

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département d'Electrotechnique**



**Mémoire de Fin d'Etudes
De MASTER ACADEMIQUE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques**



***Présenté par :
Siham KABLI***

Thème

***Action du vieillissement climatique naturel
sur les propriétés du PVC utilisé comme
gaine de câble MT***

Mémoire soutenu publiquement le 03/11/2019 devant le jury composé de :

Mr Youcef BOUTORA
M.C.A, Président.

Mr Djaffar BOUGUEDAD
M.C.A, Encadreur.

M^{lle} Sarah TAGZIRT
Doctorante, Co-Encadreur.

Mr Farid NAMANI
M.A.A, Examineur

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu le tout-puissant de m'avoir donné la volonté, le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Ma profonde gratitude et mes sincères remerciements s'adressent à mon encadreur Monsieur Djaffar BOUGUEDAD pour son encadrement, ses orientations précieuses, ses conseils judicieux, son aide et la grande disponibilité qu'il m'a offert à tout moment au long de ce travail.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

Mes très vifs remerciements vont à Monsieur Farhat Belabbas, Ingénieur au laboratoire de Physique à l'entreprise Electro-industries d'Azazga pour son aide précieuse et son chaleureux accueil.

J'exprime mes sincères remerciements à mes parents qui ont fait de leur mieux pour que je réussisse dans mes études.

Enfin, mes remerciements s'adressent à mes amis qui ont toujours su être là pour m'encourager et me soutenir durant ces années d'étude.

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction général.....	1
Chapitre I : Généralités sur les polymères	
I.1- Introduction.....	3
I.2- Définition.....	3
I.3- Types de polymères.....	3
I.3.1- Homopolymères.....	3
I.3.2- Copolymères.....	3
I.4- Propriétés des polymères	5
I.4.1- Propriétés électriques.....	5
I.4.2- Propriétés mécaniques.....	11
I.4.3- Propriétés physiques.....	12
I.4.4- Propriétés thermiques.....	13
I.4.5- Propriétés chimiques.....	13
I.4.6- Propriétés optique.....	13
I.4.7- Propriétés acoustiques.....	14
I.5- Vieillessement des polymères.....	14
I.5.1- Vieillessement thermique.....	14
I.5.2- Vieillessement électrique	16
I.5.3- Vieillessement hydrolytique.....	17
I.5.4- Vieillessement climatique.....	20
Chapitre II : Câbles de transport d'énergie électrique	
II.1- Présentation des câbles.....	22
II.1.1- Introduction.....	22
II.1.2- Types de câbles.....	22
II.1.3- Domaine d'utilisation.....	24
II.2- Caractéristique des câbles.....	24

II.2.1- Ame conductrice.....	24
II.2.2- Isolation.....	26
II.2.3- Ecran semi-conducteur.....	26
II .2.4-Blindage métallique.....	27
II .2.5- Gaine de protection.....	27
II.3- Polymères utilisés comme gainage.....	27
II.3.1- Papier imprégné.....	27
II.3.2- Polychlorure de vinyle (PVC).....	27
II.3.3-Polyéthylène (PE).....	27
II.3.4- Polyéthylène réticulé (PR).....	28
II.3.5- Caoutchouc éthylène –propylène.....	28

Chapitre III : Vieillesse climatique des isolants des câbles

III.1- Introduction.....	29
III.2- Exposition aux microorganismes.....	29
III.2.1- Principe des essais.....	29
III.2.2- Protection des matériels contre les micro-organismes.....	30
III.3- Exposition à la lumière de jour.....	30
III.3.1- Spectrométrie d'absorption du rayonnement UV visible.....	30
III.3.2- Méthode d'exposition sous verre à la lumière du jour.....	31
III.3.3- Méthode d'exposition direct aux intempéries, ou d'exposition indirecte sous verre, et à la lumière du jour intensifiée par des miroirs de Fresnel	31
III.4- Absorption d'eau	31
III.4.1- Influence des conditions d'exposition d'eau.....	32
III.4.2- Suivi de l'absorption d'eau.....	32
III.4.3- Tolérance à l'eau.....	33
III.4.4- Conséquence physique de l'absorption d'eau.....	33
III.4.5- Endommagement par démixtion.....	34

III.4.6- Absorption d'eau chaud.....	35
III.4.7- Résistance à la vapeur d'eau.....	36
III.5- Exposition à la chaleur et à l'humidité.....	36
III .5.1- Vieillissement thermique avec et sans humidité.....	36
III.5.2- Essais continus de la chaleur humide.....	36
III.5.3- Essais cyclique de la chaleur humide.....	37
 Chapitre IV : Polychlorure de vinyle (PVC)	
IV.1- Introduction.....	39
IV.2- Présentation du PVC.....	39
IV.3- Composition.....	39
IV.4- Formulation.....	40
IV.4.1- Les plastifiants.....	40
IV.4.2- Les stabilisants.....	42
IV .4.3- Les charges.....	42
IV.4.4- Les lubrifiants.....	42
IV.5- Mise en ouvre.....	43
IV.6- Propriétés du PVC.....	43
IV.6.1- Propriétés électrique.....	43
IV.6.2- Propriétés physiques.....	45
IV.6.3- Propriétés mécaniques.....	45
IV.6.4- Propriétés chimiques.....	45
IV.6.5- Propriétés thermiques.....	46
IV.6.6- Propriétés dimensionnelles.....	46
IV.7-Application.....	46
 Chapitre V : Technique expérimentales	
V.1- Introduction.....	47
V.2- Préparation des échantillons.....	47

V.3- Exposition des échantillons pour vieillissement climatique.....	48
V.4- Dispositif expérimentaux.....	49
V.4.1- Mesure de la rigidité diélectrique.....	49
V.4.2- Résistivité transversale et superficielle.....	50
V.4.3- Résistance à la traction et allongement à la rupture.....	51
V.4.4- Perte de masse.....	53
V.4.5- Changement de colleur.....	53

Chapitre VI : Résultat et discussions

VI.1- Introduction.....	55
VI.2- Mise on œuvre du vieillissement climatique sur les propriétés électriques.....	55
VI.3- Influence du vieillissement climatique sur les propriétés électriques.....	55
VI.3.1- Résistivité transversale.....	55
VI .3.2- Résistivité superficielle.....	57
VI.3.3- Rigidité diélectrique.....	57
VI.4- Influence du vieillissement climatique sur les propriétés mécaniques.....	58
VI.4.1- Résistance à la traction.....	58
VI.4.2- Allongement à la rupture.....	59
VI.5- Influence du vieillissement climatique sur les propriétés physiques.....	59
VI.5.1- Perte de masse.....	59
VI.5.2- Changement de colleur.....	61
Conclusion général.....	62

BIBLIOGRAPHIE

Introduction générale

Introduction générale

Depuis leur découverte au début de siècle dernier, le domaine des isolants organiques solides n'a cessé d'évoluer. Ces matériaux sont peu onéreux et facilement recyclables [1]. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines qui s'étendent de la microélectronique à l'industrie aéronautique et spatiale en passant par la médecine vu leurs excellentes propriétés isolantes, leur grande résistance aux attaques chimiques et leurs bonnes caractéristiques mécaniques.

