

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique  
*Ecole nationale Polytechnique*



وزارة التعليم العالي  
و البحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département: Génie Electrique  
Option : Electrotechnique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

# CONTRIBUTION À LA MODELISATION DES PROPRIETES ELECTRIQUES DES MATERIAUX POLYMERES UTILISES DANS L'ISOLATION DES CABLES HAUTE ET MOYENNE TENSION

**Proposé et dirigé par :**

**Pr A. MEKHALDI**

**Etudié par :**

**M<sup>elle</sup> CHAIBI SALIHA**

**PROMOTION– 2007 -**

Ecole Nationale Polytechnique, 10, Ave Hassan Badi, El-Harrach, Algérie

### **Abstract :**

The aim of this work is to study the modelling of electrical properties of materials used as electrical insulation of medium and high voltage cables. We determinate the electrical and the thermal stresses with regard of thermal ageing and temperature.

The obtained results by modelling are compared with those obtained experimentally by others in the high voltage laboratory of ENP. A concordance is found between them, particularly concerning their evolution.

**Index terms:** modelling-theory - electrical and thermal stresses - thermal ageing - electrical properties.

### **Résumé :**

Notre étude porte sur la modélisation des propriétés électriques des matériaux utilisés dans l'isolation des câbles haute et moyenne tension. Nous avons déterminé les contraintes électrique et thermique en fonction du rayon du câble ainsi que les variations des propriétés électriques en fonction du temps de vieillissement et en fonction de la température. Les résultats que nous avons obtenus par modélisation ont été comparés à ceux déjà obtenus expérimentalement au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP. Une concordance a été trouvée entre eux, en particulier concernant leur évolution.

**Mots clés :** modélisation – théorique – contraintes électrique et thermique – vieillissement thermique – propriétés électriques.

### **ملخص**

تتناول هذه الأطروحة دراسة نماذج للخصائص الكهربائية للمواد المستعملة كعوازل في الكوابل الكهربائية ذات التوتر المتوسط و العالي. من خلال هذه الدراسة عينا المؤثرات الكهربائية و الحرارية كما عينا تغيرات الخصائص المدروسة بدلالة تغيرات مدة التزمين وتغيرات درجة الحرارة المستعملة. النتائج المحصل عليها نظريا تتوافق مع النتائج التجريبية المقامة في مخبر التوتر العالي بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات و بالأخص من حيث التغيرات.

### **كلمات مفاتيح**

نموذج – نظرية - مؤثرات كهربائية وحراري - تزمين حراري - خصائص كهربائية.

# TABLE DES MATIERES

---

---

INTRODUCTION .....	1
Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
Chapitre II. PRESENTATION DES POLYMERES.....	27
Introduction .....	27
II-1 Polymères utilisés dans l’isolation des câbles.....	28
II.1.1. Pureté du matériau.....	29
II.1.2. Présence de vacuoles.....	29
II.1 .3. Teneur en humidité.....	29
II -2. Stabilité thermique des polymères.....	29
II -2. 1. Facteurs physiques.....	29
II -2. 2. Facteurs chimiques.....	30
II-3. Conduction des isolants polymères.....	30
II-4. Mécanisme de rupture de l'isolant en polymère.....	31
II-4.1. Mécanisme de rupture à court terme.....	31
II-4.1.1Mécánisme de rupture électrique.....	31
a. Théorie de rupture intrinsèque.....	31
b. Théorie de rupture par avalanche.....	31
II-4.1.2. Mécanisme de rupture thermique (théorie de Wagner).....	32
II-4.2. Mécanisme de rupture à long terme.....	34
II-4.2.1. Rupture diélectrique provoquée par les décharges partielles... ..	34
II-4.2.2 Rupture diélectrique provoquée par les arborescences.....	34
II-5. Vieillessement des polymères.....	35
II-5.1. Vieillessement thermiqu.....	35
a. Loi générale du vieillessement thermique.....	36
b. Loi de Montsinger.....	36
II-5.2. Vieillessement Electrochimique.....	37
II-5.3. Vieillessement Electrique.....	37
II-6. Influence du vieillessement thermique sur les propriétés électriques des polymères.....	38
II-6. 1. Résistivité transversale.....	38
II-6.2. Permittivité relative.....	38
II-6.3. Le facteur de dissipation.....	39
II-7. Propriétés de l’isolation .....	39
II-7.1. Les Polyéthylènes (PE) .....	40
II-7.2.Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).....	41
II-7.2.1.Mise en œuvre du PRC.....	41
II-7.2.2. Avantages et inconvénients de l’isolation en PRC.....	42
II-7.2.3. Avantages du PRC sur le PE.....	43

II-7.3. Présentation de l'EPDM.....	44
II-7.3.1. Structure de l'EPDM.....	44
II-7.3. 2. Propriétés de l'EPDM.....	45
II -7.3.2.1. Propriétés physico-chimiques... ..	45
II -7.3.2.2. Propriétés électriques.....	46
II -7.3.2.3. Propriétés mécaniques.....	46
II -7.3.3. Vieillessement thermique de l'EPDM.....	46
II-7.3.3.1. Vieillessement physique.....	47
II-7.3.3.2. Vieillessement chimique.....	48
II-8. Le chlorure de vinyle (PVC).....	50
II-8. 1 Formulation et mise en œuvre du PVC.....	49
II-8. 1.1. Préparation du Chlorure de vinyle.....	49
II-8. 1.2. Préparation du polychlorure de vinyle.....	49
II-8.2 Propriétés physico chimique du PVC.....	52
II-8. 3 Propriétés électriques.....	52
II-8.4. Propriétés mécaniques.....	53
II-9. Comparaison.....	53
II-9.1. Comparaison des propriétés électriques.....	53
II-9.2. Comparaison des propriétés mécaniques.....	54
Chapitre III. MODELISATION ET APPLICATION.....	55
I-MODELISATION.....	56
III-I-1. Calcul des contraintes électrique et thermique.....	56
III-I-1.1 Les hypothèses du travail.....	56
III-I-1.2. Calcul du champ électrique.....	57
III-I-1.3. Calcul de la contrainte thermique.....	59
III-I-1.3. 1. Conducteur et gaine isolante.....	59
III-I-1.3. 2. Gaine conductrice.....	59
III-I-1.3. 3. Gaine isolante.....	62
III-I-2. Le modèle de La durée de vie de l'isolation.....	66
III-I-3. Les propriétés électriques.....	67
III-I-3.1 Permittivité diélectrique .....	67
III-I-3.2. Les pertes diélectriques.....	70
III-I.3.3. La conductivité électrique.....	71
III-I-3.4. La résistivité électrique.....	72
II. APPLICATIONS ET INTERPRETATIONS.....	73
III- II.1. Données et caractéristiques du câble considéré.....	73
III-II-2. Influence du temps de vieillissement thermique sur la résistivité transversale....	74
III-II-3. Influence de la température sur les propriétés électriques .....	77
III-II-3.1 Variation de résistivité transversale en fonction de la température.....	77
III -II-3.2 Variation du champ électrique en fonction de la température.....	79
III--II-3.3 Variation de la constante diélectrique en fonction de la température.....	79
III-II-3.4 Variation du facteur de dissipation en fonction de la température.....	80

CONCLUSION GENERALE.....	83
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	85

# Dédicace

*A mes très chers parents*

*A mes sœurs Ratiba, Taous,  
Hakima, Aldjia ;*

*Et mes frères Rabah, Rachid,  
Madjid et Bachir.*

*A ma chère grand mère.*

# REMERCIEMENTS

Ce travail a été sous la direction de Monsieur A.MEKHALDI, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Qu'il me permit de lui exprimer mes vifs sentiments de gratitude, pour l'aide, le suivi, et l'attention constante qu'il a apportés à mon égard, lors de l'élaboration de ce travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à monsieur M.TEGUAR, docteur et maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour son soutien de près ou de loin, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger et d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier Mme NAAMAN, chargé de cours à l'ENP, de m'encourager et d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie vivement monsieur A.BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique de m'avoir aidée dans ce travail, ainsi pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail.

Comme je remercie Mr BOUAZABIA, d'avoir lu et jugé mon travail

Je tiens également à remercier Monsieur OUADJAOUT, chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour son aide.

Comme j'exprime mes vifs remerciements à tous mes enseignants (durant mes deux cycles universitaires, le cycle tronc commun et le cycle spécialité en génie électrique) de l'Ecole Nationale Polytechnique pour tout ce qui m'ont appris.

J'aimerais exprimer enfin mes remerciements à tous mes camarades et mes amis qui m'ont apporté aide et conseil durant la réalisation de ce travail, à tous ce qui m'ont soutenu de près ou de loin, surtout dans les moments les plus difficiles.

# *LISTE DES FIGURES*

N°	Titre	Page
Figure I.1	Représentation schématique d'un câble coaxial	16
Figure I.2	Coupe radiale d'un câble coaxial	18
Figure I.3	Détermination du temps $t_i$ nécessaire pour atteindre le critère de dégradation de 50% à chaque température T	23
Figure I.4	Évaluation de la durée de vie d'un système d'isolation	24
Figure II.1	Constitution d'un câble de HT	27
Figure II.2	Claquage thermique	33
Figure II.3	Variation de la rigidité diélectrique du PRC en fonction de la température	33
Figure II.4	claquage par arborescence	35
Figure II.5	Variation de la résistivité transversale en fonction de la température	38
Figure II.6	variation de la permittivité relative en fonction de la température	39
Figure II.7	Variation du facteur de dissipation en fonction de la température	39
Figure II.8	molécule de PE ramifié	40
Figure II.9	Structure moléculaire du peroxyde de dicumyl	41
Figure II.10	Molécule du PRC	42
Figure II.11	Structure des sphérulites	42
Figure II.12	Molécule de l'EPDM	45
Figure II.13	Molécule de chlorure de vinyle	49
Figure III.1	Coupe radiale d'un câble de haute tension	55
Figure III.2	Distribution du champ électrique dans l'isolant	58
Figure III.3	Coupe d'un câble de haute tension sous certaines hypothèses	59
Figure III.4	Représentation des directions des chaleurs dans un câble électrique	60
Figure III.5	Distribution de la température dans l'isolant	63
Figure III.6	Évaluation de la durée de vie d'un système d'isolation	67
Figure III.7	Variation de la polarisation diélectrique dans le temps	68
Figure III.8	Variation de la résistivité en fonction de la température	72
Figure III.9	-a. Courbes théoriques variation de la résistivité transversale en fonction du temps	75
	-b. Comparaison des courbes théoriques à des courbes expérimentales montrant la variation de la résistivité transversale en fonction du temps au cours du vieillissement.	77
Figure III.10	Variation de la résistivité transversale en fonction de la température	78
Figure III.11	Variation du champ électrique en fonction de la température	79
Figure III.12	Variation de la permittivité en fonction de la température	80
Figure III.13	Variation de $\tan \delta$ en fonction de la température au cours du vieillissement	82



# ***LISTE DES TABLEAUX***

---

---

N°	<i>Titre</i>	PAGE
Tableau II.1	Comparaison des propriétés électriques	<b>53</b>
Tableau II.2	Comparaison des propriétés mécanique	<b>54</b>

# LISTE DES NOTATIONS

---

---

<b>Notation</b>	<b>Désignation</b>
$\delta$	la conductivité électrique du matériau.
$\delta_0$	la conductivité électrique à la température 0°C.
W	L'énergie d'activation du matériau.
K	la constante de Boltzmann.
T	la température appliquée au diélectrique.
$\chi$	la conductivité thermique du diélectrique
E	le champ appliqué au diélectrique.
t	le temps appliqué.
S	l'effort appliqué
$\Delta G$	l'énergie libre de Gibbs
$\Delta H$	l'enthalpie libre de l'isolant.
$\Delta S$	l'entropie libre de l'isolant.
$E_{th}$	le champ électrique seuil
$G_a$	l'énergie libre absolue ou à l'équilibre.
$W_{es}$	l'énergie d'activation électrostatique
$W_{em}$	l'énergie d'activation électromécanique
$U_r$	l'énergie de rupture (J)
$U_b$	l'énergie de formation (J)
N	le nombre de liaisons cassables
h	la constante de blanc
P(t)	la probabilité d'échec
$t_0$	l'origine des temps (s)
$\alpha$	la caractéristique de vie (s)
$\beta$	le paramètre de forme
$\lambda$	la longueur d'onde (m)
$\eta$	nombre de liaisons cassés
$\eta_c$	nombre critique de liaisons cassés
L	la durée de vie de l'isolation
w	la puissance dissipée par unité de longueur

$Th$	résistivité thermique
$T_0$	température ambiante
$R$	rayon externe du câble
$\rho_0$	résistivité à la température $T^{\circ}=0^{\circ}C$
$I$	le courant de fuite radial par unité de longueur
$m$	constante connue comme coefficient d'effort (champ)
$P_0$	la valeur de la propriété à l'instant initial
$\alpha$	coefficient de température $K^{-1}$
$C_v$	capacité thermique du diélectrique,
$\lambda_2$	conductivité thermique du diélectrique
$\lambda_1$	conductivité thermique du conducteur.
$\epsilon_0$	permittivité du vide,
$\epsilon_r$	permittivité relative du diélectrique
$\chi$	la susceptibilité du matériau.
$\epsilon_r'$	composante réelle de la permittivité relative
$\epsilon_r''$	composante imaginaire de la permittivité relative
$f$	la fréquence du réseau.

# Introduction générale

---

Les câbles souterrains isolés aux polymères sont principalement employés pour le transport et la distribution d'énergie électrique. Compte tenu de l'extension rapide de l'urbanisation et pour des raisons de sécurité et d'esthétique, les sociétés de câbleries électriques cherchent toujours à fabriquer des câbles souterrains, beaucoup plus améliorés et répondant aux conditions de service.

L'adaptation d'un nouveau matériau reste toujours en question. Les caractéristiques physiques et chimiques de l'isolant du câble doivent être adaptées aux contraintes auxquelles le câble sera soumis. De plus, la validité d'une conception nouvelle ne peut être confirmée définitivement que par des résultats expérimentaux et théorique satisfaisants.

Modéliser de façon correcte, les contraintes (température, champ..) en service normale et leurs effets à long terme sur l'isolation, sert à résoudre les problèmes des fabricants des câbles électriques.

Devant la nécessité croissante au fil des années, de voir augmenter le niveau de tension de service, le problème de tenue en température des câbles s'est trouvé posé. C'est ainsi qu'à été introduit la méthode de réticulation du produit dont le résultat est le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). Bien que ce produit a été commercialisé dans les années cinquante, ce n'est qu'en 1967 que le Japon décidait d'installer le premier câble de 110 kV isolé au PRC. Comme il est connu, pour de hautes tensions de service, les câbles isolés au Polyéthylène (PE) ont été remplacés par des câbles isolés en PRC, afin de supporter la chaleur dégagée par le conducteur.

D'autres produits (éthylène propylène diène monomère (EPDM), le polychlorure de vinyle (PVC)) appartenant à la famille des caoutchoucs élastomères ont un bon fonctionnement au cours du vieillissement thermique.

Afin de mettre en évidence et de constater les phénomènes de vieillissement thermique, nous procédons à la modélisation des propriétés électriques des matériaux polymères utilisés dans l'isolation des câbles haute et moyenne tension. Nous nous sommes intéressées plus particulièrement aux propriétés électriques. Trois parties constituent notre travail.

---

---

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique comportant des généralités sur les modèles récents de la durée de vie de l'isolation des câbles isolés aux polymères.

Le deuxième chapitre est réservé à la présentation des principaux polymères utilisés dans l'isolation des câbles (PE, PRC, EPDM et le PVC), et les mécanismes et processus intervenant lors du vieillissement thermique. Ce chapitre est clôturé par une comparaison des propriétés électriques et mécaniques de ces matériaux.

Le troisième chapitre concerne la modélisation des contraintes électrique et thermique ainsi que des propriétés électriques aux cours du vieillissement thermique. Les résultats que nous avons obtenus par modélisation ont été comparés à ceux déjà obtenus expérimentalement au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP. Une concordance a été trouvée entre eux, en particulier concernant leur évolution.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

## Chapitre I

# ***Synthèse Bibliographique***

**Introduction :**

Les polymères sont très utilisés comme isolants dans les câbles électriques pour différents niveaux de tension de service (basse, moyenne et haute tension). Malgré les bonnes propriétés que présentent ces matériaux, ils se dégradent sous l'action des contraintes auxquelles ils sont soumis en service. Parmi ces contraintes, nous pouvons citer la température, le champ électrique, les radiations, ...etc. Un choix judicieux du diélectrique est donc une nécessité dans le bon dimensionnement du matériel dans lequel il est utilisé. De nombreuses investigations sont entreprises pour l'étude théorique et la modélisation des phénomènes de dégradation des systèmes d'isolation. Ce chapitre porte sur la synthèse d'un certain nombre de travaux effectués dans ce domaine.

ZELLER [1] dans son travail, a bien expliqué le phénomène de claquage et préclaquage des diélectriques sous l'effet aussi bien d'un champ élevé, que de la température.

La conductivité électrique d'un diélectrique s'écrit :

$$\delta (T) = \delta_0 \exp(-W/KT) \quad (I-1)$$

Où  $\delta$  est la conductivité électrique du matériau ;

$\delta_0$  est la conductivité électrique à la température 0°C ;

W étant l'énergie d'activation du matériau ;

K est la constante de Boltzmann ;

T est la température appliquée au diélectrique ;

La fonction température tirée de l'équation d'équilibre de continuité du même diélectrique en supposant ce dernier est homogène:

$$\text{Div}(x \text{ grad}(T)) = -\delta(T) E^2 \quad (I-2)$$

Où  $x$  est la conductivité thermique du diélectrique.

E étant le champ appliqué au diélectrique.

En combinant l'équation de la conductivité électrique (I-1) dans l'équation d'équilibre (I-2), nous obtenons une équation non linéaire à résoudre.

Zeller a défini aussi le point d'instabilité thermique, autrement dit le point critique thermique:

$$\Delta T \geq (KT/W) T \quad (I-3)$$

Ou encore:

$$\Delta T = c (KT/W) T \quad (I-4)$$

Tel que  $c \geq 1$  dépendant de la géométrie du matériau.

Le modèle de vieillissement thermoélectrique est étudié encore par G.C.Montanari [2] dans son travail portant sur la modélisation des processus de vieillissement à contraintes multiples dans une isolation solide. Cependant, le modèle de vieillissement thermoélectrique a été étudié pendant plus de 40 ans, en se référant aux approches phénoménologiques du modèle de vieillissement, un rapport fonctionnel entre une propriété diagnostique et l'effort du temps appliqué peuvent être exprimés comme suit:

$$F(P) = K(S) t \quad (I-5)$$

Où P est la propriété considérée pour le diagnostic de vieillissement, elle est limitée par un point critique défini par  $P_L$ .

t est le temps appliqué.

K(S) est le taux de vieillissement ;

S : étant l'effort appliqué (ici le paramètre temps).

L'expression de la durée de vie donnée par Montanari [2] est:

$$t_L = F(P_L) / K(S) \quad (I-6)$$

Où  $t_L$  est le temps de claquage (rupture) de l'isolant.



Montanari cite aussi les modèles thermoélectriques de la durée de vie de l'isolation selon les lois d'Arrhenius, d'Eyring et la loi de puissance, données par:

$$\text{loi d'Arrhenius : } t_L = A \exp(B/T) \quad (\text{I-7})$$

$$\text{loi d'Eyring : } t_L = \frac{h}{K} \exp\left(\frac{\Delta G}{KT}\right) \quad (\text{I-8})$$

$$\text{loi exponentielle : } t_L = t_{L0} \exp[-h'(E - E_0)] \quad (\text{I-9})$$

$$\text{loi de la puissance inverse: } t_L = t_{L0} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-n} \quad (\text{I-10})$$

Où E et T sont respectivement le champ électrique et la température appliqués.

B, h' et n sont des coefficients d'endurance, déterminés à partir des courbes expérimentales.

$\Delta G$  étant l'énergie libre de Gibbs

Or  $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$  telles que  $\Delta H$  et  $\Delta S$  sont l'enthalpie et l'entropie libre de l'isolant.

h et K sont respectivement les constantes de Blanc et de Boltzmann.

A et  $t_{L0}$  sont des paramètres déterminés à partir des conditions aux limites.

Selon Montanari dans ce travail, le modèle phénoménologique de la durée de vie d'une isolation sous contraintes multiples (champ électrique, température ...) est déduite de la loi d'Eyring. Le rapport général des différentes durées de vie des différentes contraintes peut être écrit par :

$$\left(\frac{t_L}{t_{L0}}\right) = \left(\frac{t_L}{t_{L1}}\right) \times \left(\frac{t_L}{t_{L2}}\right) \times \dots \times \left(\frac{t_L}{t_{LN}}\right) \times G(S_1, S_2, \dots, S_N)$$

Où  $t_L$  la durée de vie à contraintes multiples,  $t_{L1}, t_{L2}, \dots, t_{LN}$  soumises aux contraintes  $S_1, S_2, \dots, S_N$  tel que N est le nombre d'efforts appliqués, et G(S) étant la limite synergétique.

Montanari a déduit l'équation de la durée de vie à contraintes thermoélectriques suivantes:

$$t_L = t_{L0} \exp\left(-hE' - \frac{B}{T'} + bE'T'\right) \quad (\text{I-11})$$

Tels que :

$E' = E - E_0$  ;  $T' = 1/T_0 - 1/T$ , où T la température appliquée,  $T_0$  la température de référence, c'est la température ambiante, E le champ appliqué,  $E_0$  le champ de référence. Ce modèle de durée de vie forme un modèle thermoélectrique linéaire dans le terrain de semilog-ARRHENIUS, c'est-à-dire la variation de  $\ln(t_L)$  en fonction de  $1/T$  (figure I-3). Montanari cherche dans ses travaux un modèle général capable de décrire un comportement linéaire et curviligne:

$$L = L_0 \frac{\exp(-hE' - BT' + bE'T')}{\left[ \frac{E'}{E'_{t0}} + \frac{T}{T'_{t0}} - k_c \left( \frac{E'}{E'_{t0}} \right) \left( \frac{T'}{T'_{t0}} \right) - 1 \right]^{\mu(E', T')}} \quad (\text{I-12})$$

Avec  $\mu > 0$  pour  $E' < E'_{t0}$  ou  $T' < T'_{t0}$

$\mu = 0$  pour  $E' \geq E'_{t0}$  et  $T' \geq T'_{t0}$

$\mu = \mu(E')$  pour  $T' = 0$  ; et  $\mu = \mu(T')$  pour  $E' = 0$ .

L'expression de  $\mu$  en présence des contraintes électrique et thermique est donnée comme suit :

$$\mu = \mu_0 \left\{ \left[ \frac{E'}{E'_{t0}} - 1 \right]^2 + \left[ \frac{T'}{T'_{t0}} - 1 \right]^2 \right\} \quad (\text{I-13})$$

On vérifie bien que pour :

$E' = E'_{t0}$  et  $T' = T'_{t0}$  alors  $\mu = 0$ .

L'expression (I-13) est définie par sept paramètres  $h$ ,  $B$ ,  $b$ ,  $L_0$ ,  $\mu_0$ ,  $E'_{t0}$  et  $T'_{t0}$ , où  $E'_{t0}$  et  $T'_{t0}$  sont respectivement les seuils électrique et thermique,  $h$  constante de Boltzmann,  $b$  et  $\mu_0$ , constantes dépendant du type du matériau,  $B$  coefficient déterminé à partir de la courbe expérimentale d'endurance thermique,  $L_0$  paramètre déterminé à partir des conditions aux limites et  $E_0$  le champ de référence.

Les travaux de G.C.Montanari et al [3] où le modèle de la durée de vie des matériaux isolants prend en compte l'effet des charges d'espace sur la dégradation de ces matériaux. L'élaboration d'un nouveau modèle thermoélectrique de la durée de vie en se basant sur la théorie de taux de réaction est une approche thermodynamique de dégradation de l'isolation due aux efforts électrique et thermique déduit de la loi d'Eyring. Dissado et Colline [4] ont développé une idée suggérée par Tanaka et Green Wood [5] pour obtenir l'expression de la durée de vie suivante:

$$\text{Log}(t_r) \approx \frac{A}{E} + B - \text{Log} \left[ \frac{1}{E_{th}} - \frac{1}{E} \right] \quad (\text{I-14})$$

Où  $E_{th}$  est le champ électrique seuil. Ce modèle a été élaboré à partir des données expérimentales; le paramètre A est proportionnel à la fonction du travail.

