharges se produisent dans les canaux rendant conducteur le gaz qui les remplit; le champ électrique est reporté à leur pointe et provoque des claquages locaux qui les font progresser.

Il semble que rien ne peut empêcher les arborescences électriques une fois formées de se développer jusqu'au claquage. C'est pourquoi, il est nécessaire avant tout d'empêcher leur formation.

Actuellement, les arborescences électriques ne sont pas un danger pour les câbles, mais toute augmentation des gradients de service, ou tout défaut de fabrication peut provoquer leur apparition.

## B\*/ Arborescences électrochimiques:

### Généralités:

L'effet nocif de l'humidité sur les isolations synthétiques est bien connu. La dégradation est décelée par des diminutions des caractéristiques électriques comme la résistance d'isolement, le facteur de pertes et la rigidité diélectrique. La formation d'arborescences spécifiques associées à ce type de dégradation, semble avoir été signalée pour la première fois par PAIST en 1964, et ensuite par MIYASHITA en 1967 dans des câbles ayant fonctionné dans l'eau [30].

### Formation et propagation des arborescences électrochimiques:

Les arborescences d'eau se développent dans les isolants fonctionnant en milieu humide [29]. Ces arborescences prennent naissance à partir de défauts internes à l'isolation ou à proximité des interfaces isolant-protection. Elles ne sont visibles que si on les colore [13].

Pour qu'une arborescence d'eau apparaisse, il est nécessaire qu'une certaine quantité de liquide ou d'impuretés soit concentré dans des cavités contiguës au défaut, et soumise à un fort champ électrique [30].

La direction générale des arborescences d'eau est celle du champ électrique. Elles sont généralement formées de canaux de moins de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre; quelques fois, elles se résolvent en un nuage de microcavités [30].

La propagation de l'arborescence est attribuée à différents effets:

- pénétration d'eau dans l'isolant due au champ électrique élevé à la pointe des canaux;
- décomposition de l'eau par des décharges partielles se produisant dans une vacuole de gaz à la pointe du canal;
- dégradation locale due à la pression des gaz engendrés;
- pénétration de l'eau dans la région dégradée, avec conservation d'une vacuole de gaz.

### C\*/ Arborescences chimiques:

#### Généralités:

Ce type d'arborescence a été reconnu comme spécifique vers 1968 par KAWAWATA et OGURA. Selon TABATA, des observations remontant à 1953 se rapporteraient à des arborescences chimiques.

#### Formation et propagation des arborescences chimiques:

Ces arborescences apparaissent dans des câbles à conducteur de cuivre, enterrés au voisinage des usines chimiques, ou accompagnent les arborescences électrochimiques. Elles ont pour origine une corrosion du conducteur en cuivre par des sulfures; il se forme du sulfure cuivreux ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) qui augmente de volume en cristallisant; la pression exercée permet au produit de pénétrer dans l'isolant par les points les plus faibles, et de s'y propager sous forme d'arborescence.

Les sulfures provoquant la corrosion arrivent au conducteur soit par infiltration, en solution dans l'eau, soit par diffusion à travers toute l'épaisseur de l'isolation, sous leur forme naturelle ou en solution.

CHAPITRE III

VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS  
SOLIDES/POLYMERES

## GENERALITES:

les matériaux isolants sont soumis à de nombreuses contraintes (électrique, mécanique, thermique, chimique, rayonnement) dont quelques unes sont plus ou moins des contraintes de service permanent, d'autres étant de nature transitoire.

Il est généralement admis que de nombreux processus destructifs dans les systèmes d'isolation sont le résultat des effets combinés de plusieurs de ces contraintes. c'est pourquoi une tâche primordiale pour les concepteurs de systèmes d'isolation est d'assurer un fonctionnement fiable des matériels pendant une durée de vie suffisamment longue et de préférence prévisible [31].

### III-1 VIEILLISSEMENT:

On appelle vieillissement tout phénomène (à l'exclusion des phénomènes purement mécanique tel que le fluage ou la fatigue) se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériau.

Le terme vieillissement n'implique pas un mécanisme précis, on est même souvent en présence de phénomènes complexes faisant intervenir simultanément plusieurs mécanismes tels que l'oxydation à température modérée, hydrolyse, migration d'adjuvants.

### III-2 VIEILLISSEMENT THERMIQUE:

On convient d'appeler vieillissement thermique tout phénomène traduisant une évolution qui ne fait intervenir que:

- le matériau;
- l'atmosphère;
- la température.

Le vieillissement thermique peut faire intervenir des phénomènes purement physiques (dégazage, migration des plastifiants, évolution de la morphologie) ou des phénomènes chimiques parmi lesquels le plus important est l'oxydation. Celle-ci entraîne une augmentation des pertes 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, mais surtout de la qualité, de la quantité et de la répartition de l'anti-oxydant incorporé. Le rôle de celui-ci est de limiter la dégradation qui accompagne la réaction d'oxydation et donc prouve une résistance à la contrainte thermique et peut de ce

fait favoriser la résistance aux dégradations dues aux décharges partielles [32,34].

### III-2.1 Le vieillissement thermique des isolants solides / polymères :

Les concepteurs d'isolation se sont toujours intéressés à la tenue thermique des matériaux isolants solides et à les classer suivant leur durée de vie [33].

L'étude du phénomène de vieillissement thermique d'un isolant solide a deux buts principaux. Le premier est l'évaluation 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 [13].

Les essais d'endurance thermique des polymères sont destinés à déterminer les changements de leurs propriétés à la suite d'une exposition à la chaleur.

Le vieillissement thermique peut être continu ou cyclique. 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 [35].

### 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. Cela peut comprendre le ramollissement du matériau au de-là de sa température de transition vitreuse ou au de-là du point de fusion de sa partie cristalline. Une cristallisation secondaire ou une relaxation de structure peuvent également intervenir, et ont respectivement pour effet, une augmentation de la rigidité mécanique et une augmentation de la densité et de la fragilité [36].

### 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 plupart des propriétés importantes des polymères [36]. Les travaux de B. FALLOU permettent de les regrouper [35].

#### A\*/ Oxydation

En présence d'air, il se produit un processus d'oxydation. Celle-ci a pour conséquence la formation de

produits acides qui augmentent la conductivité ainsi que la rupture de chaînes qui est responsable de l'augmentation de la charge à la rupture.

#### B\*/ Réticulation:

Le processus d'oxydation s'accompagne généralement d'un effet de réticulation ou de pontage entre des chaînes voisines qui réduit la souplesse de l'isolant, le rendant ainsi cassant.

#### C\*/ Réactions de dépolymérisation:

Des réactions de dépolymérisation peuvent prendre naissance même en l'absence d'oxygène. L'évaporation des produits de scission de plus bas poids moléculaire a une double conséquence : d'une part un rétrécissement du matériau et d'autre part la formation de produits volatils susceptibles d'être à l'origine de décharges partielles dans les isolations à haute tension.

#### D\*/ Autres mécanismes:

Aux mécanismes que nous venons de citer peuvent s'ajouter d'autres effets que l'on peut considérer comme secondaires.

Parmi ces effets, nous pouvons noter, suivant le cas, une hydrolyse, une incompatibilité chimique entre deux constituants ou une altération due à la présence de solvants insuffisamment évacués.

### III-2.4 Endurance thermique des isolants solides \ polymères:

Certains auteurs comme B.FALLOU et E. MORIANE se sont intéressés à L'étude de l'endurance thermique des polymères [35].

#### A\*/ Position du problème:

La caractérisation du vieillissement ou de la stabilité à long terme des isolants solides doit permettre de répondre à l'une des questions simples suivantes [37]:

Pendant quel temps  $t$  peut-on maintenir un matériau (ou une isolation) sous une contrainte  $C_0$  ?

Si l'on désire une durée de maintien ou durée de vie donnée  $t_0$ , quelle contrainte maximale  $C$  sera autorisée ?

Pour y répondre, il suffit de connaître la relation contrainte-temps  $C=f(t)$  telle qu'elle est représentée à la figure(III-1).

La contrainte peut être la température, la tension ou le champ électrique.

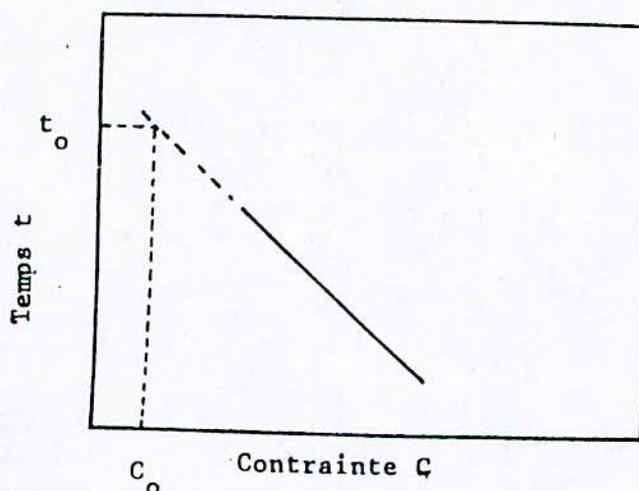


Fig.III-1 Variation du temps de vieillissement en fonction de la contrainte appliquée [37].

Pratiquement, l'établissement de cette relation passe assez souvent par la détermination de relations du type de celles présentées à la figure (III-2), qui décrivent les variations d'une propriété du matériau en fonction du temps de vieillissement et ce pour diverses valeurs  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$  de la contrainte appliquée  $C$ .

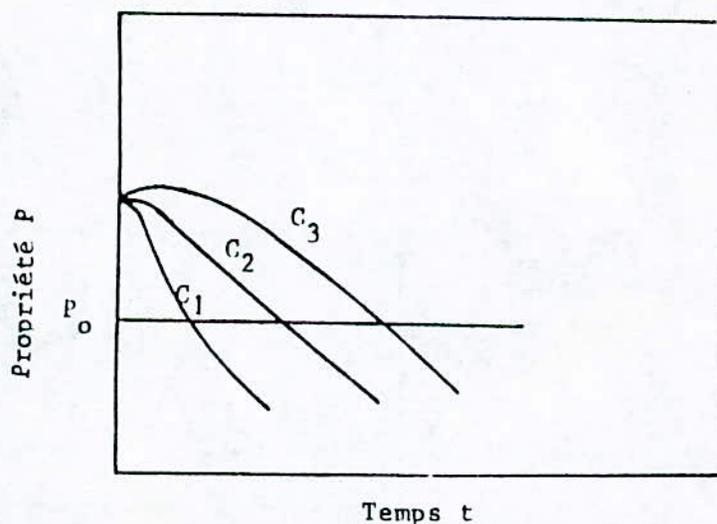


Fig.III-2 Variation de la propriété en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la contrainte  $C$  [37].

Si l'on se fixe une valeur de la propriété  $P_0$ , choisie soit arbitrairement, soit en fonction des critères d'emploi représentatifs, on obtient la relation  $C(t)$  relative à la valeur de la propriété  $P_0$ . Il s'agit de ce qu'on a coutume d'appeler courbe de durée de vie.

La propriété peut être une propriété électrique (exemple : la rigidité diélectrique) ou une propriété mécanique (exemple : charge à la rupture).

