

Vieillessement du PRC

1- Claquage des isolants solides

2- Vieillessement thermique du Polyéthylène Réticulé
Chimiquement (PRC)

(PRC utilisé dans l'isolation des câbles produits par ENICABiskra)

Pr A.Boubakeur

Ecole Nationale Polytechnique - ahmed.boubakeur@g.enp.edu.dz

1 Claquage des Isolants Solides

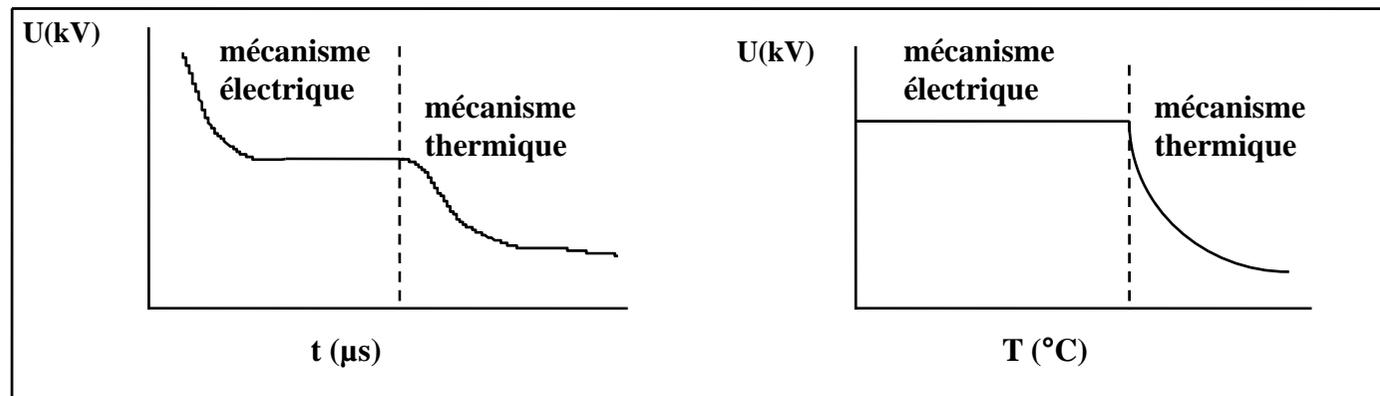
Les deux principaux mécanismes de rupture diélectrique des isolants solides sont:

- 1.le mécanisme de rupture intrinsèque (rupture électrique),
- 2.le mécanisme thermique.

Les autres mécanismes sont:

- 1.rupture par streamers,
- 2.rupture électromécanique,
- 3.rupture par arborescence,
- 4.rupture par érosion (décharges partielles)
- 5.rupture après vieillissement.

Les mécanismes électrique et thermique peuvent être distingués, d'après la variation de la tension de décharge disruptive (rupture diélectrique) en fonction du temps d'application de la tension ou en fonction de la température:



1.1 Mécanisme Electrique

La rupture intrinsèque est de nature électronique et a lieu à des temps de l'ordre de 10^{-8} s. La rigidité diélectrique est de l'ordre de 1000kV/cm (1MV/cm).

La rupture est atteinte quand les électrons acquièrent suffisamment d'énergie dans le champ appliqué, afin de traverser la bande interdite de l'isolant (passage de la bande de valence à la bande de conduction). Selon le degré d'homogénéité et de pureté du matériau, on aura un certain transfert d'énergie entre les électrons de conduction et le réseau cristallin.

En pratique, les réseaux cristallins présentent certaines imperfections dans leur structure, dues à des atomes qui manquent ou plus fréquemment à la présence d'impuretés. Ces impuretés constituent des pièges pour les électrons libres.

Quand on applique un champ électrique, les électrons acquièrent de l'énergie qui sera fournie au réseau cristallin (interaction électrons - réseau).

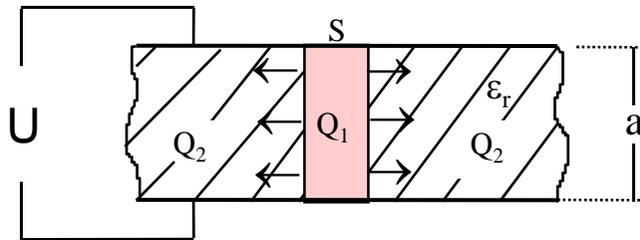
Dans les diélectriques amorphes, les électrons acquièrent plus rapidement d'énergie qu'ils n'en fournissent. De ce fait, le nombre d'électrons piégés qui atteignent la bande de conduction augmente, engendrant l'augmentation de la conduction dans le matériau, et favorisant ainsi la rupture diélectrique.

La rupture diélectrique (claquage) est atteinte lorsque l'intensité du champ appliqué est supérieure ou égale à une valeur critique (E_c).

1.2 Mécanisme Thermique

1 Rupture locale

D'après K.W.Wagner, la rupture thermique a lieu après la formation d'un canal le long duquel la conductivité du diélectrique devient beaucoup plus importante que dans le reste du volume diélectrique



La quantité de chaleur dans le canal s'exprime par:

$$Q_1 = 0,24.I^2.R = 0,24.U^2.\gamma.(S/a) = \text{Cst} . \gamma(T). U^2 \text{ avec:}$$

$\gamma(T)$: conductivité moyenne du canal.

$$\gamma_T = \gamma_{T_0,e} \alpha(T - T_0)$$

La quantité de chaleur dissipée Q_2 est donnée par l'expression suivante:

$$Q_2 = \lambda.(T - T_0).a$$

La rupture diélectrique est atteinte lorsque les conditions suivantes sont réunies:

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{et} \quad \partial Q_1 / \partial T = \partial Q_2 / \partial T$$

2 Rupture globale

Les pertes diélectriques spécifiques:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{diel}} &= E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg}(\delta) \quad (\text{cas } U \sim) \\ P_{\text{diel}} &= E^2 \cdot \gamma \quad (\text{cas } U =) \end{aligned} \right\} P_{\text{diel}} = E^2 \cdot f(T)$$

En régime stable nous avons les conditions suivantes:

$$P_{\text{diel}} = P_{\text{ref}} \quad (\text{conditions statiques})$$

et

$$\partial P_{\text{ref}} / \partial T > \partial P_{\text{diel}} / \partial T \quad (\text{stabilité})$$

La puissance dissipée à l'extérieur par conduction thermique est donnée par la formule suivante:

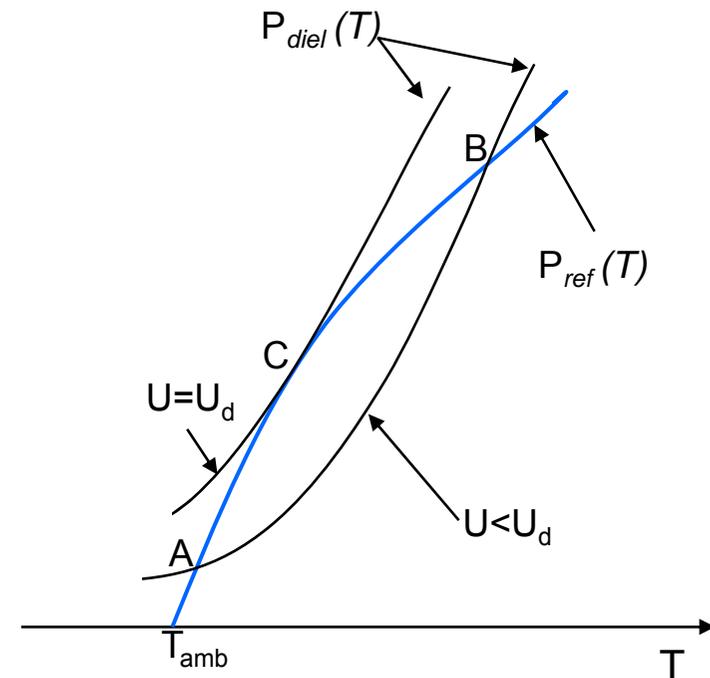
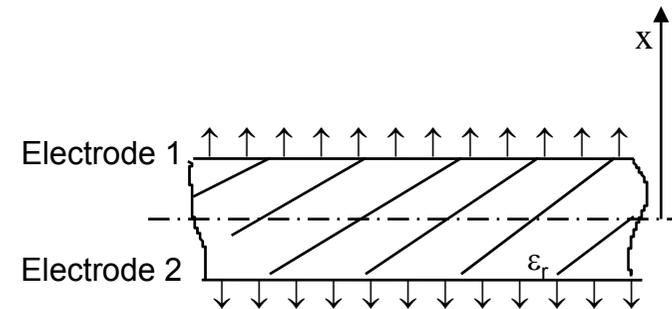
$$P_{\text{dis}} = - \operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T$$

En égalant la puissance dissipée aux pertes diélectriques, on détermine la tension critique de rupture diélectrique thermique:

avec $\lambda = \text{cste}$,

$$\lambda (d^2 T / dx^2) + E^2 \cdot f(T) = 0$$

(T variable suivant la direction x)



1.3 Mécanisme Streamers

Dans certaines conditions, la rupture pourrait avoir lieu après le passage d'une avalanche. L'avalanche peut progresser lorsque l'énergie gagnée par les électrons est supérieure à l'énergie d'ionisation du réseau cristallin (phénomène d'ionisation par choc similaire à celui observé dans le cas des gaz).

D'après Seitz, la rupture peut avoir lieu lorsque l'avalanche dépasse une certaine dimension (longueur critique).

1.4 Rupture Electromécanique

Les isolants solides pourraient rompre sous l'effet des forces de compression électrostatiques dues aux charges superficielles..

D'après Stark et Garton, si l'épaisseur initiale " d_0 " d'un diélectrique décroît jusqu'à une épaisseur " d " sous une tension U , la contrainte de compression due au champ égalée à la rigidité de compression mécanique donne le résultat suivant, Y étant le module de Young du matériau:

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r [U^2 / (2 \cdot d^2)] = Y \cdot \ln(d_0 / d)$$

La valeur maximale, U_{\max} , de la tension, est obtenue pour: $(d/d_0) = e^{0,5} \cong 0,6$

En régime stable, si $U \geq U_{\max}$, on obtient la rupture. Le champ électrique correspondant s'exprimera par la formule suivante:

$$E = U/d_0 \cong 0,6 \cdot (Y / \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r)^{1/2}$$

1.5 Rupture par Arborescence:

L'arborescence est un phénomène de préclaquage électrique, qui se présente sous forme d'arbre et dont le développement est favorisé par la présence de défauts, ou d'impuretés au sein du matériau. L'arborescence peut être révélatrice d'un stade relativement avancé de la dégradation du matériau, et reste considérée comme un phénomène précurseur de la rupture.

Les arborescences sont classées en deux principales catégories:

- les arborescences électriques,
- les arborescences d'eau.

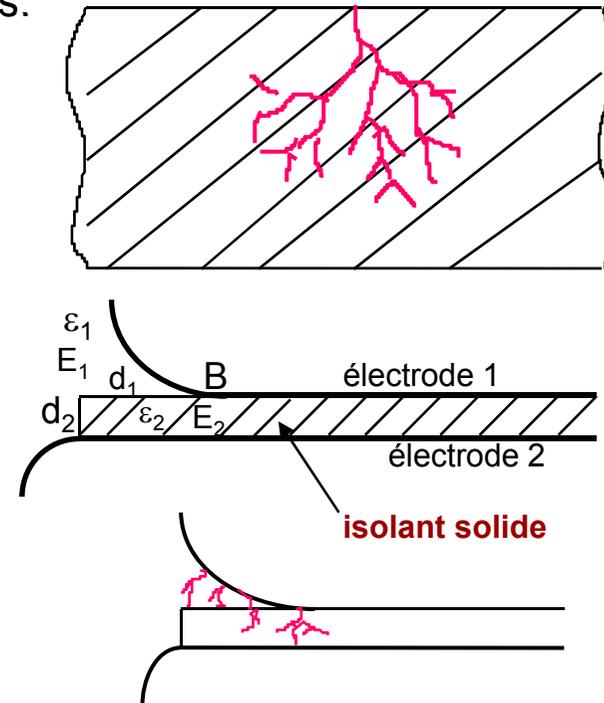
D'autres types particuliers d'arborescences peuvent être aussi observés telles que les arborescences appelées "chimiques".

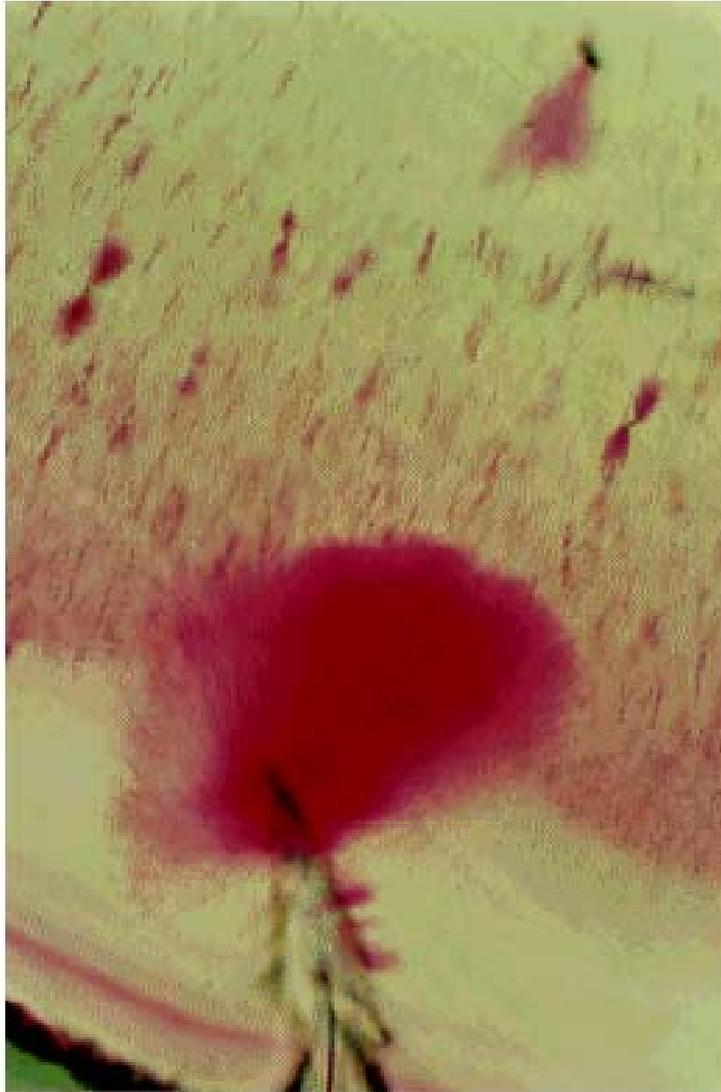
Ces arborescences sont surtout provoquées par les décharges apparaissant aux bords des électrodes, où le matériau isolant solide est en contact avec un autre matériau de permittivité généralement inférieure à la sienne (liquide ou gaz).