Le domaine du Génie Electrique leur accorde actuellement de plus en plus d'investigation. En effet, la plupart des technologies dépendantes de l'énergie électrique sont soumises à des contraintes de vieillissement qui conditionnent la fiabilité des systèmes électriques [2]. Les câbles électriques portent un recouvrement polymérique extérieur pour leur protection, c'est ce qui s'appelle gaine. Cette gaine assure la protection contre les agressions du milieu extérieur et les efforts mécaniques au moment de la pose. On s'intéresse à la prédiction de la durée de vie des câbles qui représente un enjeu économique et stratégique important pour le transporteur comme pour le distributeur d'énergie électrique. Or la durée de vie du câble est principalement liée à celle des gaines. En effet, elle est :

- d'une part, l'élément en contact direct avec l'environnement extérieur ; de ce fait, la gaine est la première victime des agressions chimiques et mécaniques.
- d'autre part, la première barrière à la pénétration d'eau. Or si l'eau pénètre à travers la gaine, elle peut créer des arborescences humides dans l'isolation électrique provoquant le claquage du câble.

Le matériau constitutif de cette gaine externe est généralement le Polyéthylène PE ou le Polychlorure de Vinyle PVC [3]. Le poly chlorure de vinyle est la deuxième matière plastique la plus utilisée au monde ; ce polymère a un rôle très important dans le secteur électrique surtout dans le domaine de fabrication des câbles électriques. Malgré que ce polymère a des bonnes propriétés mécaniques et diélectriques, mais il est assez instable à la chaleur et à l'humidité [4]. 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 aux quelles le câble sera soumis. De plus la validité d'une conception nouvelle ne peut être confirmée définitivement que par des résultats expérimentaux et théoriques satisfaisants.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence du vieillissement climatique naturel sur les propriétés du PVC utilisé comme gaine des câbles moyennes tension. Notre mémoire est présenté sous forme de six chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les isolants solides y compris les polymères.
- Le deuxième chapitre nous décrivons les câbles de transport d'énergie électrique.
- Le troisième chapitre a pour objectif la description des effets du vieillissement climatique sur un isolant de câble.
- Le quatrième chapitre est réservé à la présentation du matériau utilisé (le PVC), sa formulation et ses propriétés.

Introduction générale

- Dans le cinquième chapitre nous décrivons les techniques expérimentales utilisées dans les caractérisations du PVC soumis à un vieillissement climatique.
- En fin, le sixième chapitre est attribué aux résultats expérimentaux et aux discussions.

Nous finissons par une conclusion générale qui résume les points forts de notre étude.

Chapitre I
Généralités sur les polymères

I.1- Introduction :

Avec la découverte des hydrocarbures, les polymères sont devenus des matériaux utilisés couramment dans l'industrie. Le secteur des matériaux à base des polymères connaît un développement intensif [4].

Ces dernières années, les polymères ont trouvé une utilisation dans une variété d'application. Leur excellente isolation les rend bien adaptés aux applications électriques. En outre, ils ont un usage intensif comme matériaux d'emballage.

En termes d'application mécanique, dans certains systèmes, les roulements, les pignons, les joints sont faits de plastique. En remplacement des métaux, ils sont maintenant largement utilisés pour la fabrication des tubes pour le transport des fluides [5].

L'objectif de ce chapitre est de donner des généralités sur les polymères.

I.2- Définition :

Les polymères sont des matériaux composés de très longues chaînes (macromolécules) ; elles-mêmes formées de molécules élémentaires (monomères) assemblées entre elles. Ces chaînes sont principalement constituées d'atomes de Carbone sur lequel sont fixés des éléments comme l'hydrogène ou l'oxygène [5].

I.3- Types de polymères :

Il existe deux types de polymères :

- Les homopolymères.
- Les copolymères.

I.3.1- Homopolymères

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité (monomères). Si seulement un type de monomère est utilisé, le polymère résultant est appelé un homopolymère [6].

I.3.2- Copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se présenter en plusieurs structures différentes qui sont les suivantes [6] :

I.3.2.a- Copolymères statistiques

Ils sont caractérisés par l'alternance aléatoire des monomères A et B (figure I.1).

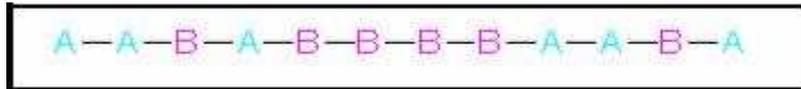


Figure. I.1: Structure moléculaire d'un copolymère statistique.

I.3.2.b- Copolymères alternés

Un cas limite du copolymère statistique est le copolymère alterné qui est également un matériau homogène à une phase (figure I.2).

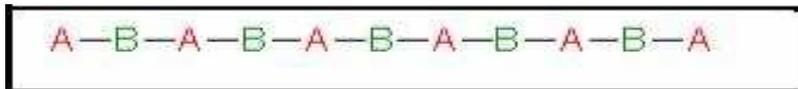


Figure. I.2: Structure moléculaire d'un copolymère alterné.

I.3.2.c- Copolymères séquencés

Ce sont des molécules linéaires ou radiales, constituées d'une alternance de longues séquences homogènes (figure I.3).

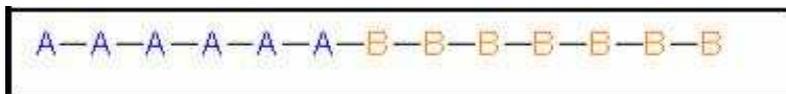


Figure. I.3: Structure moléculaire d'un copolymère séquencé.

I.3.2.d- Copolymères greffés

Les copolymères greffés sont des copolymères dans lesquels les branches ont une structure chimique différente de celle de la chaîne principale (figure I.4).

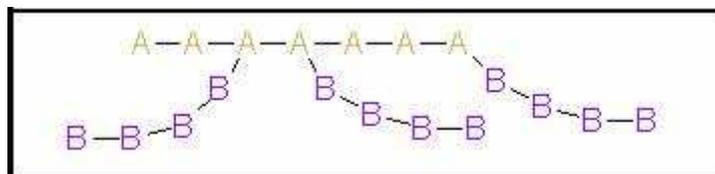


Figure. I.4: Structure moléculaire d'un copolymère greffé.

Parmi ces différents types de polymères, on peut trouver des polymères polaires et d'autres non polaires.

- **Les polymères polaires :**

Les polymères polaires sont généralement des matériaux isolants possédant dans leur molécules, en plus du carbone et de l'hydrogène, des atomes généralement électronégatifs tels que : le fluor, le chlore, l'oxygène, l'azote, qui fournissent des dipôles. Ils ont à un degré plus ou moins grand, une permittivité élevée (3,5 à 10) et un indice de pertes élevé de 10^{-2} à 10.

Parmi ces polymères on peut citer :

- ❖ Le poly (chlorure de vinyle) PVC.
- ❖ Le poly (fluorure de vinylidène) PVDF.
- ❖ Le poly (méthacrylate de méthyle) PMMA.
- ❖ Les polycondensats tels que : les polyamides, les polystères.

- **Les polymères apolaires :**

Contrairement aux polymères polaires, ces polymères présentent un indice de pertes diélectrique faibles, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} et une permittivité quasi constante (2,5 à 3) dans un large domaine de température et de fréquence. Leur formule chimique ne contient que du carbone et de l'hydrogène et s'ils contiennent des atomes électronégatifs tels que le fluor, ces atomes sont placés symétriquement le long de la chaîne carbonée.

Parmi ces polymères on peut citer [6]:

- ❖ Le polyéthylène PE.
- ❖ Le polypropylène PP.
- ❖ Le poly (tétrafluoréthylène) PTFE.

I.4- Propriétés des polymères :

I.4.1- Propriétés électriques

Dans un polymère soumis à un champ électrique alternatif constant la permittivité relative est représentée par une grandeur complexe :

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (I.1).$$

Avec :

ε_r' : La permittivité relative du diélectrique ou la constante diélectrique qui représente les pertes diélectriques de conduction.

ε_r'' : L'indice de pertes diélectriques qui représente les pertes diélectriques de polarisation.