$B = \ln(D A f)$ , f est la fréquence et D étant une constante dépendant du matériau, reliée aux valeurs critiques.

La durée de vie L d'une isolation est donnée par:

$$t_L = L \approx \frac{1}{f} E_{th} E \exp \left[ \frac{A/E}{E - E_{th}} \right] \quad (\text{I-15})$$

Le seuil de température dans l'expression (16) se base sur l'approche de DAKIN de la durée de vie d'isolation des polymères. Ce matériau perd ses propriétés d'isolation donc un certain nombre de réactions chimiques est envisagé, dans ce cas l'oxydation va augmenter certainement la conductivité électrique et donc les pertes diélectriques. En employant la théorie d'Eyring, sachant que la taux R est inversement proportionnelle à la durée de vie L, elle sera exprimée en terme d'énergie d'activation libre :

$$R = \frac{KT}{h} \exp \left( \frac{-\Delta G^*}{KT} \right) \quad (\text{I-16})$$

Tel que  $\Delta G^* = G_a - G_i$

Et  $G_a$  étant l'énergie libre absolue ou à l'équilibre.

$K$  et  $h$  sont respectivement les constantes de Boltzmann et Planck et  $T$  la température absolue.

Quelques modèles sont dérivés de l'expression du taux  $R$  :

$$R_i = \frac{KT}{h} \exp\left(-\frac{(G_a - G_j)}{KT}\right) \quad (\text{I-17})$$

Tels que pour  $j = 1$ ,  $i = b$  et pour  $j = 2$ ,  $i = f$ .

Les constantes  $R_b$  et  $R_f$  sont déterminées à partir des équations cinétiques

Tel que à l'état 1 ou l'état réactif:

$$\frac{dC_1}{dt} = -R_f C_1 + R_b C_2 \quad (\text{I-18})$$

À l'état 2 ou l'état produit:

$$\frac{dC_2}{dt} = -R_b C_2 + R_f C_1 \quad (\text{I-19})$$

Sous ces hypothèses, le modèle réversible thermique de la durée de vie est exprimé comme suit :

$$L = \frac{1}{R_f + R_b} \ln\left[\frac{A^*}{A - A^*}\right] \quad (\text{I-20})$$

Telle que  $A$  est la valeur d'équilibre du taux de conversion de l'état initial vers l'état dégradé, et elle est donnée par :

$$L = \frac{R_f}{R_f + R_b} = \frac{1}{1 + \exp\frac{\Delta G}{KT}} \quad (\text{I-21})$$

$A^*$  est la valeur limite de  $A$ , juste au premier moment de la dégradation.

Nous remarquons que l'équation (I-21) dépend des propriétés du matériau et de la température et  $A$  augmente avec la température, pour un matériau donné, et pour une température telle que  $A < A^*$ , la durée de vie sera infinie à cette température même à  $T = \infty$ . La température la plus élevée est une condition qu'on appelle le seuil thermique qui doit satisfaire la relation suivante:

$$A^* = A(T_{t0}) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Delta G}{KT_{t0}}\right)} \quad (\text{I-22})$$

Telle que :

$$T_{t0} = \frac{\Delta G}{K \ln\left(\frac{1 - A^*}{A^*}\right)} \quad (\text{I-23})$$

Et à partir de là, le nouveau modèle de Dissado et al de la durée de vie d'isolation devient:

$$L = \frac{1}{R_f(E) + R_b} \ln\left(\frac{A(E)}{A(E) - A^*}\right) \quad (\text{I-24})$$

Dans un autre travail sur les statistiques de 'claquage' d'un modèle de charges d'espace pour des isolations en polymères, P. A. Norman et al [5] ont introduit des équations statistiques pour la détermination de  $A$ . Sachant que la charge d'espace est en fonction du champ électrique appliqué par rapport à la loi de la puissance inverse:

$$q = C E^b$$

Où  $C$  et  $b$  sont des constantes dépendant du matériau.

A partir des équations:

$$W_{es} = C_1 (q)^2 = C_1 (E)^{2b}$$

$$W_{em} = C_2 (q)^4 = C_2 (E)^{4b}$$

Où  $W_{es}$  et  $W_{em}$  sont respectivement l'énergie d'activation électrostatique et l'énergie d'activation électromécanique

Avec:

$$C_1 = \frac{3}{20\pi\epsilon r_0}$$

$$C_2 = \frac{3\alpha^2}{4480\pi^3 y \epsilon^4 r_0}$$

Avec  $\alpha$  : coefficient d'électrostriction

$y$  : le module de Young

$r_0$  : le rayon du conducteur

En posant :

$$C_1' = C_1 C^2$$

$$C_2' = C_2 C^4,$$

Ce qui va donner :  $G_l(E) = G_l + A W_{es} + B W_{em}$

$$\Delta G(E) = G_2 - G_1 - B W_{em} = \Delta G - B C_2' (E)^{4b}$$

Donc l'expression de  $A(E)$  sera :

$$A(E) = \frac{1}{1 + \exp(DG(E)/KT)}$$

$$A(E) = \frac{1}{1 + \exp((DK - C_2'' E^{4b})/T)} \quad (I-25)$$

$$DK = (G_2 - G_1)/K$$

$$C_2'' = B C_2' / K$$

Sachant aussi que  $R_b$  est invariable,  $R_f(E)$  s'écrit de la façon suivante :

$$R_f(E) = \frac{KT}{h} \exp\left(-\frac{G_a - G_1 - BW_{em}}{KT}\right) = \frac{KT}{h} \exp\left(-\frac{G_a - G_1 - BC_2'' E^{4b}}{KT}\right) \quad (I-26)$$

En posant :

$$\Delta\Delta K = \frac{G_a - (G_1 + G_2)/2}{K}$$

A partir de toutes ces relations le modèle de DMM (L.Dissado, G.Mazzanti G.C.Montanari) caractérisé par les cinq paramètres  $\Delta\Delta K$ ,  $DK$ ,  $b$ ,  $A^*$  et  $C2''$  est déduit :

$$L = \frac{h}{KT} \frac{\exp\left(\frac{\Delta\Delta K}{T}\right) \exp\left(-\frac{C2'' E^{4b}}{2T}\right) \left(-\ln \frac{A(E) - A^*}{A(E)}\right)}{\exp\left(-\frac{DK - C2'' E^{4b}}{2T}\right) + \exp\left(\frac{DK - C2'' E^{4b}}{2T}\right)} \quad (I-27)$$

Les équations de seuil de courant ascendant  $T_t(E)$  sont:

$$T_t(E) = \frac{DG(E)}{K \ln[(1 - A^*)/A^*]} = T_{t0} - \frac{C2'' E^{4b}}{\ln[(1 - A^*)/A^*]} \quad (I-28)$$

Chaque valeur de  $E$  correspond au champ de seuil thermique alors que le seuil électrique peut être déduit par:

$$E_t(T) = \left(\frac{DK - T \ln((1 - A^*)/A^*)}{C2''}\right)^{1/4b} = \left(\frac{(T_{t0} - T) \ln((1 - A^*)/A^*)}{C2''}\right)^{1/4b} \quad (I-29)$$

Ainsi leur travail représente une recherche intéressante sur l'effet de la charge d'espace piégée sur le vieillissement de l'isolation des polymères sous une contrainte thermoélectrique. L'accélération du vieillissement due au fait que les charges d'espace attribuant à une réaction d'énergie libre au cours de la dégradation. La validité de ce modèle est limitée juste à la tension continue, et à la période de formation des microcavités, puisque dans d'autres mécanismes, il se produit des cavités gazeuses dans le système d'isolation sous un champ élevé. Ce modèle est caractérisé par les seuils électrique et thermique. Ils appliquent ce modèle aux résultats des essais expérimentaux sur la durée de vie du vieillissement thermoélectrique des câbles en Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).

Les essais sur le vieillissement thermoélectrique effectués par C.L.Griffith et al [8] ont concerné le polyéthylène réticulé chimiquement PRC. L'analyse des résultats expérimentaux est effectuée en utilisant la forme générale de Weibull:

$$P(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\alpha}\right)^\beta \quad (\text{I-30})$$

- La formule empirique de loi de puissance inverse (IPL) :

$$t \times E^n = C \quad (\text{I-31})$$

-Le modèle thermodynamique récent de la durée de vie (TDM) :

$$t \approx \frac{h}{2KT} \exp\left(\frac{\Delta G}{KT}\right) \cosh\left(\frac{e\lambda E}{KT}\right) \quad (\text{I-32})$$

-Le modèle d'endurance électrocinétique (EKE) :

$$t = \int_N^{\eta_c} \left\{ \frac{KT}{h} \left[ \exp\left(-\frac{U_r(E)}{KT}\right) (N-\eta) - \exp\left(-\frac{U_b(E)}{KT}\right) \eta \right] \right\}^{-1} d\eta \quad (\text{I-33})$$

Tels que :

C et n: sont des constantes de la loi de puissance inverse.

E et T: sont respectivement le champ appliqué (kV/mm) et la température absolue (K).

$\Delta G$ : l'énergie libre de Gibbs (J).

$U_r$  et  $U_b$  et: sont respectivement les énergies de rupture et de formation (J).

N: est le nombre de liaisons cassables.

K et h: sont respectivement la constante de boltzman (J/K) et la constante de blanc.

P (t): est la probabilité d'échec ;

T: est le temps d'échec (s),

$t_0$ : est l'origine des temps (s).

$\alpha$ : est la caractéristique de vie (s).

$\beta$ : est le paramètre de forme.

$\lambda$ : est la longueur d'onde (m).



$\eta$ : nombre de liaisons cassés.

$\eta_c$ : nombre critique de liaisons cassés.

Chinh. Dang et al [9] ont, dans leur travail sur le vieillissement électrique des câbles électriques extrudés sous forme de revue sur les théories et données existantes; interprété les différents résultats obtenus. Ici, le modèle est déduit à partir de la théorie de Dakin basée sur la loi d'Arrhenius (7).

Le vieillissement des polymères est décrit ici par:

$$t = \frac{h}{KT} e^{\left(\frac{\Delta G}{KT}\right)} \quad (\text{I-34})$$

Avec h : constante de Blanc

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$  telles que:  $\Delta H$  et  $\Delta S$  l'enthalpie et l'entropie d'activation.

La loi de puissance inverse a été utilisée (10).

Comme le vieillissement dépend aussi de la fréquence, la durée de vie s'exprimera alors par:

$$t = CF^{-n} f^{-x} \quad (\text{I-35})$$

Avec n et x des constantes.

Un autre travail de Montanari [10] s'intéresse aux développements récents de la modélisation du comportement d'une isolation sous des contraintes électrique et thermique, en donnant les limites appropriées. Plusieurs de ses travaux de recherche, s'adaptent à différents types de matériaux polymères en considérant les conditions aux limites suivantes:

$$L(E', T') = L(T') \text{ pour } E' = 0 ;$$

$$L(E', T') = L(E') \text{ pour } T' = 0 ;$$

Avec  $E'$  et  $T'$  sont respectivement la contrainte électrique et thermique et L la durée de vie telle que :

$$E' = E - E_0 \text{ et } T' = 1/T_0 - 1/T$$

D'autre part, les travaux de Luciano Simioni [11] concernent l'application d'un modèle de durée de vie phénoménologique général sous des contraintes combinées, à deux types de matériaux isolants polymères : polyéthylène (PE) et le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). Ce modèle général combinant les deux contraintes électrique et thermique simultanément est utilisé pour les matériaux de seuil et aux matériaux de non seuil. De bon, résultats obtenus sont avec le matériau le (PE) et encore mieux avec le PRC.

Le modèle de DMM (L.Dissado, G.Mazzanti G.C.Montanari) (I-27) [12] donne des résultats intéressants sur l'étude théorique du vieillissement thermoélectrique des câbles isolés aux polymères en suggérant certaines hypothèses:

- En traitant l'isolant en tant que matière homogène du point de vue macroscopique.
- Le modèle de la durée de vie ne prévoit pas un temps de rupture, mais le temps à la formation des microfissures.

Ce modèle ne peut être validé que sous certaines hypothèses:

1-Le point de départ est l'approche thermodynamique (l'équation de la durée de vie (I-32)) à travers laquelle la durée de vie d'isolation du diélectrique est inversement proportionnelle aux taux de vieillissement, en supposant que la réaction principale soit réversible. Le modèle thermique de la durée de vie est établi en définissant une température de seuil qui est la température au dessous de A (la valeur d'équilibre de la conversion des parties des polymères de l'état 1 qui est l'état réactif vers l'état 2 qui est l'état produit).

2-l'hypothèse principale est celle, quand la tension est appliquée au dessous du seuil électrique pour la formation d'une charge d'espace stable.

3-La cinétique de réaction est décrite en terme thermodynamique (I-32).

E.S.Cooper et al [13] traitent le problème de modélisation du vieillissement thermoélectrique des câbles en polymères, en se référant aux modèle de vie de DMM:

$$L(E,T) = \frac{h}{2KT} \frac{\exp\left(\frac{-S_d}{K}\right) \exp\left[\frac{H_{dk} - \frac{C_d E^{4b}}{2}}{T}\right] \ln\left[\frac{A_{eq}(E,T)}{A_{eq}(E,T) - A^*}\right]}{\cosh\left(\frac{K_d - C_d E^{4b}}{2T}\right)} \quad (I-36)$$

Avec L: la durée de vie de l'isolation,

K: la constante de Boltzmann,

h : la constante de Blanc.

$K_d$  est la différence entre l'état de réaction et de production.

La réaction est caractérisée par une énergie d'activation  $\Delta G = K H_{dk} - T S_d$

$C_d$  et b sont des constantes

A est la valeur d'équilibre du taux de conversion d'emplacement du polymère de l'état initial vers l'état dégradé, et elle est donnée par :

$$A = \frac{R_f}{R_f + R_b} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Delta G}{KT}\right)} \quad (I-37)$$

$R_f$  et  $R_b$  sont déterminées à partir des équations cinétiques.

$A^*$  est la valeur limite de A, juste au premier moment de dégradation.

E.S.Cooper et al [13] supposent que pour les films extrêmement fins, le champ E et la température T sont constants, mais dans les câbles de puissance, cette supposition n'est pas toujours valide. Les variations radiales du champ et de la température en fonction du rayon du câble sont données comme suit:

$$T(r_i) = T_1 + \frac{w \times Th}{2\pi} \ln\left(\frac{R_0}{r_i}\right) \quad (I-38)$$



Figure I-1. Représentation schématique d'un câble coaxial

Avec :

$w$ : la puissance dissipée par unité de longueur.

$Th$ : résistivité thermique.

$T_l$  : température ambiante.

$R_0$ : rayon externe du câble.

$R_l$  : rayon du conducteur interne.

$T(r_i)$  : température radiale en fonction du rayon tel que  $r_i$  varie entre  $R_l$  et  $R_0$ .

La distribution du champ électrique radial en fonction du rayon sous tension continue s'écrit :

$$E(r_i) = \frac{V}{r_i \ln\left(\frac{R_0}{R_l}\right)} \quad (\text{I-39})$$

Ils intègrent les équations (I-37) et (I-38) dans (I-36) pour obtenir la variation de la durée de vie thermoélectrique de l'isolation du câble, en appliquant les statistiques de Weibull pour résoudre le problème.

Un travail sur la caractérisation des écailllements de câbles au PRC, vieilliss électrothermiquement, à travers les mesures de la charge d'espace, a été réalisé par A.Tzimas et al [14]. Dans ce travail, les chercheurs utilisent le programme d'ARTÉMIS, qui permet le diagnostic de l'état du matériau (dégradation ou pas). Ils donnent l'estimation de la charge d'espace à l'instant  $t$  par la charge absolue stockée  $Q(t)$  et un échantillon considéré par:

$$Q(t) = A \int_{x_1}^{x_0} |\rho(x,t)| dx \quad (\text{I-40})$$

Avec A la superficie de l'électrode HT,  $\rho(x, t)$  est la densité de charge d'espace et t le temps où la mesure est effectuée (temps de vieillissement), l'intégrale est prise entre  $x_1$  et  $x_0$ , les extrémités d'électrodes portant les charges d'espace.

E.S.Cooper et al [15] ont décrit un modèle de vieillissement appliqué à un câble électrique, la température et le champ électrique vont être radiaux aux conducteur (I-38) et (I-39).

La distribution du champ sous tension alternative est:

$$E(r_i) = \frac{V \delta \left( \frac{r_i}{R_0} \right)^{\gamma-1}}{R_0 \left( 1 - \left( \frac{R_1}{R_0} \right)^\gamma \right)} \quad (\text{I-41})$$

Tel que  $\gamma$  est un coefficient donné par

$$\gamma = \frac{a \frac{w \times Th}{2 \pi} + m \frac{V}{R_0 - R_1}}{m \frac{V}{R_0 - R_1}}$$

Avec a et m sont des constantes dépendant du matériau.

Il s'agit de déterminer les variations du champ électrique et de la température en fonction du rayon de l'isolant cylindrique afin de déterminer les propriétés du matériau telles que la résistivité, l'énergie d'activation et la susceptibilité. L'expression de la résistivité électrique en fonction des deux contraintes est donnée par:

$$\rho = \rho_0 e^{-aT} e^{-mE} \quad (\text{I-42})$$

Avec  $\rho_0$ : résistivité à la température  $T^\circ=0^\circ\text{C}$ .

Deux autres auteurs Ch.Chkradhar Reddy et T.S.Ramu [16] ont travaillé sur ce genre de modèle dans leur travail se rapportant au calcul du champ électrique et à la distribution de la température. Ils ont donné l'équation d'état d'équilibre pour la continuité thermique dans les systèmes d'isolation à la géométrie cylindrique par:

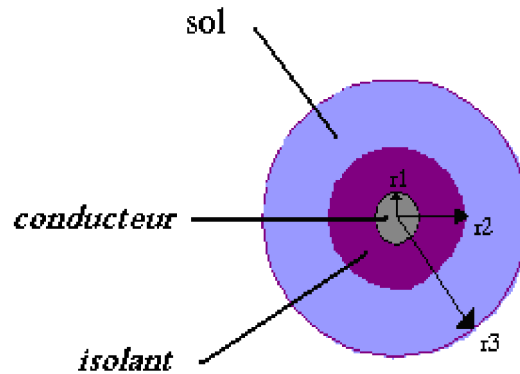


Figure I-2. Coupe radiale d'un câble coaxial

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT(r)}{dr} \right) + \frac{g(r)}{ki} = 0 \quad (\text{I-43})$$

Tel que:  $r_1 < r < r_2$

Le courant de continuité est donné par :

$$2\pi r \delta(r) E(r) = I \quad (\text{I-44})$$

Où:

$T(r)$  : température en fonction du rayon du conducteur,

$E(r)$  : le champ électrique en fonction du rayon du conducteur,

$ki$  : la conductivité thermique de l'isolant,

$I$  : le courant de fuite radial par unité de longueur,

$g(r)$  : la chaleur dissipée en fonction du rayon donnée par l'expression ci dessous [16]:

$$g(r) = \delta(r)(E(r))^2 = \frac{IE(r)}{2\pi r} \quad (\text{I-45})$$

Un modèle théorique pour la conductivité électrique applicable à tous les types des diélectriques pleins n'est pas encore disponible. Oudin et al [17] et d'autres utilisent comme expression de la conductivité électrique:

$$\delta(r) = Ae^{\left[ a|E(r)| - \frac{b}{T(r)} \right]} \quad (\text{I-46})$$

Avec  $\delta(r)$  : la conductivité électrique en fonction du rayon du conducteur,

$A$  : une constante ( $\Omega.m$ )-1.

$a$  : constante connue comme coefficient d'effort (champ).

$B = W.q/K$ , constante connue comme coefficient de température avec  $W$  est l'énergie d'activation thermique,  $q$  étant la charge élémentaire,  $K$  est la constante de Boltzmann.

L'approximation à cette équation de conductivité en utilisant une équation semblable est donnée par:

$$\delta(r) = A' \exp\left(\frac{-b}{T(r)}\right) \frac{\sinh(B|E(r)|)}{|E(r)|} \quad (\text{I-47})$$

Où  $A'$  : constante [ $V/\Omega.m^2$ ]

$B$  : constante [ $m/V$ ].

Ensuite ils déterminent la distribution de la température en fonction du rayon à partir de l'équation de continuité thermique du câble en remplaçant les expressions de la chaleur  $g(r)$ . Ils utilisent la méthode de résolution d'une équation différentielle non homogène, pour aboutir à des équations simplifiées de  $E(r)$  :

$$E(r) \cong b_1 + b_2 \ln(r) + b_3 T(r) \quad (\text{I-48-a})$$

Avec  $b_1$ ,  $b_2$  et  $b_3$  des constantes définies par :

$$b_1 = -b_2 \left( \ln \frac{I}{2\pi A E_0} + 1 + 2b/T_0 \right)$$

$$b_2 = - \left( \frac{E_0}{aE_0 + 1} \right)$$

$$b_3 = b_2 \frac{b}{T_0^2}$$

L'expression approximative de  $T(r)$  :

$$T(r) = a_1 I_0(2\sqrt{\beta r}) + a_2 k_0(2\sqrt{\beta r}) + \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\gamma}{\beta} \ln(r) \quad (\text{I-48-b})$$

$a_1$  et  $a_2$  sont des constantes à déterminer à partir des conditions aux limites

$I_0$  et  $k_0$  sont des fonctions modifiées de BASSEL d'ordre 0.

Les conditions aux limites thermiques dépendent de deux grandeurs électriques: l'intensité du courant  $I_L$  qui traverse le conducteur et la tension appliquée au câble. Ainsi, la chaleur générée dans le conducteur:  $P = R I_L^2$  dans la direction radiale et qui va croiser la limite conducteur – isolant.

L'évaluation de la température (I-48-a) et celle du champ (I-48-b) en fonction du rayon du câble peuvent nous conduire à déterminer les variations des propriétés électriques et mécaniques dépendant des contraintes électrique et thermique.

Plus tard, L.Dissado et al [17] ont amélioré leur modèle de DMM, en donnant l'expression de la valeur d'équilibre  $A$ :

$$A = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

Avec  $C_1$  et  $C_2$  les concentrations à l'état 1 ou l'état réactif et à l'état 2 ou l'état produit de l'isolant.

Soit  $A_{eq}$  est la valeur d'équilibre à la température absolue:



$$A_{eq} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Delta}{KT}\right)} \quad (I-49)$$

La différence d'énergie libre entre l'état réactif et l'état produit est donnée par:

$$\Delta = G_2 - G_1$$

Soit  $A(t)$  La valeur de  $A$  à l'instant  $t$ :

$$\ln \left[ \frac{1 - \frac{A(t)}{A_{eq}}}{1 - \frac{A(0)}{A_{eq}}} \right] = -(R_f + R_b)t \quad (I-50)$$

Avec  $A(0)$  est la valeur initiale de  $A$ ,  $R_f$  et  $R_b$  déjà prédéfinies au paragraphe 5.

A partir de là, ils déduisent le modèle de la durée de vie:

$$L(T) = \frac{h \exp(\Delta G / KT) \ln \left[ \frac{A_{eq}}{A_{eq} - A^*} \right]}{KT \exp(-\Delta / 2KT) + \exp(\Delta / 2KT)} \quad (I-51)$$

Où:

$$\Delta G = G_a - \frac{G_1 + G_2}{G_2}$$

D. Fabiani et al [18] analysent l'effet du gradient de la température appliqué aux câbles isolés aux polymères sur la charge d'espace accumulée à l'intérieur du volume d'une isolation. Les mesures expérimentales montrent l'évaluation de la densité de charge de l'état d'équilibre  $P_{ig}$  due au gradient de température en fonction du rayon du câble. Cette évaluation peut être exprimée par l'équation suivante:

$$P_{ig}(x) = -\epsilon E(x) \frac{E_a}{KT^2(x)} \frac{dT(x)}{dx} \quad (I-52)$$

Avec  $K$ : la constante de Boltzmann.

$E_a$  : l'énergie d'activation de la conduction dans le volume d'isolation.

$a$  : constante connue comme coefficient d'effort (champ).  $E$  et  $T$  sont respectivement le champ électrique et la température dépendant du rayon du câble.

Un autre travail de J.C.Dubois [19] sur une approche classique consiste à étudier l'évaluation d'une telle propriété sensible  $P$  au cours du temps en prenant comme postulat que  $P$  est directement liée à la concentration des molécules soumises au phénomène de dégradation par l'expression :

$$C = f(P) \text{ ou } P = f^{-1}(C) = f^*(C)$$

Sachons que les principes de base de ces approches se basent sur des lois cinétiques telles que :

$$\frac{dC}{dt} = -kC^\alpha \quad (\text{I-53})$$

Avec  $C$  : la concentration des molécules soumises au phénomène de dégradation,

$t$  : temps de vieillissement,

$k$  : constante de réaction ,

$\alpha$  : ordre globale de la réaction, compris entre 1 et 3 .