Dans le cas du système présenté à la figure ci-contre, le champ E_1 dans le milieu 1 est donné par la formule suivante:

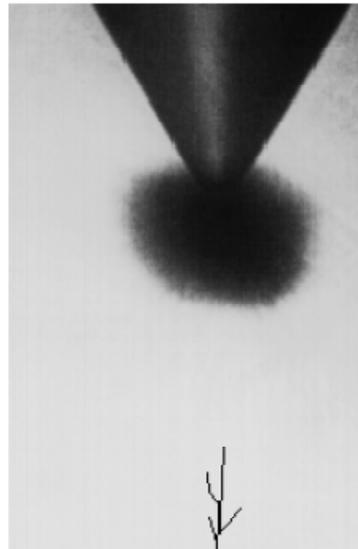
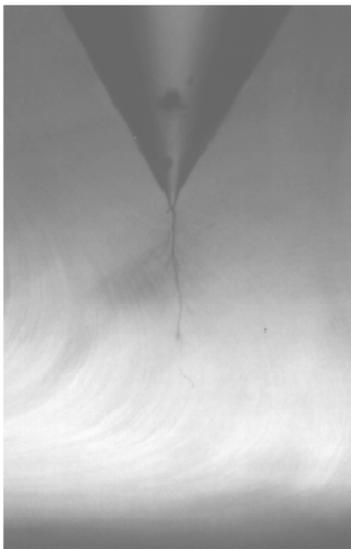
$$E_1 = U / [\varepsilon_1 \cdot (d_1/\varepsilon_1 + d_2/\varepsilon_2)]$$

Quand d_1 diminue, le champ E_1 augmente, et est maximum au point B. Ce champ peut atteindre des niveaux relativement grand (environ 10MV/cm) qui risquent de dépasser la valeur correspondant à la rigidité intrinsèque du matériau. Nous aurons dans ce cas une rupture locale suivie de la formation de plusieurs canaux en branches conduisant à la rupture totale de l'isolant solide.

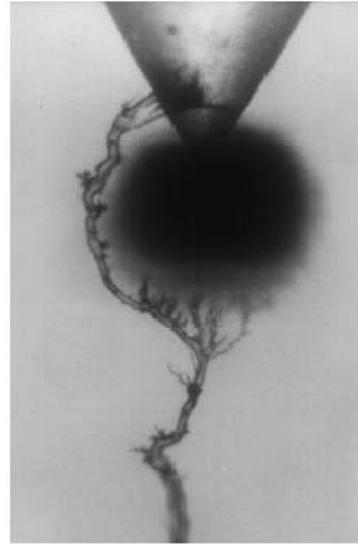
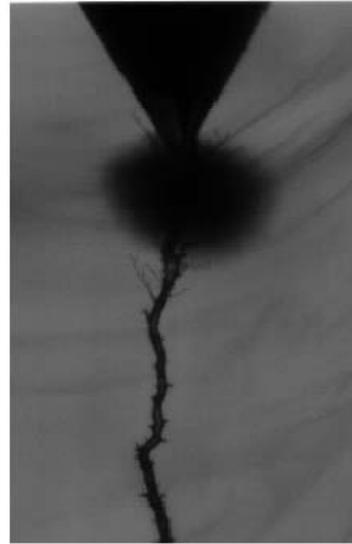




Arborescences d'eau (source EPM)



Arborescences électriques
avec et sans présence
d'arborescences d'eau dans le
polyéthylène



Claquage avec et sans
arborescences

(Source EPM)

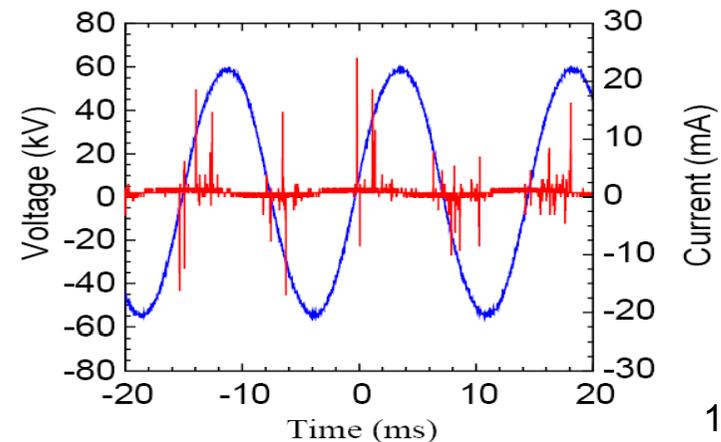
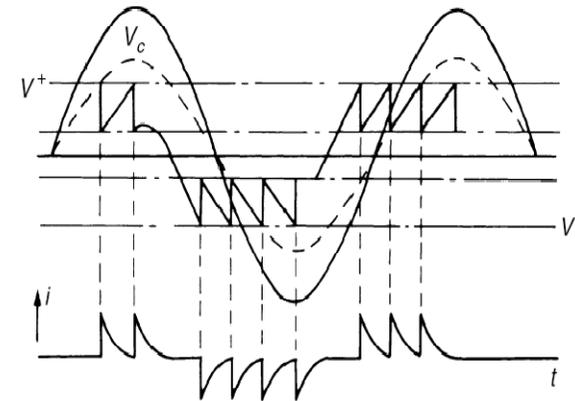
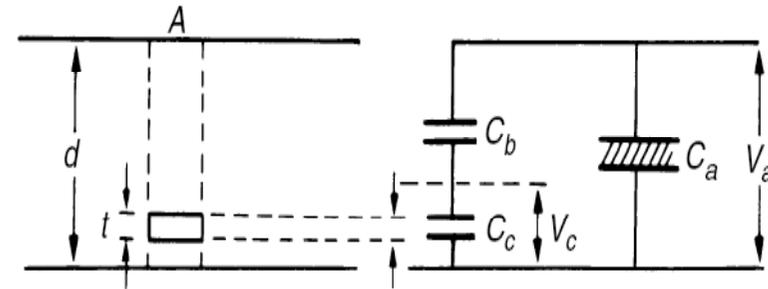
1.6 Rupture par Erosion (Décharges Partielles)

Les décharges partielles peuvent être internes ou externes. Dans le premier cas, elles se produisent à l'intérieur du matériau, et dans le second, à la surface de séparation du matériau solide avec d'autres milieux. Dans ce dernier cas, nous sommes en présence de décharges superficielles.

Lorsque les décharges partielles apparaissent dans les vacuoles de gaz présentes accidentellement dans le volume de l'isolant solide, la température du gaz augmente. Cette augmentation de température est suivie d'une augmentation de la pression du gaz risquant d'engendrer l'érosion du matériau, qui conduirait de proche en proche, à la rupture totale du diélectrique.

Dans la cavité pleine de gaz: $E_c = \epsilon_r E_a$

Si E_c dépasse la rigidité diélectrique du gaz correspondant au produit « p.t » selon la loi de Paschen, il y aura claquage dans la cavité (tenant compte de la nature diélectrique des parois).



1.7 Vieillissement

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 en même temps et influent mutuellement l'un sur l'autre.

a- Vieillessement thermique:

Le vieillissement thermique dépend de la structure du diélectrique. La dégradation du matériau est activée par la présence d'oxygène. D'après J.Fabre, 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.

1 Loi général 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 "G" (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

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

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

D'après cette loi, quand la température T augmente de 8°C , la durée de vie diminue de moitié (règle des 8°C). Cette loi est valable pour les températures comprises entre 100°C et 130°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.

b- 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.

c- Vieillessement 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, on définit la tension seuil d'apparition des décharges partielles. Elle correspond à la tension appliquée au matériau à partir de laquelle la charge apparente fournie par le réseau est égale à un seuil donné (exemple: 1pC dans le cas des câbles isolés au PRC fabriqué par ENICAB/Biskra). 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).

L'énergie des décharges partielles constitue une grandeur très significative sur le niveau de dégradations causées au matériau. L'énergie que fournit la source d'alimentation à l'objet d'essai siège de décharges partielles s'exprime par:

$$W_t = \sum (U_i \cdot q_i) \quad (i=1 \text{ à } N)$$

- W_t : énergie fournie par la source pendant le temps "t" durant lequel N décharges se sont produites dans l'objet d'essai.

- q_i et U_i : charge apparente de la ième décharge et tension instantanée aux bornes de l'objet à l'instant même où elle se produit.

2 Vieillissement thermique du Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC)

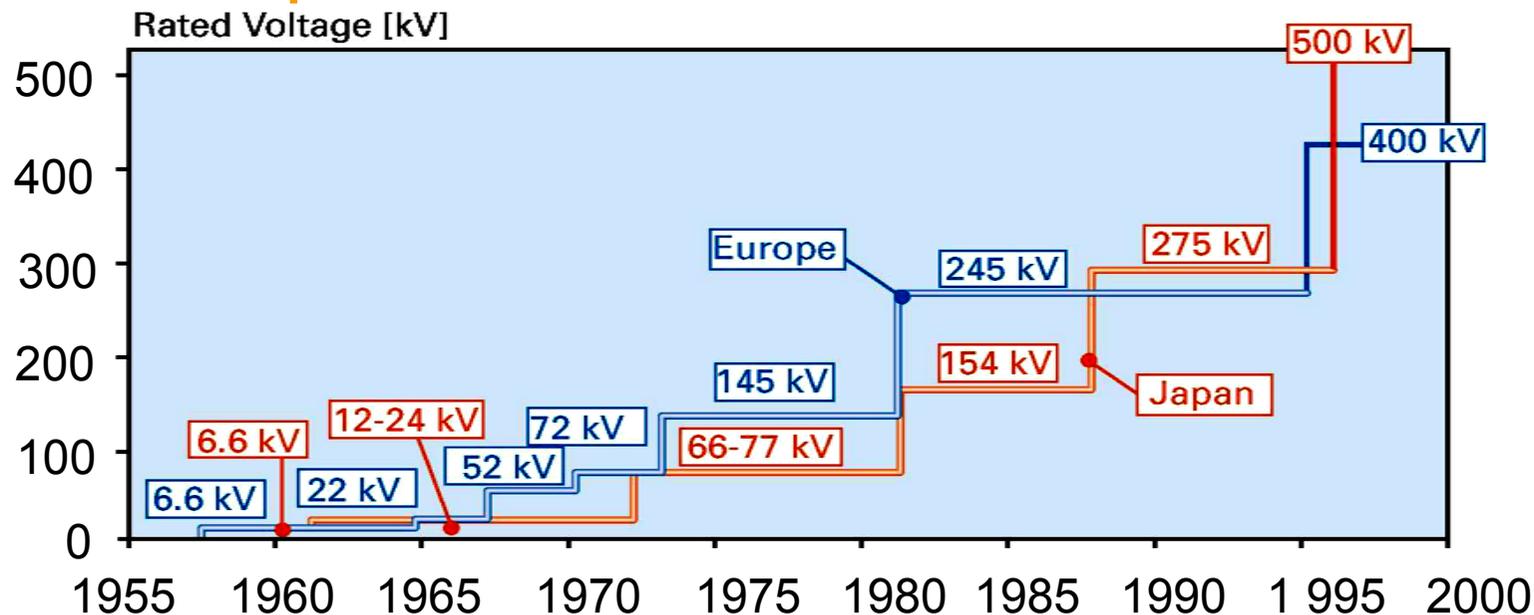
(PRC utilisé dans l'isolation des câbles produits par ENICABiskra)

Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) ou Cross-Linked Polyethylene (XLPE) est devenu un matériau de choix dans l'isolation des câbles haute tension (HT) de nouvelle génération grâce à ses performances diélectriques, physico-chimiques, mécaniques et thermiques.

Les câbles en PRC sont utilisés dans le domaine du transport d'énergie pour des tensions allant jusqu'à 500 kV et la température tolérée en service avoisine les 90°C.

Cependant, malgré les progrès réalisés dans le domaine des procédés de construction de tels câbles et le soin porté lors de leur mise en œuvre, certaines difficultés en termes de durée de vie se posent encore à travers le monde.

Historique des câbles PRC



Au cours des différentes phases de fabrication d'un câble, des impuretés de taille microscopique et de formes diverses peuvent être piégées dans l'isolant ou créées à l'interface des zones conductrices ou semi-conductrices malgré les précautions prises aussi bien par les fabricants des matières premières que par les constructeurs.

Des inhomogénéités dans la structure de l'isolant peuvent être créées au cours de l'extrusion ou du refroidissement de la couche isolante. Ces hétérogénéités induisent des perturbations dans la distribution du champ électrique ainsi qu'un renforcement de ce dernier pouvant conduire, à plus ou moins long terme, à la génération d'arborescences.

Les défauts ou facteurs de vieillissement peuvent, plus au moins conjointement, contribuer en présence des contraintes électriques et thermiques à la dégradation des propriétés principales du matériau en fonction du temps. Cette dégradation peut, dans certains cas, devenir forte et conduire à la détérioration de l'isolant par rupture diélectrique ou thermique.

La contrainte thermique est l'une des contraintes de service les plus sévères pouvant affecter sérieusement les propriétés du matériau constituant l'enveloppe isolante en les dégradant et réduisant ainsi la durée de vie des câbles. Le vieillissement thermique peut se manifester sous deux modes différents : continu ou cyclique.

Une isolation électrique doit supporter, sans défaillance, des contraintes électriques, thermiques et chimiques pendant une durée de vie pouvant aller jusqu'à 40 ans. Pour cela, les essais d'endurance thermique pour avoir une prévision de la durée de vie des matériaux sont recommandés. Ces essais sont destinés à déterminer les changements irréversibles d'importantes propriétés des matériaux isolants en fonction de la contrainte thermique et du temps de vieillissement.

Essais sur Câbles

Câbles unipolaires 18/30 kV PRC ENICABiskra



- 1 - Âme conductrice en Aluminium.
- 2 - Écran semi-conducteur interne extrudé sur âme.
- 3 - Enveloppe isolante en PRC.
- 4 - Écran semi-conducteur externe extrudé sur isolant.
- 5 - Matelas de protection.
- 6 - Écran métallique en cuivre.
- 7 - Étanchéité gonflable.
- 8 - Gaine de protection en PVC.

- Réticulation à l'azote chauffé
- Câbles à champ radial.
- Tension nominale : 30 kV.
- Tension spécifiée : 18 kV.
- Section de l'âme : 120 mm² (en Aluminium).
- Diamètre de l'âme : 12,7 mm.
- Nombre de brins : 35.
- Diamètre d'un brin : 2,15 mm.
- Épaisseur de l'isolant : 8 mm.
- Temp. assignée maximale en service normal : 90° C.
- Temp. assignée maximale en court-circuit : 250° C.
- Champ maximal à la surface de l'âme : 3,13 kV/mm.