I.4.1.a : Constante diélectrique du polymère :

La constante diélectrique ϵ_r ou permittivité relative d'un matériau est définie comme le rapport C/C_0 de la capacité C d'un condensateur dont les armatures sont séparées par le diélectrique considéré à la capacité C_0 à vide. La valeur de la capacité C est toujours supérieure à la capacité C_0 , la raison en est que le diélectrique contient des unités polaires qui existent déjà dans le matériau ou qui sont susceptibles de se créer sous l'action du champ électrique. Ces unités s'orientent dans la direction du champ électrique et font apparaître des charges images sur les armatures du condensateur qui augmentent la quantité d'électricité emmagasinée. Comme l'orientation de ses unités polaires n'est pas instantanée il s'ensuit que la partie réelle de la permittivité relative ϵ_r n'est pas constante mais tend vers une valeur ϵ_s qui n'est atteinte qu'au temps $t=\infty$.

Si le champ électrique appliqué est alternatif, la permittivité ne sera pas la même selon que les unités polarisables auront ou n'auront pas le temps de s'orienter dans le sens du champ [7].

I.4.1.b : Facteur de dissipation :

Le facteur de dissipation est défini par la formule suivante :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (I.2)$$

où δ est l'angle de phase défini par le courant total et le courant en quadrature avec la tension, cet angle représente l'angle de pertes d'un diélectrique en haute fréquence, cet angle est invariable [7].

Les pertes diélectriques de polarisation peuvent être traduites en terme de conductivité équivalente par :

$$\delta = \omega \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_r'' \quad (I.3)$$

Où ϵ_r'' : Partie imaginaire de la permittivité complexe.

ω : Pulsation électrique.

En remplaçant l'équation (I.3) dans l'équation (I.1) on obtient :

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r' - j \frac{\delta}{\omega \cdot \epsilon_r'} \quad (I.4)$$

I.4.1.c – Résistivité

Les matériaux plastiques trouvant beaucoup d'applications comme isolants, doivent avoir une grande résistivité pour prédire les effets des différents facteurs tels que les variations de température ou l'effet de présence d'impuretés. On distingue :

❖ **La résistivité transversale :**

Elle est définie par la relation [8]:

$$\rho = \frac{R.S}{e} \quad (I.5)$$

avec : ρ ($\Omega.cm$) : résistivité transversale.

$R(\Omega)$: résistance du polymère de section S (cm^2) et d'épaisseur e (cm).

• **Domaine des résistivités :**

Le domaine des résistivités des polymères organiques s'étend donc de $10^{21} \Omega.cm$ pour les très bons isolants à environ $10^{-4} \Omega.cm$ [8] pour certains plastiques conducteurs tels que les polysilanes chargés de noir de carbone au bien encore les polycétyléniques dopés, récemment synthétisés.

• **Influence des différents facteurs sur la résistivité transversale**

➤ **Humidité :**

La présence de molécules d'eau diminue la résistivité du polymère. La variation de la résistivité ρ en fonction de la teneur en eau H (rapportée au produit supposé sec) peut prendre les deux formes principales suivantes [8]:

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot H) \quad (I.6)$$

et
$$\rho = \rho_0 \cdot H^{-n} \quad (I.7)$$

Avec α et n constantes caractéristiques du matériau.

Selon le domaine de la valeur de la teneur en eau, les deux formes de loi peuvent être vérifiées sur le même produit. De même que pour l'indice de pertes, la quantité d'eau absorbée par les matériaux plastiques est un facteur très important de variation de la résistivité transversale.

Le tableau ci dessous montre le pourcentage d'eau absorbée suivant la nature du matériau et leur résistivité transversale [8].

Tableau (I.1) : Absorption d'eau et résistivité transversale ρ à 20°C.

Thermoplastique	Absorption d'eau 24 h (%)	ρ ($\Omega \cdot cm$)
Poly (chlorure de vinyle)	0.07 à 0.40	10^{14} à 10^{16}
Polypropylène	< 0.01	10^{15} à 10^{17}
Polyéthylène	< 0.01	10^{17} à 10^{19}

➤ **Additifs :**

Les données sur les effets des additifs sont généralement limitées. Les impuretés ioniques, en particulier les sels de métaux alcalins, ont un effet marqué sur la résistivité des polymères. Par exemple, la réduction du taux de cendres dans le polyéthylène de 0.3 à 0.03 % augmente la résistivité d'un ordre de grandeur

➤ **Température**

La relation qui relie la résistivité des polymères à la température T est de la forme :

$$\ln \rho = \frac{A}{T} + B \quad (1.8)$$

avec A et B des constantes.

Ce qui implique que la résistivité augmente avec l'augmentation de la température.

❖ **Résistivité superficielle**

Les divers facteurs modifiant la résistivité transversale ont un effet analogue sur la résistivité superficielle, en particulier l'humidité et les vapeurs diverses susceptibles de s'absorber à la surface du polymère jouant un rôle prépondérant.

Le tableau (I.2) représente les valeurs des résistivités transversale et superficielle suivant la nature du matériau à 20°C [8].

Tableau (I.2) : Résistivité transversale et superficielle à 20°C.

Thermoplastique	Résistivité transversale $\rho(\Omega \cdot cm)$	Résistivité superficielle $\rho(\Omega)$
Poly (tétrafluoréthylène)	10^{18}	10^{16}
Poly (sulfure de phénylène)	10^{17}	$4 \cdot 10^{16}$

I.4.1.d- Rigidité diélectrique

Encore appelée tension de claquage ou tension disruptive, la rigidité diélectrique E est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perte des propriétés isolantes dans des conditions d'essais spécifiées et la distance entre les deux électrodes de part et d'autre du polymère aux quelles est appliquée la tension :

$$E = \frac{U}{e} \quad (I.9)$$

Avec : e (m) : distance inter électrodes.

U(V) : tension appliquée pour laquelle le claquage se produit.

E (V/m) : rigidité diélectrique.

Divers paramètres donnent une idée très relative du comportement des matières plastiques, ce sont :

- le point éclair,
- la densité,
- la toxicité des fumées émises
- l'indice d'oxygène.

L'indice d'oxygène représente la teneur minimale en oxygène et d'azote pour entretenir la combustion d'une éprouvette pendant un temps donné, le tableau ci-dessous donne quelques exemples des indices d'oxygène [8].

Tableau(I.3) : Rigidité diélectrique des différents isolants [8].

Thermoplastique	Rigidité diélectrique (MV/m)
Poly (chlorure de vinyle) Rigide	37
Polyéthylène	18 à 40
Poly carbonates	35
Polystyrène	20 à 28

❖ Influence des divers paramètres sur la rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique dépend des facteurs intrinsèques tels que la porosité, l'homogénéité et la taille des grains. Ces facteurs sont directement reliés aux conditions de leurs élaborations (le taux d'ajout, la température de frittage). Quant aux paramètres extrinsèques, on peut citer la température, la tension et la vitesse de montée en tension.

• Tension appliquée

L'influence de la tension se schématise par sa forme en continu. Le facteur essentiel est la polarité en alternatif, cela va dépendre de la fréquence. Il a été constaté expérimentalement que la rigidité diélectrique en tension continue est voisine de celle en tension alternative multipliée par $\sqrt{2}$ et que dans la majorité des matériaux la tension de claquage augmente avec la vitesse de l'application de la tension [9].

• Température

Le comportement diélectrique à la rupture des isolants diffère selon qu'on se place dans la plage haute ou basse température. Par conséquent il faut considérer deux gammes de températures, haute et basse température. Dans le cas des céramiques, la gamme haute température correspond à la température au dessous de la température de frittage mais voisine de cette dernière. Contrairement à la gamme basse température, la rigidité diélectrique des céramiques dans la gamme haute température a tendance à diminuer d'une manière très significative.