**B\*/ Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides:**

Les travaux relatifs à l'endurance thermique des matériaux ont pour objectif la mise au point de méthodes générales de détermination de leur stabilité et, dans un but de simplification des résultats, l'exploitation de ceux-ci sous la forme d'indice de température attribués aux matériaux pour leurs propriétés mécaniques d'une part, pour leurs propriétés électriques de l'autre [38].

**C\*/ Essais d'endurance thermique des isolants solides:**

On soumet les matériaux à l'action prolongée de la chaleur puis on détermine l'évolution d'une ou plusieurs de leurs propriétés en fonction du temps de vieillissement, ce qui permet de tracer les caractéristiques  $P=f(t)$  [35] (Fig.III-3).

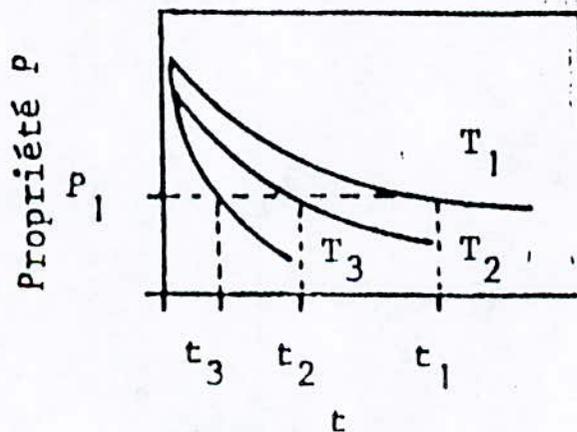


Fig.III-3 Variation de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes températures [35]

Dès que la propriété satisfait au critère de fin de vie retenu ou que l'échantillon a été éliminé à la suite d'une défaillance, les temps correspondants sont notés (Fig.III-4). En général, le critère de dégradation est choisi pour une perte de 50% de la propriété [3].

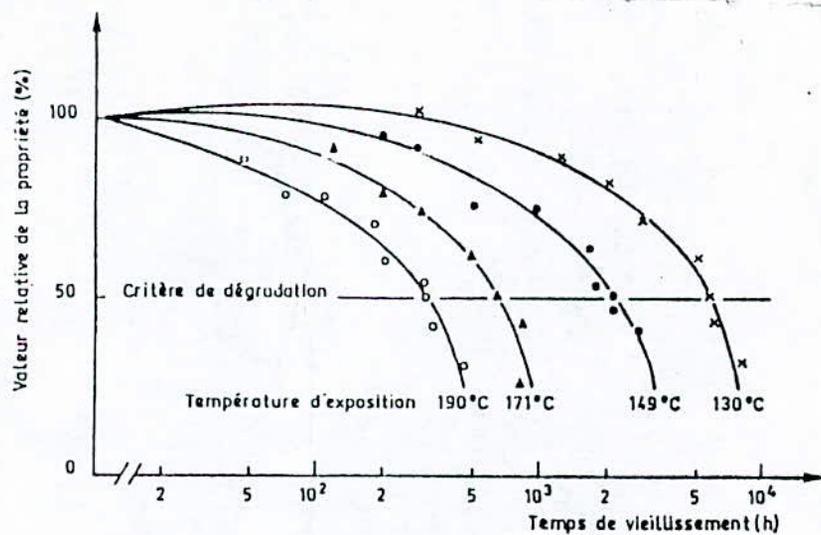


Fig. III-4 Détermination du temps nécessaire pour atteindre le critère de dégradation à chaque température - variation d'une propriété [3].

DAKIN a établi une relation permettant l'étude de l'endurance thermique de nombreux matériaux isolants; les résultats des essais sont utilisés pour déterminer leur indice de température.

Par définition, l'indice de température est le nombre égal à la température, exprimée en degré Celsius, qui correspond sur le graphique d'endurance thermique à un temps donné, normalement égale à 20000 heures [39].

Certains chercheurs font des vieillissement très accélérés (VTA) qui se font en un temps de 500 heures au lieu de 5000 heures [35].

#### D\*/ Durée de vie:

En 1913, C.P. STEINMETZ et B.G. LAMME publient une étude sur le vieillissement des isolations électriques. A partir de 1921, MONTSINGER pratique des essais de vieillissement sur des échantillons de papier imprégné d'huile minérale qui le conduisent à formuler en 1930 une loi empirique exprimant leur durée de vie en fonction de la température et une règle dite "des 8 degrés"; la durée de vie est divisée par deux lorsqu'il se produit un accroissement de la température égale à 8°C.

En 1948, T.W. DAKIN est l'un des premiers à formuler une

expression de la durée de vie des isolants soumis à une contrainte thermique, qui est basée sur la cinétique des réactions chimiques et la loi d'ARRHENIUS (1889).

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 diélectriques) atteigne une valeur limite telle que le matériel puisse encore fonctionner de façon satisfaisante [35].

Comme il a été dit précédemment, la durée de vie  $t$  d'un matériau isolant solide en fonction de la température de vieillissement est donnée par une relation de type ARRHENIUS [35].

$$\ln t = A + \frac{E}{R \cdot T} \quad (\text{III-1})$$

Avec:

- A: Constante caractéristique du matériau.
- R: Constante des gaz parfaits.
- T: Température absolue.
- E: Energie d'activation du phénomène.

Une relation analogue à (III-1) a été proposé par d'autres auteurs.

$$t = C \cdot \exp \left( \frac{B}{T} \right) \quad (\text{III-2})$$

Avec:

- C, B: Constantes caractéristiques du matériau
- T: Température absolue

Le logarithme de la durée de vie est donc porté en fonction de l'inverse de la température absolue (Fig. III-5), et dans des conditions idéales, le tracé linéaire qui en résulte peut être extrapolé, afin de déterminer la durée de vie correspondant à la température de service choisie. Pour limiter les aléas d'une extrapolation, la publication CEI 216 exige que la température de vieillissement la plus faible conduise à une durée de vie d'au moins 5000 heures; de même que pour la température la plus élevée, la durée de vie doit être d'au moins 100 heures [36].

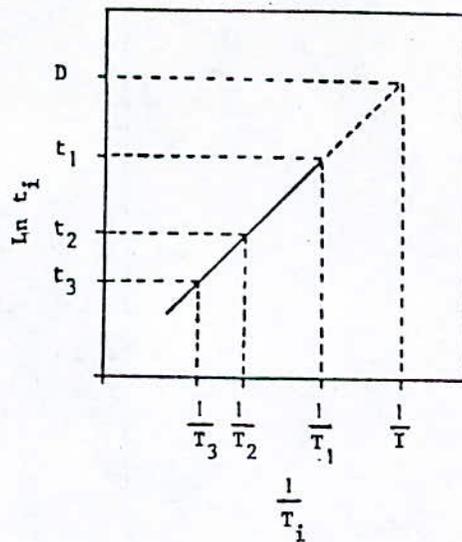


Fig. III-5 Variation du logarithme de la durée de vie des polymères en fonction de l'inverse de la température [35]

#### E\*/ Choix des températures de vieillissement

La CEI 216-1 [39] fixe un minimum de 3 températures différentes chacune de la plus voisine de 20°C et telles que le critère de dégradation soit atteint:

- en un temps inférieur à 100 heures pour la température la plus élevée;
- en un temps inférieur à 5000 heures pour la température la plus basse.

#### F\*/ Vitesse de dégradation

La vitesse de la réaction chimique représentant le phénomène de dégradation des polymères varie avec la température de vieillissement T selon la loi d'ARRHENIUS. Cette vitesse est donnée par la relation suivante [35]:

$$V = V_0 \exp \left( - \frac{E}{R \cdot T} \right) \quad (\text{III-3})$$

Avec:

- E: Energie d'activation du phénomène.
- R: Constante des gaz parfaits.
- V: Constante absolue.
- T: Température absolue.

Une relation identique à (III-3) a été formulée:

$$\ln V = -\frac{A}{T} + B \quad (\text{III-4})$$

Avec:

A et B: Constantes caractéristiques du polymère.

T: Température absolue.

### III-2.5 Influence du vieillissement thermique sur les propriétés des polymères

Pendant la dégradation des polymères, des réactions chimiques telles que l'oxydation, l'hydrolyse, les ruptures de chaînes, la réticulation et les pertes de plastifiants peuvent influencer sur la plupart de leurs propriétés (charge à la rupture, conductivité, facteur de pertes diélectriques, rigidité diélectrique,...).

### III-3 VIEILLISSEMENT ELECTRIQUE ET ELECTROCHIMIQUE:

Il est connu que, les isolants électriques sont sujets à un vieillissement électrique en service normale, ce fait s'applique certainement aux câbles haute tension, isolés au papier ou au matériaux synthétiques (polymères).

Dans les câbles isolés en matériaux synthétiques on doit considérer deux mécanismes de vieillissement électrique: le vieillissement normal qui conduit à la formation d'arborescences électriques et le vieillissement électrique dû à des liquides en particulier l'eau, qui conduit à des arborescences électrochimiques que l'on considère comme étant un stade intermédiaire de la formation des arborescences électriques [40].

#### III-3.1 Vieillissement électrique (vieillissement par décharges partielles)

il y a maintenant près de 50 ans que les industriels, aidés depuis lors par des universitaires ont entrepris de sérieuses recherches sur les processus de vieillissement des isolants dont le plus nocif, mais aussi le plus difficile à cerner concerne la dégradation sous l'action des décharges partielles [41].

De grands progrès technologiques ont été réalisés dans l'élaboration des isolants et dans leur mise en place, mais il ne semble pas que l'on soit complètement à l'abri, dans tous les types de matériels de défauts d'origine pouvant être le siège de décharges dès les premiers instants d'application du champ électrique. De plus, en admettant même que toutes les

précautions aient été prises de ce point de vue, il n'est pas possible d'éviter que des cavités ou des décollements ne se manifestent à la longue, par suite des contraintes mécaniques et surtout thermiques qui se produisent, parfois cycliquement en service. De tels défauts apparaissent le plus souvent entre isolants et conducteurs, mais aussi entre les différents constituants d'un matériau composite. Ainsi, le problème de la dégradation des isolants sous l'action des décharges partielles reste-t-il aujourd'hui d'une grande actualité à la fois parce que ces différents aspects ne sont pas encore bien clairement perçus et parce que, aux isolants et aux matériels traditionnels sont venus s'ajouter des produits nouveaux tels que les polymères purs et chargés et nous donnerons pour exemple l'utilisation du polyéthylène dans les câbles haute tension [41].

#### A\*/ Etude du vieillissement par décharges partielles

Il est très compliqué d'étudier le vieillissement par décharges partielles, car il se fait en même temps que les autres types de vieillissement.

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. Par contre, l'énergie des décharges partielles est une grandeur beaucoup plus significative et serait à l'origine des dégradations causées aux matériaux [42].

L'énergie fournie par la source à l'objet d'essai siège de décharges partielles est:

$$W_t = \sum (U_i \cdot q_i) \quad (\text{III-5})$$

$$i = 1 \text{ à } N$$

Avec:

$W_t$ : Energie fournie par la source pendant le temps  $t$  durant lequel  $N$  décharges se sont produites dans l'objet d'essai.  
 $q_i$  et  $U_i$  respectivement la charge apparente de la  $i^{\text{ème}}$  décharge et la tension instantanée aux bornes de l'objet à l'instant même ou elle se produit.