◆ Propriétés du PRC utilisé

- ✦ Permittivité relative : 2.3
- ✦ Facteur de pertes diélectriques à 60 Hz : 3×10^{-4}
- ✦ Résistance volumique en courant continu à 23°C : $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$
- ✦ Densité à 23°C : 0.92
- ✦ Résistance à la traction : 180 kgf/cm²
- ✦ Allongement à la rupture : 500%
- ✦ Degré de réticulation : 12%
- ✦ Température de fusion cristalline : entre 105°C et 110°C

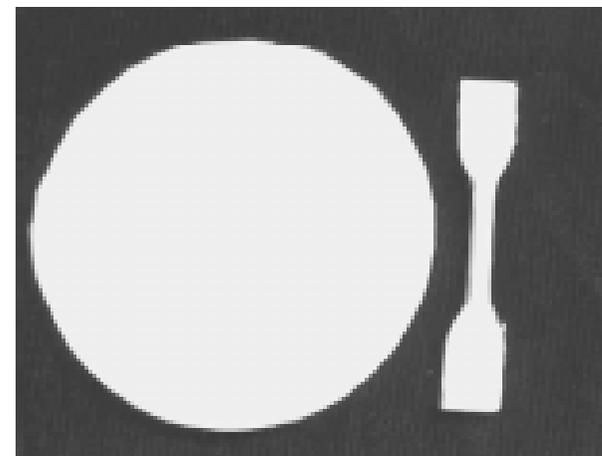
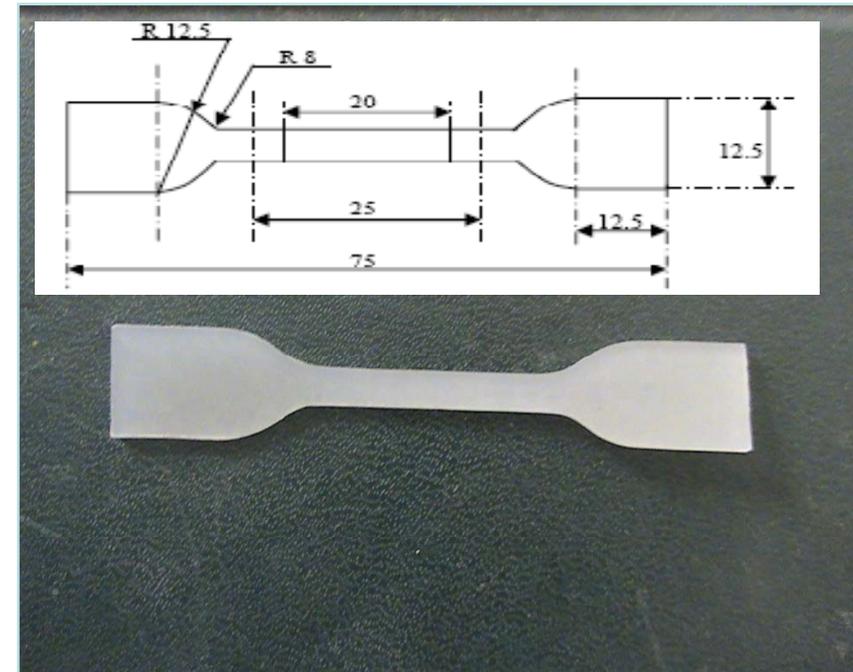
Essais sur Eprouvettes

Des granulés de PRC chargés d'un peroxyde de dicumyle (2% en teneur) et d'un antioxydant sont placés dans des moules d'une presse de type Polystat 300S (380V, 50Hz, 11kW) sous une température de 130°C (dite température de préchauffage) pendant 10 minutes pour avoir une fusion totale des granulés.

Après cette fusion totale, une pression de 300 bars est exercée en augmentant la température à 180°C (température de réticulation). Ces conditions (300 bars, 180°C) sont maintenues pendant 10 minutes pour avoir une réticulation totale du matériau.

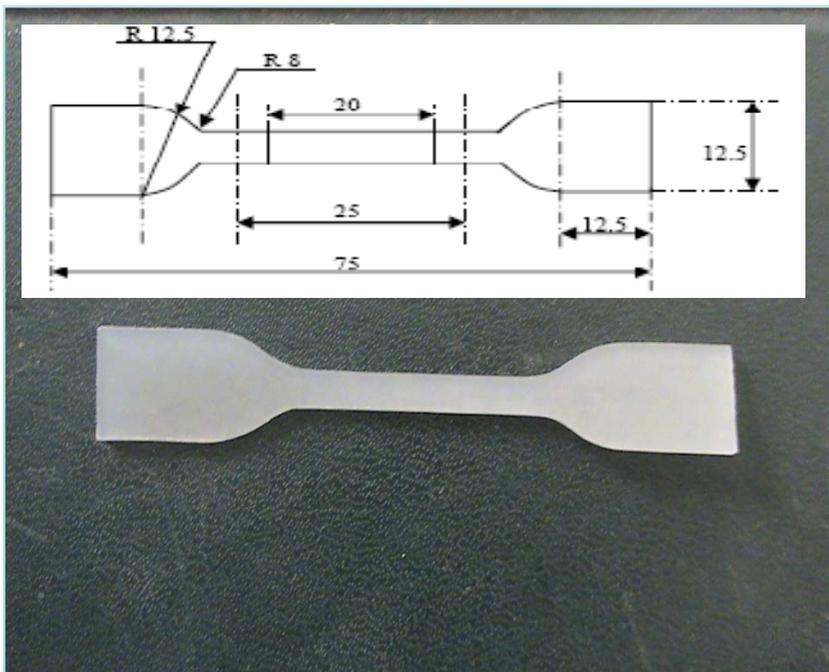
Enfin, on refroidit la presse avec de l'eau en la gardant toujours sous pression pour laisser échapper les bulles d'air et obtenir des plaques de PRC propres.

Après obtention des plaques de (2 ± 0.2) mm d'épaisseur, on découpe des éprouvettes circulaires de 7.5 cm de diamètre pour les essais diélectriques, et d'autres sous formes d'haltères pour les essais mécaniques et la perte de masse conformément à la norme CEI 540.



TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

- Essais mécaniques effectués conformément à la norme CEI 540.
- Éprouvettes sous forme d'haltère prélevées sur câble neuf et câbles vieillis thermiquement.



Éprouvette sous forme d'haltère.

Facteur de pertes - permittivité



Indicateur de zéro

Condensateur étalon

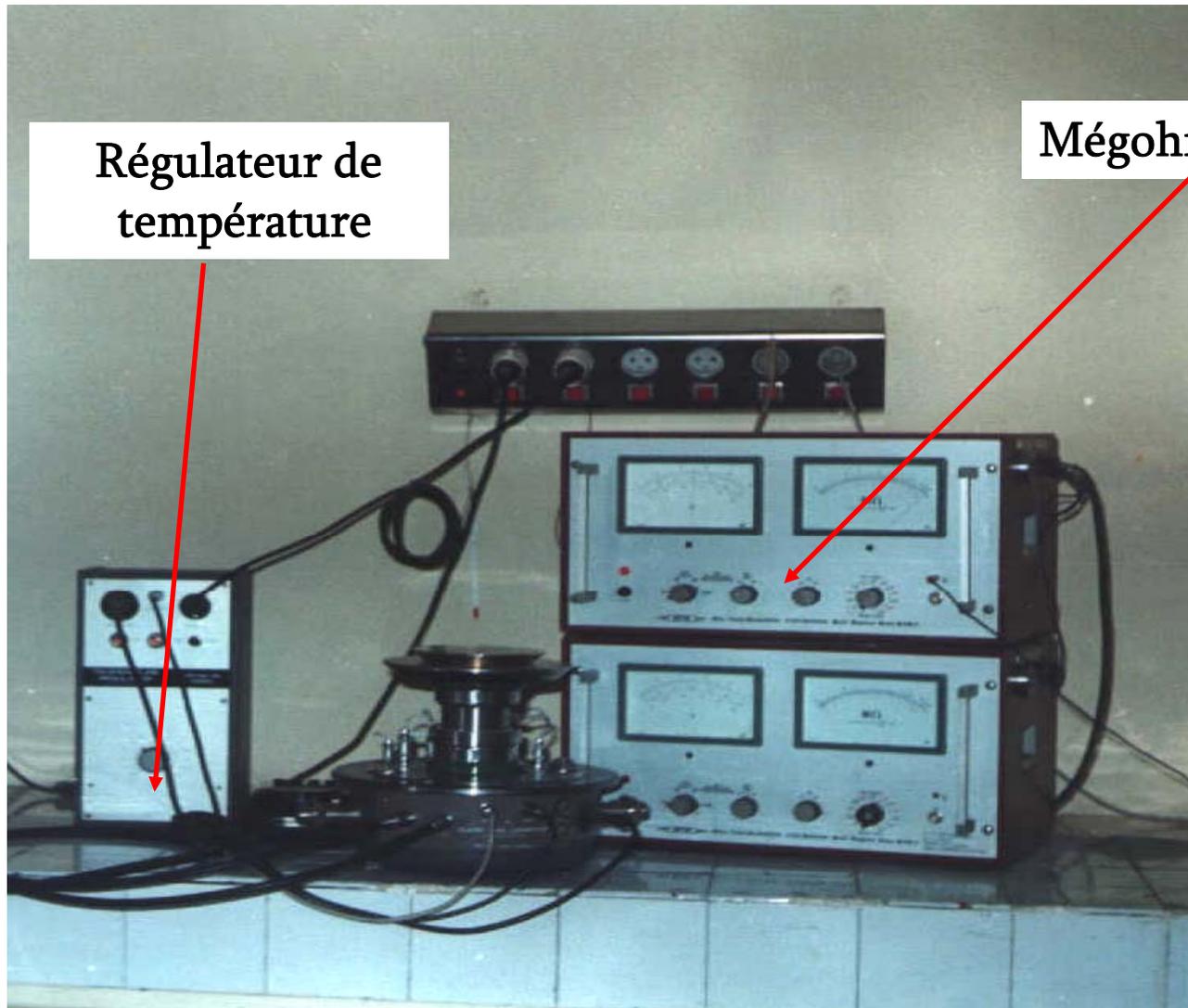
Régulateur de température

Condensateur à anneau de garde



Résistivité transversale

MEGOHMETER MOM11 CABEL Alger



Régulateur de température

Mégohmmètre

$$\rho = Rs/e$$



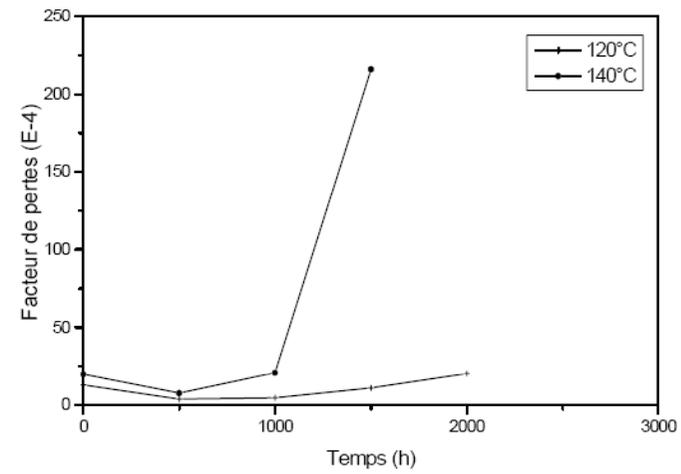
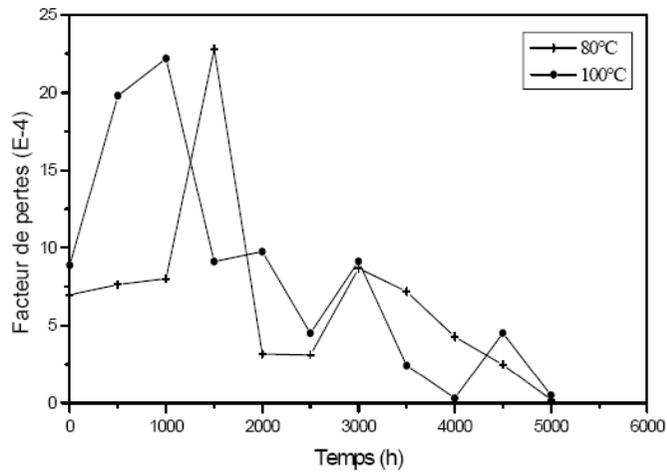
ρ : résistivité transversale [$\Omega \cdot \text{cm}$]

R : résistance d'isolement [Ω]

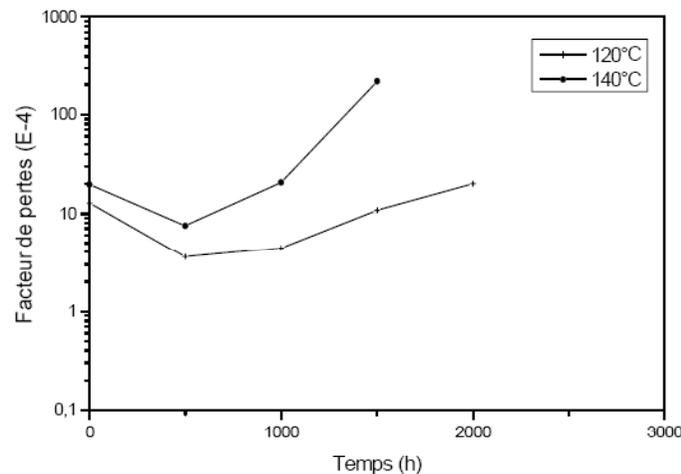
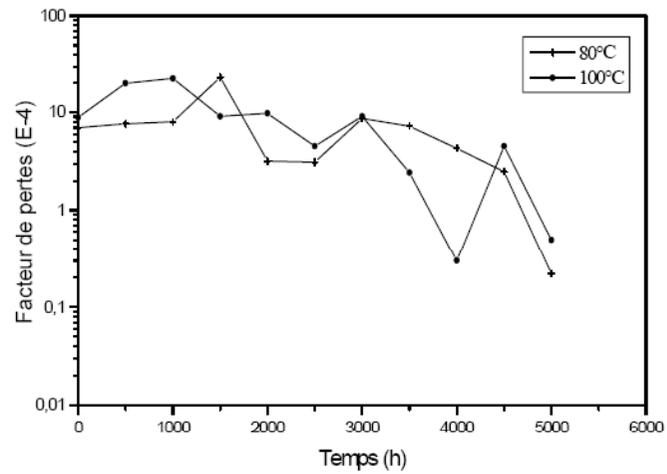
e : épaisseur de l'éprouvette [cm]