• **Epaisseur**

Généralement, l'augmentation de l'épaisseur des échantillons a pour effet de diminuer la rigidité diélectrique. Certains auteurs l'ont expliqué par l'augmentation de la densité de défaut dans le volume soumis au champ, qui réduit ainsi considérablement la rigidité diélectrique [9].

I.4.2- Propriétés mécaniques

En général, les polymères formés à partir de chaînes linéaires non réticulées et flexibles sont souples (à certaines températures) tandis que les polymères très réticulés, formant un réseau tridimensionnel sont plus rigides. Les premiers donnent lieu à des polymères thermoplastiques, les seconds à des polymères thermodurcissables [7].

Les propriétés mécaniques des matériaux polymères dépendent de la position de la température expérimentale par rapport aux températures caractéristiques que sont les températures de fusion, de transition vitreuse et de transition secondaire. Les essais de traction permettent de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile, rigide ou souple. Ils permettent aussi de quantifier certaines propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité, la résistance maximale ou la contrainte et l'allongement à la rupture en traction [4].

Quelques exemples de courbes contrainte-allongement, cas d'un thermoplastique ductile : polymères semi-cristallins sont données dans la figure I.5.

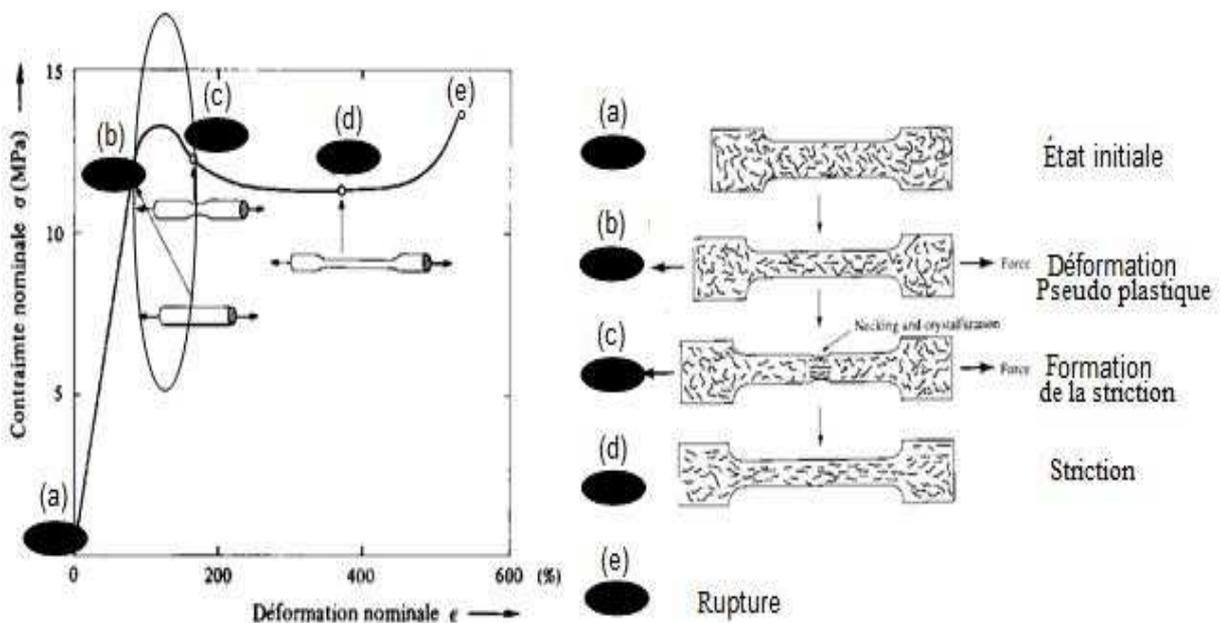


Figure I.5 : Courbe de contrainte déformation d'un thermoplastique ductile [10].

La variation du comportement ductile-fragile et de la résistance à la traction est importante sur un domaine de température restreint, nous donnons en exemple le PMMA, thermoplastique amorphe de température de transition vitreuse $T_g = 105^\circ\text{C}$.

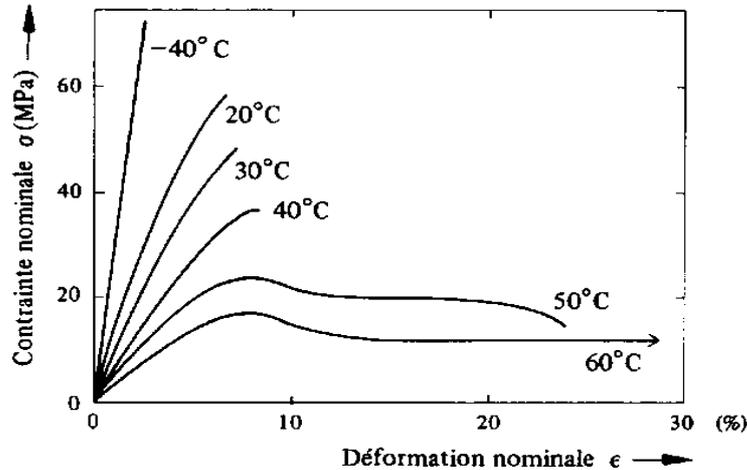


Figure I.6 : Courbe de contrainte déformation du polyméthacrylate de méthyle (PMMA) en fonction de la température [10].

I.4.3- Propriétés physiques

La température de fusion T_f et la température de transition vitreuse T_g sont modifiées par l'architecture moléculaire. De façon intuitive, on comprend par exemple que la densité diminue avec la ramification des molécules en augmentant l'espace entre les chaînes principales. Ainsi le PE linéaire non ramifié présente une haute densité et donc un point de fusion 20°C plus élevé que le PE ramifié basse densité.

La structure primaire est l'enchaînement covalent des motifs monomères. La tacticité ne concerne que les molécules asymétriques; il s'agit de molécules de même formule chimique dont l'arrangement des radicaux monovalent le long dus quel étende la molécule est différent d'une chaîne à l'autre.

Prenons le cas de l'éthylène et du PE sur lequel on a agriffé un radical R à la place d'un atome d'hydrogène. R peut être un atome de Chlore Cl, Fluor F ou un groupe méthyle CH_3 ou Phényle C_6H_5 .

Le groupement R rend le monomère asymétrique ; ce dernier peut être relié de plusieurs manières pour obtenir la chaîne polyéthylène $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$:

- Les radicaux R sont tous du même côté du plan : on a un polymère linéaire iso-tactique.
- Les radicaux R sont situés alternativement de part et d'autre du plan; le polymère est linéaire syndiotactique. Exemple le PVC Syndiotactique.

c. Les radicaux R sont fixés au hasard de façon aléatoire: le polymère est linéaire atactique.

L'existence de plusieurs formes stéréo isométriques va entraîner des propriétés physiques complètement différentes entre les stéréos isomères. Les conséquences de la structure primaire sur les propriétés des polymères sont:

- l'encombrement des groupes R gouverne la mobilité des chaînes moléculaires, son influence est importante sur les propriétés thermomécaniques.

- les molécules régulières peuvent se ranger côte à côte pour former des structures cristallines: augmentation de température de fusion.

Notons que les molécules atactiques donnent des matériaux amorphes et peu denses [7].

I.4.4- Propriétés thermiques

La conductibilité thermique est faible, quelque $0.1 \text{W.k}^{-1}.\text{m}^{-1}$. Les polymères sont des isolants. Les charges peuvent augmenter la conductibilité. La capacité thermique à pression constante est de l'ordre du $\text{kJ.k}^{-1}.\text{kg}^{-1}$. Les variations importantes ne se manifestent que pour les semi cristallins au passage de la fusion [4].