Donc la relation précédente devient :

$$\frac{dP}{dt} = -k'P^\alpha \quad (\text{I-54})$$

La résolution de cette équation différentielle donne les expressions suivantes selon les valeurs de  $\alpha$  :

- si  $\alpha=0$ ,  $P = P_0 - k't$  ;
- si  $\alpha=1$ ,  $P = P_0 \exp(-k't)$  ;

$$P = [1 + (\alpha - 1)k't]^{-\frac{1}{\alpha-1}} \quad \bullet \text{ si } \alpha \neq 0 \text{ et } \alpha \neq 1,$$

Avec  $P_0$  la valeur de la propriété à l'instant initial

La connaissance de l'expression de  $k'$  en fonction des contraintes de fonctionnement (température, irradiation, pression, contrainte électrique ...) permet de construire des graphes d'endurance et d'évaluer les énergies d'activation du système. Elle permet, en outre, de valider les conditions d'essais du vieillissement accéléré.

La définition d'un critère seuil d'utilisation du système est essentielle pour prévoir la durée de vie de ce dernier. La détermination de l'expression de la courbe décrivant le comportement permet donc d'évaluer la valeur atteinte par le système d'isolation après  $x$  années de fonctionnement. Cette approche n'est cependant pas toujours applicable en absence du critère de fin de vie et selon l'expression de la courbe.

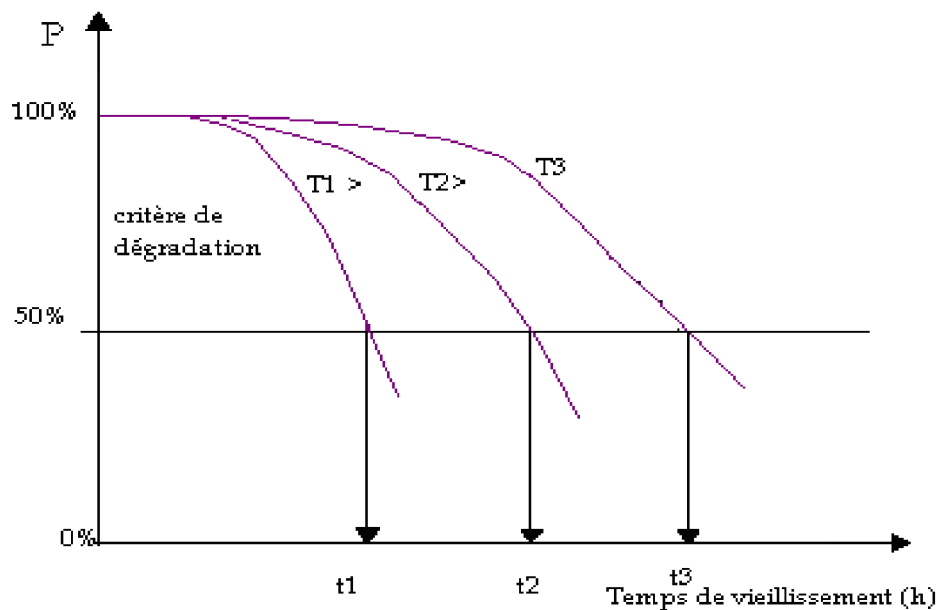


Figure I-3. Détermination du temps  $t_i$  nécessaire pour atteindre le critère de dégradation de 50% à chaque température  $T_i$

Le tracé de l'évaluation de  $\ln t$  en fonction de  $1/T$  (figure I-4) (avec  $t$  le temps de vieillissement du matériau et  $T$  la température correspondante) est le graphe d'endurance thermique et permet entre autre d'évaluer:

- La tenue dans le temps à une température donnée;

- L'indice de température: nombre égal à la température (° C) qui correspond sur le graphe d'endurance thermique à un temps donné, normalement égal à 20000 h (norme CEI 60216).

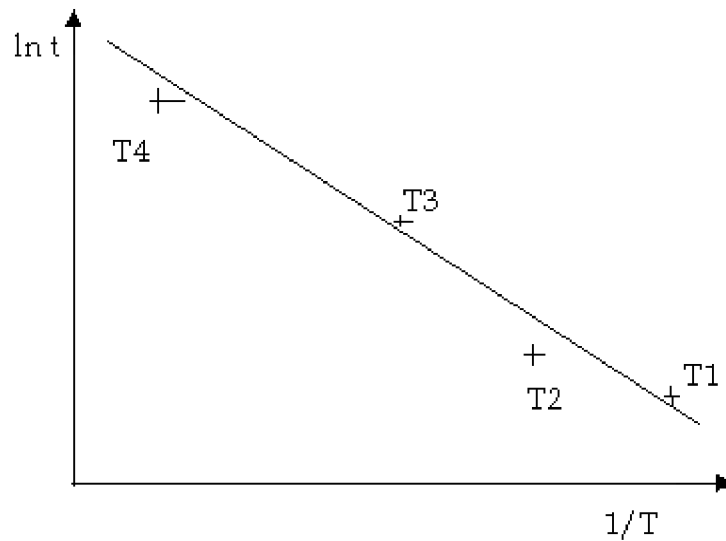


Figure I- 4. Evaluation de la durée de vie d'un système d'isolation

L'allure de cette courbe peut s'exprimer par l'évaluation, tirée de la loi d'Arrhenius :

$$\ln t = A + \frac{E_a}{RT} \quad (\text{I-55})$$

Avec t temps au bout duquel on atteint le critère fixé,

A constante préexponentielle,

Ea énergie d'activation,

R Nombre d'Avogadro,

T température exprimée en Kelvins.

Pour les types de câbles utilisés, bien qu'ils soient déjà utilisés pour le transport d'énergie électrique sous une haute tension alternative (HTCA), les câbles à isolation synthétique ne sont pas encore employés pour le transport sous une haute tension continue (HTCC), pour des raisons à la fois techniques et industrielles; cependant, des études sont en cours pour en démontrer la faisabilité.

La distribution du champ électrique en régime permanent, contrairement à ce qui se produit pour les câbles sous haute tension alternative HTCA où le gradient du potentiel (champ électrique), est fonction uniquement de la géométrie du câble, c'est la conductivité électrique de l'enveloppe isolante de ceux sous tension continue qui gouverne la distribution du champ électrique. Pour les câbles à isolation papier (de type solide), cette conductivité  $\delta(r)$  en un point  $r$  de l'enveloppe isolante est fonction à la fois du champ électrique et de la température locale et peut se mettre sous la forme:

$$\delta(r) = \delta_0 \exp[\alpha\theta(r) + \beta_E E(r)] \quad (\text{I-56})$$

Avec  $\delta_0$ : conductivité électrique de l'isolation à température ambiante (dite asymptotique)

$\theta(r)$ : température en un point  $r$  de l'enveloppe isolante,

$E(r)$ : champ électrique au même point  $r$ ,

$\alpha$ : coefficient de température ( $0, 1 K^{-1}$ ),

$\beta_E$ : coefficient de champ électrique ( $0,033 \text{ mm/kV}$ ).

Le calcul du champ électrique en un point  $r$  de l'isolant s'obtient par application de la loi d'Ohm sur une couronne d'épaisseur  $dr$ :

$$dU = IdR$$

Avec  $I$  courant traversant l'isolant,

$dR$ : résistance de la couronne,

$dU$ : différence de potentiel appliquée sur la couronne  $dr$ .

$$dU = \frac{drI}{\delta_0 2\pi r} \exp(-\alpha\theta(r) - \beta_E E(r)) \quad (\text{I-57})$$

$$\Delta\theta = \theta(r_2) - \theta(r_1) = \frac{\rho_{th}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$\Delta\theta = \theta(r) - \theta(r_1) = \frac{\rho_{th}}{2\pi} \ln \frac{r}{r_1}$$

$$\Delta\theta = \theta(r_2) - \theta(r_1) = \frac{\Delta\theta \ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (\text{I-58})$$

$\theta(r)$  peut être obtenu en considérant d'une part le flux thermique entre le conducteur à la température  $\theta_1$  et la surface cylindrique engendrée par le rayon  $r$  dans l'isolant et, d'autre part, la chute de température  $\Delta\theta$  entre le conducteur ( $r_1$ ) et l'isolant ( $r_2$ ),  $\rho_{th}$  étant la résistivité thermique de l'isolant.

Comme on a :

$$E(r) = -dU/dr$$

Alors  $E(r)$  sera déterminé à partir de l'équation (I-57)

En considérant la constante :

$$E(r)\exp(\beta_E E(r)) = \frac{-I}{\delta_0 2\pi r} \left(\frac{r}{r_1}\right)^m \exp[-\alpha\theta(r_1)] \quad (\text{I-59})$$

$$m = \frac{\alpha\Delta\theta}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

D'autre part la contrainte mécanique joue un grand rôle dans l'accélération du vieillissement du câble, considérant un câble soumis à une force de traction  $\delta_T$ , cette force peut être suggérée appliquée sur conducteur et sur l'armure :

$$\delta_T = \delta_{TC} + \delta_{TA} \quad (\text{I-60})$$

$$\delta_{TC} = \xi_c \frac{\Delta l_c}{l_c} \quad \text{et} \quad \delta_{TA} = \xi_A \frac{\Delta l_A}{l_A} \quad (\text{I-61})$$

Avec

$\xi_c$  et  $\xi_A$  : module de Young du conducteur.

$\frac{\Delta l_c}{l_c}$  et  $\frac{\Delta l_A}{l_A}$  Sont respectivement les allongements du conducteur et de l'armure.

## Chapitre II

# ***"Présentation des Polymères"***

### Introduction :

L'utilisation depuis les années cinquante, des produits synthétiques dans l'isolation des câbles moyenne et haute tension a hautement facilité le transport de l'énergie électrique. Ces nouveaux produits, en particulier le polyéthylène (PE) et le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), ont montré un meilleur comportement dans les câbles des réseaux, comparés à ceux isolés au papier imprégné d'huile. Cette isolation, extrudée à base de polyoléfinés, élimine le problème de migration des matières d'imprégnation, augmente la température admissible après un court circuit en moyenne tension (MT) et écarte surtout le problème de la maintenance [20]. En revanche, les études faites sur la tenue de l'isolation synthétique des câbles de haute tension (HT) alternatives montrent que la rupture des matériaux polymères est due, soit à la présence des cavités ou impuretés au sein du matériau, soit au vieillissement dans un intervalle de temps, suite à des contraintes électriques et thermiques de service. L'utilisation du PE a été limitée, dès les années soixante, aux basses et aux moyennes tensions (MT, BT). Quant au PRC, il reste présent dans tout type de réseau BT, MT et surtout dans les réseaux HT. Cependant, son utilisation vaste n'élimine pas ces inconvénients. Le plus important d'eux est la porosité et la teneur en eau qui est les plus importantes relativement au PE. En effet, et même avec le meilleur procédé de réticulation sèche.

Dans ce chapitre, on s'intéresse beaucoup plus aux polymères utilisés dans les câbles souterrains dont la structure du câble est schématisée dans la figure (II.1) [21].

6

1-Ame conductrice.

2-Ecran semi-conducteur.

3-Enveloppe isolante.

4- Ecran semi-conducteur sur l'isolant.

5-Ecran métallique en cuivre.

6-Gaine de protection en PVC.

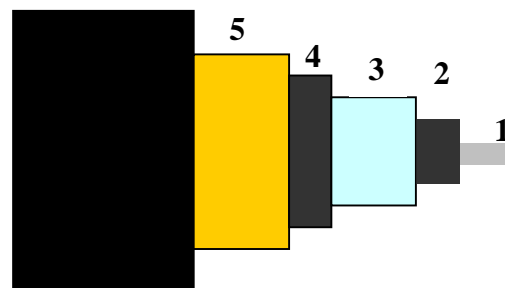


Figure II-1. Constitution d'un câble de HT



L'âme conductrice (1) est constituée par un câblage de fils de cuivre ou d'aluminium, sert à transporter le courant électrique. Ces métaux assez ductiles assurent une résistivité électrique très faible et une résistance mécanique suffisante [20]. .

L'écran semi-conducteur sur l'âme (2). D'une épaisseur égale à 5% au moins de l'épaisseur de moyenne de l'isolant, sert à limiter et uniformiser le champ électrique. Cette couche est constituée par le noir de carbone mélangé à un copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle de résistivité transversale, mesurée en courant continu, de l'ordre de  $5.10^{-2}\Omega m$ .

L'enveloppe (3) est destinée à assurer l'isolation électrique de l'âme conductrice. Les polymères constituent les matériaux les plus utilisés actuellement dans l'isolation. Ils ont de bonnes propriétés mécaniques, une bonne souplesse et une grande élasticité. Du point de vue électrique, leur rigidité diélectrique peut varier de 15kV/mm à 60 kV/mm, dans la gamme des tensions de 30kV à 400kV.

La couche semi-conductrice sur l'isolant (4) assure une répartition radiale du champ électrique dans l'isolant et forme une surface équipotentielle, rendant les caractéristiques électriques du câble indépendantes du mode de pose.

L'écran métallique (5), formé de bande de cuivre ou d'aluminium, assure le retour des courants de court circuit, et protège le câble contre le franchissement et l'émigration de l'humidité.

La gaine de protection extérieure (6), constituée par un mélange extrudé de polychlorure de vinyle (PVC), sert à éviter la corrosion de l'écran métallique, et à protéger le câble contre l'humidité et les chocs mécaniques [22].

### **II.1 Polymères utilisés dans l'isolation des câbles:**

Les polymères utilisés dans l'isolation électrique des câbles présentent généralement une bonne rigidité diélectrique en haute tension. Toutefois, cette qualité diélectrique de l'enveloppe isolante peut être affectée par la variation de trois facteurs essentiels, en l'occurrence [23]:

**II-1.1. Pureté du matériau :**

Les inclusions conductrices et protubérances des écrans ont pour effet d'accroître le champ électrique à leur voisinage et donc d'induire le claquage sous un champ électrique moyen plus faible que celui qui produirait la rupture en leur absence. Le champ de claquage décroît avec la taille des inclusions (1).

**II-1.2. Présence de vacuoles :**

Les vacuoles sont le siège de décharges partielles qui dégradent l'isolant et conduisent à la rupture du matériau par arborescences électriques.

**II-1.3. Teneur en humidité :**

La présence ou la pénétration d'eau dans l'isolation électrique conduit à la formation d'arborescences électrochimiques. Avec le temps, ces dernières se développent jusqu'à ce que elles puissent causer l'apparition d'arborescences électriques qui à leur tour provoquent un claquage d'isolant [23].

**II -2. Stabilité thermique des polymères:**

De toute évidence, un polymère, pour être utilisable, doit conserver un certain ensemble de propriétés physiques, quand il est porté à la température d'emploi. Ce sont les facteurs physiques qui sont prédominants. D'autre part, il doit conserver dans le temps ces propriétés minimales, il ne doit pas être dégradé par l'environnement, il y aura donc des facteurs chimiques qui interviendront pour limiter la stabilité thermique. Il est bon de noter que, le plus souvent, les facteurs chimiques n'interviendront que sous l'aspect durée, les facteurs physiques déterminant les propriétés instantanées [24].

**II-2. 1. Facteurs physiques:**

-Le plus important est le point de fusion des polymères, car au dessus de ce point, les propriétés électriques et mécaniques disparaissent complètement.

-Le point de transition vitreuse: détermine largement le domaine d'utilisation des polymères.

-Au point de fusion, le phénomène est équilibré, à pression constante, l'énergie libre de fusion est nulle à la température de fusion  $T_f$  [24] :

$$\Delta H_f - T_f \Delta S_f = 0 \quad (II-1)$$

### II-2. 2. Facteurs chimiques:

-L'oxydation thermique résulte de la formation de peroxyde et de groupements carbonyles. Pour éviter la formation de ces peroxydes, le noir de carbone est un bon stabilisateur.

-Le noir de carbone constitue de loin l'écran de protection le plus efficace pour le polyéthylène. La présence de 2% de ce noir de carbone porte la durée de vie des câbles de 1 à 20 ans. Une autre forme de stabilisation contre la photo oxydation consiste à absorber les radiations ultraviolettes et dissiper l'énergie absorbée de façon qu'elle ne dégrade pas le polymère [24].

### II-3. Conduction des isolants polymères:

Aux champs électriques faibles (de l'ordre de 10<sup>6</sup> V/m), la conduction des isolants présente généralement un caractère ohmique. Pour les solides, il est admis qu'elle est due au déplacement d'ions et d'électrons. En ce qui concerne les polymères, de nombreux chercheurs insistent sur le rôle joué par les ions résultant de la dissociation d'impuretés qui ont été introduites dans le matériau lors des opérations de fabrications et de mises en œuvre [25].

En générale, la conductivité d'un matériau peut s'exprimer selon la formule suivante:

$$\delta = \sum_i^n n_i q_i \mu_i \quad (II-2)$$

Où  $\delta$ : conductivité

$n_i$ : nombre de porteurs  $i$

$q_i$ : charge d'un porteur  $i$

$\mu_i$ : mobilité d'un porteur  $i$

Dans la plupart des cas, la conductivité  $\delta$  varie avec la température suivant la formule suivante:

$$\delta = \delta_0 \exp\left(-\frac{W}{RT}\right) \quad (II-3)$$

Où  $W$ : énergie d'activation

$R$ : constante des gaz parfaits

$T$ : température absolue.

Aux champs électriques élevés, la conduction des isolants perd son caractère ohmique dans les isolants solides [2] (la relation (I.1) du premier chapitre).

#### **II-4.Mécanisme de rupture de l'isolant en polymère:**

Les isolants en polymère, utilisés en pratique, présentent des défauts quelque soit le soin apporté à leur mise en œuvre. Ces défauts jouent un rôle déterminant dans les processus de rupture diélectrique de ces isolants. Ces processus sont classés suivant deux types: la rupture à court terme et la rupture à long terme [20,26].

#### **II-4.1. Mécanisme de rupture à court terme:**

Il existe deux mécanismes principaux de rupture diélectrique à court terme, le mécanisme de rupture électrique et le mécanisme de rupture thermique [27].

#### **II-4.1.1. Mécanisme de rupture électrique:**

La rupture électrique est de nature électronique. Elle ne dure qu'un temps très court, généralement d'un ordre inférieur à une seconde. Deux théories sont envisagées:

##### **a. Théorie de rupture intrinsèque:**

Cette théorie ne tient en compte que des phénomènes physiques propres à la morphologie et à la structure électronique de l'isolant. Les défauts qui y sont présents ne jouent aucun rôle dans ce type de rupture. Cette théorie suppose que les conditions pour lesquelles l'équation d'équilibre énergétique électrons photons n'est plus respectée. Il s'ensuit l'apparition d'une avalanche électronique qui se développe pour une petite augmentation de champ au dessus d'une valeur critique, créant enfin de compte la rupture de l'isolant.

##### **b. Théorie de rupture par avalanche :**

Dans ce mécanisme, dit aussi rupture diélectrique par collisions ionisantes, on suppose que les électrons ont suffisamment d'énergie pour être injectés par la cathode. Ces électrons traversent l'isolant jusqu'à une certaine profondeur en créant des paires électrons – trous par

collision avec les atomes de l'isolant. Les trous, piégés profondément, forment un espace chargé positivement qui tend à extraire davantage d'électrons à la cathode. Dans le cas où le champ électrique dépasserait une certaine valeur critique, on a un emballement du courant, et une rupture diélectrique s'ensuit [26].

#### **II-4.1.2. Mécanisme de rupture thermique (théorie de Wagner):**

En présence d'un champ électrique, l'existence des porteurs de charges libres dans un matériau isolant conduit à l'apparition d'un courant de conduction, provoquant un échauffement de l'isolant par effet joule et dont la puissance vaut  $\sigma E^2$ . Cependant, ce courant n'est pas la seule source de chaleur. Nous savons que les diélectriques présentent des phénomènes de relaxation quand ils sont soumis à un champ électrique alternatif. Ces phénomènes engendrent des mécanismes de pertes, dites pertes diélectriques, et qui contribuent à l'échauffement de l'isolant d'une grandeur de:

$$E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' \cdot \tan \delta \quad (II-4)$$

Où  $\omega$  la pulsation du champ,  $\epsilon_r'$  et  $\epsilon_r''$  sont respectivement la composante réelle et imaginaire de la permittivité diélectrique relative de l'isolant.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r'' \quad (II-5)$$

Les deux chaleurs suscitées constituent donc la source.

Une partie de cette chaleur est stockée par l'isolant et vaut  $C_v dT/dt$ , où  $C_v$  est la chaleur spécifique de l'isolant. L'autre partie est dissipée et vaut  $-\text{div}(K \text{ grad } T)$ , où  $K$  est la conductivité thermique de l'isolant. La consommation de la chaleur variant dans l'isolant d'une position à une autre.

Le bilan énergétique d'un tel processus est exprimé par l'équation de Wagner:

$$\sigma \cdot E^2 + \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' \cdot \tan \delta \cdot E^2 = C_v \frac{dT}{dt} - \text{div}(K \text{ grad } T) \quad (II-6)$$

Si la vitesse de dissipation de chaleur est inférieure à celle du stockage, il se produit une élévation rapide de la température du matériau jusqu'à ce que cette température atteigne localement une valeur critique  $T_c$ , au-delà de laquelle le courant croît rapidement entraînant la rupture totale de l'isolant. (Figure II -2).

$T_c$  : température critique

1 : pas de claquage

2 : claquage thermique à long terme

3 : claquage thermique à temps limité

4 : claquage thermique pour un échelon de tension

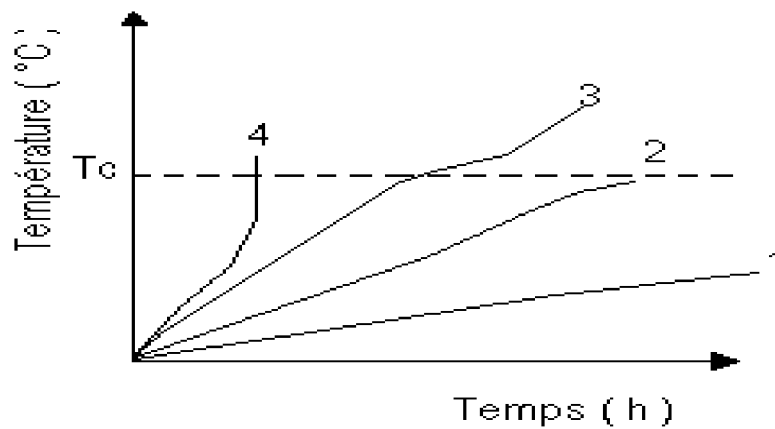


Figure II-2. Claquage thermique [26]

D'autre part, l'augmentation de la température diminue la rigidité diélectrique de l'isolant (figure II-6), ce qui favorise en plus l'apparition du claquage thermique. Ce dernier est parfois précédé par la décomposition chimique ou par la fusion de l'isolant [28].

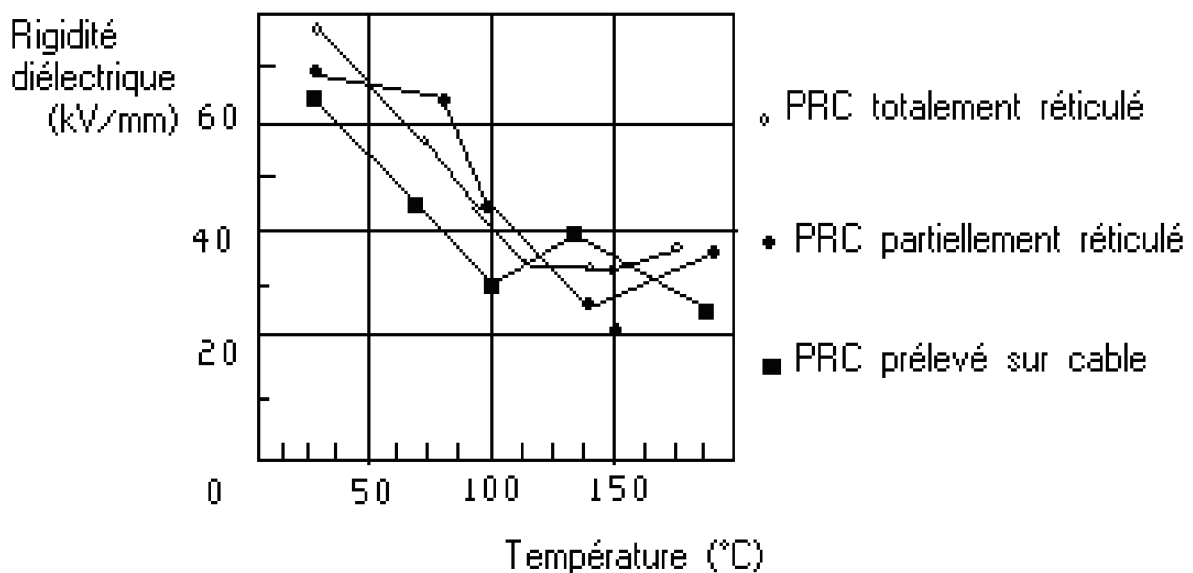


Figure II -3. Variation de la rigidité diélectrique du PRC en fonction de la température

#### **II-4.2. Mécanisme de rupture à long terme:**

Lorsque l'isolant du câble est soumis à un champ électrique modéré ne permettant pas l'obtention de la température critique de claquage (courbe 1, figure II-2), les défauts existant rentrent en jeu et causent la destruction de l'isolant après un temps très long. Les phénomènes responsables d'un tel claquage sont les décharges partielles et les arborescences [29].