#### B\*/ Dégradation des isolants solides sous l'action des décharges partielles

Les altérations que subissent les isolants sous

contraintes électriques se traduisent par des bouleversements profonds de la structure moléculaire (dépolymérisation, création de radicaux libres, de corps insaturés, réticulations, nouvelles polymérisations), accompagnés de l'apparition de produit à faible masse moléculaire: oxyde de carbone, hydrogène, hydrocarbures légers, monomères,...

#### C\*/ Dégradation du polyéthylène sous l'action des décharges partielles

L'utilisation du polyéthylène pour l'isolation des câbles de puissance est de plus en plus grande en raison de ses excellentes propriétés électriques et de l'efficacité de sa mise en oeuvre.

Cependant, la valeur du gradient techniquement utilisable est bien loin de sa tenue intrinsèque. Les raisons essentielles sont liées au vieillissement de l'isolation sous l'action du champ électrique. Il commence de préférence dans des homogénéités dues soit à la mise en oeuvre, soit au matériau lui même [43]. En effet, le phénomène primaire consiste dans la formation de radicaux libres qui, en se combinant avec des molécules gazeuses, donnent naissance à des produits stables et nocifs pouvant entraîner le claquage de l'isolant. D'autre part de nouvelles méthodes d'études et d'analyses ont montré que la dégradation causée par les décharges partielles a amené à une rupture de liaisons de la chaîne de carbone du polyéthylène et le dégagement de l'hydrogène au cours de vieillissement du matériau [42].

#### D\*/ Durée de vie:

Le vieillissement sous champ électrique ou, en d'autres termes, la rupture diélectrique à long terme, a été largement étudié.

Un très grand nombre de chercheurs et industriels ont établi depuis longtemps des relations de type  $L=f(V)$  sur des bases empiriques ou semi-empiriques, à partir d'essais de moyenne ou longue durée relatifs à des matériaux ou des isolations. En première approximation, les avis ont été longtemps partagés en deux formules suivantes [31,37]:

$$L = K \cdot V^{-n} \quad (\text{III-6})$$

$$L = A \cdot \exp(B \cdot V) \quad (\text{III-7})$$

Où:

L, V, K, n, A, B sont respectivement la durée de vie, la tension et des constantes.

### III-3.2 Vieillissement électrochimique

Engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique.

Le processus de vieillissement électrochimique a lieu surtout sous l'action d'une tension continue de longue durée d'application, ainsi qu'une tension alternative de faible fréquence.

Le courant de fuite circulant à travers le diélectrique a un caractère électrolytique, lié au transfert d'ions. Ces ions peuvent être métalliques ou pas [42]:

- les ions métalliques peuvent, après neutralisation, pénétrer dans le diélectrique et y créer souvent des chemins conducteurs;

- les ions non métalliques se déchargent au niveau des électrodes et peuvent former des substances actives se combinant avec le diélectrique.

Lors du processus de vieillissement électrochimique, la température du diélectrique augmente. Cette augmentation engendre non seulement une augmentation de la conductivité du matériau, mais aussi une activation des réactions chimiques qui sont la cause du vieillissement [42].

Pour retarder le vieillissement électrochimique, on utilise des "stabilisateurs", qui empêchent la formation d'acides.

Le vieillissement électrochimique est le plus souvent observé dans l'isolation à papier imprégné de diélectriques liquides chlorés [42].

DEUXIEME PARTIE  
ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX

## GENERALITE:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les essais effectués sur câble portant sur l'influence des vieillissements thermique et électrique sur les propriétés diélectriques du PRC ainsi que sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles. Nous avons exposé aussi la variation des propriétés diélectriques du polymère en fonction de la température. En plus, nous avons étudié la caractéristique du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension.

### VI-I PRESENTATION DU CABLE:

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.

#### IV-1.1 Propriétés du compound [44]:

##### A/ Propriétés physiques:

- densité à 23°C : 0.92 g/cm<sup>3</sup>.
- résistance à la rupture en traction : 180 kg/cm<sup>2</sup> (17.7MPa).
- allongement à la rupture : 500 %.
- degré de réticulation, extraction à la décaline : 12 % .
- température de fragilité : -90°C.

##### B/ Propriétés électriques:

- constante diélectrique à 50 Hz : 2.3.
- facteur de dissipation diélectrique à 50Hz :  $3 \cdot 10^{-4}$ .
- résistivité volumique en courant continu à 23°C:  $>10^{15} \Omega/\text{cm}$ .
- rigidité diélectrique courte durée : 22 kV/mm.

#### IV-1.2 Dimensions et caractéristiques du câble:

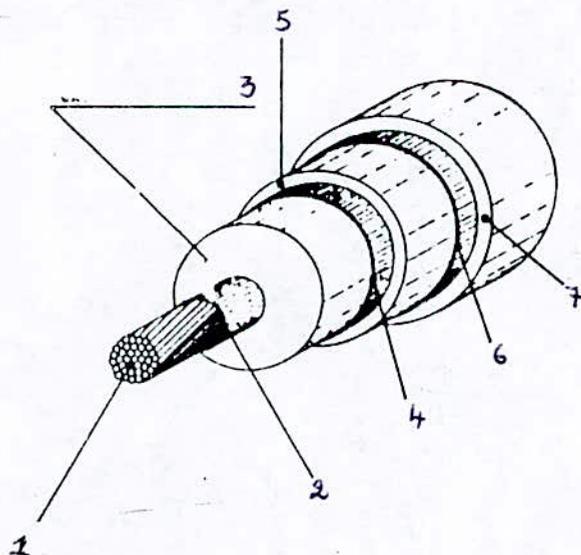
Le câble présenté les caractéristiques suivantes :

- câble à champ radial.
- tension nominale : U=30 kV.

- tension spécifiée :  $U = 18 \text{ kV}$ .
- section nominale de l'âme :  $120 \text{ mm}^2$ .
- diamètre de l'âme :  $12.7 \text{ mm}$ .
- nombre de brins : 35.
- diamètre d'un brin :  $2.15 \text{ mm}$ .
- épaisseur de l'isolant :  $8 \text{ mm}$ .
- température assignée maximale de l'âme en service nominale :  $90^\circ\text{C}$ .
- température assignée maximale de l'âme en régime de court-circuit :  $250^\circ\text{C}$  (durée maximale 5 s).
- champ maximal à la surface de l'âme :  $3.13 \text{ kV/mm}$ .

#### IV-1.3 Différents constituants du câble:

Nous avons présenté les différents constituants du câble à la figure (IV-1).



- 1-Âme 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  
isole au PRC.

#### IV-1.4 Utilisation:

Le câble est utilisé pour la distribution souterraine de l'énergie électrique.

#### IV-2 ESSAIS DE VIEILLISSEMENT THERMIQUE:

##### IV-2.1 Dispositifs expérimentaux:

###### A\*/ Mode opératoire:

Un échantillon de câble d'une longueur d'environ 12 m est soumis à des cycles de chauffage et de refroidissement.

Un cycle de vieillissement consiste à chauffer le câble à la température de 100°C pendant 8 heures et à le laisser refroidir naturellement pendant au moins 16 heures [45].

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 (100°C), qui est supérieure de 10°C à celle assignée maximale de l'enveloppe isolante.

Ce chauffage est réalisé grâce à un transformateur de marque VEB type ETK 63.1, 50Hz, 57kVA, 220/380V.

Ce transformateur alimente la spire en court-circuit formée, par le câble à ses deux extrémités par un accessoire en aluminium.

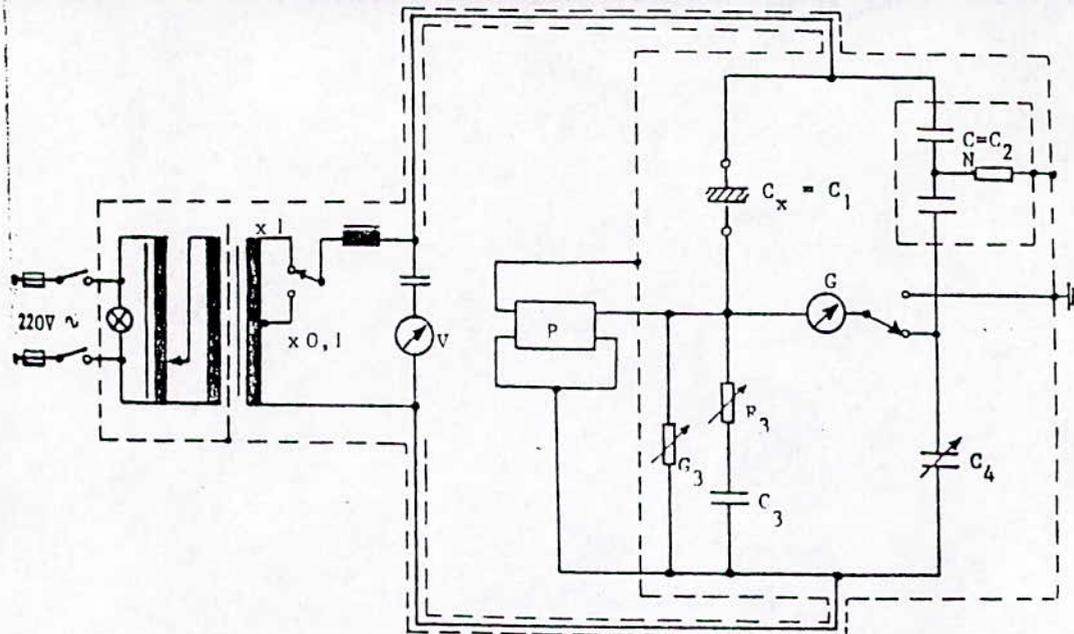
Au cours de nos essais, la tension d'essai est appliquée entre l'âme et l'écran métallique du câble.

Nous avons effectué 20 cycles de chauffages (à la température de 100°C) et de refroidissement.

###### B\*/ Mesure du facteur de pertes diélectriques et de la capacité :

Pour la mesure de facteur de pertes diélectriques et de la capacité, nous avons utilisé un pont de Schering TETTEX AG type 2801 [46] dont le schéma de principe est représenté à la figure (IV-2).

Connaissant la valeur de la capacité de l'isolant, on détermine la constante diélectrique.



### C\*/ Détermination de la résistivité transversale:

Pour la mesure de la Résistance d'isolement, nous avons utilisé un Mégohmmètre (TERALOG) type 6202.

La mesure se fait en appliquant une tension continue de 500 V entre âme et écran que nous maintenons pendant une durée suffisante comprise entre 1mn et 5mn selon les recommandations de la CEI 502.

La Résistivité transversale doit être calculée, en partant de la valeur mesurée de la Résistance d'isolement, par la formule suivante [47]:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R}{\ln \left( \frac{D}{d} \right)}$$

Avec:

$\rho$  : résistivité transversale en  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

R : résistance d'isolement mesurée en  $\Omega$ .

L : longueur du câble en cm.