s : surface de l'éprouvette 20cm^2

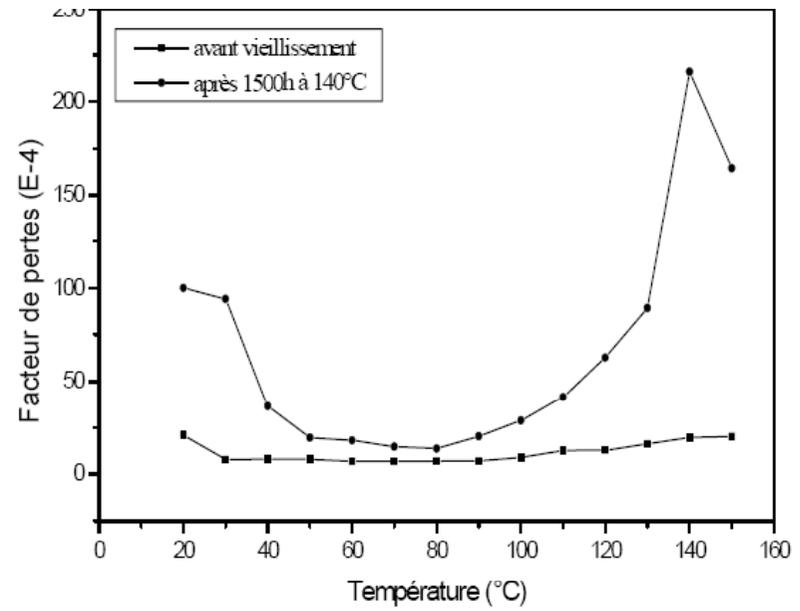
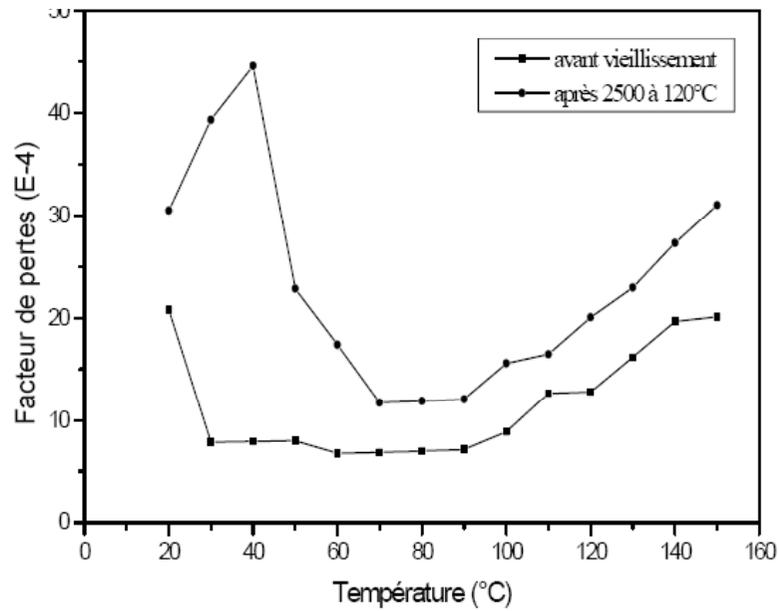
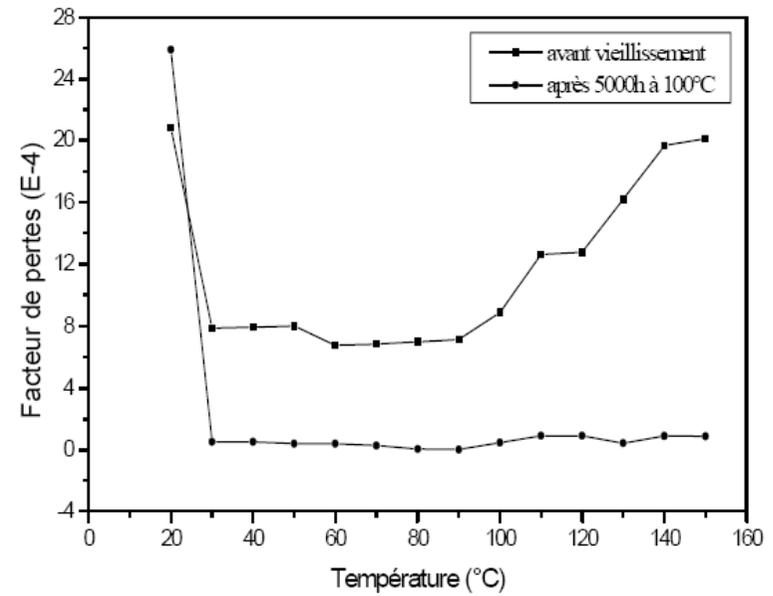
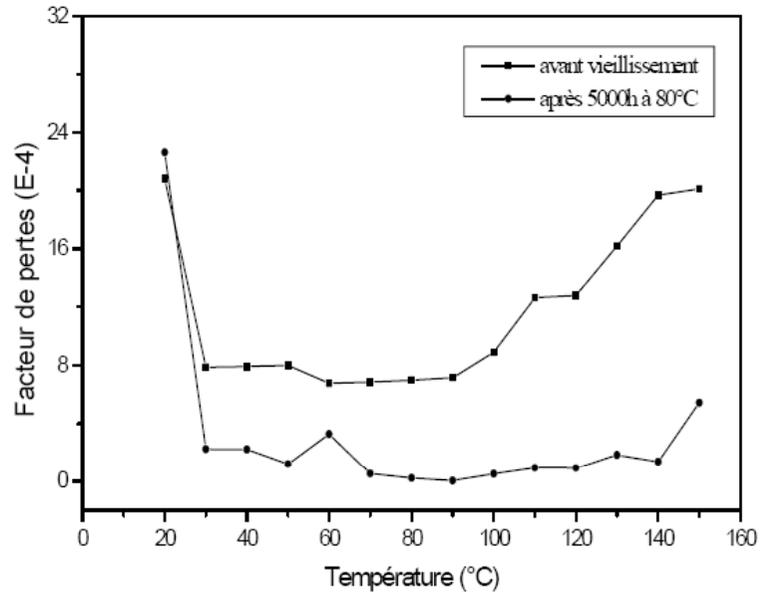
Facteur de pertes diélectriques ($\text{tg}\delta$)