##### **II-4.2.1. Rupture diélectrique provoquée par les décharges partielles:**

Les décharges partielles se manifestent grâce à l'existence de vacuoles gazeuses à l'intérieur de l'isolant. L'existence de vacuoles a pour conséquences l'augmentation non négligeable du champ électrique qui y règne. Lorsqu'on atteint la tension seuil d'ionisation du gaz de vacuole, des décharges électriques apparaissent. Ces décharges entraînent une augmentation locale de la température et aussi une érosion mécanique des parois de vacuole par le bombardement d'ions du gaz et d'électrons qui s'y manifestent. Il peut se produire également des réactions chimiques provoquées par des atomes excités par les décharges. Ce processus de rupture est très lent (de l'ordre de quelques années pour une fréquence industrielle) et la durée de vie de l'isolant dépend essentiellement de l'amplitude du champ électrique appliqué et de sa fréquence [23].

##### **II-4.2.2 Rupture diélectrique provoquée par les arborescences:**

Sous un champ de service, de nouveaux défauts se créent dans l'isolant par décharges partielles à partir des défauts initiaux (vacuoles). Par conséquent, une augmentation de la densité de charges au sein de l'isolant s'établit par polarisation. Après une certaine durée et sous l'action du champ électrique, les défauts se regroupent. Les porteurs de charges (les électrons) vont alors voir leur libre parcours moyen augmenter de plus en plus, et par conséquent, ils acquièrent plus d'énergie, et par la suite la formation des arborescences électriques. Ces dernières sont des chemins de conduction électrique dans la partie isolante du câble et qui se manifestent sous forme d'arbre (figure II-4). On distingue trois phases dans l'évolution du phénomène d'arborescence:

- La phase de formation
- La phase de propagation qui est toujours accompagnée de décharges partielles.

- La phase de claquage qui se produit rapidement lorsque les branches de l'arbre traversent complètement la couche isolante [23,30].

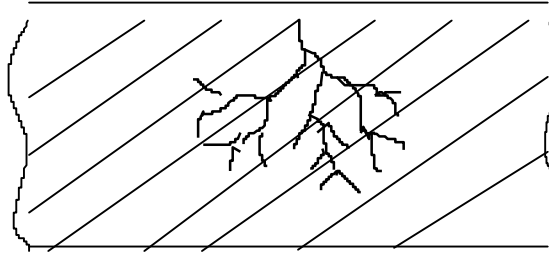


Figure II-4. Claquage par arborescence

### **II-5. Vieillissement des polymères:**

Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, les isolants vieillissent. Le vieillissement est caractérisé par une altération partielle des propriétés diélectriques de ces isolants.

Les principaux types de vieillissement sont:

- le vieillissement thermique: provoqué par l'action de longue durée de hautes températures, sur le diélectrique.
- le vieillissement électrochimique: engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique.
- le vieillissement électrique (ionisation - décharges partielles): résultant des décharges dans les espaces, surtout gazeux, enfermés dans les diélectriques.

Les vieillissements sont caractérisés surtout par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques (par exemple: augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité). Très souvent, différents mécanismes apparaissent simultanément et influent mutuellement l'un sur l'autre [29].

#### **II-5.1. Vieillissement thermique:**

Le vieillissement thermique dépend de la structure du diélectrique. La dégradation du matériau est activée par la présence d'oxygène. Les principaux processus de vieillissement thermique sont:



- la rupture des chaînes multimoléculaires, accompagnée par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques,
- le dégagement de gaz à faible poids moléculaire,
- l'oxydation conduisant à l'apparition d'acides carboxyliques.

### **a. Loi générale du vieillissement thermique:**

La durée de vie de l'isolation est définie par le temps, après lequel les propriétés de l'isolant sont modifiées jusqu'à un niveau défini.

La loi générale de vieillissement consiste à étudier les variations d'une grandeur physique "P" (rigidité diélectrique, rigidité mécanique...), en fonction de la concentration "C" d'un composant élémentaire, lorsque la température varie.

La durée de vie "t" est définie par:

$$t = A.e^{B/T}$$

Avec:

A et B constantes relatives au type de matériau

### **b.Loi de Montsinger:**

W.M.Montsinger a établi la relation liant la durée de vie "t" de l'isolation à base de cellulose en fonction de la température:

$$t = t_0.e^{-m.T}$$

Avec:

- $t_0$ : temps caractéristique par type d'isolation donné,
- m: constante de Montsinger ( $m=0,0865 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

D'après cette loi, quand la température T augmente de  $8^\circ\text{C}$ , la durée de vie diminue de moitié (règle des  $8^\circ\text{C}$ ). Cette loi est valable pour les températures comprises entre  $100^\circ\text{C}$  et  $130^\circ\text{C}$ . Elle n'est pas toujours vérifiée, car la réduction de la durée de vie, dépend surtout du degré de polymérisation à partir duquel l'isolation n'est plus utilisable. Par exemple, le degré de polymérisation initial de la cellulose dans le papier, est de l'ordre de 1200-1300. Le degré final est d'environ 150. A ce dernier degré, le papier n'a pratiquement aucune rigidité mécanique.

En plus de la température, les principaux facteurs qui accélèrent le vieillissement thermique sont l'humidité et l'oxygène.

### **II-5.2. Vieillissement Electrochimique:**

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

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

- Les ions métalliques peuvent, après neutralisation, pénétrer dans le diélectrique et y créer souvent des chemins conducteurs appelés "dendrites".

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.

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.

### **II-5.3. Vieillissement Electrique:**

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée. Il est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale du matériau. La dégradation est particulièrement accentuée par la présence d'impuretés de différentes natures, plus particulièrement des vacuoles de gaz au sein du diélectrique. Ces impuretés sont en général le siège de décharges partielles qui peuvent engendrer, après un temps relativement long, l'érosion du matériau et finalement la rupture diélectrique.

En pratique, la tension seuil d'apparition des décharges partielles correspond à la tension appliquée au matériau à partir de laquelle la charge apparente fournie par le réseau est égale

à un seuil donné. La tension seuil d'apparition des décharges partielles risque de diminuer en fonction du temps de vieillissement pour les champs appliqués relativement intenses. La tension seuil d'apparition des décharges partielles diminue aussi dans le cas du vieillissement thermique (application de fortes températures sur de longues périodes) [20].

## II-6. Influence du vieillissement thermique sur les propriétés électriques des polymères :

### II-6. 1. Résistivité transversale :

La résistivité ou la conductivité polymères suivant la loi d'Arrhenius (I-7), la résistivité d'un polymère diminue avec la température [31] (figure (II-5)).

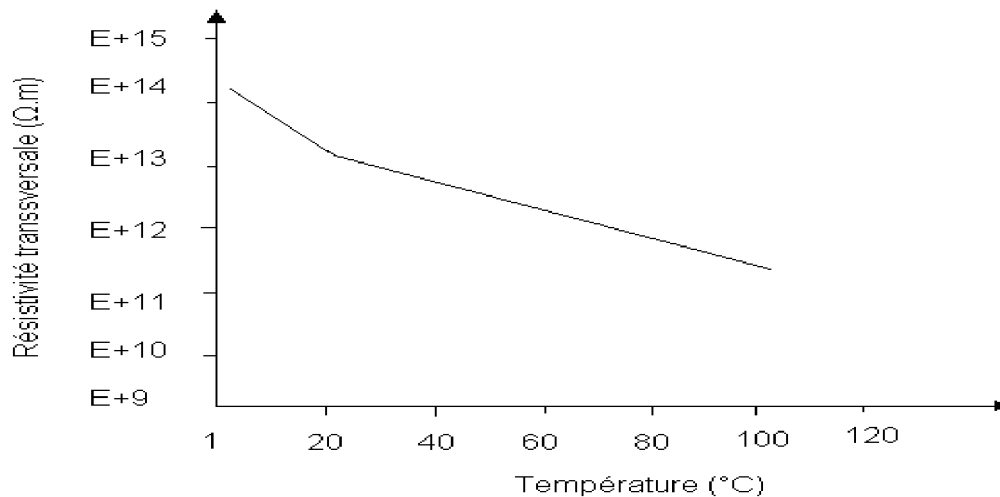


Figure (II-5) Variation de la résistivité transversale en fonction de la température

### II-6.2. Permittivité relative :

La permittivité relative diminue très sensiblement avec la température [31] (Figure (II-6))

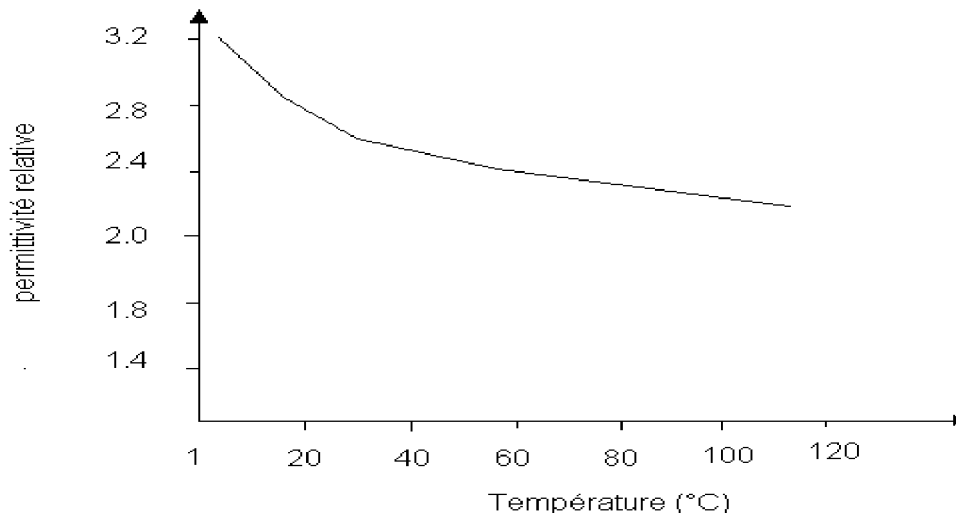


Figure (II-6) variation de la permittivité relative en fonction de la température

### II-6.3. Le facteur de dissipation:

Le facteur de pertes diélectriques croît avec la température [31] (Figure (II-7))

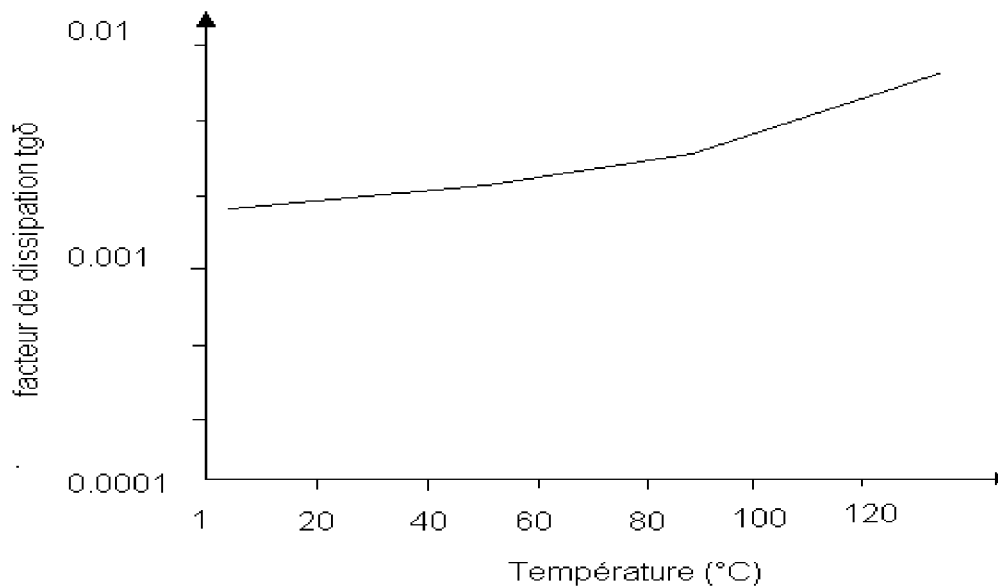


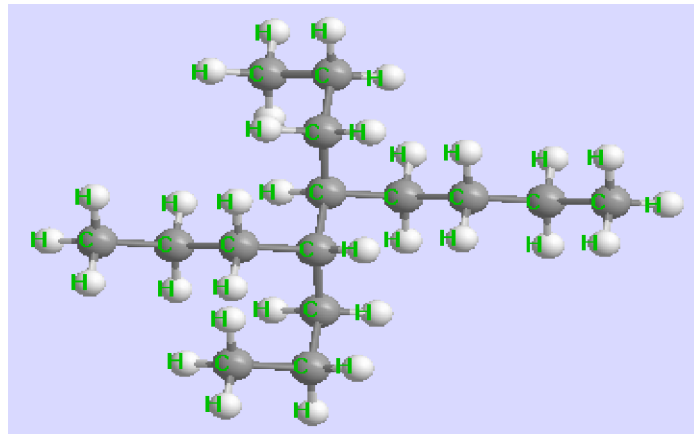
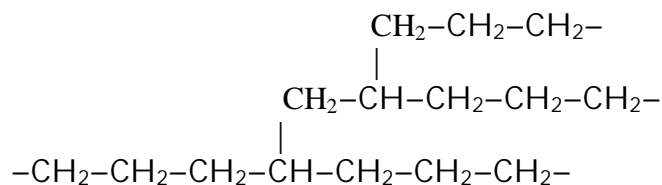
Figure (II-7). Variation du facteur de dissipation en fonction de la température

### II-7. Propriétés de l'isolation :

Parmi les polymères utilisés dans la fabrication des câbles et qui répondent le mieux aux exigences industrielles, le Polyéthylène (PE), le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC), l'Éthylène Propylène Diène Monomère (EPDM) et le polychlorure de vinyle (PVC) sont les mieux adaptés.

### II-7.1. Les Polyéthylènes (PE) :

Les polyéthylènes (PE) sont obtenus par polymérisation de l'éthylène  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ , en présence de catalyseurs, dans certaines conditions de température et de pression. La molécule du polyéthylène peut présenter des ramifications qui provoquent une diminution de la densité du matériau et de sa cristallinité (figure II-8):



*Figure II-8 molécule de PE ramifiée*

Cette polymérisation peut être obtenue:

- soit à haute pression (3000 bars) et à température élevée ( $400^\circ\text{C}$ ) [25].

Les polyéthylènes obtenus sont dits à haute pression ou basse densité (PEBD)

- soit à basse pression (50 bars) et à une température inférieure à  $180^\circ\text{C}$  [25].

Les polyéthylènes obtenus sont dits à basse pression ou haute densité (PEHD).

Le PEBD continue d'être largement utilisé dans la fabrication des câbles en raison de son faible coût et la facilité de sa mise en œuvre. De surcroît, le PEBD est électriquement meilleur que le PEHD. Par contre, sa faible résistance thermique limite assez sévèrement son emploi, lorsqu'on l'utilise en haute tension où la température dans l'âme du câble peut dépasser  $90^\circ\text{C}$ . Notons que le PEBD est un produit thermoplastique qui se ramolli et

devient déformable vers 80°C et fond vers 100°C. Malgré de constant progrès dans la recherche, additif et de stabilisant, les câbles isolés au PEHD ne sont utilisés couramment que dans la gamme de 60 à 132kV. Une meilleure performance est réalisée pour des câbles de service à isolant en PEBD, réalisée en France par la firme SILEC, où la tension de service atteint 225kV.

## II-7.2.Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) :

### II-7.2.1.Mise en œuvre du PRC:

Le PRC est obtenu à la base du PE, le procédé le plus utilisé consiste à incorporer du peroxyde de dicumyl (Figure II-9) à une teneur de 2% dans le PE, avant ou pendant l'extrusion puis à soumettre le mélange à une température supérieure à 150°C sous une pression de vapeur d'eau ou d'azote.

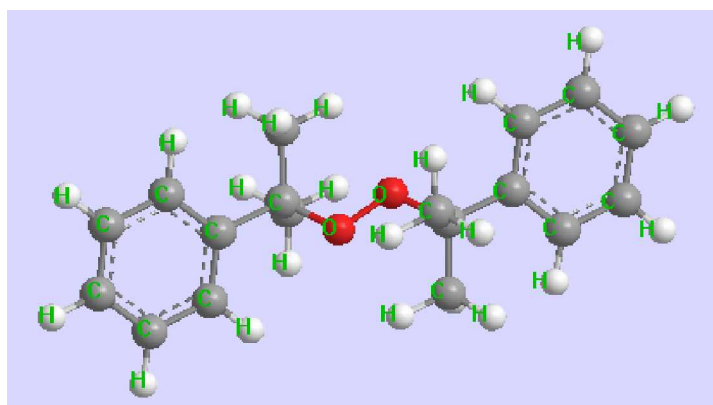
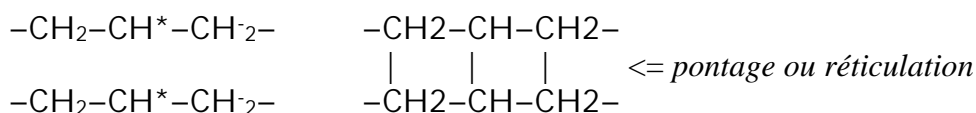


Figure II-9. Structure moléculaire du peroxyde de dicumyl

Lors de ces opérations, le peroxyde organique composé, dont la forme générale est R-O-O-R, où R est un radical quelconque aromatique ou aliphatique, se décompose à haute température selon la réaction :  $R-O-O-R \rightarrow 2RO^*$ , pour donner des radicaux libres très actifs. Ces derniers se combinent avec les hydrogènes des chaînes du polymère pour former des sites réactifs et un alcool [32]:



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



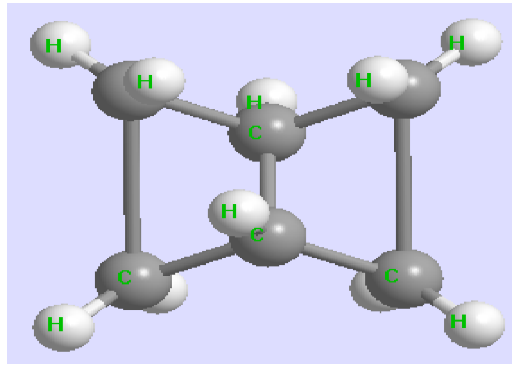


Figure II-10. Molécule du PRC

Le taux de réticulation est caractérisé par le nombre de ces pontages : il est évalué par des méthodes chimiques ou des essais mécaniques. Le PRC a une morphologie sphérolitique semi-cristalline, l'unité morphologique est le sphérolite, est un corps polyédrique, généré à partir d'un noyau et enveloppé par une matrice amorphe. L'intérieur est constitué d'un arrangement de cristaux lamellaire radialement répartis et séparés les uns des autres par le matériau amorphe [23, 33] (figure II.11).

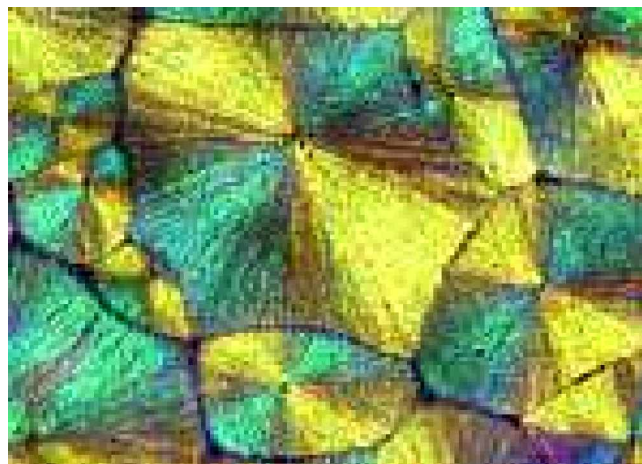


Figure II.11. Structure des sphérolites

### **II-7.2.2. Avantages et inconvénients de l'isolation en PRC :**

Le PRC présente les avantages suivants :

- Pertes diélectriques extrêmement faibles et quasi indépendantes de la température;
- Bonne étanchéité à l'eau ;
- Forte résistance d'isolement ;
- Meilleure conductivité thermique;
- Haute rigidité diélectrique ;
- Température de fonctionnement élevée (90°C en service normal) ;

- Bonne tenue en court-circuit (à 250°C).

Toutefois le PRC présente certains inconvénients par rapport aux polyéthylènes PEBD et PEHD [33]:

- **Filtrage plus difficile:** au cours de la fabrication, on impose un filtrage permettant d'éviter les inclusions et les protubérances et d'éliminer certaines particules telles que les fibres de verres.
- **porosité et teneur en eau plus importantes:** avec le meilleur procédé de réticulation sèche, la teneur en eau atteint dans le PRC plus de 100ppm, alors que la quantité d'eau maximale admise dans les câbles HT à isolation PE est de 10ppm [34].

### II-7.2.3. Avantages du PRC sur le PE:

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

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

La réticulation du polyéthylène a pour conséquence les principaux avantages suivants:

- La réticulation confère au PEBD des propriétés mécaniques améliorées, en particulier, une meilleure résistance au fluage (déformation à chaud). Celles-ci peuvent également être améliorées par l'incorporation de charges renforçantes au



polymère. Le produit obtenu est un thermoplastique. Sa tenue au vieillissement thermique est améliorée par rapport à celle du PEBD.

- La réticulation fait disparaître complètement la tendance qu'avait la résine à se fissurer au contact d'atmosphères agressives du type oxydant.
- Le PRC possède une meilleure résistance à la fissuration sous l'effet de contraintes mécaniques extérieures, ainsi qu'une meilleure charge de rupture (150 kg/mm<sup>2</sup>).
- de fait de la réticulation, la température d'utilisation est de 90°C et la température tolérée en court-circuit est de 250°C.
- Le PRC chargé de noirs de carbone appropriés ne propage la flamme que difficilement.
- Les propriétés thermiques et électriques du PRC ne sont pas très différentes de celles du PE. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE [25].

### **II-7.3. Présentation de l'EPDM:**

L'EPDM appartient à la famille des caoutchoucs élastomères, il est caractérisé essentiellement par une haute inertie vis-à-vis des produits chimiques et par une remarquable résistance à de nombreux facteurs tels que : intempéries, ozone, humidité, décharges électriques et température. Cependant, l'action séparée ou combinée de ces facteurs peut provoquer dans le temps une dégradation des propriétés du matériau. Des chercheurs ont étudié la dégradation de l'EPDM et ses mélanges sous une variété de conditions, y compris la photo-oxydation, l'oxydation radiochimique, la thermo-oxydation, l'irradiation ultraviolette, et les agents oxydants [31,35].

#### **II-7.3.1. Structure de l'EPDM :**

Cet isolant est constitué d'un terpolymère dééthylène propylène diène non conjugué en faible quantité dont la structure développée est:

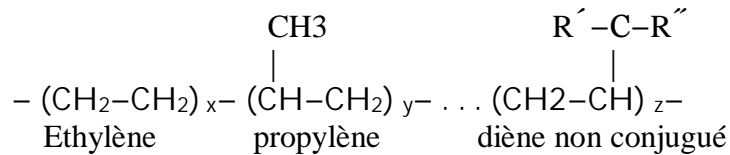


Figure II.12. Molécule de l'EPDM

Les paramètres variables de la macromolécule sont :

- le rapport éthylène propylène.
- la nature du diène.
- la teneur en diène.
- la masse moléculaire.

La structure moléculaire.