D : diamètre extérieur du câble en cm.

d : diamètre intérieur de l'isolation en cm.

### D\*/ Mesure de la tension seuil d'apparition des décharges partielles:

Nous avons mesuré la tension seuil d'apparition des décharges partielles à l'aide d'un système de mesure type MSTE.

#### IV-2.2 Influence du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques du PRC:

##### A\*/ Influence du vieillissement thermique sur le facteur de pertes diélectriques :

Nous avons étudié la variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du nombre de cycles de vieillissement.

Les mesures ont été effectuées à plusieurs températures: 20, 80, 100, 120°C et pour des niveaux de tension d'essai compris entre 9 et 36 kV.

Nous présentons les résultats obtenus par niveau de tension et de températures donnés (Fig.IV-3).

Nous remarquons que les caractéristiques du facteur de pertes diélectriques en fonction du nombre de cycles de vieillissement présentent des pics de relaxation (3pics pour la température de 20°C).

Pour la plupart des polymères semi-cristallins, on note en général la présence de 4 pics qu'on a coutume d'appeler  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ .

Ces pics, dont certains peuvent être absents pour plusieurs types de polyoléfines, sont dus à des mouvements (rotations, vibrations, translations) des segments plus ou moins longs des chaînes principales et latérales [49].

Ainsi, le pic  $\alpha$  peut être attribué aux mouvements de la chaîne dans la phase cristalline.

Il apparaît à une température d'environ 100-150°C Selon les conditions opérationnelles et la nature du matériau étudié [48].

Le pic  $\beta$  est associé à la phase amorphe, il apparaît entre (-50 et 50°C) est dû à des mouvements des chaînes latérales et peut entraîner, dans certains cas, des portions importantes (de 50 à 100 carbonés) de la chaîne principale.

Il correspondrait à la transition vitreuse [48,49].

le pic  $\gamma$  apparaît vers 150K serait dû à la rotation de segments latéraux dans les régions désordonnés ou à des défauts moléculaires dans les lamelles des monocristaux (cas du polyéthylène).

Enfin le pic  $\delta$  pourrait être dû au mouvement de rotation de groupe méthyle dans la phase cristalline et amorphe.

B' / Influence du vieillissement thermique sur la résistivité transversale:

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

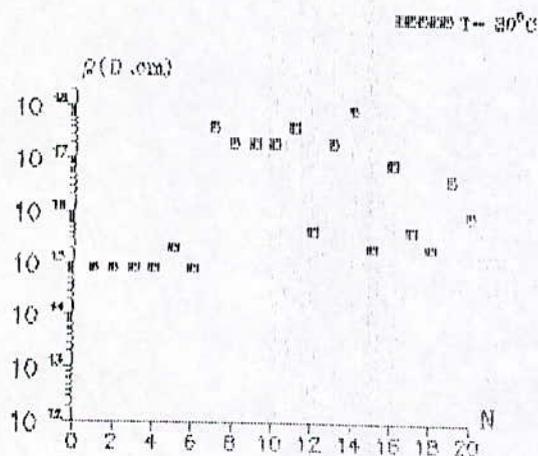


Figure -a-

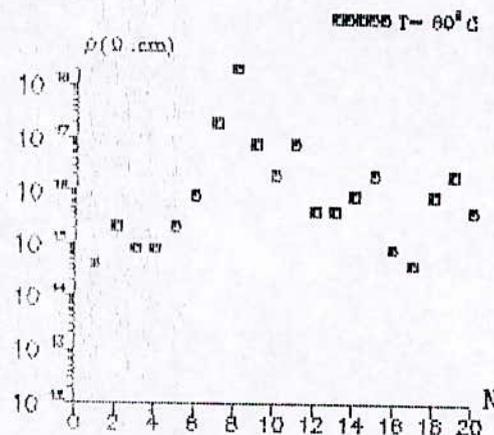


Figure -b-

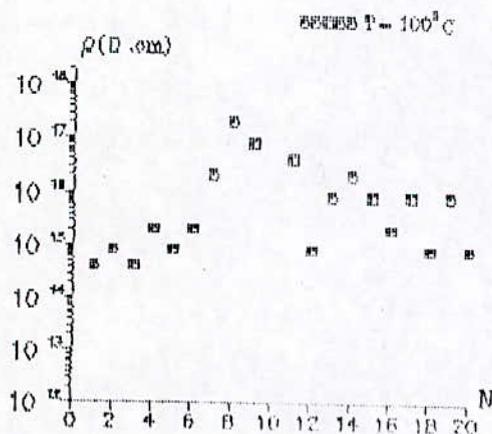


Figure -c-

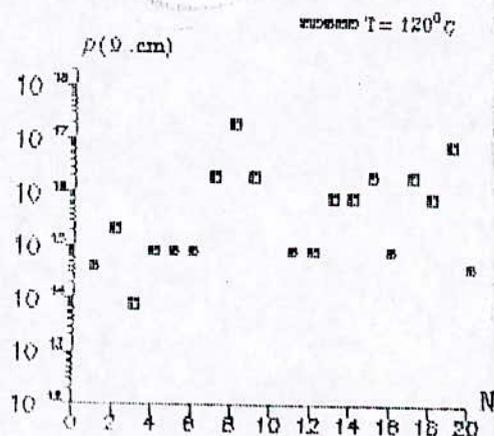


Figure -d-

Fig.IV-4 Variation de la résistivité transversale en fonction du nombre de cycles de vieillissement.

Nous remarquons que pour une température donnée, la résistivité transversale est pratiquement constante en fonction du nombre de cycles de vieillissement (Fig.IV-4).

C\*/ Influence du vieillissement thermique sur la constante diélectrique:

Après chaque cycle de chauffage et de refroidissement, nous avons mesuré la capacité de l'isolant à différentes températures (20, 80, 100, 120°C) et pour des niveaux de tension compris entre 9 et 36 kV.

Nous présentons les résultats obtenus par niveaux de tensions et de températures donnés (Fig.IV-5).

Nous remarquons que pour chaque température, la constante diélectrique diminue légèrement en fonction du nombre de cycles de vieillissement.

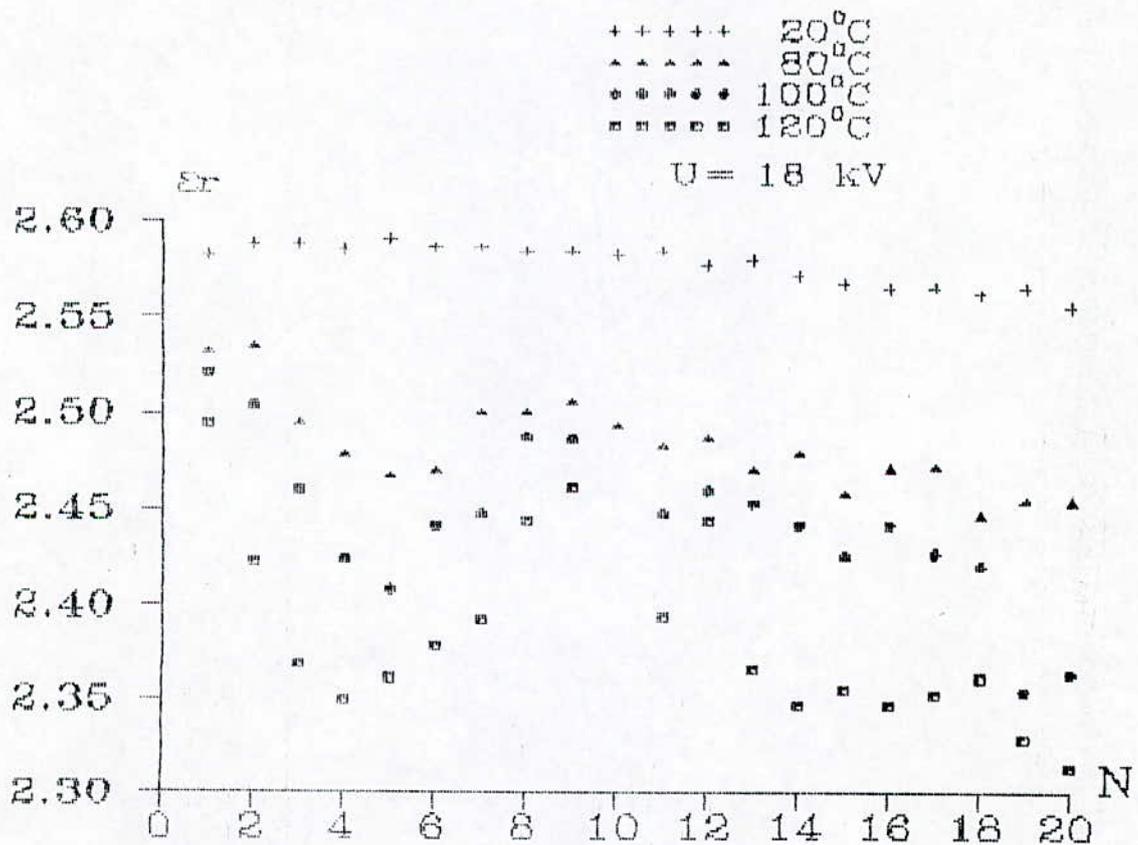


Fig.IV-5 Variation de la constante diélectrique en fonction du nombre de cycles de vieillissement.

D°/ Influence du vieillissement thermique sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles :

Après chaque cycle de chauffage et de refroidissement, nous avons mesuré la tension seuil d'apparition des décharges partielles .

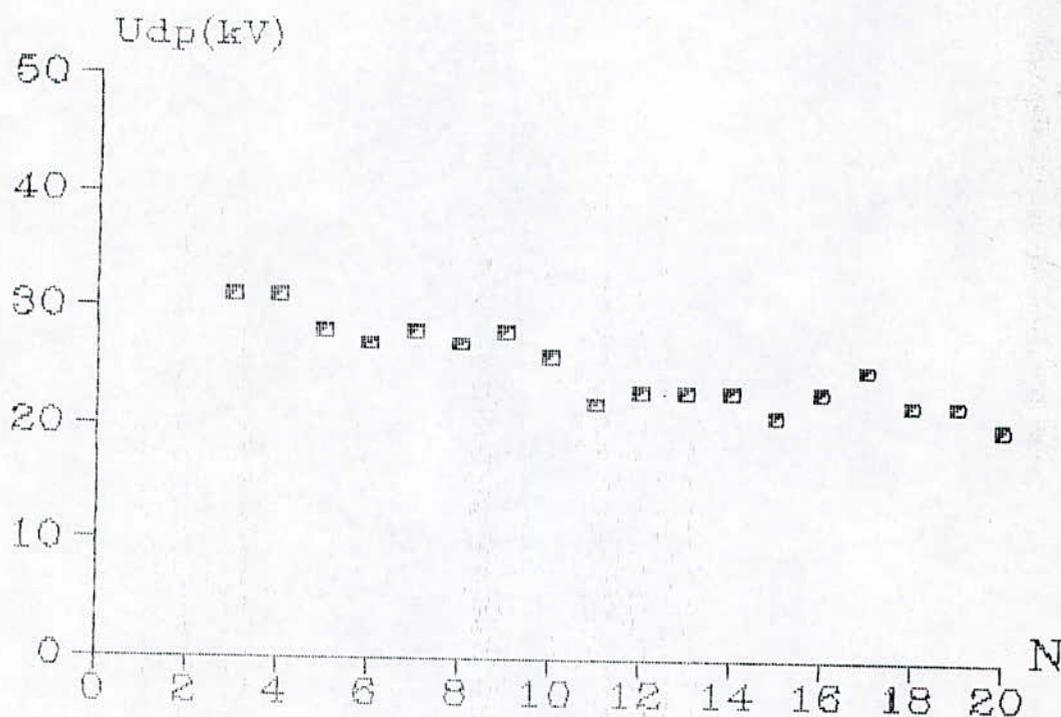


Fig.IV-6 Variation de la tension seuil d'apparition des décharges partielles en fonction du nombre de cycles de vieillissement.

nous remarquons que cette dernière diminue en fonction du nombre de cycles de vieillissement (Fig.IV-6).