I.4.5- Propriétés chimiques

Le comportement chimique d'un matériau dépend de grande partie de la nature chimique de la partie polymère mais aussi de son accessible aux agents extérieurs. La distinction entre mise en solution et attaque chimique est théoriquement claire, une solution devant laisser intacte la structure chimique du produit [4].

I.4.6- Propriétés optiques

Les matériaux polymères, à quelques rares exceptions sont des milieux transparents dans le domaine visible [11]. Ceci s'explique par le fait que :

- ces matériaux ne possèdent pas d'électrons libres (à l'exception des polymères conjugués et dopés).

- la contribution de la polarisation ionique est négligeable.

- la principale contribution provient de la polarisation électronique.

De plus ces matériaux sont isotropes à l'échelle de la longueur d'onde, si bien qu'ils se comportent comme des matériaux non biréfringents, c'est à dire qu'ils possèdent la propriété de biréfringence dans lequel la lumière se propage de façon anisotrope.

Pour un matériau homogène et isotope (ex un polymère amorphe non orienté), l'origine de l'absorption de rayonnement dans le domaine visible provient d'une part d'un phénomène de diffusion élastique provoqué par les fluctuations spatiales de densité (donc d'indice de réfraction existant dans les structures non cristallines) et d'autre part des modes propres de vibration moléculaires [11].

I.4.7- Propriétés acoustiques

Certains polymères sont disponibles sous forme de structure alvéolaire ou masse qui ont la particularité d'être isolants thermiques mais aussi acoustiques. Les réglementations en matière d'isolation acoustique deviennent de plus en plus sévères dans les domaines de bâtiment et de la machine notamment [4].

I .5- Vieillessement des polymères

On appelle vieillissement toute altération lente et irréversible des propriétés d'un matériau résultant de son instabilité propre ou d'effet de l'environnement et qui ne fait intervenir que le matériau, atmosphère et la température [12]. Il peut faire intervenir aussi des phénomènes purement physiques (dégazage, migration des plastifiants, évolution de la morphologie) ou des phénomènes chimiques. Ces phénomènes peuvent affecter la structure chimique ou dans certains cas concerner seulement les additifs [12].

I .5.1- Vieillessement thermique :

La température est l'un des facteurs déterminant de la dégradation : plus l'énergie thermique apportée est élevée, plus une déstabilisation se produit au sein du polymère [13].

I .5.1. a- Endurance thermique

L'effet de la température sur les isolants solides a été examiné en 1930, puisque Montsinger avait présenté une règle empirique décrivant le doublement de la durée de vie pour un abaissement de 10°C de la température de l'isolation au papier d'un transformateur [14]. En 1948, T.W.Dakin formule une expression de la durée de vie des isolants soumis à la contrainte thermique qui est fondée sur la cinétique des réactions chimiques représentant les phénomènes élémentaires prédominants de la dégradation [14] .

I .5 .1.b-Principe

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

- Pendant quel temps t peut-on maintenir un matériau (ou une isolation) sous la contrainte C_0 ?
- Si l'on désire une durée de maintien ou durée de vie donnée t_0 , quelle contrainte maximale C sera autorisée?

Pour y répondre, il suffit de connaître la relation contrainte-temps $C=f(t)$ donnée à la figure I.7.

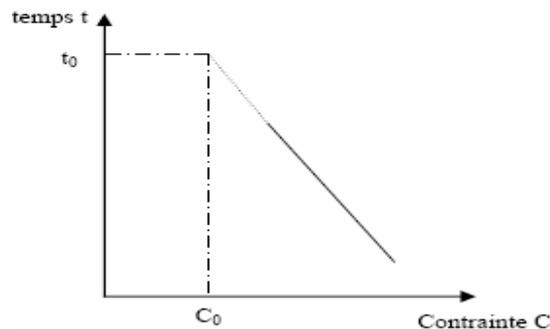


Figure I.7: Relation contrainte-temps [15].

Pratiquement, l'établissement de cette relation passe par la détermination des variations d'une propriété du matériau en fonction du temps et ce pour diverses valeurs C_1, C_2, \dots, C_n de la contrainte appliquée (figure I.8).

Si l'on se fixe une valeur de la propriété P_0 , choisie soit arbitrairement, soit en fonction de critères d'emploi représentatifs, on obtient la courbe $C(t)$ relative à la valeur P_0 . Il s'agit de ce qu'on a coutume d'appeler « courbe de durée de vie ». La propriété peut être électrique (rigidité diélectrique, résistivité transversale,...), mécanique (allongement à la rupture, résistance à la traction,...) ou une perte de masse [15].

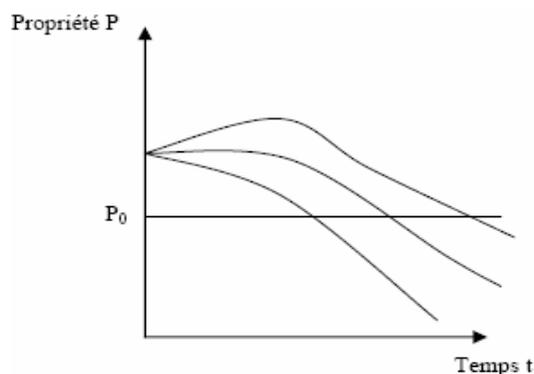


Figure I.8 : Variations d'une propriété P en fonction du temps pour diverses valeurs de la constante C appliquée [15].

I.5.1.c- Choix des températures de vieillissement

La norme CEI 216-1 décrit les conditions générales dans lesquelles sont effectués les essais d'endurance thermique des matériaux isolants. On retiendra pour le choix des températures de vieillissement, qu'elles sont au nombre de trois au minimum, différant chacune de la plus voisine de 20°C et tel que le critère de dégradation soit atteint : en un temps inférieur à 100 h pour la température la plus élevée et en un temps inférieur à 5000 h pour la température la plus basse [14].

I.5.1.d- Choix des caractéristiques mesurées et des critères de fin de vie

Les caractéristiques étudiées doivent être à la fois représentatives des conditions d'emploi des matériaux dans les matériels et présenter une évolution dans le temps entre des limites extrêmes suffisamment éloignées, pour que les dispersions qui affectent les mesures ne risquent pas de masquer cette évolution. Le plus généralement, on choisit une caractéristique électrique et une caractéristique mécanique. On peut éventuellement y associer une caractéristique physique (perte de masse par exemple).

Le critère de fin de vie est déterminé pour chaque propriété comme étant la limite inférieure de cette caractéristique, au-delà de laquelle, le matériau n'est plus apte à remplir l'emploi auquel il est destiné, dans le matériel où il sera utilisé.

En pratique, on choisit souvent comme critère de fin de vie, une valeur égale à 50% de la valeur initiale pour les propriétés électriques et mécaniques [15].

I.5.2- Vieillessement électrique

Si le matériau est soumis à un champ électrique, des décharges partielles naissent. Leurs effets se traduisent par la formation de radicaux libres et ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène. Il s'ensuit une dégradation généralisée ou très localisée (arborescences électriques) des isolants. En présence d'humidité, d'impuretés ioniques et sous l'influence de la température, des réactions électrochimiques peuvent également conduire à une dégradation des propriétés du matériau. Dans certaines circonstances, il peut apparaître des arborescences électrochimiques ou d'eau [12]. Les différentes étapes du processus sont présentées dans la figure I.9 dans laquelle on trouve :

Etape 1: Le matériau est en équilibre sous champ faible ou nul. En moyenne, le champ électrique n'a aucune action sur la structure : s'il y a création de défauts, ils sont sous forme métastable. La structure peut donc revenir à son état initial.