En faisant varier le rapport éthylène/propylène, on peut obtenir des produits allant des matières plastiques aux élastomères. La nature du diène et sa teneur déterminent la vitesse de vulcanisation. La nature du diène peut également être responsable du comportement vis-à-vis d'un système de vulcanisation donné. La masse moléculaire et la structure moléculaire déterminant évidemment la viscosité, les caractéristiques de mise en œuvre et les propriétés mécaniques des vulcanisants [25].

### **II-7.3.2. Propriétés de l' EPDM:**

#### **II-7.3.2.1. Propriétés physico-chimiques:**

Les principales caractéristiques du mélange ainsi obtenues se résument à :

- Une bonne tenue au vieillissement à la chaleur. La plage d'utilisation en température peut varier entre -60°C et +150°C.
- Une résistance à l'ozone et aux intempéries.
- Une résistance à l'action de la vapeur.
- Une souplesse à basse température.
- Une bonne résistance aux radiations et aux produits chimiques.
- De bonnes propriétés électriques.
- Une facilité de mise en œuvre.
- Une faible densité de 0.86 à 0.87: la densité de l'EPDM est plus faible que celle de n'importe quel autre type d'élastomère. En pratique cela signifie qu'on fabrique un plus grand nombre de pièces par kilogramme de polymère.

▪ **Comportement au feu** : L'EPDM, comme tous les élastomères, a le même comportement dans un incendie, il brûle facilement et propage la flamme, mais ne produit pas de gouttes enflammées, il 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.

### II-7.3.2.2. Propriétés électriques:

L'EPDM possède d'excellentes caractéristiques diélectriques mises en application en câblerie, pour l'isolation électrique.

▪ Résistivité transversale:

$$\rho_t = 10^{12} \text{ à } 10^{15} \Omega.cm$$

▪ Permittivité relative:

$$\varepsilon_r = 3 \quad \text{à } 20^\circ C$$

$$\varepsilon_r = 3.67 \quad \text{à } 90^\circ C$$

▪ Facteur de dissipation:

$$\text{tg}\delta_{\max} = 20.10^{-3} \quad \text{à } 20^\circ C$$

$$\text{tg}\delta_{\max} = 40.10^{-3} \quad \text{à } 90^\circ C$$

▪ Rigidité diélectrique:

$$E = 20 \quad \text{à } 35 \text{ k V/mm}$$

### II-7.3.2.3. Propriétés mécaniques:

▪ L'EPDM possède une bonne résistance à la traction:

$$RT = 0.5 \quad \text{à } 1.5 \text{ kg/mm}^2$$

$$RT_{\min} = 4.2 \text{ N/mm}^2 \quad \text{à } 20^\circ C$$

▪ L'allongement à la rupture:

$$A\% = 300 \quad \text{à } 700\%$$

$$A\%_{\min} = 200 \quad \text{à } 20^\circ C$$

▪ Aux températures élevées supérieures à 140°C, l'EPDM perd ses propriétés mécaniques [31, 35].

### II-7.3.3. Vieillessement thermique de l'EPDM:

**Généralités :**

On convient d'appeler vieillissement thermique toute altération lente et irréversible des propriétés d'un matériau, le vieillissement thermique peut faire intervenir des phénomènes purement physiques (dégazage, migration de plastifiants, évolution de la morphologie) ou des phénomènes chimiques, parmi lesquels l'oxydation par l'oxygène atmosphérique. Ces phénomènes peuvent affecter la structure chimique du polymère. Le vieillissement thermique est souvent un phénomène de surface, autrement dit, le degré de dégradation est plus fort au voisinage de la surface des objets exposés que dans la masse. Ce vieillissement est d'autant plus rapide que la température est élevée.

**II-7.3.3.1. Vieillissement physique :**

Le vieillissement physique englobe tous les processus conduisant à une altération irréversible des propriétés d'utilisation du matériau sans qu'il y ait modification de la structure chimique des macromolécules constituant le matériau. Le vieillissement physique peut résulter:

- **De modification de la configuration spéciale des macromolécules:** le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la compacité du réseau macromoléculaire, c'est à dire par une réduction du volume libre (volume disponible par les mouvements de gents de macromolécules). La masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue, et le facteur de pertes diélectriques diminue.
  
- **De phénomènes de surface:** un phénomène de fissuration est du aux forces de tensions superficielles à l'interface polymère-liquide.
  
- **De phénomènes de transport:** selon qu'il y ait transfert de masse du matériau vers l'environnement ou l'inverse, on distingue:
  - **Pénétration de solvants:** elle se fait selon une loi de diffusion. Cette pénétration est facilitée lorsque le taux de réticulation est faible. Elle a pour conséquences, la plastification qui se traduit par une diminution du module d'élasticité, de la contrainte à la rupture, une augmentation de l'allongement à la rupture et la diminution de la température de transition vitreuse.

▫ **Perte d'adjuvants:** les polymères contiennent souvent des substances organiques de faible masse moléculaire. Ces substances peuvent, sous l'effet de la température, migrer plus ou moins lentement hors du matériau [36, 37].

### II-7.5.2. Vieillessement chimique :

On appelle vieillissement chimique tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau (polymères ou ses adjuvants) sous l'influence de l'environnement. Pratiquement, ce vieillissement se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes interfèrent. Les principaux types de réactions intervenant lors du vieillissement chimique sont:

▪ **Coupure de chaînes statistiques:** une grande variété de mécanismes chimiques peut être la cause de coupure de chaînes statistiques des chaînes (par exemple l'hydrolyse). Ces coupures de chaînes provoquent une diminution de la masse moléculaire moyenne dans le cas des polymères linéaires et une diminution du taux de réticulation dans le cas des polymères tridimensionnels. Ces coupures affectent les propriétés mécaniques du matériau.

▪ **Dépolymérisation:** des réactions de dépolymérisation peuvent prendre naissance même en absence d'oxygène. L'évaporation des produits de scissions de plus bas poids moléculaire a pour double conséquence, d'une part un rétrécissement du matériau, d'autre part la formation de produits volatils, susceptibles d'être à l'origine de bulles gazeuses, elles-mêmes responsables de décharges partielles dans les isolations à haute tension.

▪ **Réticulation:** le processus de réticulation est caractérisé par la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines, qui réduit la souplesse de l'isolant et son aptitude à l'allongement, ce qui a pour effet de le rendre cassant.

▪ **Oxydation:** l'oxygène s'attaque à la chaîne hydrocarbonée des polymères, en entraînant des scissions ou des réticulations parasites. Ce processus a pour conséquences la formation de produits acides qui augmentent la conductivité, ainsi que la coupure des chaînes qui est responsable d'une diminution de la charge de rupture [31, 37, 39].

### II-8. Le chlorure de vinyle (PVC) :

Le PVC est très utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension. A l'état pur, le PVC est cassant d'où la nécessité de lui ajouter des produits auxiliaires appelés adjuvants. Le type et la quantité de chaque adjuvant est le grand problème des producteurs de câbles électriques.

## II-8. 1 Formulation et mise en œuvre du PVC :

### II-8. 1.1. Préparation du Chlorure de vinyle:

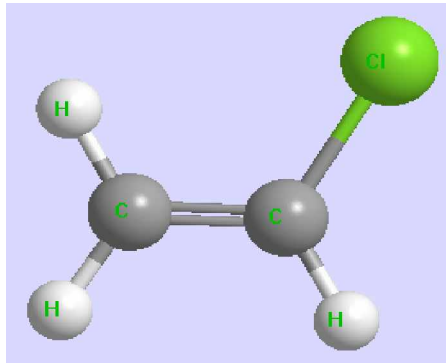


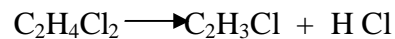
Figure II-13. Molécule de chlorure de vinyle

Le chlorure de vinyle monomère (CVM)  $\text{CH}_2=\text{CH Cl}$  est préparé suivant deux procédés principaux [38] :

- Addition du gaz chlorhydrique à l'éthylène :

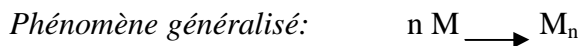
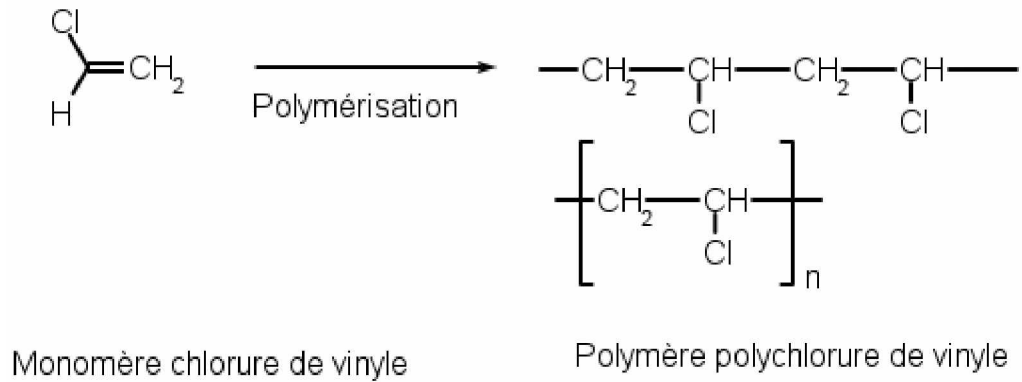


- Séparation de l'acide chlorhydrique du dichloréthane :



### II-8. 1.1. Préparation du polychlorure de vinyle:

Le processus de polymérisation consiste à souder bout à bout en une longue chaîne un grand nombre de molécules identiques du produit de base, cet assemblage forme de molécules géantes ou macromolécules constituant un nouveau produit (polymère). Cette polymérisation se produit sous l'effet d'une température et d'une pression élevées ainsi que sous l'influence d'un catalyseur éventuel. Le processus peut être expliqué par [38]:



Où M est la molécule du monomère,  $M_n$  celle du polymère (macromolécule) et n le nombre de motifs monomères (degré de polymérisation).

La polymérisation dépend :

- Du procédé d'obtention: polymérisation en suspension, en masse ou en émulsion.
- De la longueur de la chaîne, c'est à dire le nombre n de motifs monomères.
- De l'insertion dans la chaîne de motifs monomères autres que le chlorure de vinyle pour modifier certaines caractéristiques [38].

### **Les adjuvants :**

Le polymère est une résine dure. A cause de cela, on y ajoute un certain nombre d'adjuvants. Ces derniers sont des substances mélangées physiquement aux polymères et destinées à modifier l'aspect du matériau, ses propriétés physiques et sa stabilité à l'environnement. En général, les adjuvants sont des composés organiques ou organométalliques dont la masse moléculaire est faible par rapport à celle du polymère.

### **◆ Les stabilisants:**

Les stabilisants doivent conférer aux mélanges une stabilité à la lumière et une stabilité thermique suffisante pour qu'on puisse les travailler à une température convenable. Sous l'action de la chaleur, le PVC peut libérer de l'acide chlorhydrique. L'effet des stabilisants est d'éviter ce dégagement d'acide et à le capter s'il se produit.

Les principaux stabilisants utilisés sont les savons, les époxydes et les organométalliques.

### **◆ Plastifiants:**

Dans le but de rendre le matériau moins cassant, il est généralement fait appel à des additifs appelés plastifiants. Le moment dipolaire élevé des liaisons polaires C-Cl de la molécule PVC engendre de puissantes liaisons dipolaires entre les différentes chaînes moléculaires. Ces liaisons élèvent la température de transition à environ 78°C. Au dessous de cette température, le PVC est rigide et ne résiste que peu aux chocs, cet état de rigidité peut être supprimé par des substances qui affaiblissent les forces de liaisons intermoléculaires : les plastifiants. L'adjonction des plastifiants a pour effet de diminuer la résistance à la traction et d'augmenter l'allongement à la rupture. Ce qui permet d'obtenir des câbles allant du rigide au souple. Les principaux plastifiants utilisés sont les phtaliques, les phosphates et les esters d'acides gras. Ils sont utilisés à raison de 30 à 90 parties en poids pour 100 parties de PVC.

#### **◇ Les charges:**

L'emploi des charges n'a généralement pour but qu'un abaissement du prix ou une amélioration des propriétés diélectriques mais non de propriétés mécaniques. Les principales charges utilisées : le carbonate de calcium, le kaolin calciné, la silice et l'amiante. Elles sont utilisées à raison de 5 à 7 parties en poids pour 100 parties de PVC. Au delà de cette proportion, elles influent négativement sur les propriétés mécaniques.

#### **◇ Les lubrifiants:**

Lors de la mise en oeuvre du PVC, l'écoulement de ce dernier est facilité par l'emploi de lubrifiants. Ils ont pour effet d'atténuer la tendance qu'à la résine de base à adhérer aux surfaces environnantes. Ce phénomène est réalisé en remontant la température de collage au dessus de la température de travail. Les lubrifiants les plus couramment utilisés sont les acides gras, les stéarates métalliques, les esters gras et les cires. Ils sont utilisés à raison de 2 parties en poids pour 100 parties de PVC.

#### **◇ Les pigments et colorants:**

Ils permettent de réaliser la coloration des mélanges, parmi les colorants et pigments, il faut choisir ceux qui sont stables à la température de travail et éventuellement en présence de traces d'acide chlorhydrique. L'emploi des colorants solubles dans les plastifiants qui donneraient lieu à des migrations ou déteintes en surface. Les colorants et pigments les plus employés sont les oxydes de fer, les sulfo-séléniures, les azoïques de poids moléculaire



élevé, le stannate de nickel, le noir de carbone et l'oxyde de titane. Ils sont utilisés à raison de 0.5 à 1 partie en poids pour 100 parties de PVC [38].

### **II-8.2 Propriétés physico chimique du PVC:**

- La masse volumique des compositions du PVC varie entre 1.0 à 2.0 g/cm<sup>3</sup> à la température ambiante (1.4 g/cm<sup>3</sup> pour les mélanges non plastifiés et 1.2 à 1.3 g/cm<sup>3</sup> pour les formules plastifiées).
- Le PVC transmet mal la flamme mais sa combustion entraîne un dégagement de gaz corrosif et de fumées.
- Le PVC a un bon vieillissement thermique. Sous l'action prolongée de la chaleur, il devient jaune puis brun, puis rouge et enfin noire.
- Le PVC a une résistance exceptionnelle à l'ozone. Il possède une résistance moyenne aux hydrocarbures aliphatiques, aux acides et aux bases. Le PVC résiste au fluage à température élevée, mais il est fragile aux basses températures.
- Le PVC résiste bien aux agents chimiques inorganiques, il est soluble dans les cétones, le cyclohexanone et le dichloroéthylène.
- la température de transition vitreuse du PVC est élevée, elle se situe entre 75 et 80°C, avec l'emploi de plastifiants, cette température se situe entre -10 et -5 °C.
- Le PVC est colorable en couleurs vives [38].

### **II-8. 3 Propriétés électriques:**

- La rigidité diélectrique est de 37kV/mm pour une éprouvette de 3 mm d'épaisseur à 20°C.
- Le facteur de pertes diélectriques est élevé:  
tg δ (à 50 Hz) = 0.015 à 20°C.
- La constante diélectrique est élevée :  
ε<sub>r</sub> (à 50 Hz) = 3.4 à 20°C.

- La résistance transversale est élevée :

$\rho_t = 10^{16} \Omega.cm$  à 20°C pour les produits non plastifiés.

$\rho_t = 10^{10}$  à  $10^{15} \Omega.cm$  à 20°C pour les produits plastifiés.

#### **II-8.4. Propriétés mécaniques :**

- Le PVC a une bonne résistance à la traction : 5.5 à 6 kgf/mm<sup>2</sup>.
- L'allongement à la rupture est généralement de l'ordre de 100% pour les produits non plastifiés et de 200 à 400 % pour les compositions plastifiés.
- Les propriétés mécaniques sont fortement dépendantes de la température. Au dessous de 140 à 150, le PVC perd toutes ses propriétés mécaniques [38].

#### **II-9. Comparaison des polymères:**

##### **II-9.1. Comparaison des propriétés électriques :**

	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	$\epsilon_r$	tg $\delta$	(kV/m)
EPDM	$>10^{12}$ -	3 - 3.67	$>0.002$	20 - 35
PVC	$10^{16}$	3.4	0.0001	37
PRC	$10^{12}$	2.5	-	-

*Tableau II-1. Comparaison des propriétés électriques*

**II-9.2. Comparaison des propriétés mécaniques :**

	Résistance à la traction N/ mm <sup>2</sup>	Allongement à la rupture %	Pertes de masse %
EPDM	4.2	300 - 700	-
PVC	5.5 - 6	200 - 400	-
PRC	20	600	-

*Tableau II-2. Comparaison des propriétés mécaniques*

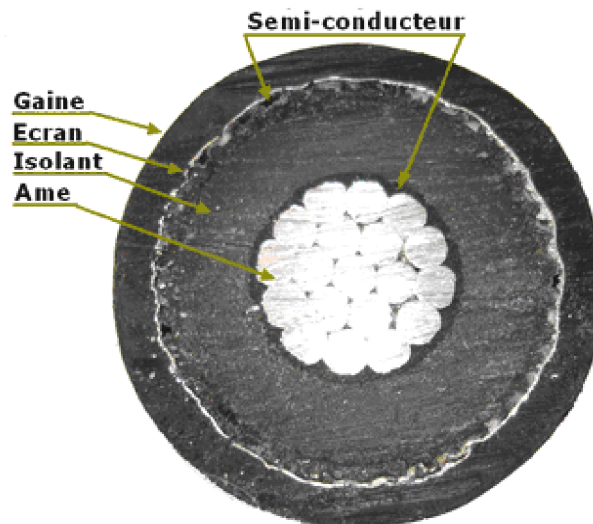
## Chapitre III

# ***" Modélisation et Application "***

**Introduction:**

Le problème du comportement de l'isolation des câbles de haute tension quand elle est soumise à des champs électriques intenses et à des variations de température est très complexe, notamment quand le matériau isolant n'est pas homogène et contient des défauts de nature et dimensions différentes. Dans notre travail, nous supposons que ces défauts sont négligeables en donnant un modèle théorique des variations des contraintes électrique et thermique. Dans la littérature, il existe peu de théories sur le modèle de la durée de vie du vieillissement thermique, toutes ces théories existantes découlent de la loi d'Arrhenius [2, 9, 15,18]. Nous donnons par la suite les modèles des propriétés électriques (conductivité électrique, résistivité électrique, constante diélectrique et les pertes diélectriques) en fonction du temps de vieillissement et en fonction de la température d'essai.

Le modèle proposé permet de calculer le champ électrique radial et la température radiale dans un câble électrique de dimensions bien déterminées (figure III.1). Ceci nous amène à supposer certaines hypothèses simplificatrices afin de résoudre les équations différentielles des différents systèmes complexes que nous allons traiter.



*Figure III. 1 Coupe radiale d'un câble de haute tension*

## **I. MODELISATION :**

### **III-I. 1. Calcul des contraintes électrique et thermique:**

L'enveloppe isolante, dans laquelle on veut calculer la distribution du champ électrique, est limitée par deux couches semi-conductrices qui constituent les frontières radiales de notre domaine. Ces couches ont des épaisseurs négligeables devant l'épaisseur de la gaine conductrice et la gaine isolante (figureII-1).

Par conséquent, le rayon de l'âme conductrice, augmenté de l'épaisseur de la couche semi-conductrice, représente l'électrode haute tension. La deuxième couche semi-conductrice sur l'isolant du côté de la terre portera le potentiel nul. Ceux-ci constituent les conditions aux limites de notre problème.

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle analytique de calcul des distributions de la température et du champ électrique dans les deux différentes gaines conductrice et isolante en matériaux polymères constituant le câble souterrain. Dans notre travail nous considérons le cas homogène le cas homogène (isolant sans défaut). Nous présentons les modèles théoriques des propriétés électriques des matériaux polymères. La deuxième partie de notre travail montre des applications des modèles théoriques sur deux types de câbles, câble isolé à l'EPDM, dont on détermine la résistivité transversale sous l'influence du temps de vieillissement et sous l'influence de la température. Câble isolé au PRC dont on détermine la permittivité relative et le facteur de dissipation sous l'influence de la température. Les résultats obtenus dans les deux cas sont comparés aux résultats des essais déjà fait [25, 31].

### **Présentation des modèles analytiques pour la détermination des contraintes d'isolation:**

#### **III-I-1.1 Les hypothèses de travail:**

1. En supposant que le matériau isolant est homogène, c'est à dire pas de bulles et pas d'arborescences ni d'autres défauts.
2. L'épaisseur des gaines semi-conductrices est négligeable devant l'épaisseur de la gaine isolante et l'épaisseur de la gaine conductrice.

3. On a une réversibilité thermique et mécanique telle que:

Dissipation volumique:

$$\delta\Psi = \delta\Psi_1 + \delta\Psi_2 \quad (\text{III-1})$$

Dissipation thermique:

$$\delta\Psi_2 = -\delta \left( \frac{\vec{q}}{T} \text{grad}T \right) \quad (\text{III-2})$$

$\delta\Psi_1$  est la dissipation mécanique qui n'est pas l'objet de notre travail.

Réversibilité thermique:

$$\delta\Psi_2 = -\delta \left( \frac{\vec{q}}{T} \text{grad}T \right) = 0 \quad (\text{III-3})$$

Avec  $q$  la chaleur dissipée dans le solide,  $\delta$  la conductivité électrique du matériau et  $T$  la température appliquée.

4- l'hypothèse principale est celle où nous considérons que la tension est appliquée au dessous du seuil électrique, pour éviter les phénomènes de dégradation avant que nous appliquions le modèle de la durée de vie d'isolation.

5- Le modèle thermique de la durée de vie est établi en définissant une température de seuil qui est la température au dessous de  $A$  (valeur d'équilibre de la conversion de parties du polymère de l'état 1 « état réactif » vers l'état 2 « état produit »).

### **III-I. 1.2. Calcul du champ électrique:**

La symétrie axiale du câble électrique permet de réduire les dimensions du domaine de calcul du champ électrique au plan correspondant à la coupe transversale du câble [13,23]. L'équation du potentiel obtenue par application du théorème de GAUSS est:

$$V(r_i) = \frac{V_c}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_i}\right) \quad (\text{III-4})$$

Où  $R$ : rayon du câble,

$r_0$ : rayon du conducteur,

$r_i$ : position donnée dans la partie isolante du matériau.

Avec les conditions aux limites suivantes:

Potentiel de la gaine métallique extérieure:  $V(R) = 0 \text{ kV}$

Potentiel de l'âme:  $V(r_0) = V_c \text{ kV}$

L'expression du champ s'obtient par la dérivation de  $V(r_i)$  par rapport à  $r_i$  c'est à dire :

$$\vec{E} = -\text{grad} \vec{V} \quad (\text{III-5})$$

$$E(r_i) = \frac{V_c}{r_i \ln \frac{R}{r_0}} \quad (\text{III-6})$$

L'allure de l'équation (III-6) est représentée par la figure (III-2) ci dessous (pour les données du câble suivant :  $R=14\text{mm}$ ,  $r_0=6\text{mm}$  et  $U=30\text{kV}$ ).

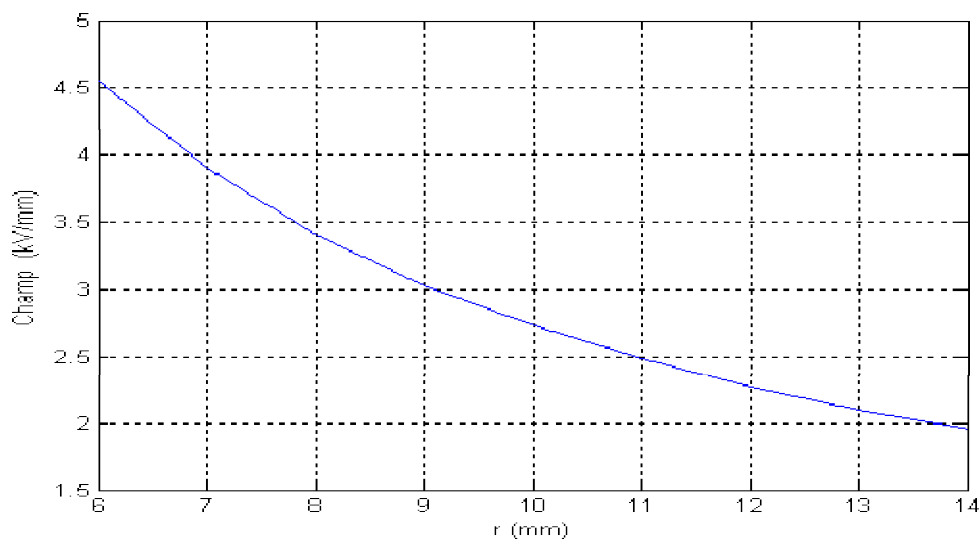


Figure III-2. Distribution du champ électrique dans l'isolant

### **III-I. 1. 3. Calcul de la contrainte thermique:**

#### **III-I. 1.3. 1. Conducteur et gaine isolante :**



Soit un conducteur de rayon  $r_0$ , parcouru par un courant d'intensité  $I$ , entouré d'une gaine isolante d'épaisseur "a". La température extérieure à la gaine est supposée constante et vaut  $T_0$ . Le conducteur a une conductivité électrique  $\delta$ , une conductivité thermique  $\lambda_1$ . La conductivité thermique de la gaine isolante est  $\lambda_2$ . Nous considérons qu'on est en régime stationnaire en négligeant les effets de bords. Nous supposons également le contact thermique parfait entre la gaine isolante et le conducteur (figure (III-3)).