#### IV-2.3 Influence de la température sur les propriétés diélectriques avant et après vieillissement:

Nous nous sommes intéressés à la variation du facteur de pertes diélectriques, de la constante diélectrique et de la résistivité transversale en fonction de la température avant vieillissement et après 20 cycles de chauffage (à 100°C) et de refroidissement.

A\*/ Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la températures:

\* Avant vieillissement:

Nous constatons que le facteur de pertes diélectriques diminue en fonction de la température. et après vieillissement (fig. IV-8)

D'après certains auteurs notamment R.FOURNIE[ ], ceci peut être expliqué par le fait que le polyéthylène présente plusieurs bandes d'absorption dues à la relaxation de dipôles ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ).

Notant que les temps de relaxations dépendent de la température.

\* Après vieillissement:

Nous remarquons que le facteur de pertes diélectriques augmente en fonction de la température. Notons aussi que le facteur de pertes diélectriques après 20 cycles de chauffage et de refroidissement est plus grand que celui d'avant vieillissement.

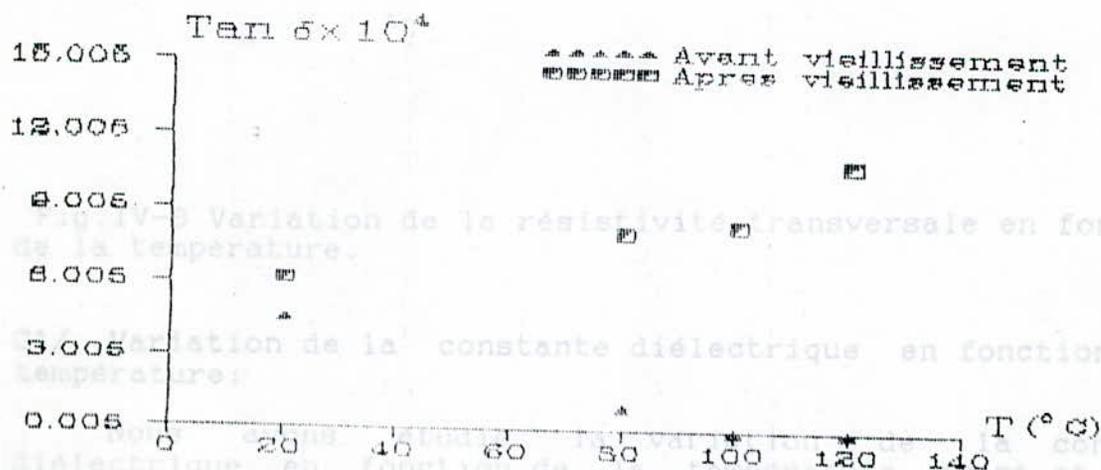


Fig. IV-7 Variation du facteur de pertes dielectriques en fonction de la température.

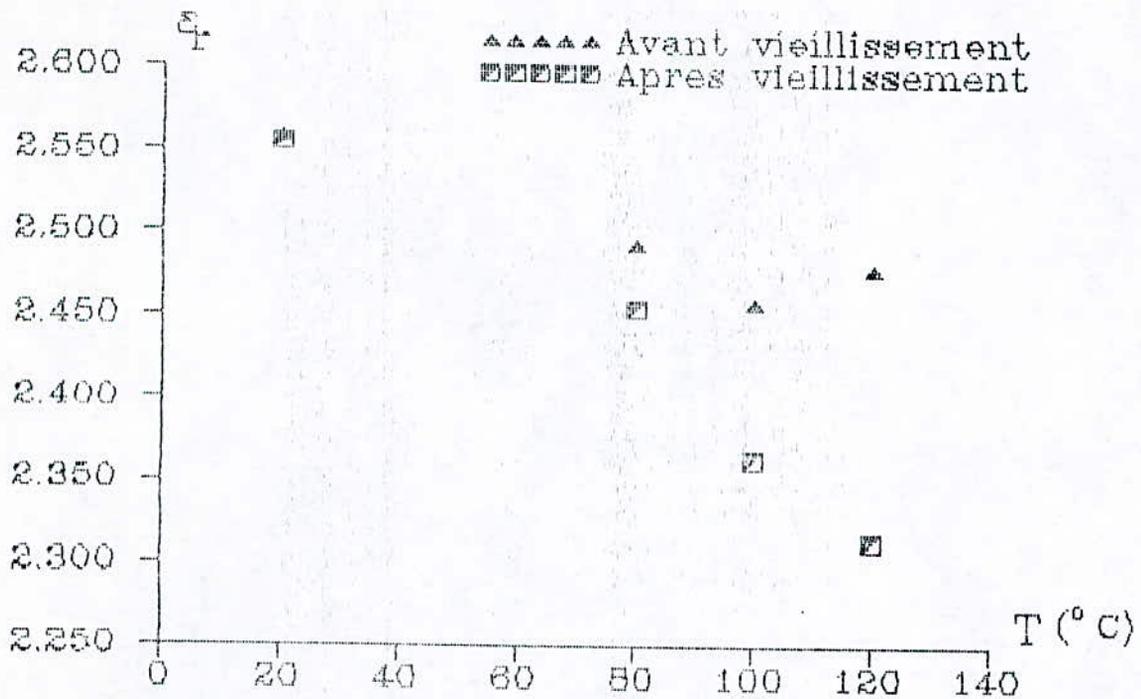


Fig.IV-9 Variation de la constante diélectrique en fonction de la température.

Nous remarquons que la constante diélectrique diminue en fonction de la température avant et après vieillissement (Fig. IV-9).

Notons que la permittivité relative avant vieillissement est supérieure à celle mesurée après 20 cycles de chauffage et de refroidissement.

#### IV-2.4 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension:

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

\* Essais avant vieillissement:

Nous constatons que pour la température de 20°C, le facteur de pertes diélectriques augmente en fonction de la tension, alors que pour la température de 80°C il est pratiquement constant.

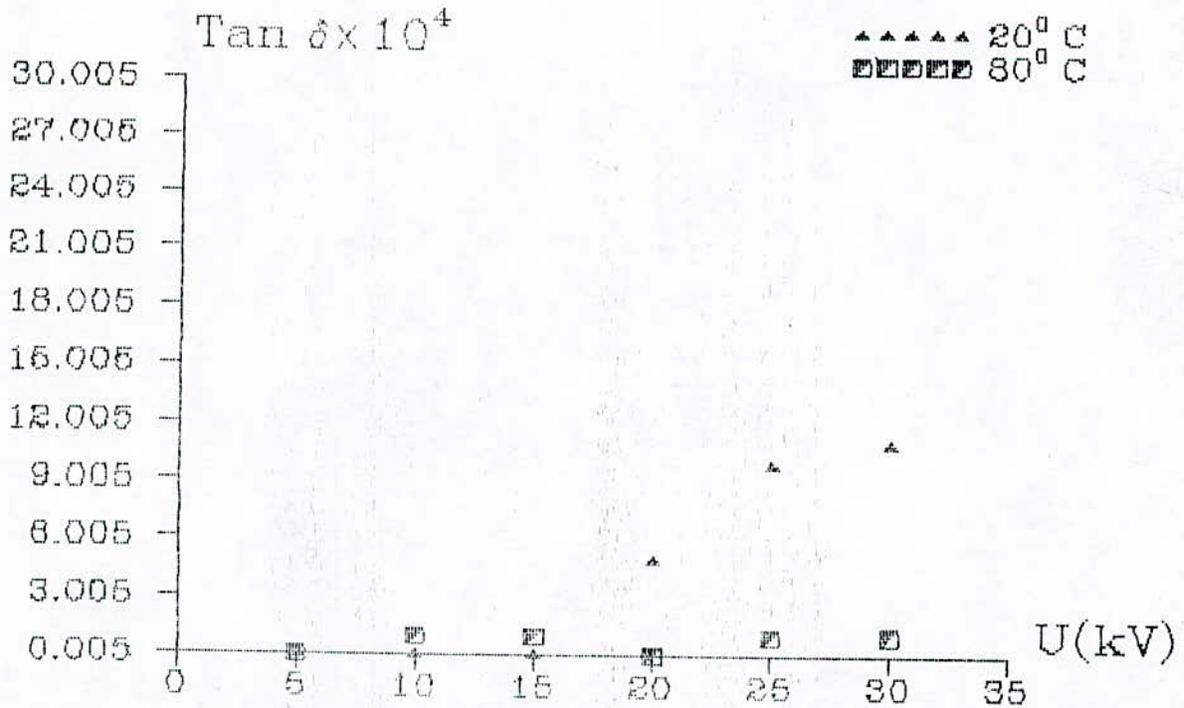


Fig.IV-10 -a- Variation du facteur de pertes dielectriques en fonction de la tension avant vieillissement.

\* Essais après vieillissement:

Après 20 cycles de chauffage et de refroidissement, nous avons également étudié la variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension et nous avons constaté que:

- le facteur de pertes diélectriques augmente en fonction

de la tension jusqu'à atteindre un maximum puis il diminue;  
- le facteur de pertes diélectriques est plus grand pour la température de 80°C;

- le facteur de pertes diélectriques après 20 cycles de chauffage et de refroidissement est supérieur à celui d'avant vieillissement.