Etape 2 : Le champ est suffisant pour créer de nouveaux défauts à partir de défauts initiaux de façon irréversible. Ce processus entraîne une augmentation de la densité de charges au sein du matériau.

Etape 3 : Sous l'action combinée du champ électrique et du temps, la densité de défauts est telle que la probabilité pour qu'ils se groupent en amas n'est pas nulle.

Etape 4 : Les porteurs dont le libre parcours moyen est de plus en plus grand au sein de ces amas, sont susceptibles d'acquérir des énergies importantes donc de produire des défauts de dimensions plus importantes qui peuvent apparaître sous forme d'arborescences par exemple.

Etape 5 : La rupture se fait selon un mécanisme de percolation entre les amas des défauts.

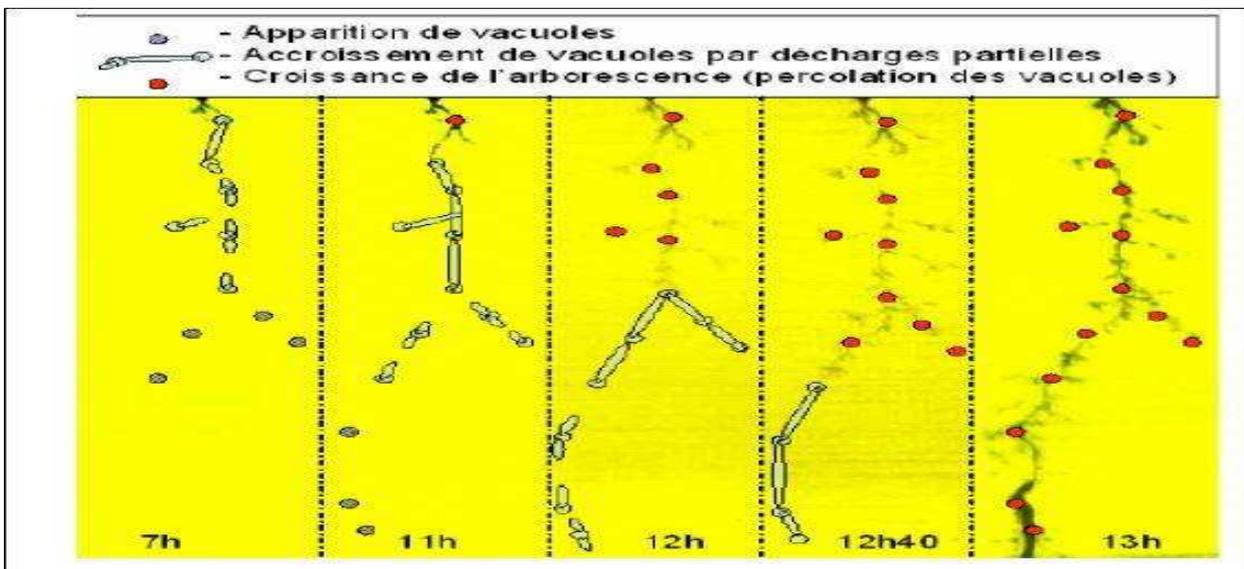


Figure. I.9 : Arborescence électrique observée dans le volume d'une résine époxy en configuration pointe/plan à laquelle a été superposée la théorie de la percolation de A. K. Joncher et R. Lacoste [6].

I.5.3- Vieillessement hydrolytique :

I.5.3.1- Réaction d'hydrolyse :

Nous avons vu, précédemment que les polymères absorbent une quantité plus au moins importante d'eau en fonction de leur structure et en particulier de la polarité de leur motif monomère. Dans certains cas le polymère ne se contente pas de fixer les molécules d'eau, il réagit plus ou moins rapidement avec elle, le cas le plus fréquent et le plus important sur le plan pratique peut être décrit comme suit [16].

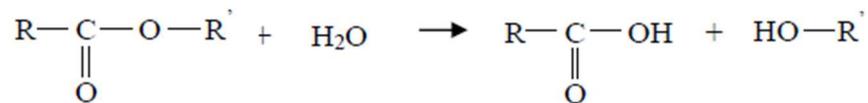


Cette réaction conduit à la coupure de chaînes entre nœuds de réticulation et ainsi création de fragments de chaînes macromoléculaires se trouvant libres dans le réseau et pouvant diffuser vers le milieu extérieur. On parle dans ce cas de lessivage, il se crée un volume libre qui peut accueillir des molécules d'eau supplémentaire [16].

I.5.3.2- Mécanismes

Il existe trois mécanismes qui font intervenir les groupes suivants [16] :

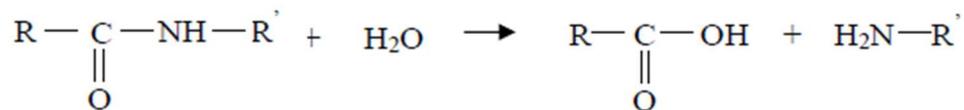
a- Groupe ester :



Ce groupe peut se trouver dans :

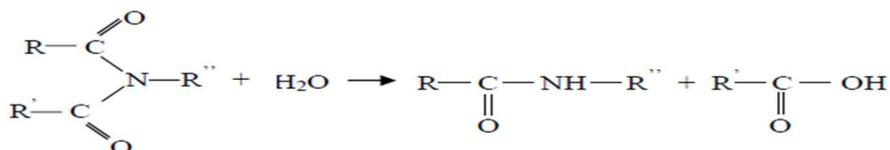
- les polyesters linéaires.
- le polyester tridimensionnel.
- les polyuréthanes-polyesters.
- le poly époxy réticulé par des anhydrides.

b-Groupe amide



On le trouve dans les polyimides et les poly (amides-imides).

c- Groupe imide



On le trouve dans les polyimides et les poly (amides-imides).

I.5.3.3- Caractéristiques :

Les phénomènes d'hydrolyse ont un certain nombre de caractéristiques communes [16].

a - Ils sont généralement très lents à température ambiante. La vitesse de l'acte chimique élémentaire étant elle-même faible et le processus étant souvent contrôlée par la diffusion de l'eau dans le matériau. Dans ce cas, les effets de l'hydrolyse se manifestent à long terme (plusieurs mois ou plusieurs années).

b- Les effets de l'hydrolyse se superposent aux effets physiques de l'absorption d'eau. Ces derniers effets seuls sont réversibles.

En effet, dans le cas où le matériau n'est pas parvenu à saturation.

Comme l'indique la figure 6, lorsque $t < t_1$. (Période initiale) les phénomènes physique prédominent et lorsque $t > t_1$. Le processus se stabilise.

La courbe 2 de la figure ci-dessous indique les effets de l'hydrolyse d'un polymère sont irréversibles et ils entraînent la disparation du palier de la stabilisation ($t > t_1$).

c- l'hydrolyse est une réaction activée par une élévation de la température, elle devient très rapide aux températures de mise en œuvre du polymère, d'où la nécessité d'une dessiccation des poudres et granulés avant la mise en œuvre.

d- l'hydrolyse est une réaction susceptible d'être catalysée par des agents chimiques divers, tels que les ions H^+ , OH^- , métaux de transition, . . . etc. ;

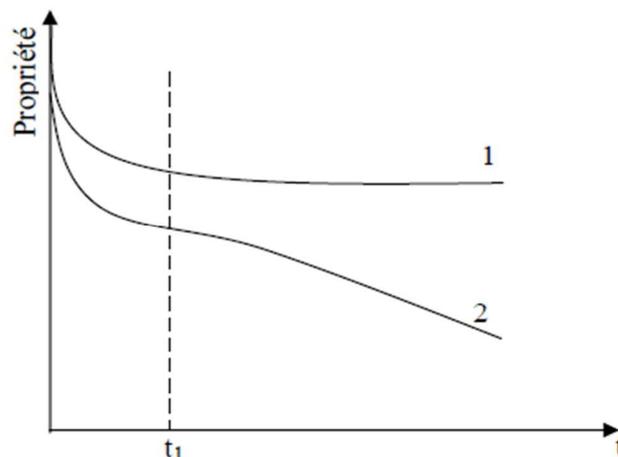


Figure I.10 : Evaluation d'une propriété d'un polymère hydrophile en fonction du temps en fonction du temps d'exposition au milieu humide.