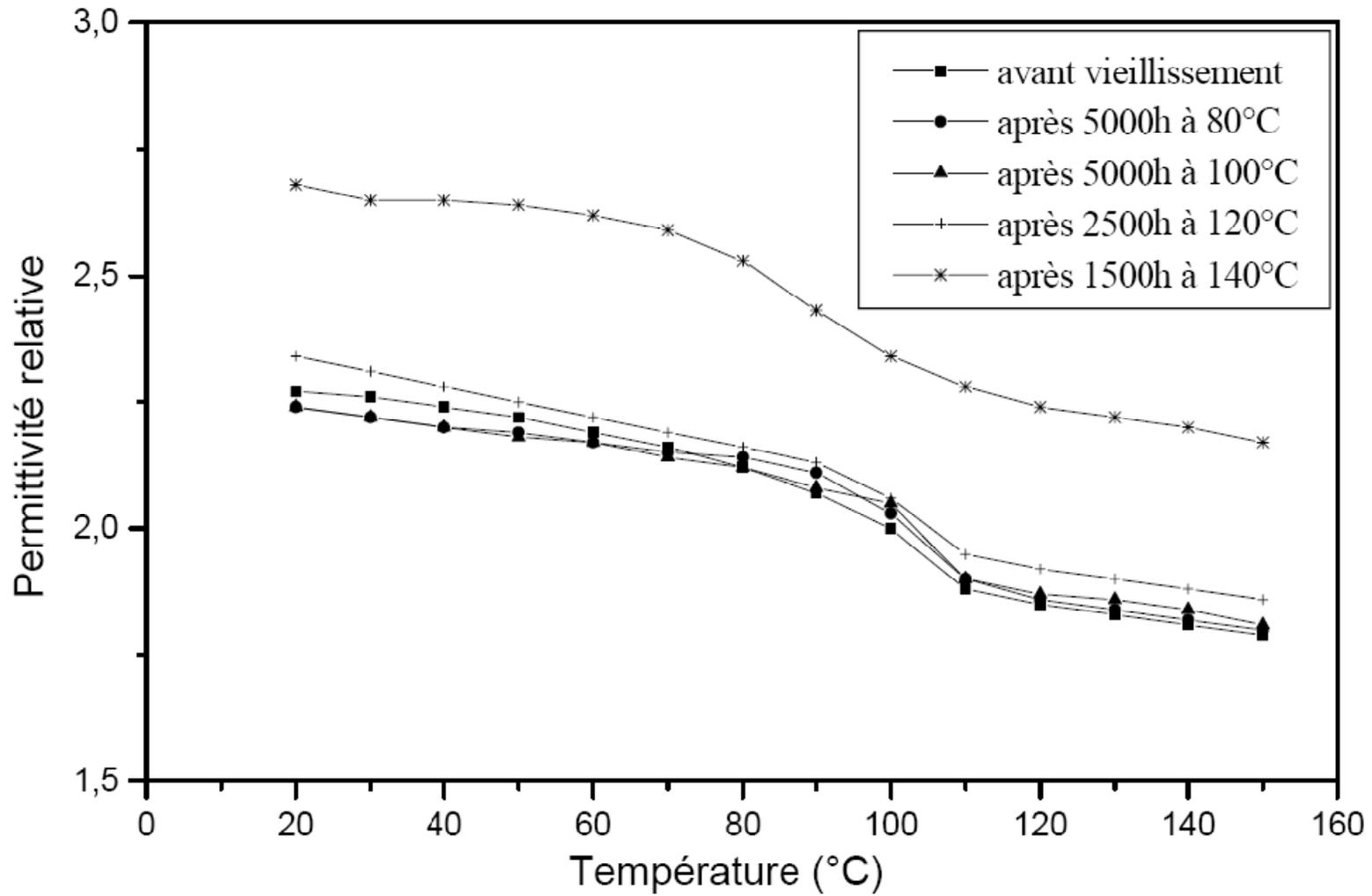
a) Echelle linéaire



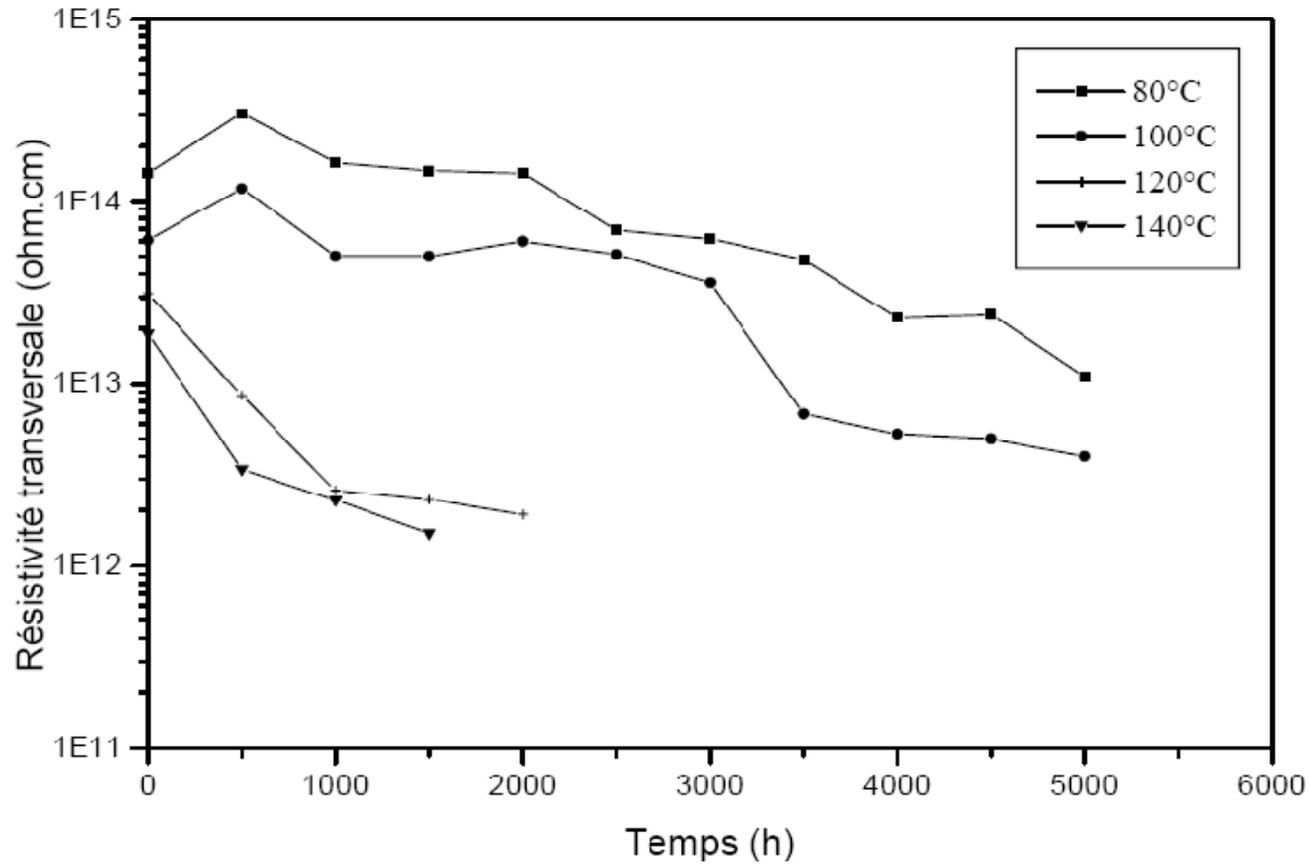
b) Echelle logarithmique

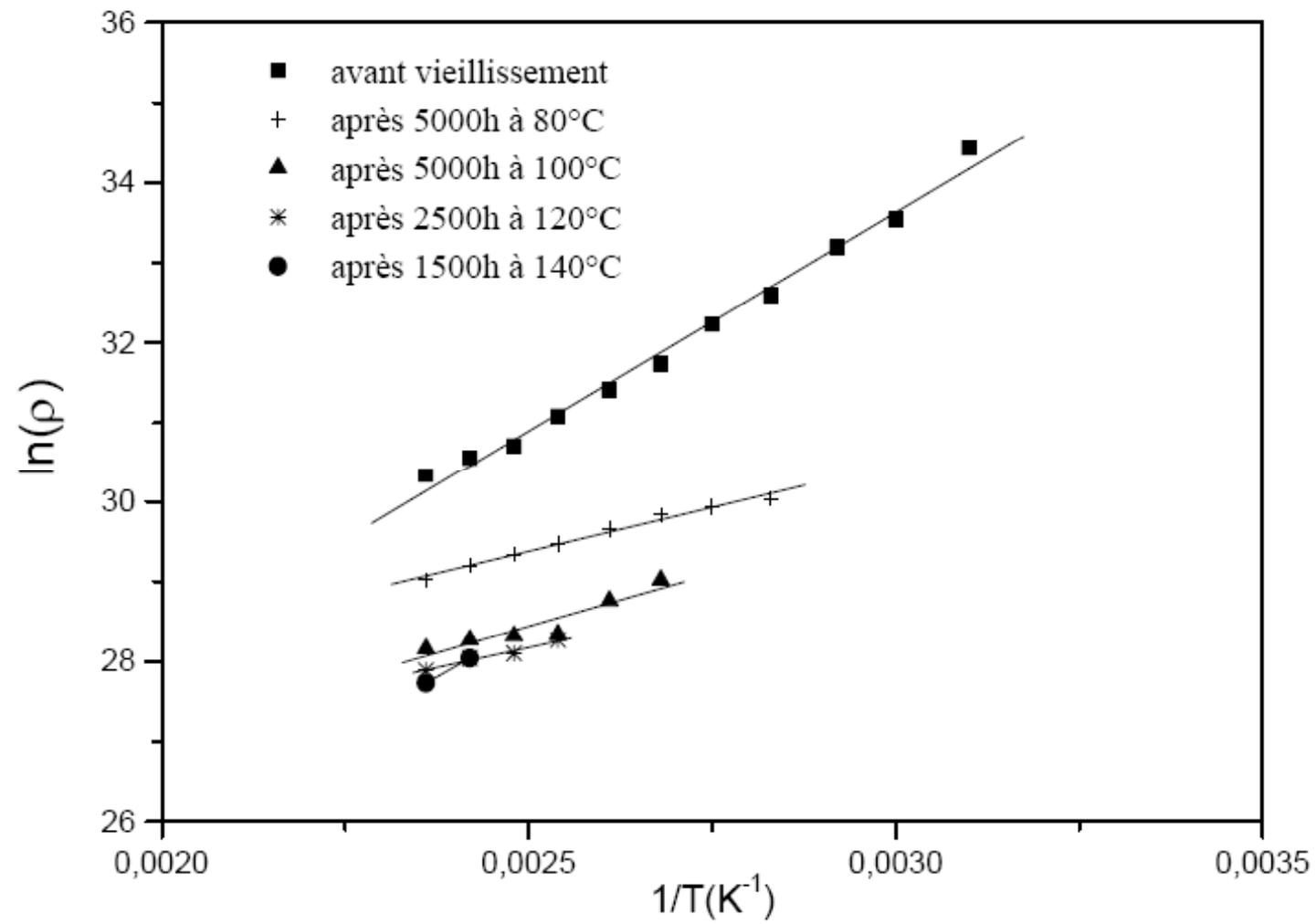


Permittivité relative

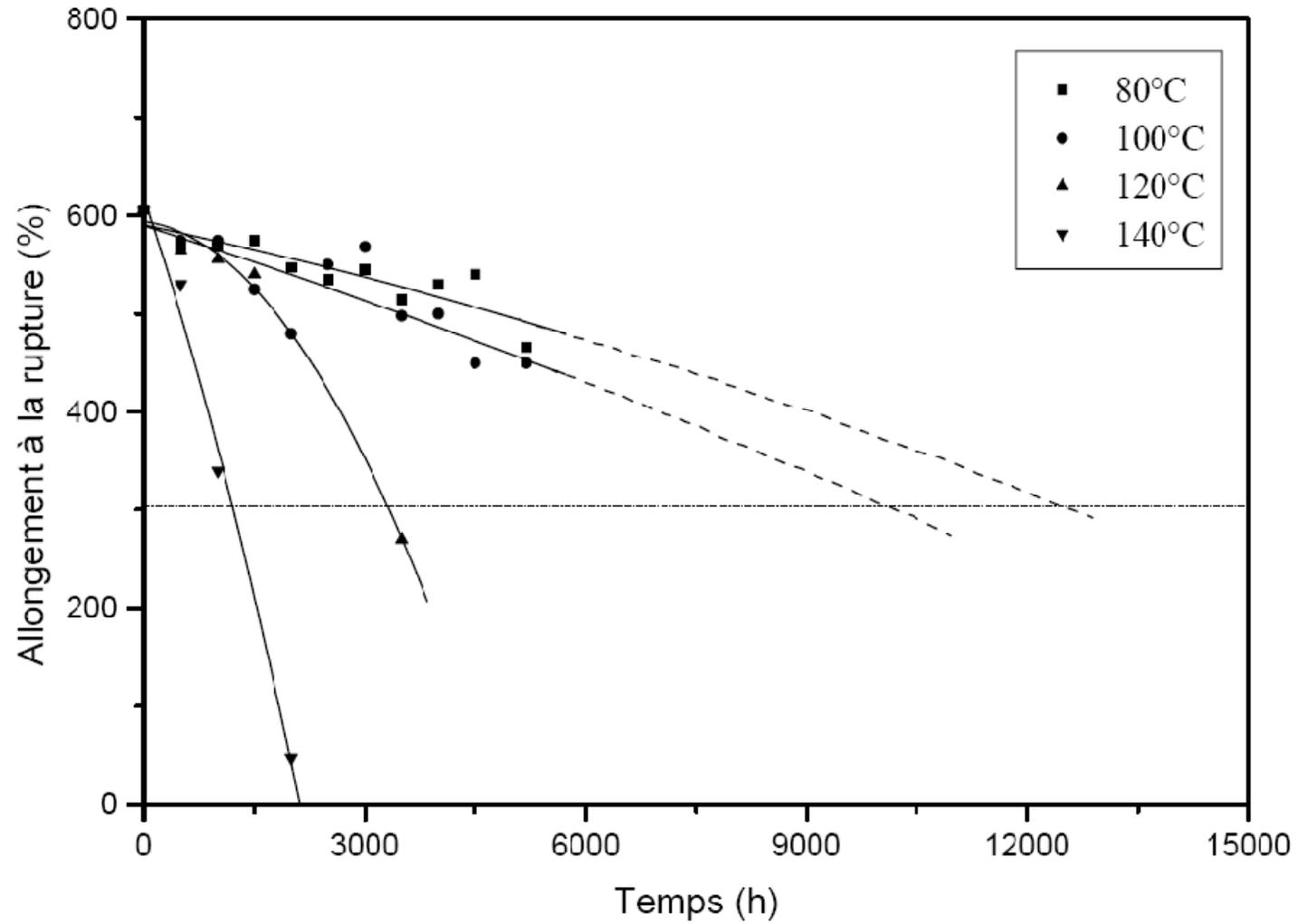


Résistivité transversale

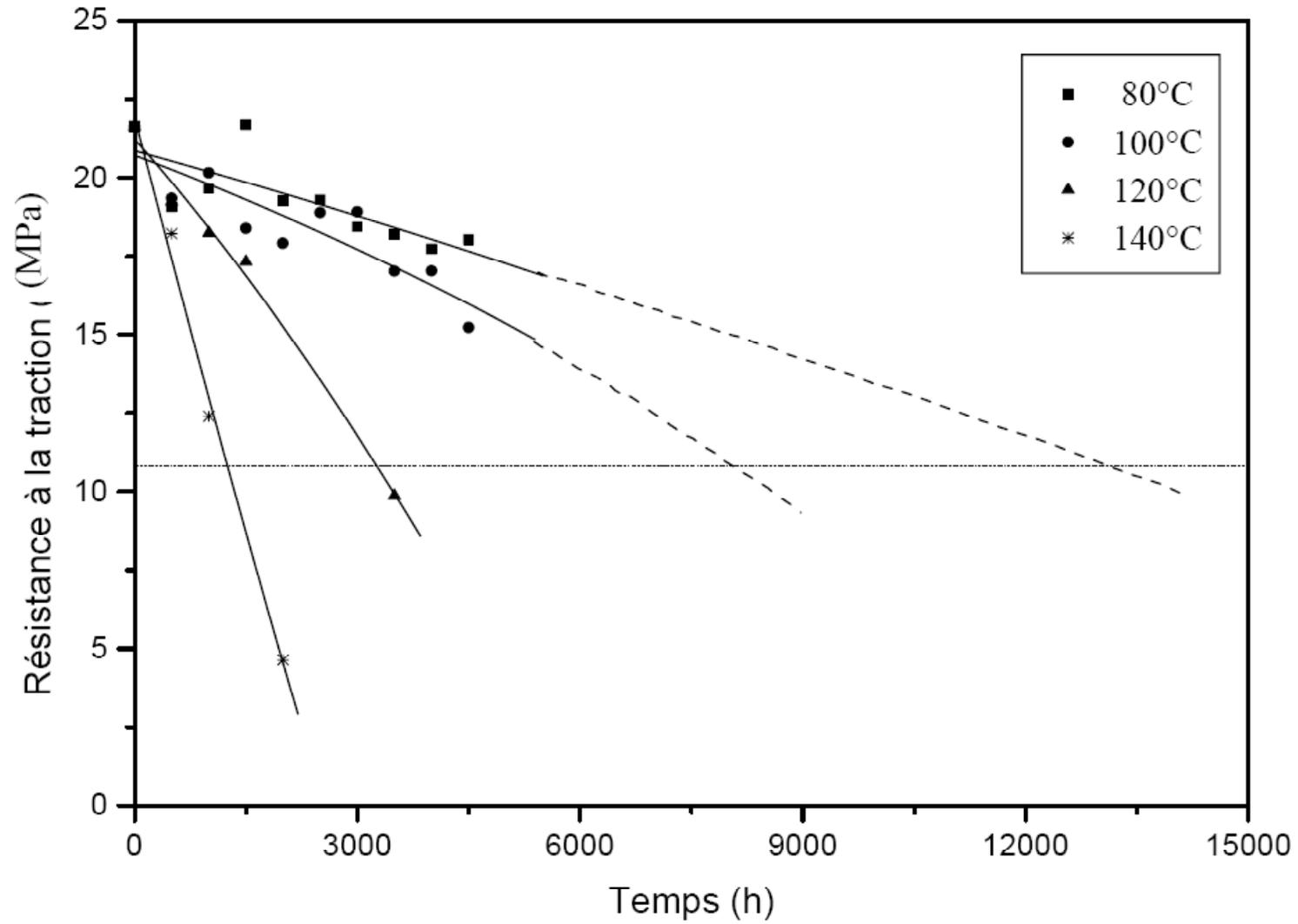




Allongement à la rupture

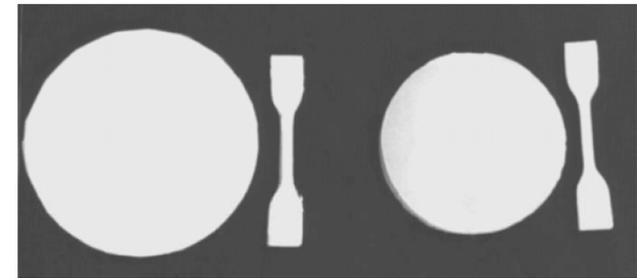
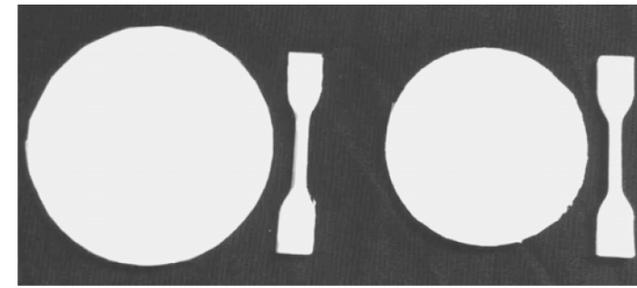
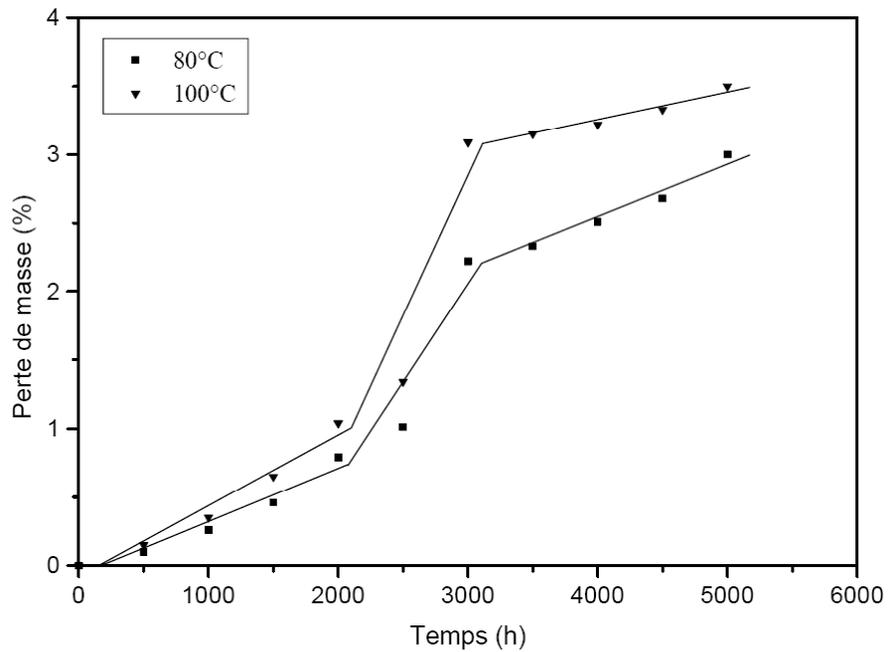
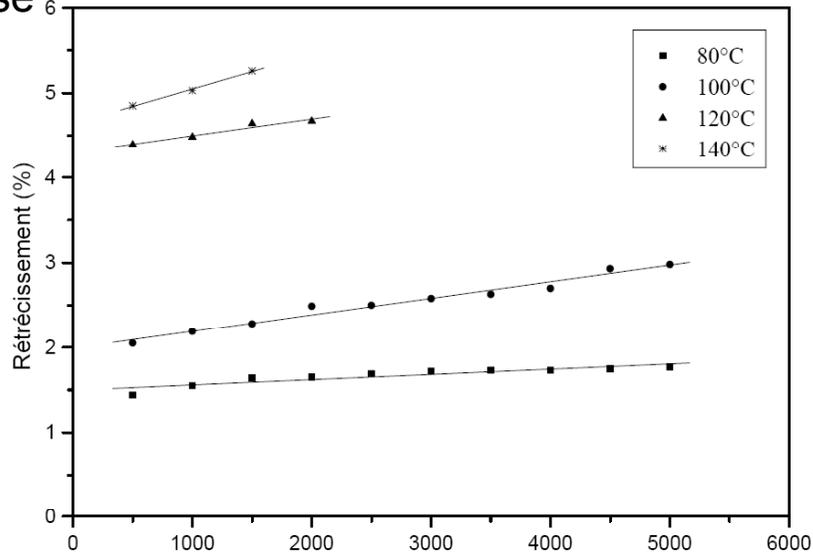


Résistance à la traction



Conséquences de dégradation

- Changement de couleur
- Rétrécissement du matériau
- Perte de masse



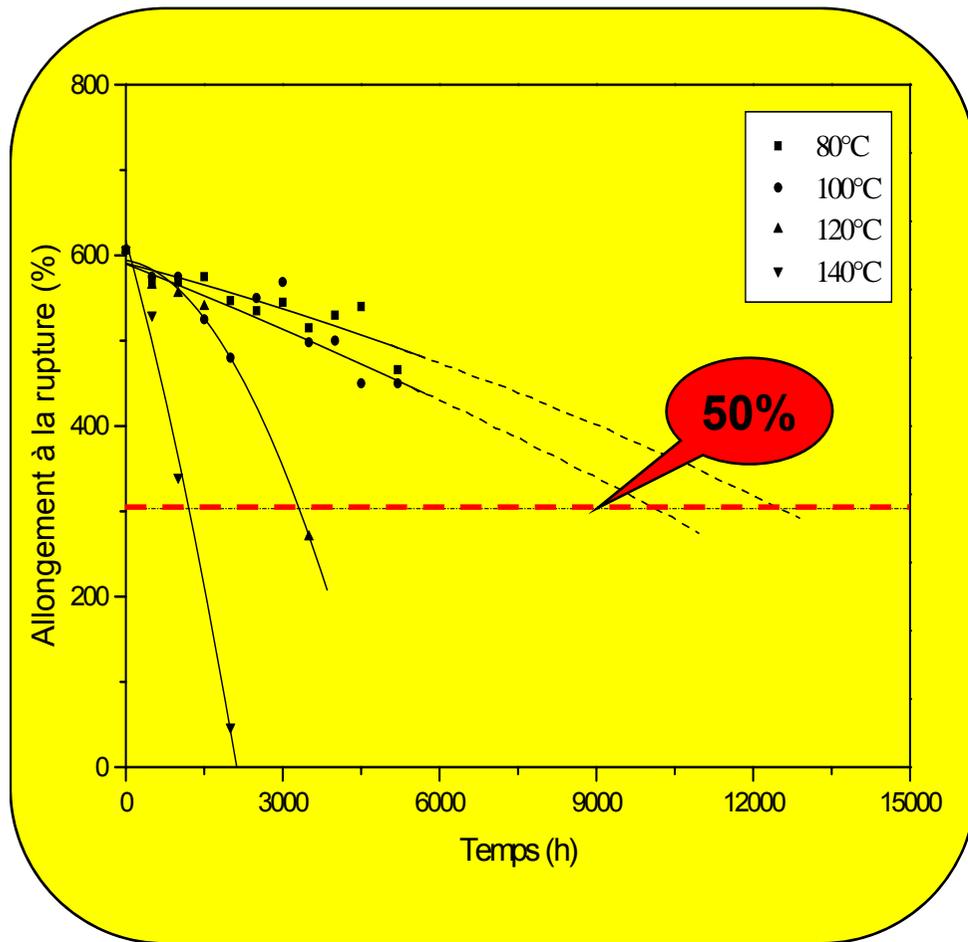
c)

d)