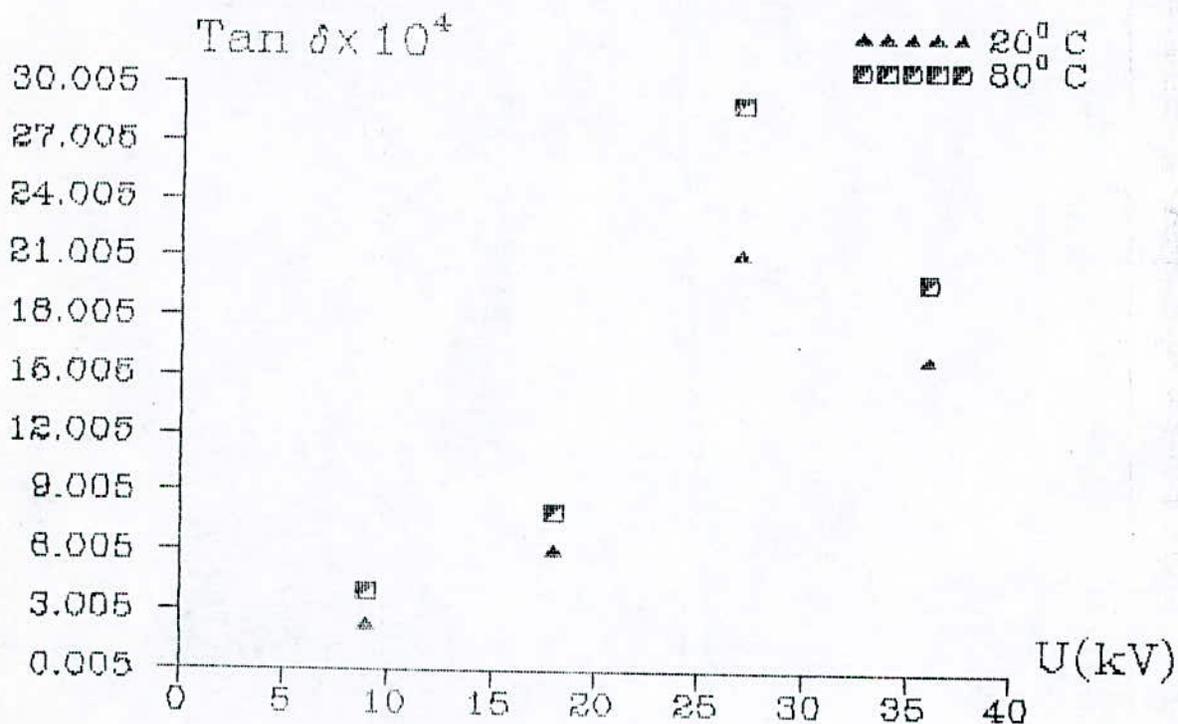


Fig.IV-10-b- Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension après vieillissement.

#### IV-3 ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ELECTRIQUE:

##### IV-3.1 Mode opératoire:

Le câble présente les mêmes caractéristiques que celui utilisé pour l'essai de vieillissement thermique.

Nous avons exposé un échantillon de câble d'une longueur de 12 m pendant environ 770 heures à un vieillissement électrique sous une tension de 36 kV soit deux fois sa tension de service, appliquée entre âme et écran métallique.

Notre échantillon a été muni à chacune de ses extrémités d'un déflecteur, afin d'éviter la concentration du champ électrique au niveau de l'écran [50].

Après environ toutes les 120 heures et pour la température ambiante, nous avons mesuré:

- le facteur de pertes diélectriques et la capacité de l'isolant pour différents niveaux de tension;
- la résistivité transversale;
- la tension seuil d'apparition des décharges partielles.

#### IV-3.2 Influence du vieillissement électrique sur le facteur de pertes diélectriques :

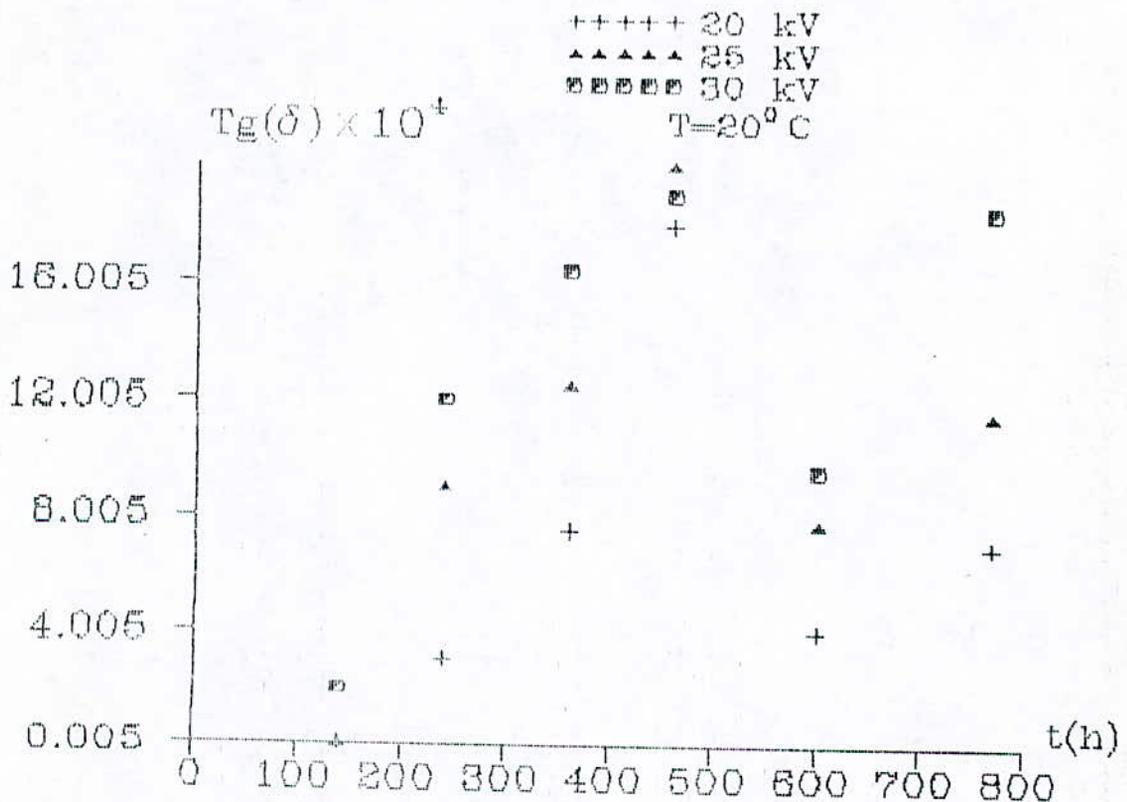


Fig.IV-12 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du nombre d'heures de vieillissement.

Nous avons étudié la variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du nombre d'heures de vieillissement, pour la température ambiante et pour différentes valeurs de la tension (20, 25 et 30 kV).

Les résultats obtenus sont représentés à la figure (IV11).

Nous remarquons, comme pour le cas d'un vieillissement thermique, que la caractéristique du facteur de pertes diélectriques en fonction du nombre d'heures présente un pic de relaxation

#### IV-3.4 Influence du vieillissement électrique sur la résistivité transversale:

Après 770 heures de vieillissement électrique et pour une fréquence de mesure de 120 heures environ, nous avons remarqué que la résistivité transversale reste pratiquement constante (Fig. IV-12).

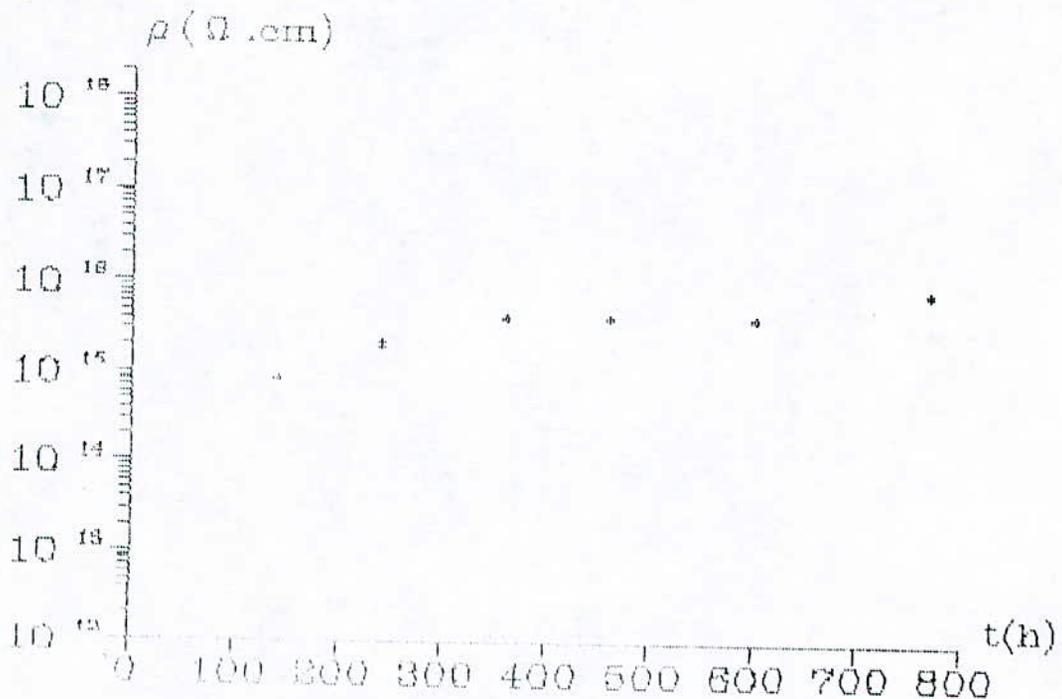


Fig. IV-12 Variation de la résistivité transversale en fonction du nombre d'heures de vieillissement.

#### IV-3.5 Influence du vieillissement électrique sur la constante diélectrique:

Nous avons étudié la variation de la constante diélectrique du matériau en fonction du nombre d'heures de vieillissement, à température ambiante et pour  $U=18$  kV.

Nous constatons que la permittivité relative reste pratiquement constante en fonction du nombre d'heures (Fig.IV-13).

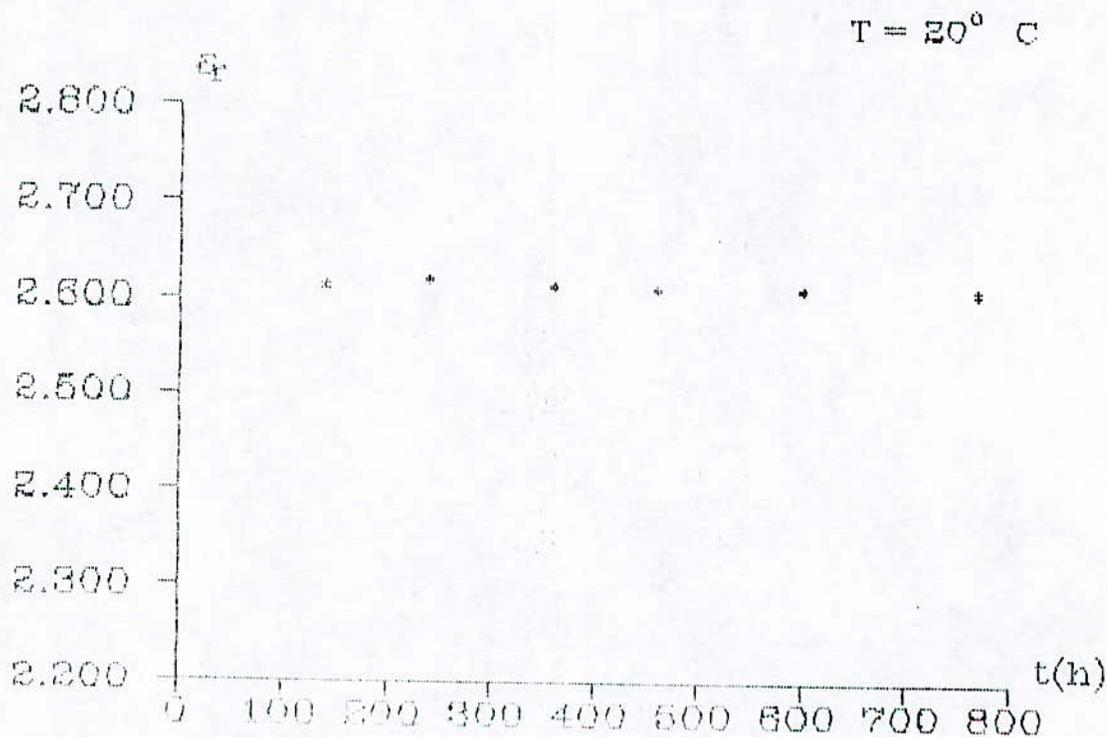


Fig.IV-13 Variation de la constante diélectrique en fonction du nombre d'heures de vieillissement.