I.5.3.4- Conséquence et cinétique de l'hydrolyse :

L'hydrolyse d'un polymère se traduit par des coupures de chaînes, d'où une diminution de la masse moléculaire ou de la densité de réticulation qui peut être utilisée pour caractériser l'avancement de la réaction d'hydrolyse. Les coupures de chaînes créent de nouvelles macromolécules, on peut ainsi écrire dans le cas d'un polymère linéaire :

$$\frac{1}{\overline{M}_t} - \frac{1}{\overline{M}_0} = n_t$$

avec \overline{M}_t : Masse moyenne aux temps t d'exposition.

\overline{M}_0 : Masse molaire moyenne initiale.

n_t : Nombre de moles de coupure de chaîne au temps t dans un gramme d'échantillon.

La cinétique de dégradation se présentera alors sous la forme $n_t = f(t)$; ce qui permettra la détermination de manière conventionnelle la vitesse et les énergies d'activation qui pourront être utilisées dans un modèle mathématique de comportement à long terme, afin de faire une prédiction de la durée de vie ; dans le cas où la mesure des masses molaires n'est possible. L'indice de fluidité à chaud peut être utilisé ou même les propriétés mécaniques ; en ayant conscience que dans ce dernier cas la relation avec la structure chimique n'est pas évidente. Les essais réalisés en atmosphère humide voisine de la saturation à des températures inférieures ou égales à 90°C ont montré que les durées de vie polymères industriels contenant des groupes ester ou amides vont quelques mois à quelques dizaines de mois au bout desquels on constate une chute de 50% des propriétés mécaniques [16].

I.5.4- Vieillessement climatique :

Le vieillissement climatique « weathering » résulte de l'exposition directe des matériaux au rayonnement solaire, aux températures et à diverses pollutions (marines, industrielles, ...) ; la température joue également un rôle important [12].

Les matériaux utilisés dans le réseau de transport de distribution situés à l'extérieur (les isolateurs de ligne, les conducteurs isolés) sont directement exposés à ce type de contrainte. Avec l'emploi des isolateurs synthétiques leur durée de vie doit être étudiée parce qu'elle est directement liée au vieillissement naturel. Les causes de dégradation sont nombreuses [17]:

- le rayonnement solaire.
- l'humidité relative, pluie
- les composantes chimiques : air, ozone, particules dues à la pollution.

De nombreux adjuvants permettent de protéger les polymères (noir de carbone, pigments minéraux, tels que l'oxyde de zinc et l'oxyde de titane, et les absorbeurs (UV) [12].

Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques de la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminements [12].

Chapitre II
Généralités sur les câbles

II.1- Présentation des câbles

II.1.1- Introduction

Les câbles représentent les éléments actifs des liaisons électriques, puisque leur rôle essentiel est de conduire le courant électrique. Il existe une très grande variété ; pour satisfaire à toutes les utilisations de l'électricité [4].

II.1.2- Types de câbles

II.1.2.a- Câbles unipolaires

Ces câbles servent à l'alimentation d'auxiliaires (moteurs, pompes) sur des sites de production d'électricité. Ces câbles dont l'isolation principale est à base de polychlorure de vinyle (PVC) sont des câbles haute tension (HTA) à champ radial exploités en 6,6 kV [18].

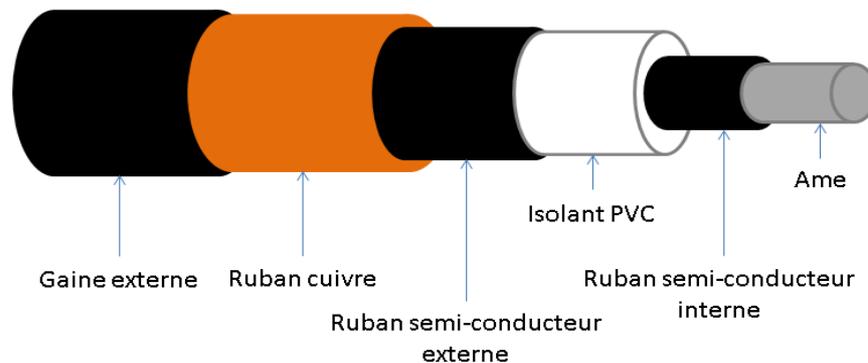


Figure II.1 : Représentation d'un câble unipolaire [18].

II.1.2.b- Contraintes d'exposition

Au cours de sa vie, un câble de ce type peut être amené à subir différentes contraintes, principalement d'ordre électrique, thermique, mécanique et climatique. Suivant leurs utilisations, ils peuvent également être exposés à des contraintes radiochimiques.

❖ Contraintes électriques

La contrainte électrique en courant contribue, par effet Joule, à l'échauffement du câble et se traduit donc par une élévation de température. La contrainte électrique en tension se traduit par un champ électrique radial 50 Hz de l'ordre de quelque kV/mm qui est à l'origine de pertes dans le diélectrique.

❖ Contraintes mécaniques

Elles ont lieu majoritairement lors de la mise en œuvre du câble via la technique de pose utilisée. Le câble n'est pas destiné à bouger, les contraintes mécaniques surviennent ensuite.

Quelques contraintes peuvent cependant subsister comme le fluage qui provient de la disposition des supports du câble, et la flexion due à rayon de courbure faible.

❖ Contraintes thermiques

Elles sont plus difficiles à estimer. La température du câble a pour origine la puissance fournie et la puissance cédée à l'extérieur, elle dépend de la température environnante mais également des dimensions et caractéristiques thermiques des matériaux constitutifs du câble.

❖ Contraintes climatiques

Elles peuvent également jouer un rôle en modulant l'hygrométrie ambiante. On ne s'intéressera pas ici aux intempéries (pluie, neige) car les câbles concernés ne sont jamais à l'air et sont sensés ne jamais être trempés dans de l'eau. Toutefois une augmentation de la teneur en eau a été mesurée sur des câbles retirés du service [18].

II .1.2.c- Câbles multipolaires

Il existe en effet également des câbles tripolaires dont une structure assez répandue est présentée en figure II.2.

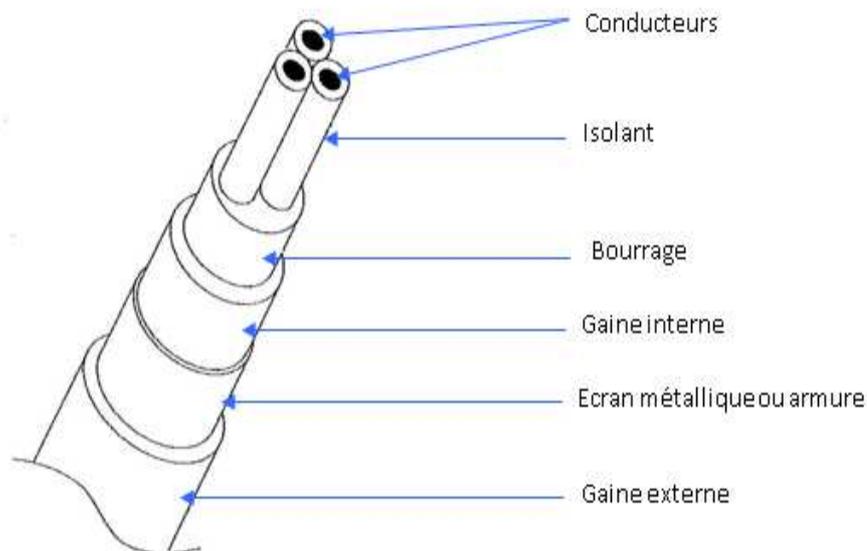


Figure II.2 : Représentation d'un câble multipolaire [18].