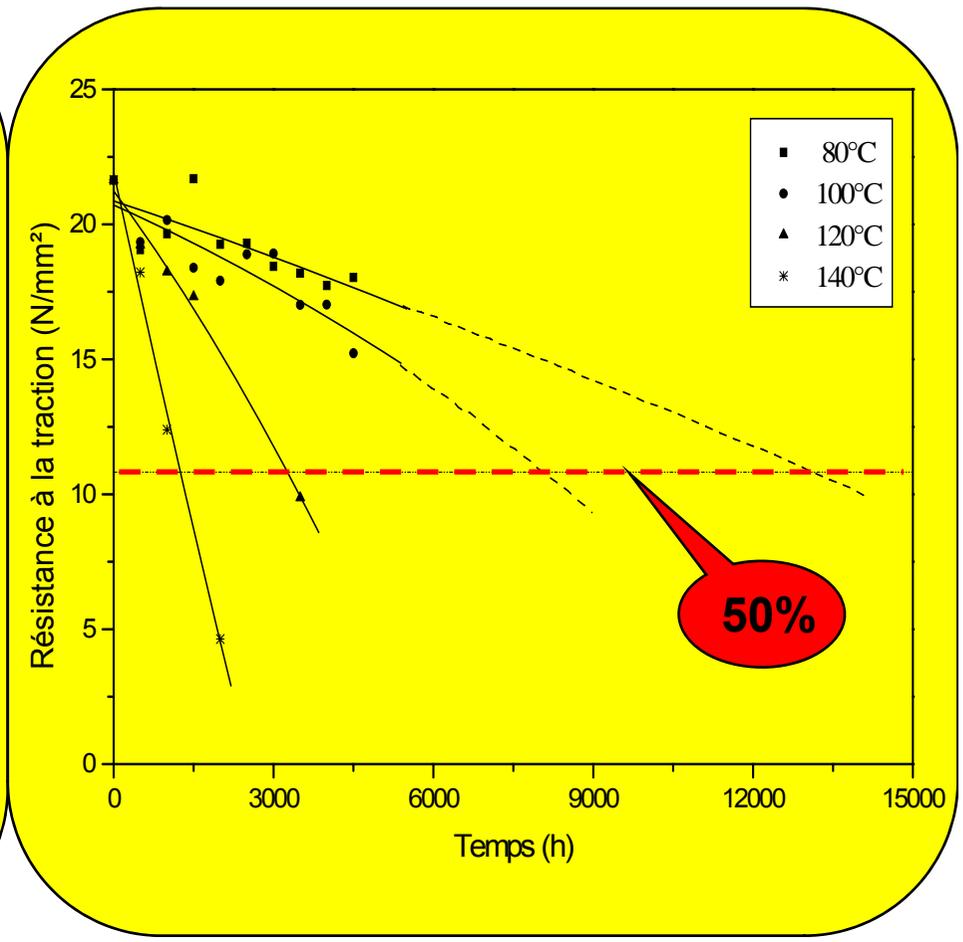
- a) 80°C
- b) 100°C
- c) 120°C
- d) 140°C

ENDURANCE THERMIQUE DU PRC

Allongement à la rupture



Résistance à la traction



Modèle d'Arrhenius

$$t = A \exp \frac{B}{T}$$

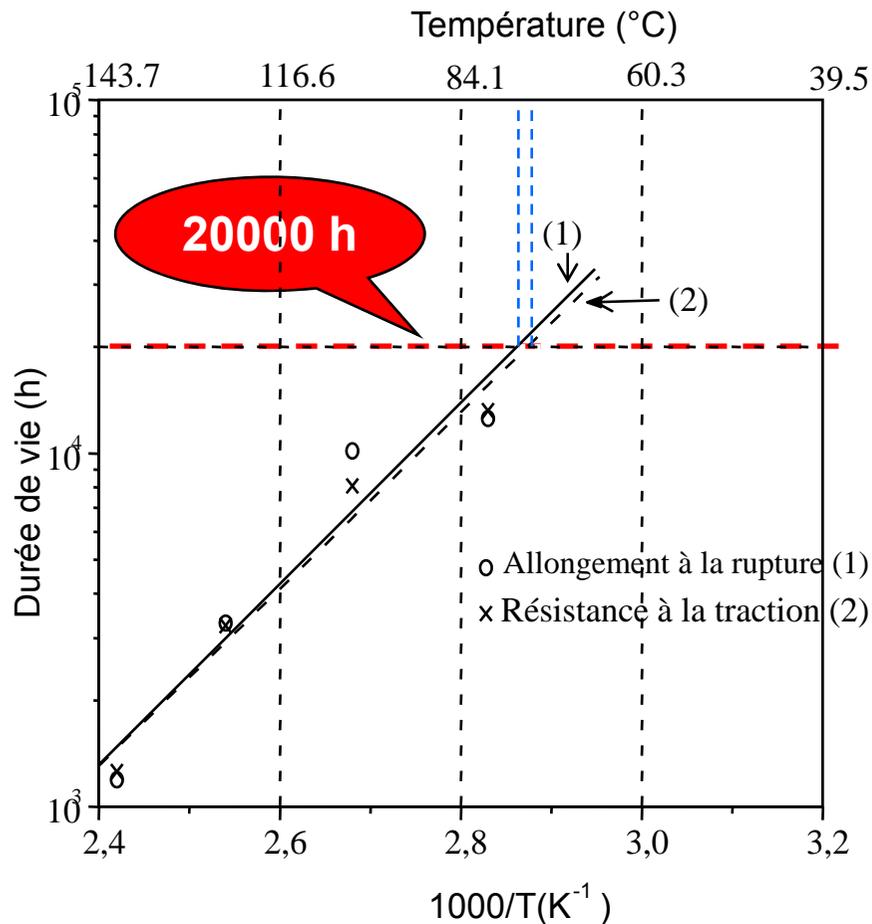
A et B : constantes.

$$B = E/R$$

T : température absolue [K].

E : énergie d'activation [J/mol].

R : constante des gaz parfaits (R = 8.314 J/mol.K).



$$t = 658.8 \times 10^{-6} \exp \frac{6017}{T}$$

$$t = 1327.8 \times 10^{-6} \exp \frac{5749}{T}$$

Les énergies d'activation:

● 12 kcal/mol pour l'allongement

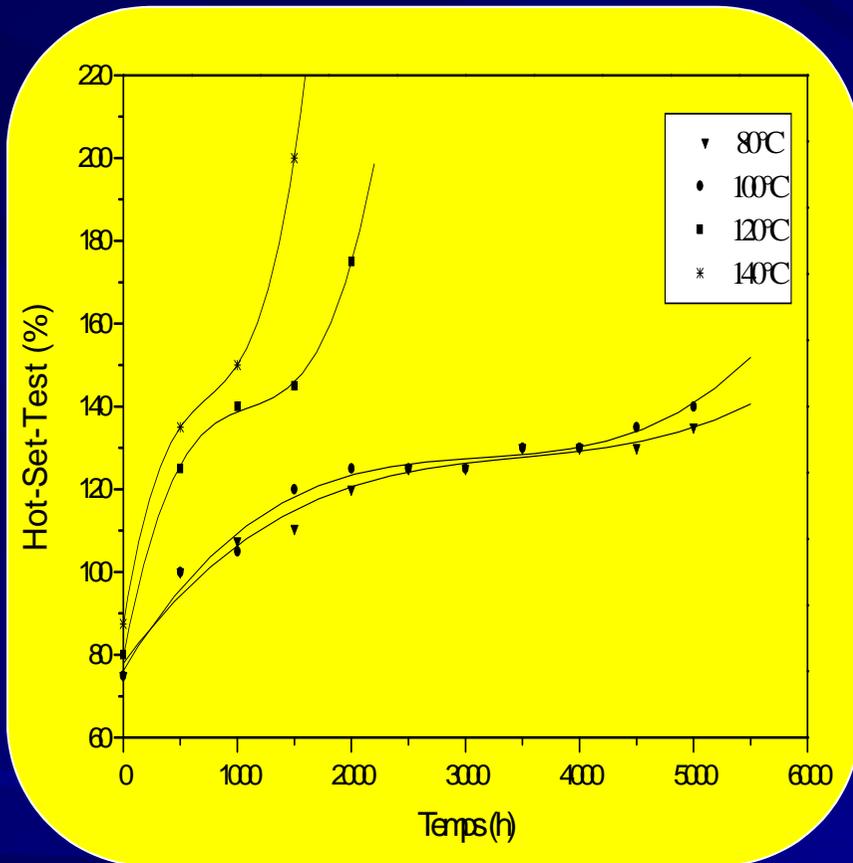
● 11.5 kcal/mol pour la résistance

Les indices de température:

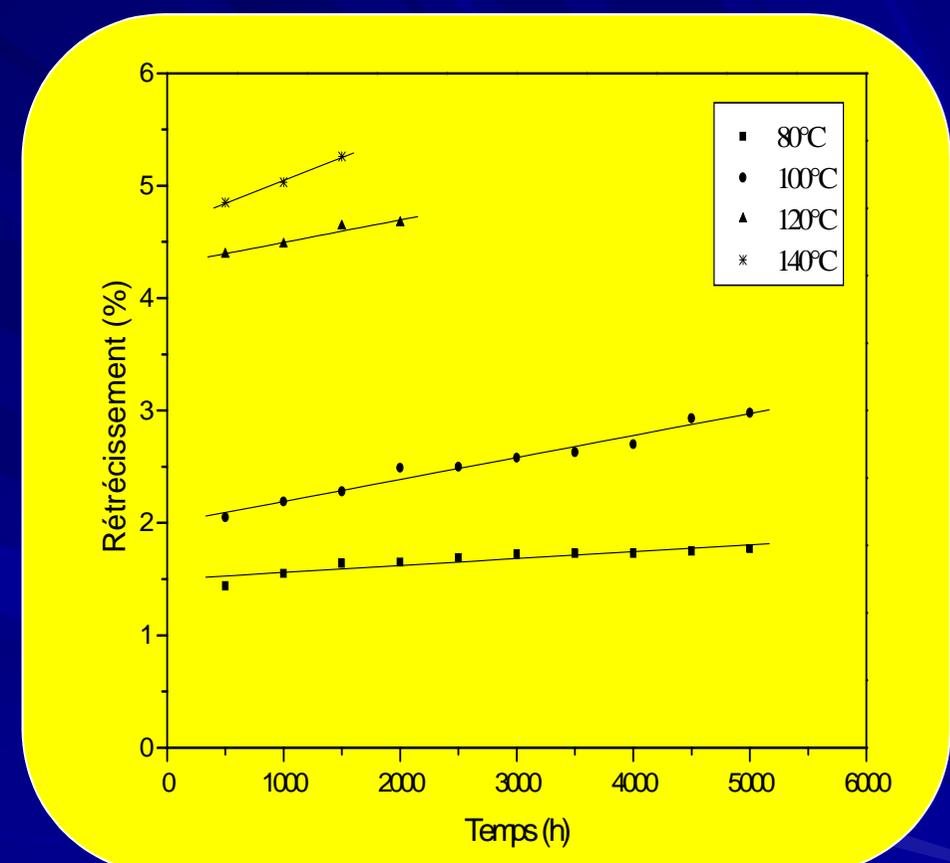
● 76.3° pour l'allongement

● 75° pour la résistance

● Allongement à chaud



● Rétrécissement du matériau



OBJECTIF

L'objectif de cette partie est fixé sur l'effet de vieillissement sur :

- ✦ La cristallinité du PRC
- ✦ Les températures de fusion et de cristallisation du PRC
- ✦ Les enthalpies de fusion et de cristallisation du PRC
- ✦ La distribution des tailles des lamelles cristallines (forme des thermogrammes) du PRC
- ✦ l'évolution des changements causés par l'oxydation

Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

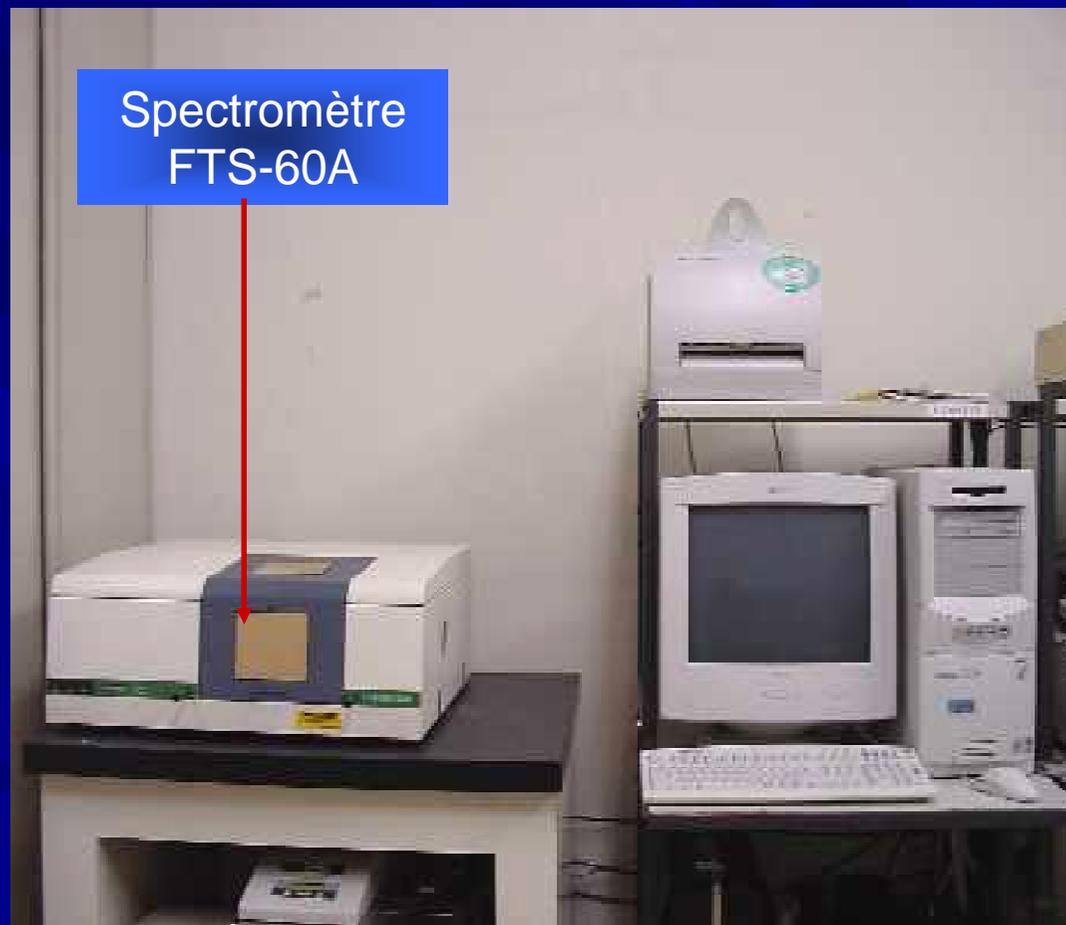
Spectromètre infrarouge de type FTS-60A

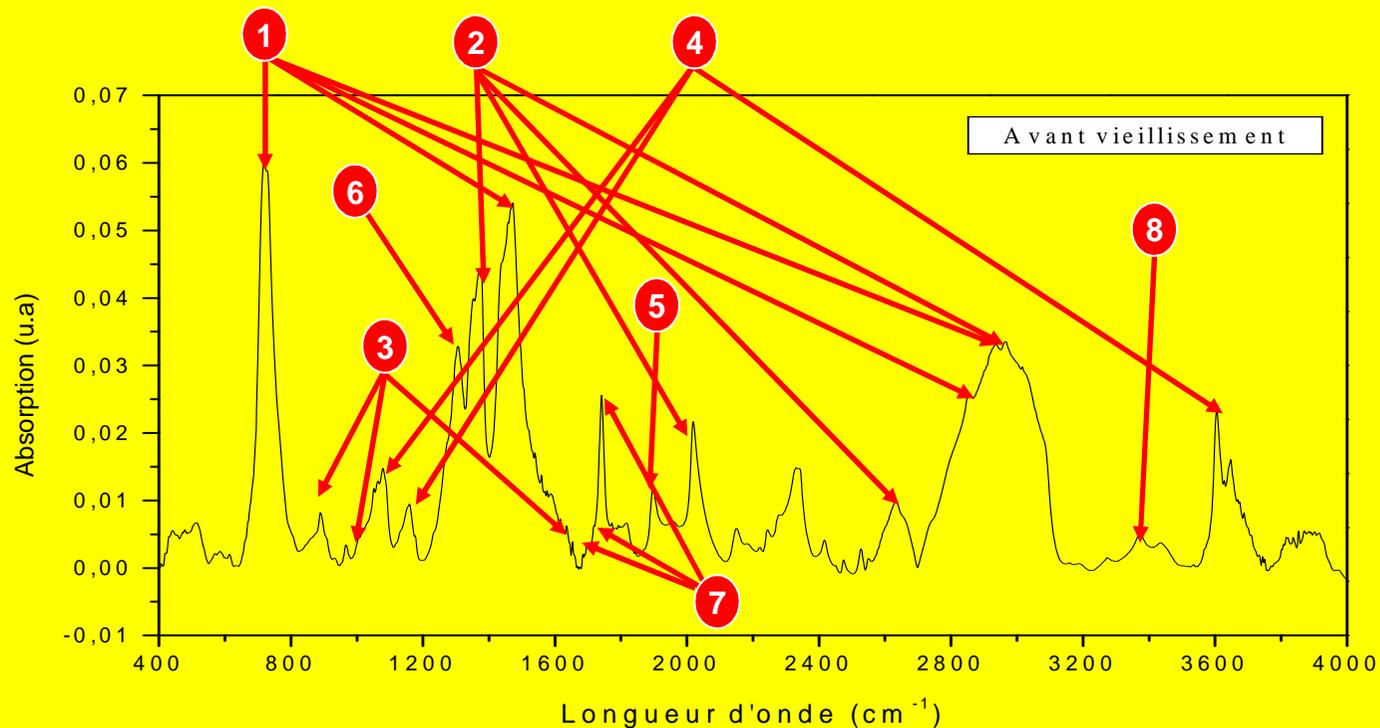
Installé au LGET-UPS
Toulouse-France

Évaluer les changements dans la structure chimique causés particulièrement par l'oxydation

Un spectre est constitué d'une moyenne de 32 enregistrement sur une gamme de longueurs d'ondes située entre 400 cm^{-1} et 4000 cm^{-1}

L'essai est complètement automatisé, l'analyse est effectuée à l'aide d'un logiciel BIO-RAD





- 1 { 720cm⁻¹ Balancement de CH₂
1471cm⁻¹ vibration de valence de CH₂
2856cm⁻¹ vibration symétrique de CH₂
2937cm⁻¹ vibration asymétrique de CH₂

- 2 { 1377cm⁻¹ vibration de déformation symétrique de CH₃
2150cm⁻¹ absorption de CH₃
2632cm⁻¹ absorption de CH₃
2953cm⁻¹ vibration de valence symétrique de CH₃

- 3 { 889cm⁻¹ absorption de vinylidène
966cm⁻¹ absorption de transvinyle
1635cm⁻¹ absorption de vinylène

- 4 1078cm⁻¹, 1159cm⁻¹, 3604cm⁻¹ caractérise l'antioxydant Irganox 1035

- 5 1898cm⁻¹ absorption de la Partie cristalline

- 6 1305cm⁻¹ absorption de la Partie amorphe ou acétophénone

- 7 { 1701 cm⁻¹ absorption de l'Acide carboxylique
1718 cm⁻¹ absorption d'Aldéhyde
1741 cm⁻¹ absorption de la Cétone

- 8 3300 cm⁻¹- 3500 cm⁻¹ absorption du groupe -OH

Analyse Enthalpique Différentielle (DSC)

DSC 2010 de marque TA
Instruments

Installé au LGET-UPS
Toulouse-France



- ✓ Évolution de la cristallinité
- ✓ Les températures de fusion et de cristallisation
- ✓ Les enthalpies de fusion et de cristallisation

Deux cycles de chauffage de l'ambiante à 160°C

Deux cycles de refroidissement de 160°C à l'ambiante

Vitesse de chauffage et de refroidissement constante de 10°C/min



Diffraction avec les rayons X (X-ray)

Diffractomètre de type
X'Pert Philips

Installé à L'Université de
Laghouat

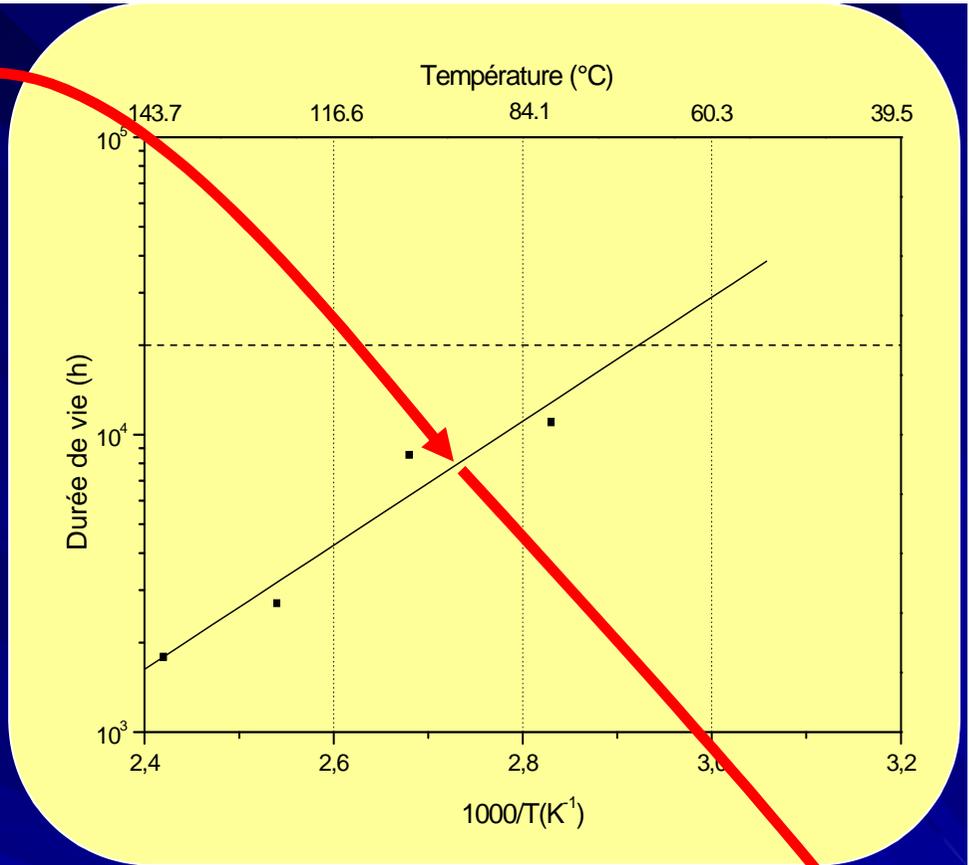
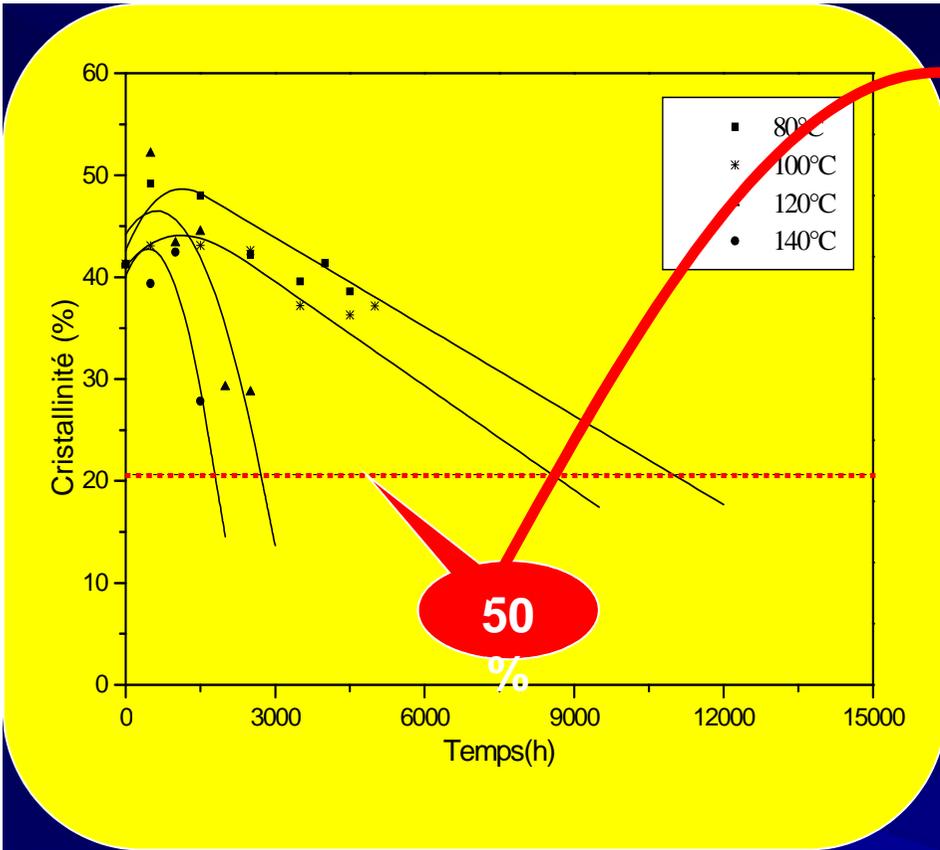


- ✓ Évolution de la phase cristalline du PRC
- ✓ Évolution de la cristallinité en fonction du temps de vieillissement



Un balayage en 2θ de 5° à 90° avec un pas de 0.04° et un temps de 0.4 seconde/pas





Énergie d'activation de phénomène est 9.5 kcal/mol

Indice de température est 69°C

$$t = 1.61 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{4795}{T}\right)$$

Travaux ENP sur les Polymères utilisés dans l'isolation des câbles MT

Thèses de Doctorat soutenues

1. L.Boukezzi, "Influence du vieillissement électrique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans les câbles de moyenne tension" Thèse soutenue, juin 2007, ENP, Direction A.Boubakeur
2. Y.Mecheri, « Influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension » Thèse soutenue, mai 2008 , ENP, Direction A.Boubakeur
3. M.Guibadj, Etude par simulation numérique de l'effet des contraintes électriques et électromécaniques sur l'apparition des arborescences électriques dans l'isolation des câbles de moyenne tension, soutenue, Juillet 2009, ENP, Direction A.Boubakeur
4. A.Medjdoub, " Essais de systèmes de câble et caractérisation des matériaux utilisés dans l'isolation des câbles de haute tension" Université de Béjaïa, soutenue, Avril 2010, Direction A.Boubakeur
5. S. Rogti, « Mécanismes Rôle des interfaces métal/diélectrique et diélectrique/diélectrique dans la formation des charges d'espace dans les polymères sous contrainte continue », soutenue en Juillet 2009, ENP, Direction A.Mekhaldi
6. J. Bouguedad : Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'EPDM", Université de Tizi-Ouzou, Mai 2010. Direction A.Mekhaldi

Magisters soutenus

1. A. Handala, « Etude des phénomènes d'arborescence dans l' EPDM pour câbles moyennes tensions » (thèse soutenue en 1982 sous la Direction de A.Beroual).
2. M.Nedjar, "Influence du vieillissement thermique des polymères utilisés dans les câbles H.T.", Institut d'Electrotechnique, [Université de Tizi-Ouzou](#), 1991 (sous la direction de A.Boubakeur)
3. N.Khalèche, "Influence du vieillissement thermique sur la propagation des arborescences électriques", Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, 1993 (sous la direction de A.Boubakeur)
4. Medjdoub Abdellah, "Influence des vieillissements thermique et électrique sur les propriétés du Polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de Moyenne Tension", [Centre Universitaire de Béjaïa](#), Institut d'Electrotechnique, 1997 (sous la direction de A.Boubakeur)
5. Mecheri Yacine, " Influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du PRC utilisé dans l'isolation des câbles de Moyenne Tension", Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, 1998 (sous la direction de A.Boubakeur)
6. Nouar Allal, "Etude de la répartition des contraintes électrique, électromécanique et thermique dans le voisinage des inclusions contenues dans l'isolation des câbles de haute tension", Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, 1999 (sous la direction de A.Boubakeur)
7. L.Boukezzi, "Vieillissement thermique du PRC, essais sur éprouvettes", Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, 2000 (sous la direction de A.Boubakeur)
8. D. Bouguedad, " Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère)", Univ. Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2002 (sous la direction de A.Mekhaldi)

Projets de Recherche CNEPRU

1. Utilisation des polymères dans l'isolation des câbles HT, J1606/02/08/91, agréé en 1991, collaboration ENICAB, LGE/CNRS-UPSToulouse (FR), achevé en 1993 (A.Boubakeur).
2. Essais de décharges partielles dans les câbles HT isolés aux polymères, J1606/02/08/94, agréé en 1994, collaboration ENICAB, LGE/CNRS-UPSToulouse (FR), achevé en 1996 (A.Boubakeur).
3. Application des réseaux de neurones artificiels dans le domaine de l'isolation à haute tension, N° 1602/02/02/02, agréé en Janvier 2002, collaboration U.Batna, U.Libanaise, West Virginia University et Kettering University Michigan (USA), Transfo-Centre/SONELGAZ achevé en 2003 (A.Boubakeur).
4. Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère) utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension, J1606/02/03/03, achevé en 2005 (A.Mekhaldi)
5. Caractérisation et comportement des matériaux isolants sous différents modes de tension, CNEPRU, J0204820070011, achevé en 2010 (A.Mekhaldi).