#### IV-3.6 Influence du vieillissement électrique sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles:

Nous avons essayé d'étudier l'influence du vieillissement électrique sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles, cela n'a pas été possible par manque de moyens.

Mais notons que pendant 770 heures de vieillissement, la tension seuil d'apparition des décharges partielles était toujours supérieure à 45 kV.

#### IV-3.7 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension avant et après vieillissement:

Nous nous sommes intéressés à la variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension avant et après 770 heures de vieillissement.

Nous remarquons que le facteur de pertes diélectriques avant et après vieillissement augmente en fonction de la tension (Fig.IV-14).

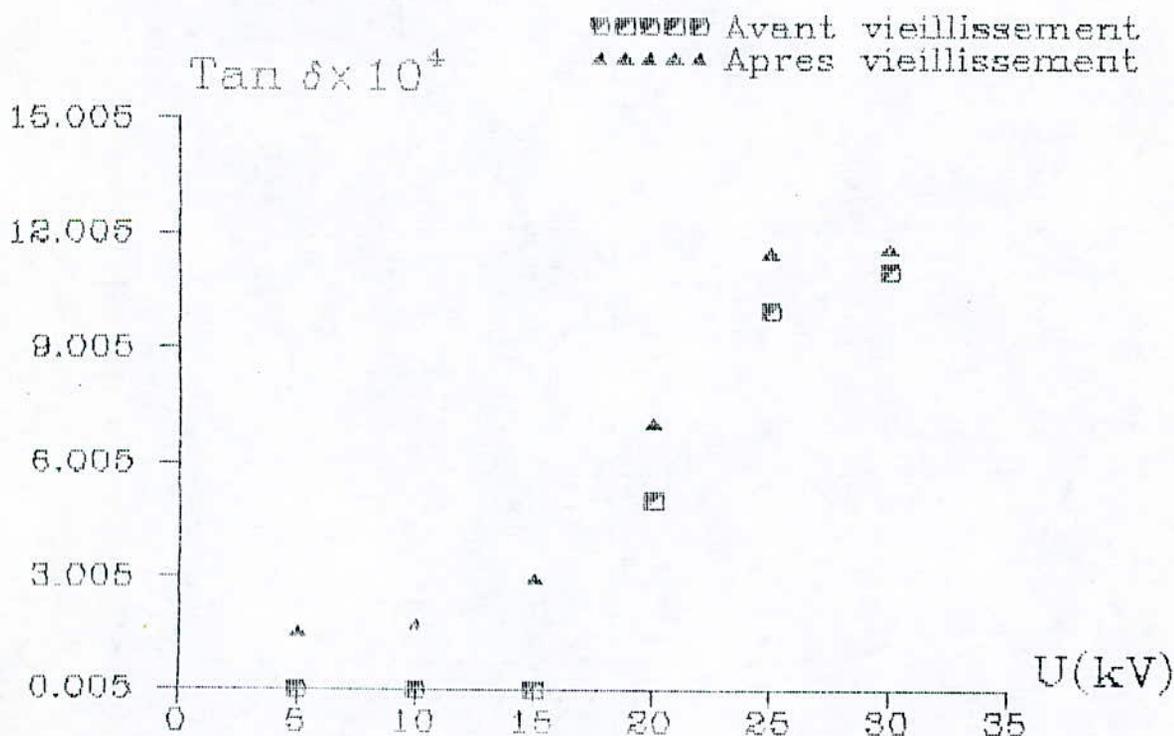


Fig.IV-14 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension avant et après vieillissement.

CONCLUSION

## CONCLUSION:

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence des vieillissements thermique et électrique, sur les propriétés diélectriques, ainsi que sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles du polyéthylène réticulé chimiquement.

Nous avons également étudié l'influence de la température sur les principales propriétés diélectriques ( $\tan\delta, \rho, \epsilon_r$ ), ainsi que sur la variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension avant et après vieillissement.

Le vieillissement thermique que nous avons considéré consiste à soumettre le matériau à une seule contrainte qui est la contrainte thermique.

D'autre part, le vieillissement électrique consiste à faire subir à l'isolant la contrainte du champ électrique. En service, le matériau est soumis à l'action combinée des deux contraintes citées ci-dessus.

Nos essais ont été effectués sur câble et faits conformément aux normes en vigueur.

D'après nos résultats, pour un vieillissement thermique à la température de  $100^\circ\text{C}$ , nous avons constaté l'apparition des pics de relaxations dans la variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du nombre de cycles de chauffage et de refroidissement et cela pour plusieurs niveaux de tension et pour différentes températures de mesure.

Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux trouvés dans la littérature.

Nous avons aussi constaté une légère diminution de la permittivité relative sous l'action de la contrainte thermique, tandis que la résistivité transversale est restée pratiquement constante.

Par ailleurs, nous avons obtenu une diminution progressive de la tension seuil d'apparition des décharges partielles en fonction du nombre de cycles de vieillissement.

Il est à noter que, pour un vieillissement thermique à la température de  $100^\circ\text{C}$ , les propriétés diélectriques avant vieillissement sont meilleures que celles obtenues après vieillissement.

Pour ce qui est du vieillissement électrique, nous avons remarqué l'apparition d'un seul pic de relaxation pour la variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du nombre d'heures de vieillissement, par contre la constante diélectrique et la résistivité transversale sont pratiquement constantes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: J.VERDU:  
Vieillissement des plastiques, Afnor technique.
- [2]: A.SERGENT:  
Contribution à l'étude du vieillissement d'isolations solides soumises aux décharges partielles, Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle 22 Juin 1978.
- [3]: R.FOURNIE:  
Les isolants en électrotechnique: Essais; mécanismes de dégradation; applications industrielles, édition EYROLLES 1990.
- [4]: J.N.DEMAY et J.C.BOBO:  
Câbles haute tension au polyéthylène: Matériaux pour câbles haute tension à isolation polyéthylène ou polyéthylène réticulé chimiquement, R.G.E N°9 Septembre 1976.
- [5]: M.J.SLOSIAR:  
Matériaux électrotechniques 1965-1966 ENP d'Alger.
- [6]: A.M.MERAD:  
Etude de la propagation des streamers aux interfaces liquides isolants/polymères sous tension alternatives 50Hz, Projet de fin d'études ENP d'Alger, 1993.
- [7]: P.ROBERT:  
Matériaux de l'électrotechnique, édition GEORGI 1982.
- [8]: M.ACHOUR et M.HASNI:  
Etude de la conception d'un câble de 30 kV isolé au PRS, Projet de fin d'études ENP d'Alger, Juin 1991.
- [9]: J.C.DUBOIS:  
Les propriétés diélectriques des polymères: Les polymères organiques utilisables à températures élevées, Colloque, organisé par l'Institut Français du Pétrole 17-19 Novembre 1982.
- [10]: J.P.TROTIGNON:  
Précis des matières plastiques: Structure, propriétés, mise en oeuvre et normalisation, édition NATHAN 1982.
- [11]: R.FOURNIE:  
Les isolants en électrotechniques: Concepts et théories, édition EYROLLES 1986.
- [12]: J.F.MAY et G.VALLET:  
Contributions à l'étude des propriétés électriques de certains types de polymères à l'état solide, R.G.E Avril 1972.
- [13]: N.KHALECHE:  
Rupture par arborescence électrique du PVC vieilli thermiquement, Thèse de Magister ENP d'Alger, 1993.
- [14]: M.CHEBREK et M.HAMIA:  
Conception et réalisation d'un câble de 30 kV isolé à l'EPDM, Projet de fin d'études ENP d'Alger, 1983.
- [15]: J.L.PARPAL et E.PINET:  
Rapport préliminaire sur l'étude de la biréfringence et de l'électroluminescence du polyéthylène, IREQ 11 Jan 1990.
- [16]: W.D.SCHUPPE:  
Méthodes analytiques et physiques sensibles pour diagnostiquer les modifications d'état dans des plaques

- ou des isolations de câbles en polyoléfines.
- [17]: T.TANAKA et T.OKAMOTO:  
Une méthode avancée de mesures des décharges partielles sensible à la forme d'une vacuole, CIGRE 1988, Gr 15.02.
- [18]: CHRISTIAN J.MAYOUX:  
Partial discharge phenomena and the effect of their constituents on polyethylene, IEEE transaction electrical insulation Dec 1976.
- [19]: A.BUI et C.MAYOUX:  
Le phénomène de la décharge partielle et son action sur le polyéthylène
- [20]: J.PERRET, Y.LEGALL et P.RECOUPE:  
Contribution à l'étude des mécanismes de formation et de propagation des arborescences dans le polyéthylène pour câbles à haute tension, R.G.E, tome 85, n°9 Septembre 1976.
- [21]: CEI Publication 270:  
Mesure de décharges partielles, deuxième édition, 1981.
- [22]: A.BEROUAL:  
Cours de Matériaux diélectriques et haute tension, 1<sup>ère</sup> année de poste graduation, ENP d'Alger, 1990-1991.
- [23]: E.KUFFEL et W.S.ZAENGL:  
High voltage engineering, Pergamon press, Oxford, 1984.
- [24]: M.AGUET et IANOZ:  
Haute tension, presses polytechnique romande, 1987.
- [25]: ROBINSON INSTRUMENTS:  
Les décharges partielles.
- [26]: W.S.ZAENGLI, P.OSVATH et H.J.WEBER:  
Correlation entre la largeur de bande des détecteurs de décharges partielles et leurs erreurs d'intégrations, RGE, N°4, Avril 1989.
- [27]: T.PRAEHAUSER:  
Measurement of partial discharges in high voltage apparatus with the balanced circuit, HAEFELY  
Publication, translated from bulletin A.S.E, 1973.
- [28]: P.OSVATH, W.ZAENGL et H.J.WEBER:  
La mesure des décharges partielles, problèmes de mesure et un système de mesure flexible qui permet de les résoudre.
- [29]: N.ROUHA:  
Etude et modélisation de la dégradation des polymères par le phénomène d'arborescence, Thèse de Magister 1994, ENP d'Alger.
- [30]: J.PERRET, Y.LEGALL et P.RECOUPE:  
Câbles haute tension au polyéthylène, contribution à l'étude des mécanismes de formation et de propagation des arborescences dans le polyéthylène pour câbles à haute tension, R.G.E, tome 85, N°9, Septembre 1976.
- [31]: S.HIRABAYASHI, C.W.REED et J.ISLETBAK:  
Comportement sous contraintes multiples de Matériaux isolants et de structures d'isolation.
- [32]: M.NEDJAR, A.BOUBAKEUR et KHAÏLI:  
Etude des propriétés électriques du polychlorure de vinyle avant et après un vieillissement thermique, journal of technologie, 2<sup>ème</sup> colloque sur l'electrotechnique et l'automatique, CEA'94, Algiers,