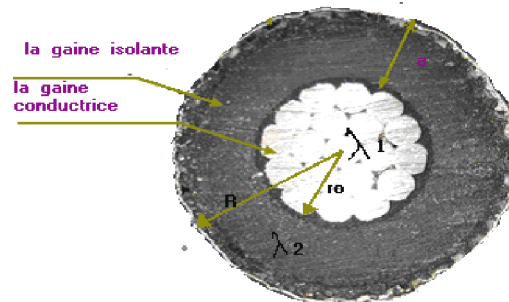


Figure III- 3. Coupe d'un câble de haute tension sous certaines hypothèses

### III-I. 1. 3. 2. Détermination de la température $T(r)$ dans la gaine conductrice:

Dans le présent travail, nous avons procédé à des méthodes analytiques pour le calcul des distributions du champ électrique radial et de la température radiale du câble électrique. Nous montrons les différentes démarches de calcul de la température radiale dans la gaine conductrice, en commençant par déterminer la chaleur dissipée dans le matériau, puis appliquer la théorie de conservation d'énergie, et enfin on aboutit à une équation différentielle dont on cherchera sa solution.

(Indice 1 pour le conducteur; indice 2 pour la gaine isolante)

**Puissance "p" dissipée (effet joule) par unité de volume V :**

$$p = \frac{RI^2}{V} \quad (\text{III-7})$$

Avec  $S = \pi r_0^2$

S : section du cylindre ( $m^2$ ), (âme conductrice)

Volume du cylindre  $V = \pi r_0^2 L$ .

$$D'o\grave{u} : p = \frac{RI^2}{\pi r_0^2 L} \quad (\text{III-8})$$

Pour obtenir l'équation de base pour la rupture thermique, en considérant le cylindre ci dessous tel que l'écoulement de la chaleur est suivant la direction x (figure III-3), puis l'écoulement de la chaleur à travers le cylindre [41]:

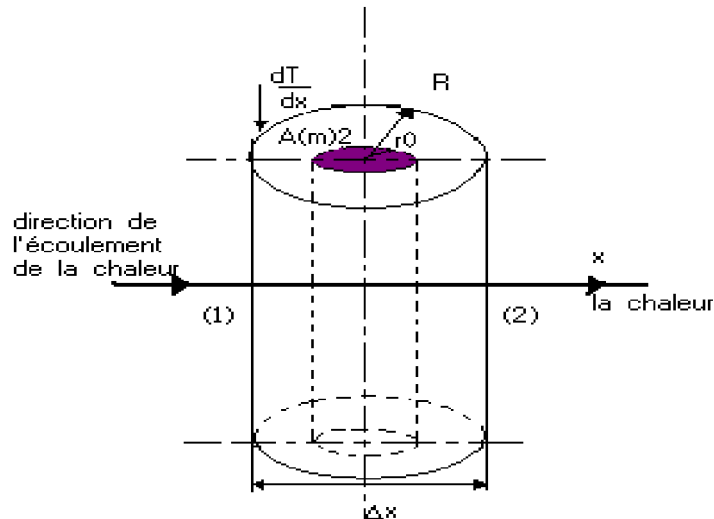


Figure III-4. Représentation des directions des chaleurs dans un câble électrique

- Dans la face (1), l'écoulement de la chaleur =  $\lambda_1 A \frac{dT}{dx}$  (III-9)

- Dans la face (2), l'écoulement de la chaleur =  $\lambda_1 A \frac{dT}{dx} + \lambda_1 A \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) \Delta x$  (III-10)

Le deuxième terme dans l'équation (III.10) représente l'entrée de la chaleur en traversant le matériau.

En supposant que le deuxième terme dans l'équation (III.10) représentant la variation de l'entrée de la chaleur à travers le matériau est:

1. Premier cas : est nul.

2. deuxième cas : non nul.

**1. Premier cas:**  $\lambda_1 A \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) \Delta x = 0$

Le postulat de conservation d'énergie dans un matériau exige que la quantité de chaleur générée est égale à la chaleur absorbée plus les pertes de chaleur dans l'environnement, c'est à dire:

$$C_v \frac{dT}{dx} + \text{div}(\lambda_2 \text{ grad } T) = \delta E^2 \quad (\text{III-11})$$

Avec  $C_v$ : capacité thermique du diélectrique,

$\lambda_2$ : conductivité thermique du diélectrique.

Flux thermique de conduction qui rentre par une surface cylindrique de longueur L et de rayon r:

$$\Psi_r = \lambda_1 2\pi r L \left( \frac{dT_1}{dr} \right)_r \quad (\text{III-12})$$

Flux thermique de conduction qui sort par une surface cylindrique de longueur L et de rayon  $r+dr$ :

$$\Psi_{r+dr} = -\lambda_1 2\pi (r+dr) L \left( \frac{dT_1}{dr} \right)_{r+dr} \quad (\text{III-13})$$

L'élément de volume compris entre les surfaces cylindriques de rayons r et  $r+dr$  :  $dv = 2\pi r L dr$

Puissance interne dans cet élément de volume :  $p dv = 2\pi L p r dr$

Bilan énergétique en régime permanent:

$$2\pi L p r dr - \lambda_1 2\pi r L \left( \frac{dT_1}{dr} \right)_r + \lambda_1 2\pi (r+dr) L \left( \frac{dT_1}{dr} \right)_{r+dr} = 0 \quad (\text{III-14})$$

$$p r dr - \lambda_1 r \left( \frac{dT_1}{dr} \right)_r + \lambda_1 (r+dr) \left( \frac{dT_1}{dr} \right)_{r+dr} = 0 \quad (\text{III-15})$$

$$p r = -\frac{\lambda_1 r}{dr} \left[ \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r+dr} - \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_r + \frac{1}{r} dr \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r+dr} \right] \quad (\text{III-16})$$

$$p r = -\frac{\lambda_1 r}{dr} \left[ \frac{d}{dr} \left( \frac{dT_1}{dr} \right) dr + \frac{dT_1}{dr} \right] \quad (\text{III-17})$$

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dT_1}{dr} \right) = \frac{dT_1}{dr} + r \frac{d^2 T_1}{dr^2} \quad (\text{III-18})$$

$$\text{D'où} \quad pr = -\lambda_1 \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT_1}{dr} \right)$$

$$\frac{-pr^2}{2\lambda_1} = r \frac{dT_1}{dr} + d \quad (\text{III-19})$$

$$\text{Pour } r=0, \text{ on suppose que } \frac{dT_1}{dr} = 0, \text{ alors } d=0 \quad dT_1 = \frac{-pr}{2\lambda_1} dr \quad T_1 = \frac{-pr^2}{4\lambda_1} + c' \quad (\text{III-20})$$

La constante "c'" sera déterminée à partir de l'expression de  $T_2(r)$ , température dans la gaine isolante.

**III-I. 1.3.3. Gaine isolante :** Nous procédons de la même façon que précédemment, et nous aboutissons au bilan énergétique en régime permanent suivant :

$$-\lambda_2 2\pi r L \left( \frac{dT_2}{dr} \right)_r + \lambda_2 2\pi (r+dr) L \left( \frac{dT_2}{dr} \right)_{r+dr} = 0 \quad (\text{III-21})$$

$$-\lambda_2 r L \left( \frac{dT_2}{dr} \right)_r + \lambda_2 (r+dr) L \left( \frac{dT_2}{dr} \right)_{r+dr} = 0 \quad (\text{III-22})$$

$$\lambda_2 d \left( r \frac{dT_2}{dr} \right)_r = 0; \left( r \frac{dT_2}{dr} \right)_r = 0; r \frac{dT_2}{dr} = c$$

$$dT_2 = c \frac{dr}{r};$$

$$T_2 = c \ln r + C_1 \quad (\text{III-23})$$

( $C_1$  est une constante d'intégration).

c est déterminée en écrivant la continuité du flux thermique en  $r = r_0$  :

$$-\lambda_1 2\pi r L \left( \frac{dT_1}{dr} \right)_r = -\lambda_2 2\pi r L \left( \frac{dT_2}{dr} \right)_r \quad (\text{III-24})$$

$$-\lambda_1 \left( \frac{dT_1}{dr} \right)_{r_0} = -\lambda_2 \left( \frac{dT_2}{dr} \right)_{r_0} \quad (\text{III-25})$$

$$\left( \frac{dT_1}{dr} \right)_{r_0} = \frac{-pr_0}{2\lambda_1} \quad (\text{III-26})$$

$$\text{D'autre part:} \quad \left( \frac{dT_2}{dr} \right)_{r_0} = \frac{c}{r_0} \quad (\text{III-27})$$

À partir des équations (III.26) et (III.27) on aura:  $c = \frac{-pr_0^2}{2\lambda_2}$  (III-28)

$C_1$  est déterminée en écrivant que  $T_2 = T_0$  en  $r = r_0 + a$  :

A partir de l'équation (III.23) on aura:

$$T_0 = C \ln(r_0 + a) + C_1 ;$$

$$\text{Or } C_1 = T_0 - C \ln(r_0 + a)$$

$$\text{D'où : } T_2 = T_0 - c \ln\left(\frac{r}{r_0 + a}\right) = T_0 - \frac{pr_0^2}{2\lambda_2} \ln\left(\frac{r}{r_0 + a}\right) \quad (\text{III-29})$$

D'où nous obtenons l'expression suivante de la distribution de la température dans la gaine isolante du polymère d'un câble électrique:

$$T_2 = T_0 + c \cdot \ln\left(\frac{R}{r_i}\right) \quad (\text{III-30})$$

Tels que:  $R = r_0 + a$ , et  $a$  l'épaisseur de l'isolant.

L'allure de l'équation (III-30) est représentée par la figure (III-5), en supposant que l'épaisseur de l'isolant varie entre 6 à 14 mm,  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ , température ambiante.

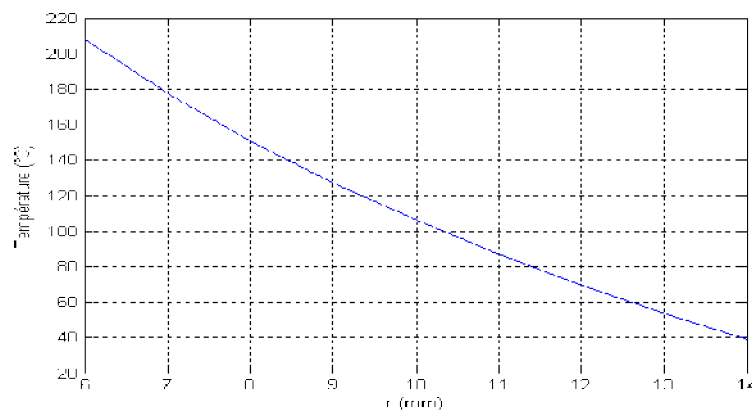


Figure III-5. Distribution de la température dans l'isolant

A partir de l'équation (III-20), on détermine  $c'$  en écrivant la continuité de la température en  $r = r_0$ :

$$T_1(r_0) = \frac{-pr_0^2}{4\lambda_1} + c' \quad (\text{III-31})$$

A partir de l'équation (III-29), on a:  $T_2(r_0) = T_0 - \frac{P}{2\lambda_2 r_0} \ln\left(\frac{r_0}{r_0 + a}\right)$  (III-32)

L'égalité des équations (III.31) et (III.32) donne:

$$\frac{-pr_0^2}{4\lambda_1} + c' = T_0 - \frac{pr_0}{2\lambda_2} \ln\left(\frac{r_0}{r_0 + a}\right) \quad (\text{III-33})$$

D'où:  $c' = \frac{-pr_0^2}{4\lambda_1} + T_0 - \frac{pr_0}{2\lambda_2} \ln\left(\frac{r_0}{r_0 + a}\right)$  (III-34)

Finalement, on obtient:  $T_1(r) = T_0 - \frac{P}{4\lambda_1}(r^2 - r_0^2) - \frac{pr_0}{2\lambda_2} \ln \frac{r_0}{r_0 + a}$  (III-35)

L'équation (III-35) étant la distribution de la température dans la gaine conductrice.

## 2. Deuxième cas:

La deuxième méthode consiste à déterminer la distribution de la température en fonction du

rayon sans négliger le terme de l'équation (III-10):  $\lambda_1 A \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) \Delta x \neq 0$

Soit l'équation différentielle d'état de continuité d'équilibre pour la continuité thermique dans le système d'isolation pour une géométrie cylindrique de rayon r [16]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT(r)}{dr} \right) + \frac{g(r)}{ki} = 0 \quad (\text{III-36})$$

$g(r)$  est la chaleur dissipée dans le matériau en fonction du rayon r donnée par (I-43) dans le premier chapitre[16], et à partir de l'équation (I-45), d'où l'équation à résoudre est :

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{\lambda_2} \delta(r)(E(r))^2 = 0 \quad (\text{III-37})$$

En remplaçant  $\delta$  par son expression donnée par l'équation (I-46), on a :

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{A}{\lambda_2} \exp(bT) \cdot \exp(aE) \cdot (E(r))^2 = 0 \quad (\text{III-38})$$

En posant :  $K' = \frac{A}{\lambda_2} \exp(aE) \cdot (E(r))^2$

On obtient: 
$$\frac{d^2T}{dr^2} + K' \exp(bT) = 0 \quad (\text{III-39})$$

Par dérivation, on aura :

$$\frac{d^3T}{dr^3} + a \cdot K' \cdot \frac{dT}{dr} \cdot \exp(bT) = 0 \quad (\text{III-40})$$

Par intégration, on aura:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{2} b \cdot \left( \frac{dT}{dr} \right)^2 = 0 \quad (\text{III-41})$$

En posant :

$$\left( \frac{dT}{dr} \right) = Y \quad (\text{III-42})$$

$$\Rightarrow \left( \frac{dY}{dr} \right) + \frac{1}{2} b \cdot Y^2 = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{Y^2} \frac{dY}{dr} + \frac{1}{2} b = \frac{C}{Y^2}$$

Cas où :  $C=0 \Rightarrow \frac{1}{Y^2} \frac{dY}{dr} = -\frac{1}{2} b$

$$\Rightarrow \int \frac{1}{Y^2} \frac{dY}{dr} = -\frac{1}{2} b r + b'$$

$$\Rightarrow -\frac{1}{Y} = -\frac{1}{2} b r + b' \Rightarrow Y = -\frac{1}{-\frac{1}{2} b r + b'} \quad (\text{III-43})$$

On remplace Y par  $\left(\frac{dT}{dr}\right)$  :

$$\Rightarrow \frac{dT}{dr} = -\frac{1}{-\frac{1}{2}.br + b'}$$

$$\text{D'où } T = \frac{1}{b} \ln \left| -\frac{1}{2}.br + b' \right| \quad (\text{III-44})$$

Tel que : b constante préexponentielle dépendant du matériau (coefficient de la température, sa valeur approximative égale à  $0.1 \text{ K}^{-1}$  pour les matériaux polymères utilisés dans l'isolation des câbles électriques).

La constante b' sera déterminée à partir des conditions aux limites (insuffisance des données sur les conditions aux limites déterminées à partir de la dérivée de la température par rapport au rayon du câble.

### III-I.2. Le modèle de la durée de vie de l'isolation:

La durée de vie de l'isolation est donnée par la loi d'Arrhenius:

$$t = \frac{h}{KT} e^{\left(\frac{\Delta G}{KT}\right)} \quad (\text{III-45-a})$$

Avec h : constante de Blanc.

K : constante de Boltzmann.

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$  telles que:  $\Delta H$  et  $\Delta S$  l'enthalpie et l'entropie d'activation.

A partir de la courbe expérimentale de la durée de vie d'isolation, on tire la formule :

$$\ln t = A + \frac{E_a}{RT} \quad (\text{III-45-b})$$

Avec t temps au bout duquel on atteint le critère fixé,

A constante préexponentielle,

$E_a$  énergie d'activation,

R Nombre d'Avogadro

T température exprimée en Kelvins.

L'allure de l'équation d'Arrhenius (III-45.b) [39] est donnée par la figure (III-6) :



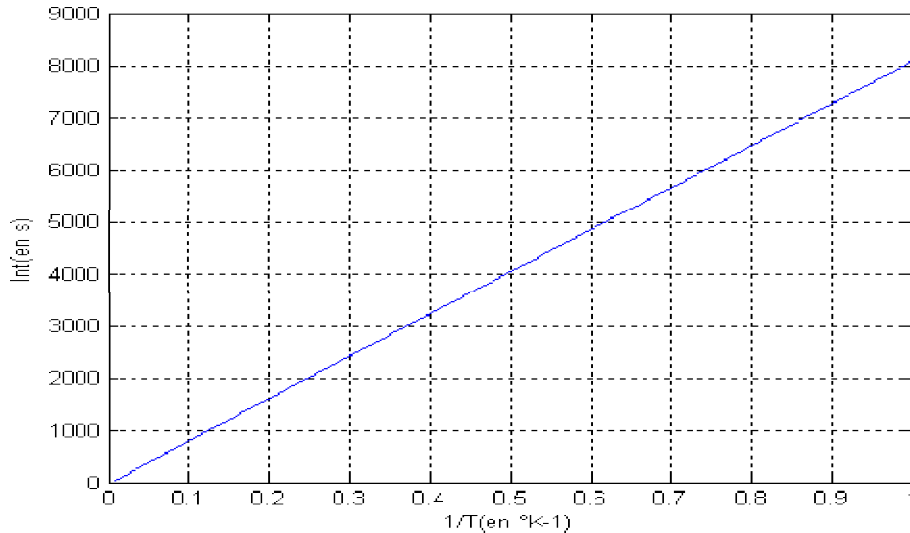


Figure III-6. Évaluation de la durée de vie d'un système d'isolation

### III-I.3 Les propriétés électriques

#### III-I.3.1 Permittivité diélectrique de l'isolant:

Dans un diélectrique, la polarisation est due à des mécanismes de déformations de répartition des charges électriques sous l'influence du champ électrique. Une relaxation diélectrique induit une perte d'énergie au niveau du matériau. Une telle configuration est équivalente à un circuit comportant une résistance en parallèle avec une capacité [19]. La polarisation est donc caractérisée par l'apparition de deux minces couches de charges électriques de signes opposés, chacune sur une face du matériau [20,26]. La relaxation est due au déphasage entre le déplacement électrique  $D$  et le champ électrique  $E$  [19].

Le vecteur densité du champ électrique:

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (\text{III-46})$$

$\epsilon_0$ : permittivité du vide,

$\epsilon_r$ : permittivité relative du diélectrique qui s'écrit :  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (\text{III-47})$$

Avec  $P$  densité de charge partielle dans la surface du diélectrique,  $P$  est défini aussi comme moment dipolaire du diélectrique par unité de volume.

$$D = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} = 1 + \chi \quad (\text{III-48})$$

$\chi$ : la susceptibilité du matériau.

Dans le cas d'un matériau homogène, l'équation de relaxation de la polarisation dans le temps est donnée par [40]:

$$P(t) = P_\infty - (P_\infty - P_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (\text{III-49})$$

$\tau$  : constante dépendant du matériau.

$P_\infty$  et  $P_0$  sont respectivement la polarisation initiale et la polarisation à l'infini.

La figure ci-dessous montre que l'allure de la polarisation se compose de deux zones de travail, zone où  $P$  varie rapidement dans le temps (régime transitoire de la polarisation), et une deuxième zone où  $P$  reste pratiquement constant jusqu'à l'infini [40].

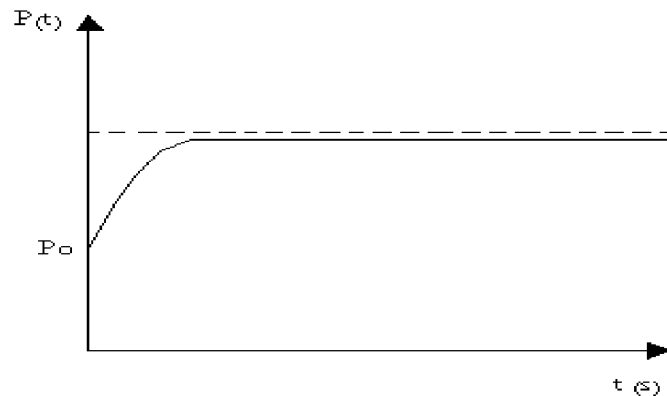


Figure III- 7. Variation de la polarisation diélectrique dans le temps

Le vecteur polarisation admet une valeur initiale et une valeur à l'infini, signifie aussi que la permittivité relative d'après la relation (III- 47) admet une valeur initiale  $\epsilon_{r0}$  et une autre quant  $t$  tend vers l'infini  $\epsilon_{r\infty}$ ,  $\epsilon_{r0}$  est fixée selon le matériau et  $\epsilon_{r\infty}$  déterminée à partir des conditions aux limites, généralement la valeur de  $\epsilon_{r\infty}$  est  $\epsilon_0$  [42].

Sachant que le temps de relaxation est d'ordre de  $10^{-16}$  (s) [40], d'où le temps de vieillissement est très grand devant le temps de relaxation, alors la valeur de  $P(t)$  quand le temps tend vers l'infini est  $P_\infty$ .

$$\text{D'autre part : } |\ddot{P}| = \frac{Q}{S} = \frac{CU}{S} = \frac{\varepsilon_r C_0 U}{S} \quad (\text{III-50})$$

$$\text{D'où : } P_\infty = \frac{\varepsilon_{r\infty} C_0 U}{S} \quad (\text{III-51})$$

Tel que :

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\log \frac{R}{r_0}}$$

Et  $S$  la surface de l'armature de rayon  $r_0$

$$\text{La permittivité du matériau s'écrit : } \varepsilon_r = 1 + \frac{P_\infty}{\varepsilon_0 E} \quad (\text{III-52})$$

$E$  étant le champ électrique en fonction de la température de vieillissement figure (III-12).

### **III-I.3.2 Les pertes diélectriques:**

L'isolant d'un câble électrique est modélisé en deux configurations : soit par un circuit équivalent parallèle ou par un circuit équivalent série.

#### **Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique :**

Soit  $\varepsilon$  la permittivité complexe absolue du diélectrique définie comme [40, 43] :

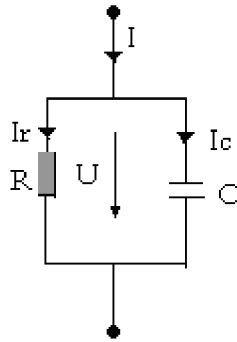
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{III-53})$$

Avec :  $\varepsilon_r$  étant la permittivité complexe relative du diélectrique définie comme:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (\text{III-54})$$

$\varepsilon_r''$ : permittivité relative du diélectrique définissant la composante de pertes actives.

$\epsilon_r''$  : permittivité relative du diélectrique définissant la composante de pertes réactives.



Lorsqu'un diélectrique remplace le vide entre les armatures d'un condensateur, la notion de permittivité relative a été introduite par [41] :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (\text{III-55})$$

La séparation des charges positives et négatives ainsi introduites entraîne l'apparition des dipôles électriques qui tendent à s'aligner dans la direction du champ électrique. Toutefois, un déphasage subsiste entre la direction du champ électrique et l'établissement des dipôles, entraînant une dissipation d'énergie responsable des pertes diélectriques caractérisée par  $\text{tg } \delta$ , représentant le facteur de dissipation ou l'angle de pertes.

On calcul ce facteur en faisant le rapport entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance équivalente du diélectrique:

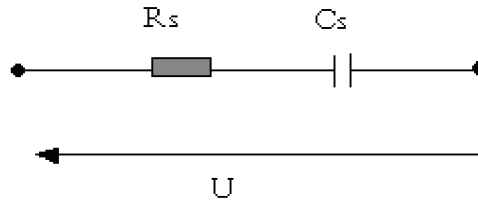
$$\text{tg } \delta = \frac{1}{RC\omega} \quad (\text{III-56})$$

Avec  $\omega = 2\pi f$  et  $f$  étant la fréquence du réseau.