PNR – Diagnostic et contrôle de l'état des isolations dans le domaine de la haute tension. Avec GRTE/SONELGAZ Pr Mekhaldi 2011-2013

Publications

1. A.Boubakeur, M.Hamia, M.Chebrek, " Utilisation de l'EPDM pour l'isolation des câbles de Moyenne Tension", Journal of Technology, Ecole Nationale Polytechnique, Algiers, N°4, 1987, pp.88-95.
2. **A.Boubakeur, Y.Mecheri, M.Boumerzoug, " Influence of Continous Thermal Ageing on the Properties of XLPE used in Medium Voltage Cables", 11th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 99, IEE Conference Publication No.467, ISBN 0 85296 719 5, ISSN 0537-9989., Vol.4, Session P2, Sept. 1999, London, U.K., pp 236-239.**
3. **Ahmed Boubakeur, Yacine Mecheri, Mahmoud Boumerzoug, "Comportement diélectrique et mécanique du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à un vieillissement thermique continu, Annales de Chimie, Science des Matériaux, Elsevier, ISSN : 0151-9107, Paris, France, Volume 25, N°6, 2000, pp.457-470.**
4. **A.Boubakeur, L.Boukezzi, M.Lallouani " The Effect of Thermal Ageing Influence on the Electrical and Physical Behaviour of XLPE", Proceedings of the International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APDATM'2001, Special Issue of Przegląd Elektryczny, edited by SEP - Polish Electrical Society, Wroclaw, Poland, 2001, pp.202-204.**
5. L.Mokhnache, A.Boubakeur, A.Feliachi,, "Prediction of thermal ageing of transformer oil and PVC cables using artificial neural networks", IEE – Proceedings Science, Measurement and Technology, Volume 150, Issue 03. May 2003, pp 107-112.
6. **Y.Mecheri, A.Medjdoub, A.Boubakeur et M.Boumerzoug, "Influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du PRC", Annales de Chimie, Sc. Mat., 2006, 31(5), pp. 571-582**

7. **L.Boukezzi, M.Nedjar, L.Mokhnache, M.Lallouani, A.Boubakeur, "Thermal Aging of Cross-Linked Polyethylene", *Annales de Chimie, Sci.Mat.*2006, 31(5), pp.561-569**
8. M.Nedjar, A.Beroual, A.Boubakeur, "Influence of Thermal Aging on the Electrical Properties of PVC", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.102,4728–4733(2006) VVC2006 Wiley Periodicals, Inc.
9. **L.Boukezzi, A.Boubakeur, C.Laurent, M.Lallouani, Observations on structural changes under thermal ageing of cross-linked polyethylene used as power cables insulation, *Iranian Polymer Journal*, Vol. 17, N° 8, pp. 611-624, 2008**
10. D.Bouguedad, A. Mekhaldi, A. Boubakeur et O. Jbara, Thermal Ageing Effects on the Properties of Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM), *Annales de Chimie, Science des Matériaux*, 2008, 33 (4), pp. 303-313. (doi:10.3166/acsm.33.303-313 © Lavoisier, Paris).
11. M.Guibadj, A.Nouar, IK Lefkaier, A.Boubakeur, Etude des contraintes électrique et électromécanique dans l'isolation des câbles de moyenne tension contenant des cavités, *European Journal of Electrical Engineering, (Revue Internationale de Génie Electrique)*, Vol 12/1 - 2009 - pp.77-99, janvier 2009.
12. A. Medjdoub, A. Boubakeur, Dielectric Spectroscopy and Transient Current Measurements in Low Density Polyethylene , *Annales de Chimie, Science des Matériaux*, 2009, Vol 34(3), pp. 155-169
13. L.Boukezzi & A.Boubakeur, Numerical study using FVM of Electrical Field Distribution in XLPE Insulation Cables Containing Cavities, *Canadian Journal on EEE*, Vol.2, N°3, March 2011, pp.57-63
14. D. Bouguedad, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, et O. Jbara "Thermal ageing effects on the properties of ethylene-propylene-diene monomer (EPDM)", *Annales de chimie, Sciences des matériaux*, 33 (4), pp. 303 – 313, 2008

- 15.F. Rogti, A. Mekhaldi and C. Laurent, "Space Charge Behavior at Physical Interfaces in Cross-Linked Polyethylene under DC Field", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, N° 5, pp. 1478 – 1485, October 2008.
- 16.F .Rogti, C. Laurent et A .Mekhaldi, "Effect of the interfaces polymeric /electrode and polymeric /polymeric on the formation of the space charges in an insulator polyethylene subjected to a continuous electric field", Journal of electrical systems, pp. 57 – 61, Special Issue N° 01 : November 2009.
- 17.D. Bouguedad, O.Jbara, S. Rondot, A. Mekhaldi and A. Hadjadj:" Investigation of Accelerated Thermal Aging of EPDM Polymer by Electric Tests in Air and by Means of a SEM Technique in High Vacuum", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 3; pp. 981 – 989, June 2012.
- 18.M. Nedjar, A. Boubakeur, A. Beroual and M. Bournane, Thermal aging of polyvinyl chloride used in electrical insulation,, Ann.. Chim. Sci. Mat. 28, 2003, pp. 97-104.
- 19.M. Nedjar, A. Beroual and A. Boubakeur, Influence of thermal aging on the electrical properties of polyvinyl chloride, J. of Applied Polymers Science, Vol. 102, Issue 5, 2006, pp. 4728-4733.

Communications Internationales avec Publication d'Articles Complètes dans des Proceedings

- 1. A.Boubakeur, M.Nedjar, R.Khaili, "Endurance thermique du PVC utilisé dans les câbles de Haute Tension", 3^{ème} Journées Maghrébines des Sciences de Matériaux, Algiers, Algeria, 1992.**
2. A.Boubakeur, N.Khaleche, C.Laurent, "Initiation des arborescences électriques dans le PEBD", 3^{ème} Journées Maghrébines des Sciences de Matériaux, Algiers, Algeria, 1992.

- 3. A. Boubakeur, M. Nedjar, R. Khaili, "Influence of thermal ageing on the properties of PVC", Middle East Power System Conference, MEPCON'92, Assiut, Egypt, 1992, pp.124-127.**
4. A. Boubakeur, M. Nedjar, "Effect of Thermal Ageing on the Electrical Properties of PVC Insulating Cables", 5th International Middle East Power System Conference, MEPCON'97, Volume 2, Alexandria, Egypt, Jan.1997, pp.699-702.
- 5. A. Boubakeur, A. Medjdoub, M. Boumerzoug, "Influence of Thermal Aging on the Properties of Cross-Linked Polyethylene used as Electrical Insulation of Medium Voltage Cables", 10th International Symposium on High Voltage Engineering., Paper 3054, Montréal, Canada, June 1997.(paper printed from CR-ROM).**
- 6. A. Boubakeur, Y. Mecheri, M. Boumerzoug, "Influence du vieillissement thermique sur la variation du facteur de pertes diélectriques du P.R.C. utilisé dans l'isolation des câbles Moyenne Tension", AJOT, ISSN 1111 357 X, Actes de la 3^{ème} Conférence Maghrébine sur l'Automatique, l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle, COMAEI'98, Bejaia, Décembre 1998, pp.256-258.**
- 7. A. Boubakeur, Y. Mecheri, L. Boukezzi and L. Lallouani, "Dielectrical and Mechanical Behaviour of XLPE under Thermal Aging", CEIDP'2000, IEEE, October 2000, Victoria (BC), Canada.**
8. A. Boubakeur, L. Mokhnache, A. Khelifi, A. L. Nemmour, "Neural Network Application in the Field of High Voltage Cable Insulation Thermal Ageing", 3rd International Conference "Quality Reliability Maintenance", Oxford, U.K., March 2000, Professional Engineering Publishing, ISBN I 86058 256 7, London, 2000, pp.123-126.
- 9. A. Boubakeur, L. Boukezzi, M. Lallouani and D. Abdesselam, 'Thermal ageing influence on the electrical and mechanical behaviour of XLPE', 12th International Symposium on High Voltage Eng, ISH'2001, Banagalore (India), Volume 4, paper No 6-40, 2001.**

- 10.L.Mokhnache, A.Boubakeur, "Self-Organization Neural Networks In Prediction of Insulation Thermal Ageing", International Symposium on HV Eng., ISH 2003, P.11, Delft, Netherlands, 25-28 August, 2003.
- 11.A.Mekhaldi, M.Teguar, S.Benabbas, H.Chair, A.Boubakeur, "Use of Neural Networks in the thermal ageing prediction of the EPDM (Ethylene Propylene Dien Monomer), International Symposium on HV Eng., ISH 2003, P.11.39, Delft, Netherlands, 25-28 August, 2003.
- 12.L.Mokhnache, A.Boubakeur, N.Nait Said "Application of Neural Networks in Diagnosis and Prediction of High Voltage Insulation", 5^{ème} Conférence Régionale des Comités CIGRE des Pays Arabes, acceptée pour communication, Algiers, Algeria, juin 2004.
- 13.L.Boukezzi, A.Boubakeur et M.Lallouani, Endurance Thermique du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'Isolation des Câbles de Moyenne Tension, 5^{ème} Congrès Régional des Comités CIGRE des Pays Arabes, Algiers Juin 2004.**
- 14.A. Medjdoub, A Boubakeur, Influence du vieillissement thermique cyclique sur les propriétés diélectriques du polyéthylène réticulé chimiquement PRC, International council on large electric systems, CIGRE, Egypt 21-23 November 2005.
- 15.A. Medjdoub, A Boubakeur, Influence of electrical aging on the properties of Cross-linked Polyethylene use as electrical Insulation on Underground Power Cables, IEEE-PES , paper N° 599 ; ISBN: 5-93208-034-0, St-Petersburg, Russia , June 2005.
- 16.A. Medjdoub, A Boubakeur, Influence du vieillissement thermique cyclique sur les propriétés diélectriques du polyéthylène réticulé chimiquement PRC, International concil on large electric systems, CIGRE, Egypt 21-23 November 2005.

- 17. L. Boukezzi, A. Boubakeur, C. Laurent, M. Lallouani, “DSC Study of Artificial Thermal Aging of XLPE Insulation Cables”, 9th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD07, 2007.**
- 18. L. Boukezzi, A. Boubakeur, C. Laurent, M. Lallouani, “FTIR Study of Artificial Thermal Aging of XLPE Insulation Cables”, 15th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH’2007, August 2007, Ljubljana, Slovenia.**
- 19. L. Boukezzi, A. Boubakeur, M. Lallouani, “Effect of artificial thermal aging on the crystallinity of XLPE insulation cables: Xray study”, IEEE, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, Oct. 2007, Vancouver, Canada**
20. A. Medjdoub, A. Boubakeur, T. Lebey “Dielectric Spectroscopy Analysis Behavior of low Density Polyethylene”, CEIDP 2008, Québec City, Canada, October 26-29, 2008.
21. A. Medjdoub A. Boubakeur, T. Lebey, Broad band Dielectric Investigation of cross-linked Polyethylene use as electrical Insulation on Underground Power Cables.’’, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE/CEIDP 2010, West Lafayette, Indiana , USA, Octobre 2010.
- 22. L. Boukezzi, A. Boubakeur, M. Lallouani, “Oxidation Evaluation of Cross-linked Polyethylene (XLPE) under Thermal Degradation : FTIR Study”, 5th International Symposium on Hydrocarbons & Chemistry, Sidi Fredj, Algiers, May the 23rd to 25th, 2010.**
23. L. Boukezzi, Y. Saadi, A. Boubakeur, “The Radial Distribution of Temperature in XLPE Cable: an Analysis with the Finite Volume Numerical Method (FVM)”, CEIDP2010, USA, October 17th -20th 2010.

24.L. Boukezzi , A. Boubakeur, “The use of Back-Propagation algorithm to Predict Properties of XLPE High Voltage Insulation Under Thermal Aging”, International Conference on High Voltage Engineering and Application, New Orleans, USA, October 11th – 14th, 2010.

25.L. Bessissa, L. Boukezzi, D. Mahi, A. Boubakeur, “Prédiction des propriétés mécaniques des isolants des câbles HT sous vieillissement thermique (Application de la logique floue)”, Interational Conference on Electrical Engeneering, Electronics and Automatic ICEEA 10, Béjaia, Algeria, 01-03 November 2010.

**26.Y.Mecheri, A.Medjdoub, A.Boubakeur et D.Abdesselam, Simulation of MV XLPE Insulated Cables Under Service Conditions in Laboratory, 4th ICEE, Zeralda 7-9 Mai, 2012, pp 350-353
http://www.usthb.dz/ICEE_12/spip.php?article26 (PID0191)**

Relation U-I

- 1. A.Boubakeur, M.Bellag, "Impact de la Relation Ecole-Industrie dans la Formation d'Ingénieurs (Expérience ENP-ENICAB), Actes du Congrès Mondial des Responsables de Formation d'Ingénieurs et des Dirigeants d'Industrie, UNESCO, ONUDI, UATI, FMOI, Volume II, Table Ronde 1 "Energie", Paris, France, Juillet 1996, pp. 55-59.**
- 2. A.Boubakeur, M.Bellag, "ENP-ENICAB Science Cooperation in the Field of High Voltage Engineering", Proceedings of ENGIN'96, World Congress of Industry Leaders and Educators, Fair of Engineering Innovations and UNESCO-UNISPAR Seminar, Editors J.Turowski, A.Krawczyk, S.Wiak, ISBN 83-87202-15-0, Oct. 1996, Lodz, Poland, pp. 6-9.**
- 3. A.Boubakeur, "ENP of Algiers high voltage laboratory twenty five years of co-operation with industry", Global Congress on Engineering Education, UNESCO-ICEE, Krakow, Poland, September 1998, Paper 68-1/3.**
- 4. A.Boubakeur, A.Ouabdesselam, "Student Work Influence on the University Industry Co-Operation", Proceedings of the 3rd UNESCO-UNISPAR World Network Seminar, UNISPAR'99, Polish Innovation Market, Vol. September 1999, ISSN 1428-0582, Editor J.Turowski, pp.29-30**

Conclusion

Questions - réponses