- Novembre 1994.
- [33]: A. BOUBAKEUR, M. NEDJAR et R. KHAILI:  
Etude thermique du PVC utilisé dans les câbles de haute tension, 3<sup>ème</sup> journées Maghrébines des sciences des Matériaux, Alger, Avril 1992.
- [34]: M.M. EPSTEIN, B.S. BERNSTEIN et M.T. SHAW:  
Vieillessement et défaillance dans les Matériaux électriques, CIGRE, session de 1982, Gr 15-01, 1-9 Septembre.
- [35]: 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.
- [36]: C. STEVENSEN, A.G. DAY et B. FALLOU:  
Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des Matériaux isolants, CIGRE, session de 1982, 1-9 Septembre.
- [37]: B. FALLOU:  
Comportements spécifiques des Matériaux isolants solides soumis à diverses contraintes (chaleur, champ électrique, radiations), résumé des connaissances actuelles et normalisation, R.G.E, Octobre 1985.
- [38]: P. BELLOC et B. FALLOU:  
Etude du vieillissement thermique des Matériaux utilisés dans la construction électrique, R.G.E, mars 1970.
- [39]: CEI 216-1:  
Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique, des indices de températures et des profils d'endurance thermiques, édition 1974.
- [40]: C.T. JACOBSEN, R. ATTERMO et B. DELLYBY:  
Expérience sur les câbles à haute tension isolés au PRC réticulé à sec.
- [41]: R. LACOSTE, BUI. AI et C. MAYOUX:  
Dégradation progressive des isolants solides sous l'action des décharges partielles, session de perfectionnement E4 sur l'isolation électrique, Ecole Supérieure d'Electricité, 8-12 Avril 1974.
- [42]: A. BOUBAKEUR:  
Cours de haute tension, 4<sup>ème</sup> année, ENP d'Alger, 1993-1994.
- [43]: M. EBERHARDT, W. MOSCH, F. PETZOLD, D. FLUGGE et P. KULLIG:  
Résistance du polyéthylène aux arborescences et leur détection CIGRE, Gr 15-01.
- [44]: B.P. POLYETHYLENE:  
Wire and cable compounds, technigram WF 14/1F Décembre 1984.
- [45]: A. BOUBAKEUR, M. NEDJAR et R. KHAILI:  
Influence of thermal ageing on the properties of PVC, seconde middle east power system conference, MEPCON'92.
- [46]: 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.
- [47]: CEI 502:  
Câbles de transport d'énergie isolés par diélectriques

- massifs extrudés pour des tensions assignées de 1kV à 30 kV, troisième édition, 1983.
- [48]: J.F.MAY:  
Technologie et transformation des matières plastiques, cours de J.F.MAY, 3<sup>ème</sup> fascicule, université de saint-Etienne.
- [49]: J.F.MAY et G.VALLET:  
Contribution à l'étude des propriétés électriques de certains types de polymères à l'état solide, R.G.E, tome 81, N°4, Avril 1972.
- [50]: F.H.KREUGER, P.A.C.BENTVELSEN:  
Câble à isolation synthétique avec écran extérieur à Résistance non linéaire, CIGRE, rapport N°2, Gr 21, 1978.[40]

TABLE DES MATIERES

# TABLE DES MATIERES

Page

INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.	
CHAPITRE I: UTILISATION DES POLYMERES DANS LA HAUTE TENSION.	
GENERALITES.....	3
I-1 CARACTERISTIQUES GENERALES DES CABLES HT ET THT A ISOLATION SYNTHETIQUE.....	3
I-2 ORIGINE DES POLYMERES.....	3
A/ Les polymères naturels.....	3
B/ Les polymères synthétiques.....	3
I-3 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES POLYMERES.....	4
I-3-1 Structure chimique et morphologie.....	4
I-3-2 Polymérisation.....	4
I-3-3 Structure des polymères.....	4
I-4 COMPORTEMENT CHIMIQUE DES POLYMERES.....	6
I-5 PROPRIETES MECANIQUES DES POLYMERES.....	6
I-6 PROPRIETES ELECTRIQUES DES POLYMERES.....	6
I-6-1 Polarisation et constante diélectrique.....	6
A/ Polarisation électronique.....	7
B/ Polarisation atomique.....	8
C*/ Polarisation d'orientation.....	8
D*/ Polarisation par charge d'espace.....	8
I-6-2 Rigidité diélectrique.....	8
I-6-3 Propriétés superficielles.....	9
I-6-4 Résistivité transversale.....	9
I-7 LES POLYMERES UTILISES POUR L'ISOLATION DES CABLES DE HAUTE TENSION.....	9
I-7-1 Le polychlorure de vinyle pvc.....	9
* Propriétés physico-chimiques et électriques du PVC.....	10
I-7-2 L'éthylène propylène diène monomère EPDM.....	10
* Propriétés physico-chimiques et électriques de l'EPDM.....	11
I-7-3 Le polyéthylène PE.....	11
Généralités.....	11
A/ Structure et morphologie.....	11
B/ Procédé de polymérisation.....	12
C/ Les polyéthylènes PEBD et PEHD.....	12

polyéthylène PE.....	13
E°/ Procédé de réticulation.....	14
I-8 LE POLYETHYLENE RETICULE CHIMIQUEMENT.....	14
A°/ Fabrication.....	14
B°/ Propriétés du PRC.....	16

## CHAPITRE II: DECHARGES PARTIELLES.

INTRODUCTION.....	18
II-1 ORIGINE DES DECHARGES PARTIELLES.....	18
II-1.1 Décharges externes.....	18
II-1.2 Décharges superficielles.....	19
II-1.3 Décharges internes.....	20
II-2 LE PHENOMENE DE DECHARGES PARTIELLES DANS LES ISOLANTS ELECTRIQUES.....	20
II-3 CIRCUIT EQUIVALENT D'UN MATERIAU ISOLANT AVEC DECHARGE PARTIELLE.....	21
II-4 MESURE DES DECHARGES PARTIELLES.....	22
II-4.1 Pourquoi detecter et mesurer les décharges partielles ?.....	22
II-4.2 Comment mesurer les décharges partielles?.....	23
II-4.3 Montages de base.....	23
A°/ Définition.....	23
B°/ Montages.....	24
II-4.4 Considérations pratiques.....	25
A°/ Perturbations.....	25
* Sources de perturbations.....	25
* Réduction de la perturbation.....	25
** Cage de Faraday.....	26
** Système de mesure en pont.....	26
II-4.5 Autres quantités caractérisant les décharges partielles.....	27
II-5 ARBORESCENCES.....	27
II-5.1 Définition et origine des arborescences.....	27
II-5.2 Classification des arborescences.....	28
A°/ Arborescences électriques.....	28
* Généralités.....	28
* Formation et propagation des arborescences électriques.....	28
B°/ Arborescences électrochimiques.....	29
* Généralités.....	29
* Formation et propagation des arborescences électrochimiques.....	30
C°/ Arborescences chimiques.....	30
* Généralités.....	30
* Formation et propagation des arborescences chimiques.....	30

## CHAPITRE III: VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS SOLIDES/POLYMERES.

## CHAPITRE III: VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS SOLIDES/POLYMERES.

GENERALITES.....	32
III-1 VIEILLISSEMENT.....	32
III-2 VIEILLISSEMENT THERMIQUE.....	32
III-2.1 Le vieillissement thermique des isolants solides /polymères.....	33
III-2.2 Processus physiques intervenants dans la dégradation thermique des polymères.....	33
III-2.3 Processus chimiques intervenants dans la dégradation thermique des polymères.....	33
A°/ Oxydation.....	33
B°/ Réticulation.....	34
C°/ Réactions de dépolymérisation.....	34
D°/ Autres mécanismes.....	34
III-2.4 Endurance thermique des isolants solides \ polymères.....	34
A°/ Position du problème.....	34
B°/ Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides..	36
C°/ Essais d'endurance thermique des isolants solides.....	36
D°/ Durée de vie.....	37
E°/ Choix des températures de vieillissement....	39
F°/ Vitesse de dégradation.....	39
III-2.5 Influence du vieillissement thermique sur les propriétés des polymères.....	40
III-3 VIEILLISSEMENT ELECTRIQUE ET ELECTROCHIMIQUE.....	40
III-3.1 Vieillissement électrique (vieillissement par décharges partielles).....	40
A°/ Etude du vieillissement par décharges partielles.....	41
B°/ Dégradation des isolants solides sous l'action des décharges partielles.....	41
C°/ Dégradation du polyéthylène sous l'action des décharges partielles.....	42
D°/ Durée de vie.....	42
III-3.2 Vieillissement électrochimique.....	43
DEUXIEME PARTIE: ETUDE EXPERIMENTALE	
CHAPITRE IV: RESULTATS EXPERIMENTAUX	
GENERALITE.....	44
VI-I PRESENTATION DU CABLE.....	44
IV-1.1 Propriétés du compound.....	44
A/ Propriétés physiques.....	44
B/ Propriétés électriques.....	44

IV-1.2	Dimensions et caractéristiques du câble.....	44
IV-1.3	Differents constituants du cable.....	45
IV-1.4	Utilisation.....	46
IV-2	ESSAIS DE VIEILLISSEMENT THERMIQUE.....	46
IV-2.1	Dispositifs experimentaux.....	46
	A°/ Mode operatoire.....	46
	B°/ Mesure du facteur de pertes diélectriques et de la capacité .....	46
	C°/ Détermination de la résistivité transversale.....	47
	D°/ Mesure de la tension seuil d'apparition des décharges partielles.....	47
IV-2.2	Influence du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques du PRC.....	48
	A/ Influence du vieillissement thermique le facteur de pertes diélectriques.....	48
	B°/ Influence du vieillissement thermique sur la résistivité transversale.....	51
IV-2.3	Influence de la température sur les propriétés diélectriques avant et après vieillissement.....	53
	A°/ Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la températures.....	54
	* Avant vieillissement.....	54
	* Après vieillissement.....	54
	B°/ Variation de la résistivité transversale en fonction de la température.....	55
	C°/ Variation de la constante diélectrique en fonction de la température.....	55
IV-2.4	Variation du facteur de pertes dielectriques en fonction de la tension.....	56
	* Essais avant vieillissement.....	57
	* Essais apres vieillissement.....	57
IV-3	ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ELECTRIQUE.....	58
IV-3.1	Mode opératoire.....	58
IV-3.2	Influence du vieillissement électrique sur le facteur de pertes diélectriques .....	59
IV-3.4	Influence du vieillissement électrique sur la résistivité transversale.....	60
IV-3.5	Influence du vieillissement électrique sur la constante diélectrique.....	61
IV-3.6	Influence du vieillissement électrique sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles.....	62
IV 3.7	Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension avant et après vieillissement.....	62
	CONCLUSION.....	63
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	65
	TABLE DES MATIERES.....	69