En remplaçant  $R$  et  $C$  par leurs expressions, et on aboutit à la formule suivante:

$$\text{tg } \delta = \frac{\pi(R^2 - r_0^2)}{\rho(T)\epsilon_r(T)C_0\omega l} \quad (\text{III-57})$$

**Circuit équivalent série représentant un diélectrique [44] :**



Dans ce cas le facteur de dissipation s'écrit :

$$\operatorname{tg}\delta = \omega R_s C_s \quad (\text{III-58})$$

$$\text{Avec : } R_s = \frac{l}{\delta S} \quad (\text{III-59})$$

$\delta$ : étant la conductivité électrique (III.60).

$S$  : surface du diélectrique.

$C_s$ : est donnée par la formule (III.55).

$R_s$  : résistance électrique [45, 46].

### III-I.3.3. La conductivité électrique:

Un modèle théorique pour la conductivité électrique applicable à tous les genres des diélectriques pleins n'est pas encore disponible. En utilisant comme expression [16]:

$$\delta(r) = A e^{\left[ a|E(r)| - \frac{b}{T(r)} \right]} \quad (\text{III-60})$$

Avec  $\delta(r)$  : la conductivité électrique en fonction du rayon du conducteur,

$A$  : une constante  $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ .

$a$  : constante connue comme coefficient d'effort (champ).

$b = \frac{Wq}{K}$  constante connue comme coefficient de température avec  $W$  est l'énergie

d'activation thermique,  $q$  étant la charge élémentaire,  $K$  est la constante de Boltzmann. Ce coefficient est différent selon le type de matériau, il peut être déterminé entre la plage de variation de température  $[-65^\circ\text{C}, 150^\circ\text{C}]$  [30]:

$$b \leq 6.5 \cdot 10^{-5} \quad \text{à } -65^{\circ}\text{C}$$

### III-I.3.4. La résistivité électrique:

L'expression de la résistivité électrique en fonction des deux contraintes est donnée par [16,30]:

$$\rho = \rho_0 e^{-aT} e^{-mE} \quad (\text{III-61})$$

Avec  $\rho_0$ : résistivité à la température  $T^{\circ}=0^{\circ}\text{C}$ , elle est d'ordre de  $10^{12} \Omega\cdot\text{m}$  pour les isolants polymères.

a coefficient de la température :  $0.1 \text{ K}^{-1}$  [35].

m coefficient du champ électrique :  $0.033 \text{ mm/kV}$  [35].

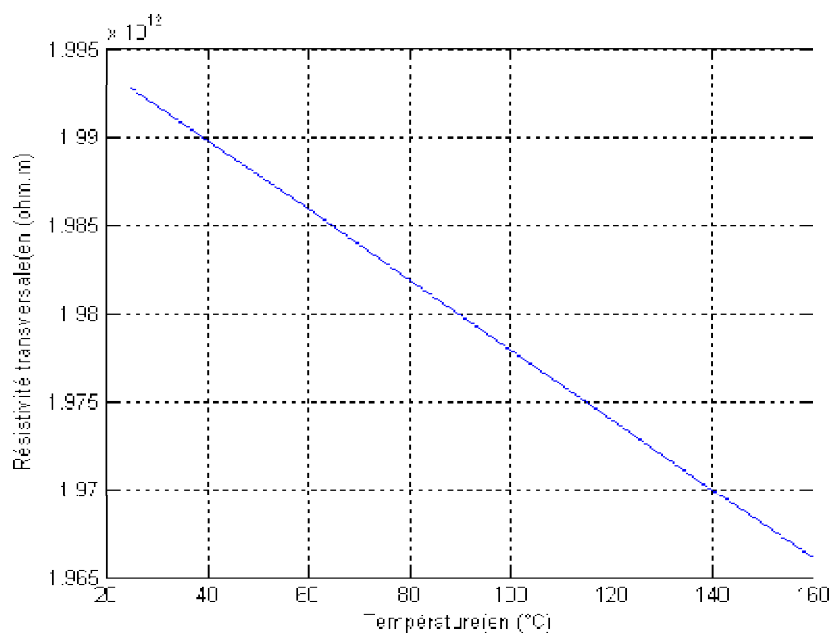


Figure III-8. Variation de la résistivité en fonction de la température

## II. APPLICATIONS ET INTERPRETATIONS:

Nous présentons dans cette partie les résultats des modèles présentés. Ces résultats portent sur l'évolution des propriétés diélectriques du polyéthylène réticulé chimiquement (facteur de pertes diélectriques  $\tan \delta$ , permittivité relatives  $\epsilon_r$ , résistivité transversale et l'indice de pertes diélectriques).

### III- II.1. Données et caractéristiques du câble considéré:

Cette partie de notre étude se base sur les résultats expérimentaux obtenus au niveau du laboratoire de haute tension de l'ENP [25, 31]. Ces travaux en concerné en premier, les échantillons de câbles moyenne tension (18/30 kV), isolés au polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) [47], fournis par l'entreprise des industries des câbles (E.N.I.C.A.B) de Biskra. Puis sur les échantillons circulaires de l'EPDM (éthylène propylène diène monomère) fournis par CABEL (Gué de Constantine).

Le câble en PRC présente les caractéristiques suivantes :

Câble à champ radial.

Tension nominale : 30kV.

Tension spécifiée : 18 kV.

Section de l'âme : 120 mm<sup>2</sup> (en aluminium).

Diamètre de l'âme : 12 mm.

Nombre de brins : 35.

Diamètre d'un brin ; 2.15 mm.

Epaisseur de l'isolant : 8 mm.

Diamètre extérieur 28 mm.

Température assignée maximale de l'âme en service normal : 90°C.

Température assignée maximale en régime de court circuit : 250°C.

Champ maximal à la surface de l'âme : 3.13 kV/mm [25].

Longueur de l'échantillon : 12 m.

Résistance linéique 0.153  $\Omega$ /km.

Masses approximative : 1705 kg/km.

Propriétés des matériaux utilisés :

Conductivité thermique du PRC: 0.17. W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> [27].

Coefficient du champ électrique : 0.033 mm/kV [27].

Le câble en EPDM présente les caractéristiques suivantes :

Câble à champ radial.

Tension nominale : 30kV.

Tension spécifiée : 18 kV.

Température assignée maximale de l'âme en service normal : 70°C.

Température assignée maximale en régime de court circuit : 250°C.

Diamètre extérieur : 28.8mm.

Section de l'âme : 150 mm<sup>2</sup>

Coefficient de la température : 0.1 K<sup>-1</sup> [27].

Conductivité thermique de l'EPDM : 0.20 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> [27].

### **III-II-1. Influence du temps de vieillissement thermique sur la résistivité transversale :**

La variation de la résistivité transversale en fonction du temps de vieillissement est représentée par la figure (III-9). Généralement, les courbes pratiques obtenues au niveau du laboratoire de l'ENP [31] sont proches de celles obtenues théoriquement, dans les deux cas de figure, la résistivité diminue en fonction du temps de vieillissement. La résistivité varie aussi en fonction de la température d'essai telle que la courbe obtenue à la température d'essai 80°C est supérieure à celle obtenue sous 100°C, qui est elle-même au dessus de celle obtenue à la température d'essai 120°C. la courbe des variations de la résistivité



transversale en fonction du temps obtenue à 140°C montre la dégradation du matériau (EPDM) sous l'effet du vieillissement thermique et sous l'effet de la température d'essai à la fois.

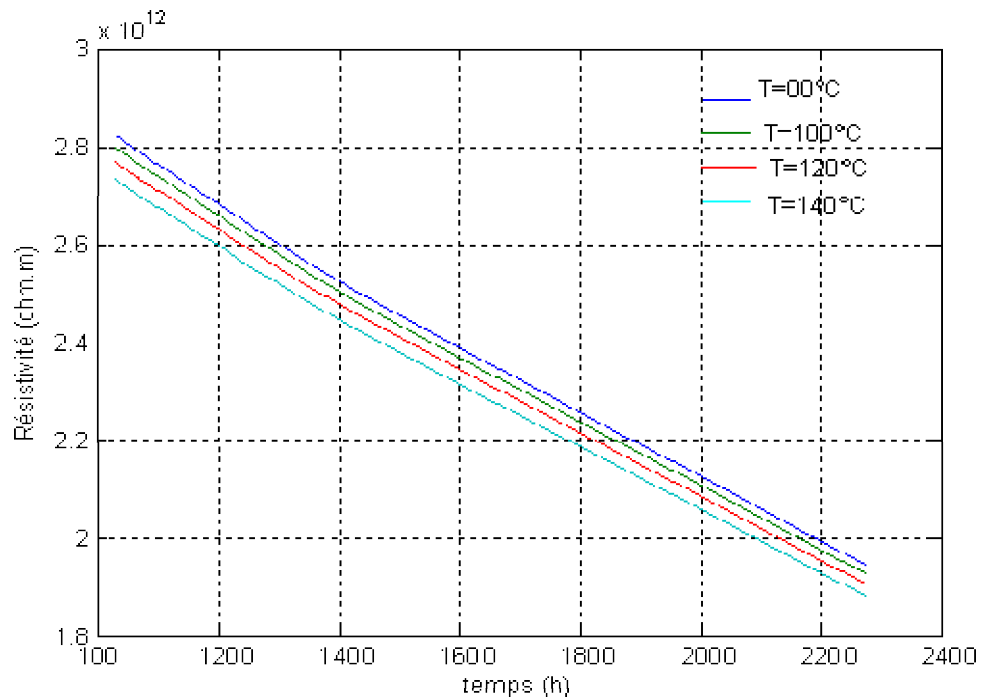
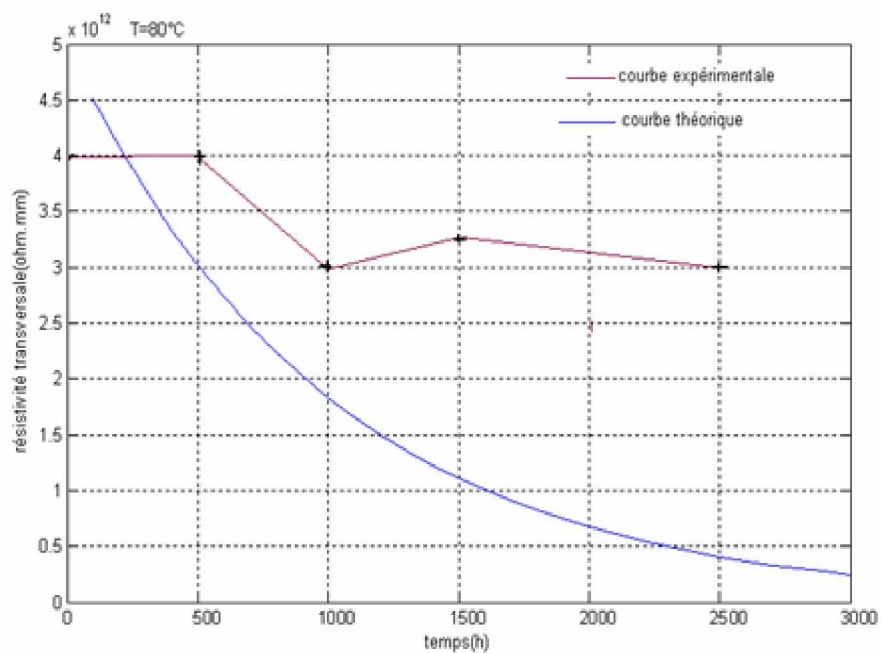
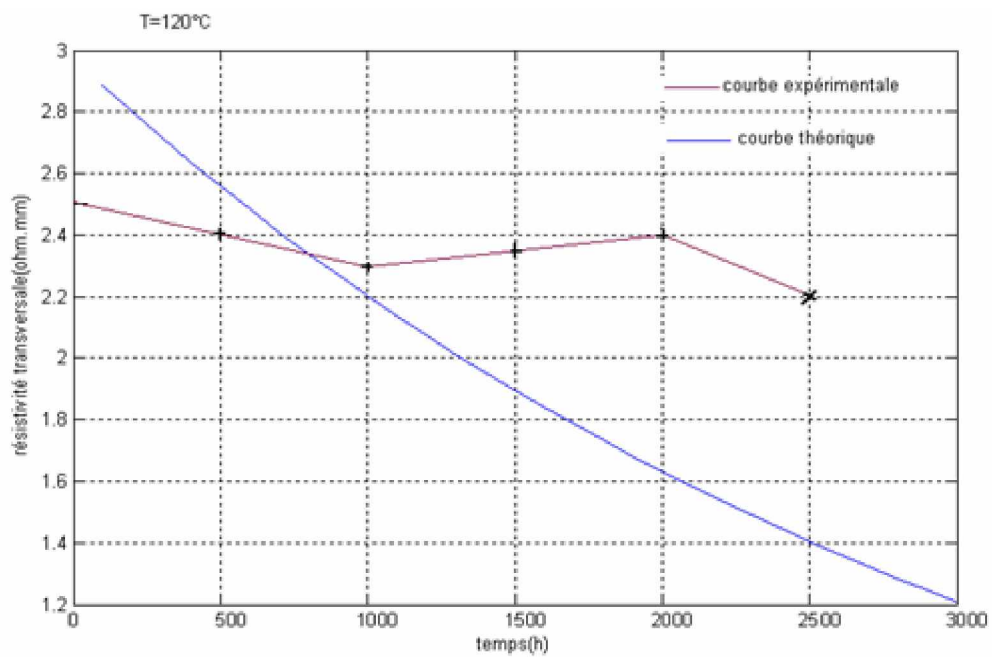
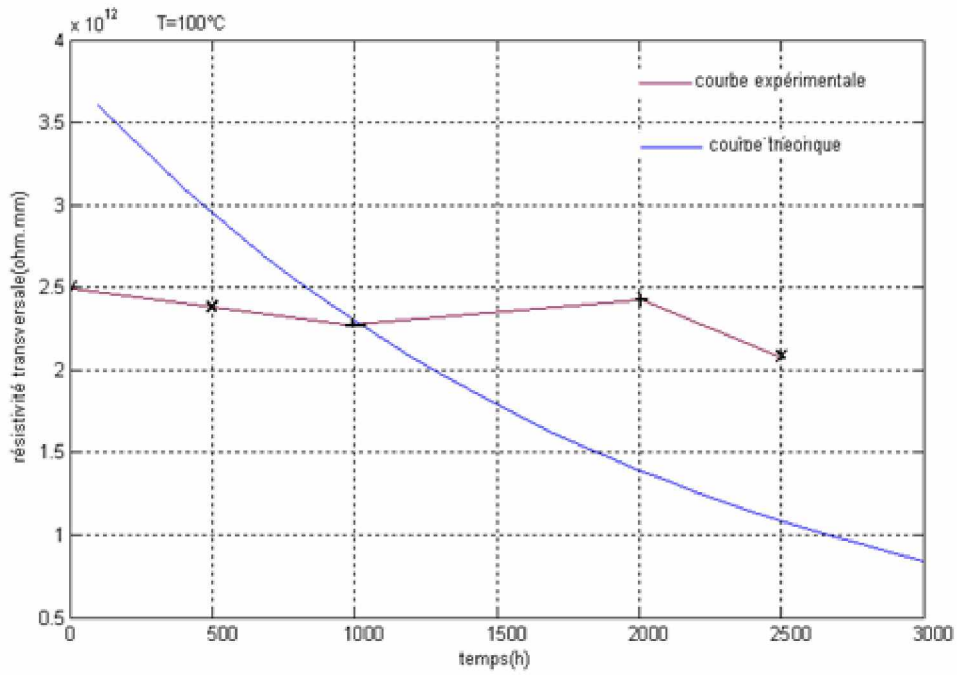


Figure III-9-a : Courbes théoriques variation de la résistivité transversale en fonction du temps





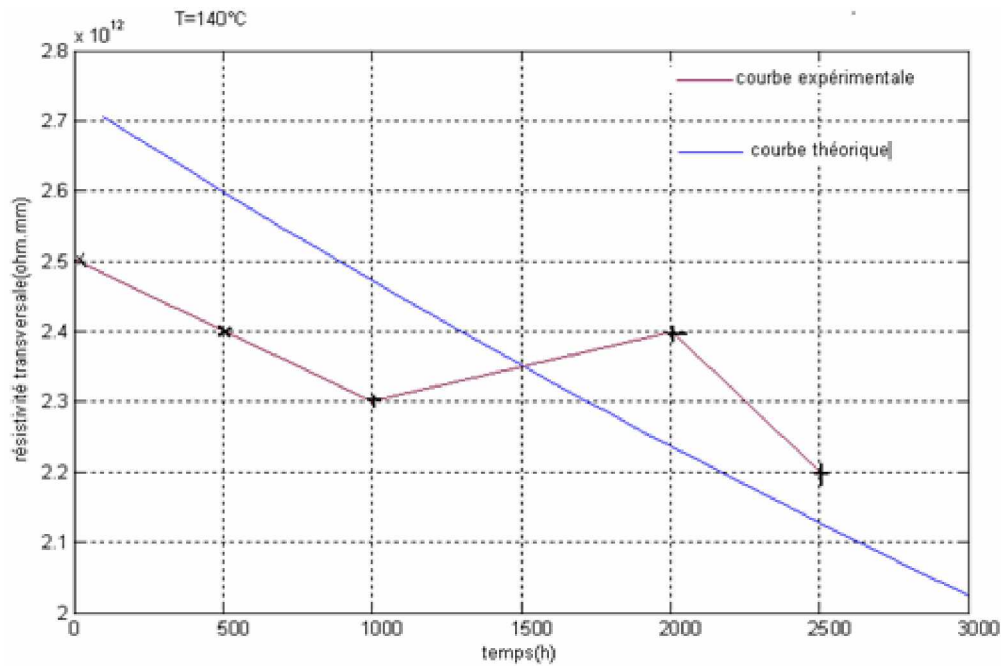


Figure III-9-b. Comparaison des courbes théoriques à des courbes expérimentales montrant la variation de la résistivité transversale en fonction du temps au cours du vieillissement.

### **III-II-2. Influence de la température sur les propriétés électriques:**

#### **III-II-2.1 Variation de résistivité transversale en fonction de la température:**

Pratiquement, la résistivité transversale varie entre  $2.5 \times 10^{12} \Omega.m$  à  $10^{12} \Omega.m$  et puis décroît rapidement en fonction de la température. Les courbes théoriques montrent très bien cette diminution rapide. Les explications données pour l'augmentation de la résistivité transversale données par une diminution de l'humidité dans le matériau. Après vieillissement ( $120^\circ C$  et  $140^\circ C$ ), on voit que la décroissance des courbes théoriques et expérimentales et beaucoup plus rapides avec des valeurs initiales inférieures à celle obtenue par un vieillissement ( $80^\circ C$ ). Selon la norme CEI 502 [28] qui fixe la valeur de la résistivité transversale à la température maximale assignée de service à  $10^{12} \Omega.m$ , la courbe théorique répond aussi à cette norme figure (III-10).

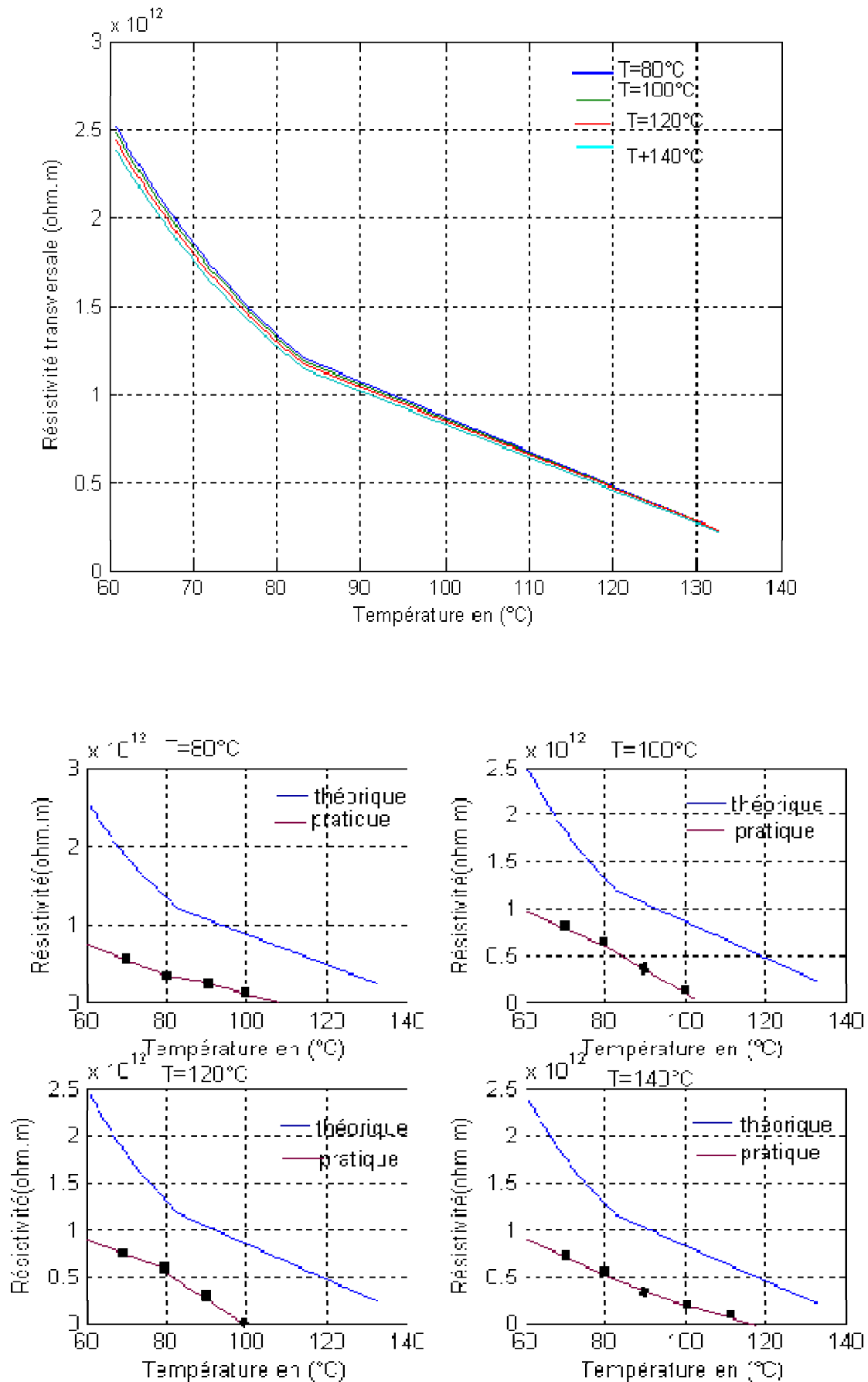


Figure III-10. Variation de la résistivité transversale en fonction de la température

### III -II-2.2 Variation du champ électrique en fonction de la température:

Le champ électrique dans l'isolant augmente avec la température d'essai qui varie entre 20°C et 140°C. Les valeurs du champ varient dans l'isolant de 2.4 kV/mm à 8 kV/mm, tel que l'isolant est compris entre 6 mm et 14 mm, pour une tension appliquée de 18 kV figure (III-11).

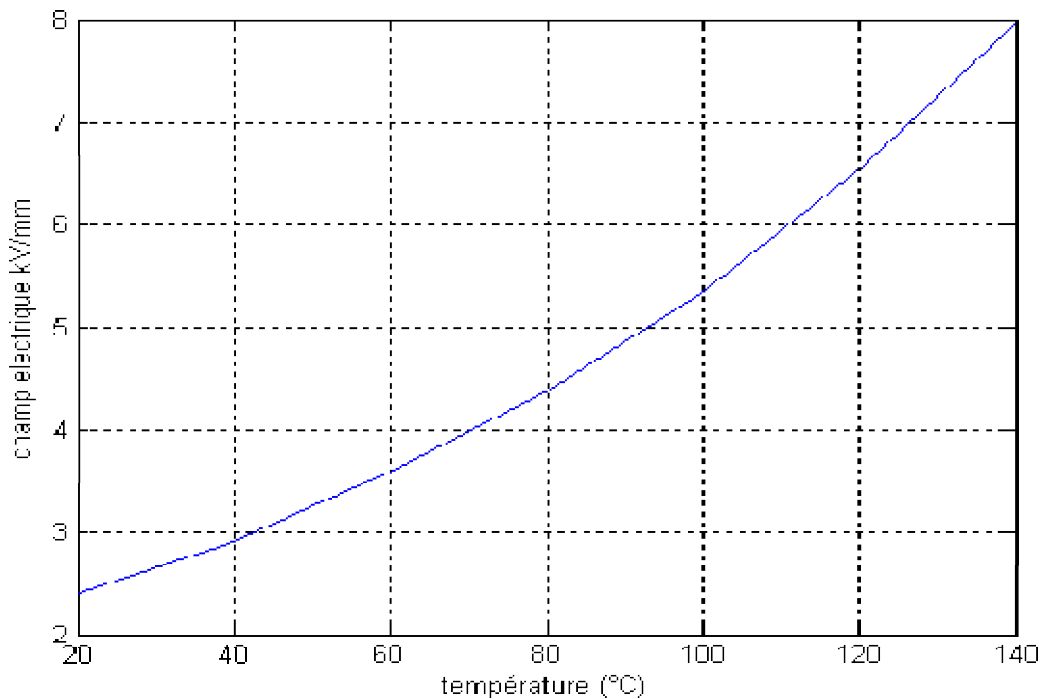


Figure III-11. Variation du champ électrique en fonction de la température

### III-II-2.3 Variation de la constante diélectrique en fonction de la température:

La valeur mesurée et la valeur théorique de la constante diélectrique du PRC ont une différence négligeable (valeur théorique : 2.63, valeur mesurée est de 2.55 à 20°C). La figure (III-12) montre que la fonction de la permittivité relative avec la température est une fonction décroissante soit de point de vue théorique ou expérimental sauf que dans notre cas la courbe expérimentale varie moins rapidement par rapport à celle théorique.

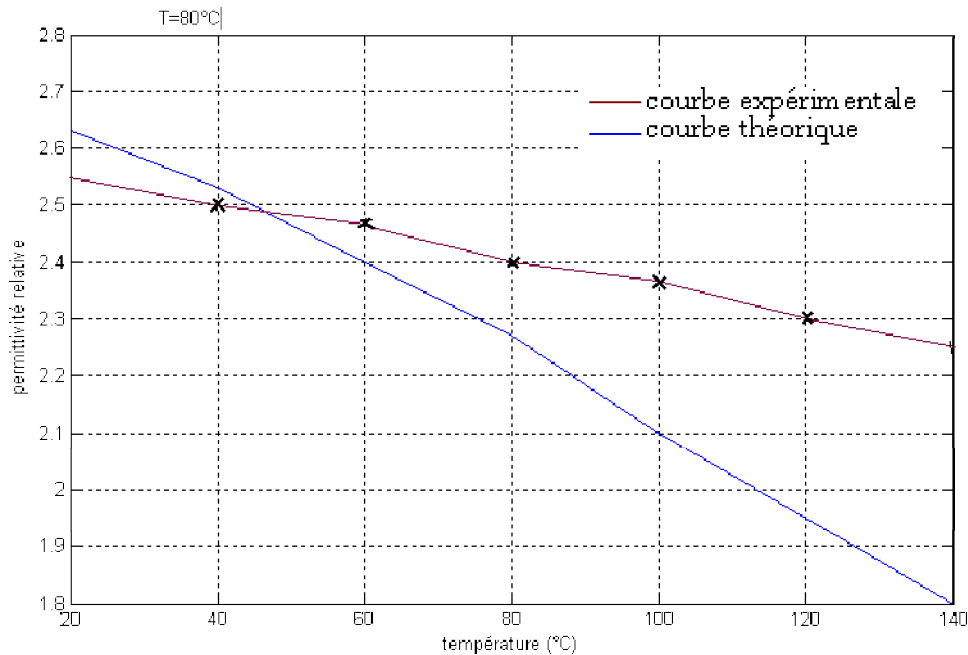
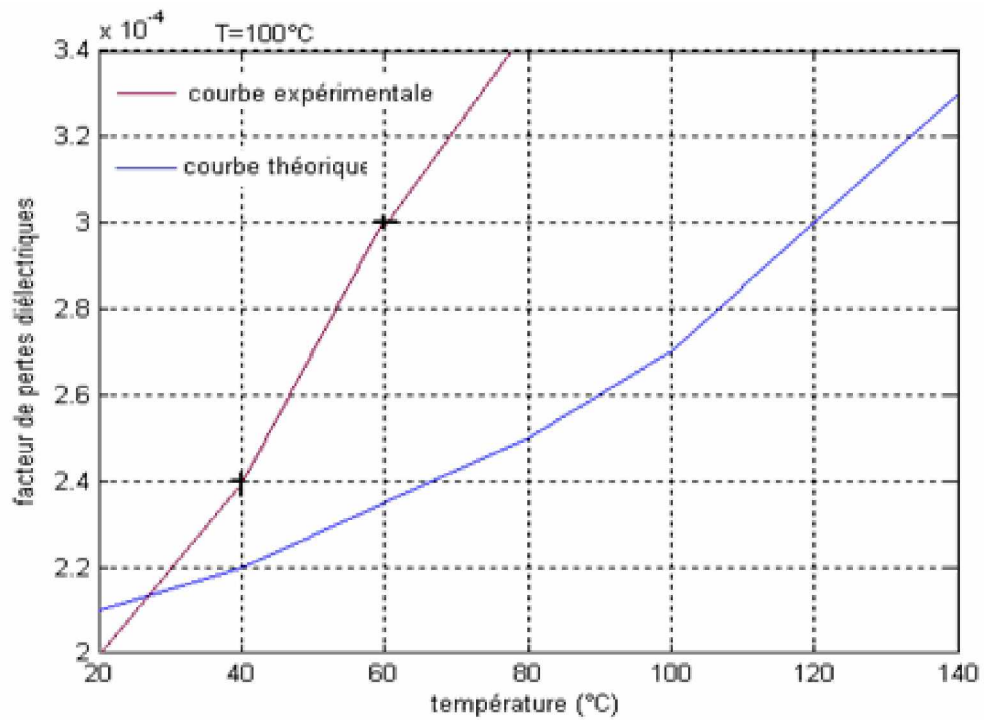
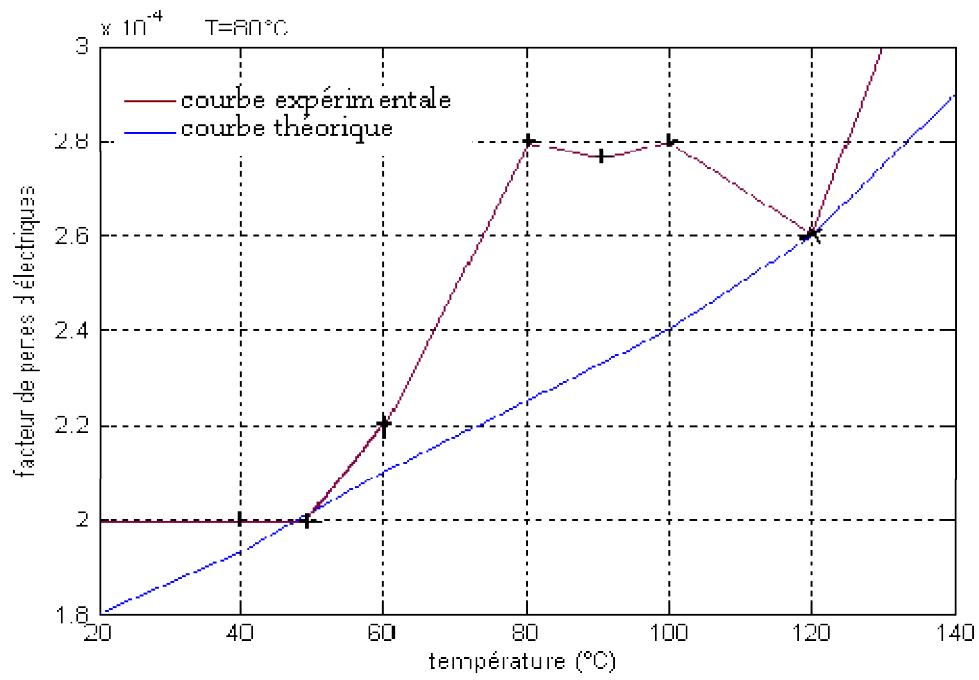


Figure III- 12. Variation de la permittivité en fonction de la température

#### **III-II-2.4 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température :**

Le facteur de pertes diélectriques augmente avec la température comme dans le cas pratique. Cette augmentation peut être attribuée à l'accroissement de la mobilité des charges, aux pertes dues aux charges d'espace, au phénomène d'oxydation et au phénomène de relaxation des dipôles. L'allure des courbes obtenues à T=80°C, 100°C, 120°C et 140°C est la même, mais avec des valeurs supérieures au cours du vieillissement. C'est exactement ce qui a été trouvé par modélisation pour les différentes températures de vieillissement figure (III-13).



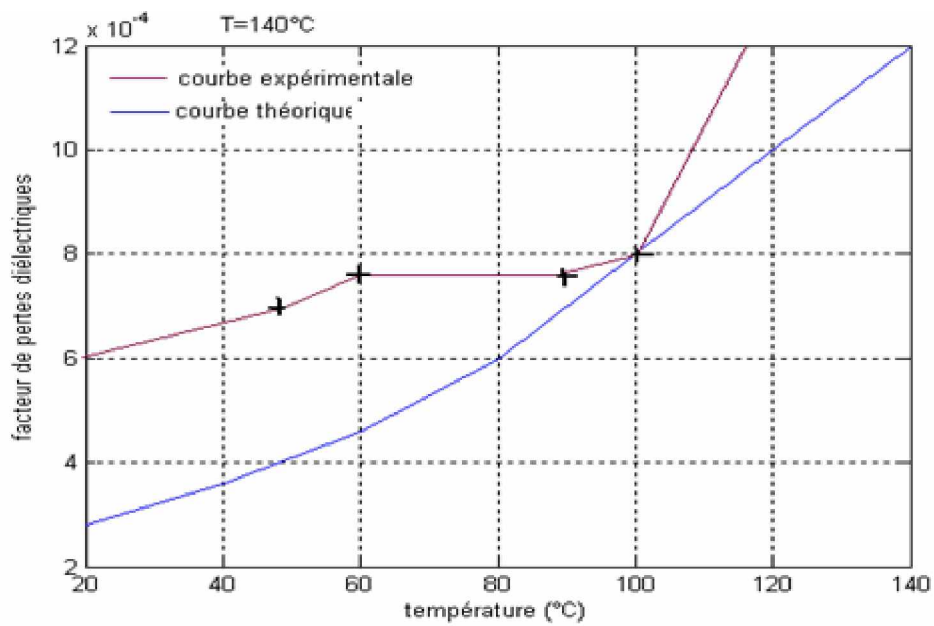
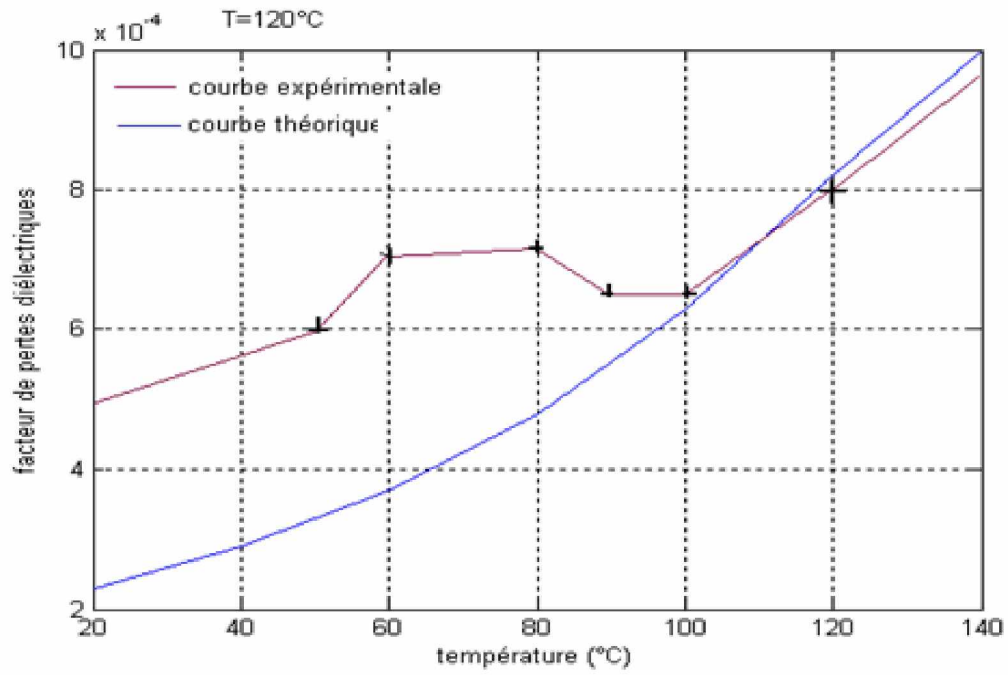


Figure III-13. Variation de  $\text{tg } \delta$  en fonction de la température au cours du vieillissement



# Conclusion générale

---

Le présent travail nous permet en premier lieu d'établir le calcul des modèles analytiques des contraintes électrique et thermique dans un câble haute et moyenne tension à isolation homogène. Il est évident que les distributions de la température et du champ électrique en fonction du rayon du câble nous permettent de déterminer l'évaluation des propriétés électriques en fonction du temps de vieillissement et en fonction de la température d'essai.

Le processus de vieillissement thermique est très complexe et les mécanismes varient avec les différents polymères et suivant les différentes conditions de service. Dans la littérature, il existe peu de théories sur le vieillissement thermique des polymères, généralement les théories existantes découlent de la loi d'Arrhenius.

Nous avons étudié le vieillissement thermique de deux principaux polymères (EPDM, PRC) utilisés dans l'isolation des câbles moyenne et haute tension sous tension continue. Nous nous sommes intéressés à l'évolution des propriétés électriques en fonction du temps de vieillissement pour différentes températures de vieillissement (80°C, 100°C, 120°C, 140°C), ainsi que l'évaluation des propriétés électriques en fonction de la température aux cours du vieillissement.

Nous constatons que l'EPDM et le PRC étudiés dans le laboratoire de l'ENP, et étudiés théoriquement répondent aux normes en vigueur, et ont un bon vieillissement thermique. Nous remarquons que la résistivité transversale et la constante diélectrique diminuent légèrement en fonction de la température. Le facteur de pertes diélectriques du PRC a été considérablement affecté sous l'action du vieillissement thermique. Ce facteur est d'autant plus important quand la température augmente.

Ces résultats sont très importants dans la mesure où il constitue un paramètre nous renseignant sur la qualité du câble fabriqué.

Les caractéristiques obtenues par modélisation des propriétés électriques (résistivité transversale sous l'influence du temps de vieillissement et de la température, la permittivité relative et le facteur de dissipation sous l'influence de la température) sont pratiquement proches de celles obtenues par d'autres auteurs aussi bien expérimentales que théoriques.

Nous avons établi les variations des propriétés électriques à partir d'un modèle de durée de vie (loi d'Arrhenius). Ce modèle est une approche d'une courbe expérimentale [48].

Les modèles établis ne sont valides que pour les isolations homogènes. Une modélisation parfaite est celle qui tient compte des vacuoles, des impuretés, arborescences électriques et de tous les facteurs influençant le vieillissement thermique

## *Références Bibliographiques*

---

- [1] H.R.Zeller, "Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Solid Dielectrics", IEEE Trans. Elect. Insul, vol. 1, No.2, April 1987.
- [2] G.C.Montanari, "Modelling of Multifactor Ageing Processes Occurring in Solid Insulation", IEEE. Trans. Dielect. Elect. Insul. vol. 2. No.6, 1992
- [3] L. Dissado, G. Mazzanti, G.C.Montanari, "The incorporation of Space Charge Degradation in Life Model for Electrical Insulating Materials", IEEE, Trans. Dielect. Elect. Insul. vol. 2. No.6, pp 1147-1158, December 1995.
- [4] L. Dissado, G. Mazzanti, G.C .Montanari," A New Thermo-electrical Life Model Based on Space Charge Trapping ", International Symposium on Electrical Insulation, Montréal, Quebec, Canada June 16-19, 1996.
- [5] L.Dissado et S. J.Urban, P.A.Norman, "Breakdown Statistics of the Space Charge Ageing Model for Polymeric Insulation", IEEE, Conference Elect. Dielect. Phenom, San Francisco, pp 128-132, October 20-23 1996.
- [6] L. Dissado, G. Mazzanti, G.C .Montanari, "The Role of Trapped Space Charges in The Electrical Ageing of Insulating Materials", IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul. vol. 4, No.5, pp 496-506, October 1997.
- [7] L. Dissado, G. Mazzanti, G.C .Montanari, "A New Thermo Electrical Life Model Based on Space Charge Trapping", IEEE Inter. Sympos. Electric. Insul ,Montréal, Quebec, Canada, , pp 642-646, Jun 16-19 1996.
- [8] C.L.Griffiths, J.Freestone et R.N.Hampton, "Thermoelectric Ageing of Cable Grade XPLE", IEEE, Inter. Sympos. Electric. Insul. Arlington, Virginia, USA, pp 578-583, Jun 7-10 1998.
- [9] CHINH DANG, Jean Luc Parpal, Jean pierre Crine , " Electrical Ageing of Extruded Dielectric Cables, Review of Existing Theories and Data ", IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul, Vol. 3, No.2, pp 237-248, April 1996.
- [10] G.C.Montanari, "A Comparative Investigation of Electrothermal Endurance Models For Insulating Materials and Systems Characterization", IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul. vol. 13, No.3, June 1997.

- [11] Luciano Simoni “A General Phenomenological Life Model for Insulating Materials Under Combined Stresses”, IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., Vol. 6,No.2, pp 250-259, April 1999.
- [12] L.Dissado, G. Mazzanti, G.C.Montanari, “A Space Charge Life Model for AC Electrical Aging of Polymers” IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol. 6,No.6, pp 864-876, December 1999.
- [13] E.S.Cooper , LA Dissado et J.C.Fothergill, “ Application of Polymer Ageing Models to Power Cables” , IEEE, annual report conference on Trans. Dielect. Elect. Insul. Pp.392-396, 2002.
- [14] A.Tzimas, M.Fu, L.A.Dissado, “ Characterization of Electrothermally Aged XPPE Cable Peelings Through Space Charge Measurements” IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., Vol. 6,No.6, pp 30-34,2005.
- [15] E.S.Cooper , LA Dissado et J.C.Fothergill, “ Application of Thermoelectric Aging Models to Polymeric Insulation in Cable Geometry” , IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., Vol. 12,No.9, February2005.
- [16] Ch.Chakradhar Reddy et T.S.Ramu, “On the Computation of Electric Field and Temperature Distribution in HVDC Cable Insulation”, IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol. 13,No.6, pp 864-876, December 2006.
- [17] L.A.Dissado, “Elemental Strain and Trapped Space Charge in Thermoelectrical Ageing of Insulating Materials, part I: Elemental Strain under Electrical, Mechanical Stress “, IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul. Vol 8, No 6, pp 959-965, December 2001.
- [18] D. Fabiani, G.C.Montanari, R. Rodega, P.H.F. Morshuis, C.Laurent et ] L.A.Dissado, “The Effect of Temperature Gradient on Space Charge and Electric Field Distribution of HVDC Cable Models”, IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol 8, No 6, pp 959-965,2005.
- [19] J.C.Dubois, “ Propriétés Diélectriques”, Technique de l’Ingénieur, A3140 ,1984.
- [20] R. Fournier “ Les isolants en Electrotechnique, Essais Mécaniques de Dégradation et Application Industrielles ”, édition Eyrolle, Paris 1990.
- [21] A.Boubakeur, Y.Mecheri, M.Boumerzoug, “ Comportement diélectrique et mécanique du PRC soumis à un vieillissement thermique continu ”? Annales de chimie, sciences des matériaux, pp.457-470, Eservier, Paris 2000.
- [22] Chettih Saliha “ Etude par Simulation de l’Influence des Arborescences d’Eau Ouvertes sur les Contraintes Electrique et Electromécanique dans la Couche Isolante des Câbles de Haute Tension ”, Thèse de Magister, Laghouat 2001.

- [23] M. Seghir Tahar “ Etude par Simulation de l’Influence de la Température sur l’Apparition des Décharges Partielles dans les Cavités Gazeuses Contenues dans la Couche Isolante des Câbles de Haute Tension”, Thèse de Magister, Laghouat 2001.
- [24] F. ROCABOY “ Comportement Thermique des Polymères Synthétiques, Tome I, Polymères à Chaînes Carbonées ”, Edition Paris 1972.
- [25] M. Mecheri “ Influence du Vieillissement Thermique Continu sur les Propriétés Diélectriques et Mécaniques du Polyéthylène Réticulé Chimiquement Utilisé dans l’Isolation des Câbles Moyenne Tension ”, Thèse de Magister, ENP 1998.
- [26] M. Aguet, M. Lanoz “ Haute tension”, Traité d’Electricité, Vol.XXII, édition presse P.R, Lausanne 1990.
- [27] H.T. Gian, D. Malek “ Phénomène de Rupture Diélectrique des Matériaux Isolants en Electrotechnique ”, 3<sup>ème</sup> Journée Magrébine des Sciences des Matériaux, pp. 96-101, Alger, Avril 1992.
- [28] J.Verdu “ vieillissement chimique”, technique de l’ingénieur, A3151, 1980.
- [29] M. Fontanille, Y.Gnagnou “ structure moléculaire et morphologie des polymères”, technique de l’ingénieur, A 3042, AM1, 1994.
- [30] Guy Rabillaud “High Performance Polymers, Tome I, Conductive Adhesives, Chemistry and Applications”, pp 32-36-179, Edition TECHNIP, Paris 1997.
- [31] D. Bouguedad “ Influence du Vieillissement Thermique sur les Propriétés de l’EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère) ”, Thèse de Magister, UMMTO 1999.
- [32] A.Boubakeur, Y.Mecheri, M.Boumerzoug, “influence of continous thermal ageing on the properties of XPLE used in medium voltage cables”, IEEE, International symposium on high voltage engineering, ISH, 99, london1999.
- [33] M. Guibadj mossadek “ Etude par Simulation du Phénomène d’Apparition des Décharges Partielles dans les Cavités Gazeuses Contenues dans la Couche Isolante des Câbles de Haute Tension ”, Thèses de Magister, Laghouat 2001.
- [34] Champrier “ Chimie Macromoléculaire I ”, édition Hermann, Paris 1971.
- [35] M. Chebrek “ Conception et Réalisation d’un Câble de 30 kV Isolé à l’ EPDM ”, Thèse de Projet de Fin d’Etude, ENP 1983.
- [36] Garcia “ Sur le Comportement du Polyéthylène Réticulé Chimiquement Soumis à l’Action des Décharges Partielles ”, Thèse de Doctorat, UPS Toulouse1980.
- [37] JO PEREZ “ Physique et Mécanique des Polymères Amorphes ”, Londres New York Paris, Technique et Documentation LAVOISIER 1992.

- [38] Mohamed Nedjar “ Influence du Vieillissement Thermique sur les Propriétés de Polychlorure de Vinyle Utilisé dans l’Isolation des Câbles de Haute Tension”, Thèse de Magister, Tizi ousou 1991.
- [39] R. Fournier “ Les isolants en Electrotechnique, concepts et théories”, édition Eyrolles, Paris 1986.
- [40] M.Khalifa et H.Anis, “Solid Insulating Materials”, Egypt.
- [41] E.Kuffel, W.S.Zaengel, “High Voltage Engineering”, Edition Canada 2000.
- [42]L.Boukezzi “ Influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du PRC utilisé dans l’isolation des câbles moyenne tension ”, these de magister, ENP, Février 2000.
- [43] Jean Marie Escané et Pierre Escané , “ modélisation des lignes de câbles ”, technique de l’ingénieur, D1102.
- [44] M.Khalifa et H.Anis, “Solid Insulating Materials”, Egypt
- [45] François Gaille “ Physique II, Electromagnétisme”, Ecole d’Ingénieurs du Canton de Vaud 1996.
- [46] Maurice RAVALLE “ Electrostatique Electrocinétiq ue ”, Edition Paris 1964
- [47] A.Boubakeur, A.Medjoub, M.Boumerzoug , “Influence of thermal ageing of cross linked polyethylene used as electrical insulation of medium voltage cables”, 10<sup>th</sup> international symposium on high voltage (ISH), Montreal, Canada, 1997.
- [48] R.A.D.ixon “Thermal Aging Predictions from an Arrhenius Plot with only one Data Point”, IEEE, Trans on Elect. Ins, No 4, Vol.15, pp.331-334, August 1980.