La principale différence provient du fait que le câble est dans ce cas constitué non plus d'une âme conductrice mais de trois. Chaque âme est alors recouverte d'un isolant PVC et les trois ensembles « âme–isolant » sont pris dans le bourrage. Le rôle de celui-ci est remplir les interstices entre les conducteurs tout en permettant de donner à l'ensemble une forme

déterminée. L'écran métallique est présent et s'intercale entre deux gaines. La première recouvre le bourrage et la seconde a pour rôle la protection mécanique du câble.

Certains câbles de ce type sont constitués de PVC, à la fois pour l'isolant mais également pour les deux gaines [18].

II.1.3- Domaine d'utilisation

Pour les câbles isolés de puissance, les principaux domaines sont indiqués ci-après :

II.1.3.a- Les câbles à haute tension (HTB)

En 400 kV, ils sont principalement employés sur de courtes longueurs (quelques centaines de mètres à 2 ou 3 kilomètres) pour assurer l'évacuation de la puissance de certaines centrales thermiques ou assurer l'alimentation des auxiliaires des centrales nucléaires.

II.1.3.b- Les câbles moyens tension (HTA)

En 3 à 45 kV, ils sont très utilisés sur les réseaux de distribution d'énergie électrique. Anciennement isolés au papier imprégné, ils sont maintenant fabriqués par des matières synthétiques entraînant une réduction du coût et une plus grande facilité de pose et de mise en œuvre.

II.1.3.c- Les câbles à basse tension (BT)

A 230 ou 400 V, ils constituent le moyen le plus sûr et le plus esthétique de distribution locale d'énergie électrique. De nombreux types de câbles particuliers sont également développés (ayant un comportement amélioré au feu, résistant aux produits chimiques, à des températures élevées, mécaniquement très souples ou robustes, etc.). Ils font l'objet de spécifications particulières [19].

II.2- Caractéristiques des câbles

II.2.1-Ame conductrice

L'âme conductrice ou tout simplement le conducteur est la partie principale d'un câble. Son rôle est de transmettre le courant nécessaire avec une faible perte d'énergie. Les deux matériaux largement utilisés sont le cuivre et l'aluminium.

II.2.1. a- Caractéristiques électriques

Le tableau II.1 [20] montre les propriétés électriques des métaux couramment utilisés dans les câbles. Prenant en considération le prix. Le cuivre et l'aluminium sont clairement le

meilleur choix pour les conducteurs, mais il y a eu une certaine expérience pratique avec les sodium.

Tableau II .1 : Propriétés électriques des métaux utilisées dans les câbles.

Matériaux	Avantage	Inconvénient
Aluminium	Léger	Conductivité électrique et thermique est d'environ 60% que celle du cuivre.
Cuivre	Haute conductivité électrique et thermique	Coûteux
Argent	Légèrement supérieur à celui du cuivre	Extrêmement coûteux
Sodium	Extrêmement bon marché	Les questions de sécurité sur la manipulation et l'entretien. Conductivité électrique et thermique médiocres.

La résistivité et le coefficient de température de cuivre et de l'aluminium sont donnés dans le tableau II .2 [20].

Tableau II.2 : Résistivité spécifique et son coefficient de température

	Cuivre	Aluminium
R_{20} : résistivité électrique spécifique 20°C en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0 ,01786	0 ,02874
α : coefficient thermique de la résistivité électrique spécifique 20°C en 1/K	0,00392	0,0042

La température maximale du conducteur est déterminée par la température qu'il peut supporter pendant de longues périodes de temps sans dommages. La température maximale peut être affectée par la capacité à dissiper la chaleur et la température ambiante et l'élévation de température totale admissible du conducteur.

II.2.1.b- Supraconductivité

Depuis la découverte de la supraconductivité à haute température, un certain nombre de compositions d'oxyde ont été trouvées avec une température critique (T_c) de supraconductivité au-dessus de 77 K. La supraconductivité permet d'entrevoir une multitude d'applications électrotechniques à grande échelle (transport des fortes puissances, stockage d'énergie, champ magnétique intenses...). De nombreux matériaux analogues ont été découverts dont les températures critiques peuvent aller jusqu'à 150 K. Ces matériaux dits supraconducteurs à haute température critique ont l'énorme avantage d'avoir une conduction du courant électrique de très forte densité pour des températures assez élevées par rapport aux supraconducteurs à basse température critique, donc la supraconductivité est en effet un phénomène apparaissant sous une température critique (T_c) [20].

II.2.1.c- Forme de l'âme conductrice

Les structures des âmes conductrices sont variées. Elles peuvent être soit de section circulaire, soit autres. Elles sont soit massive soit câblées. Pour les très fortes sections (1600 Al ; 1200 Cu) et l'utilisation de câble pour le transport d'énergie sous tension alternative, l'âme conductrice est le plus souvent segmentée (la section circulaire est divisée en segments câblés individuellement et isolés les uns des autres) afin de réduire sensiblement les pertes par effet de peau [19].

II.2.2- Isolation

L'isolation électrique est la partie la plus cruciale d'un câble puisqu'elle permet une séparation suffisante entre le conducteur et la masse électrique la plus proche afin d'empêcher la rupture diélectrique. Les matériaux d'isolation les plus couramment utilisés dans les câbles extrudés sont le polyéthylène réticulé (XLPE), le caoutchouc éthylène-propylène (EPR) et polyéthylène réticulé avec retardateur d'arborescence (TR-XLPE) [20].

II.2.3- Ecran Semi-conducteur

Des couches de semi-conducteurs sont utilisées des deux côtes de l'isolation. La couche interne est appelée l'écran du conducteur et son but est de créer une surface en forme de cylindre lisse sur le dessus du conducteur. Ceci permet de fluidifier le champ électrique radial et d'éviter la formation de cavités entre le conducteur et l'isolant, ce qui conduirait à des décharges partielles qui pourraient endommager l'isolation. Le matériau semi-conducteur est habituellement basé sur le même matériau que l'isolant. La couche externe est appelée écran

d'isolation. Sa fonction est d'homogénéiser le champ électrique radial et de fournir un chemin aux courants de fuite. L'écran d'isolation empêche également les décharges pareilles au-dessus de l'isolant. Il est généralement fabriqué à partir du même matériau que l'écran conducteur.

II .2.4- Blindage métallique

Le blindage métallique est un facteur de sécurité important dans les câbles haute tension. En cas de dommage mécanique causé aux câbles, un commutateur rapide offre un accès à faible impédance au courant de défaut. Il joue le rôle de protection contre les contacts accidentels, ainsi qu'à la protection mécanique de l'isolant.

II.2.5-Gaine de protection

Ce composant a pour fonction de protéger le câble d'éventuelles possibilités de dommages mécaniques et de la corrosion provoquée par l'eau. Le polyéthylène haute densité (HDPE) est couramment utilisé comme matériau pour cette gaine de protection car il offre une bonne protection mécanique et une excellente résistance à l'abrasion avec une faible pénétration de l'humidité [20].

II.3-Polymères utilisés comme gainage

II.3.1- Papier imprégné :

C'est un isolant très employé, il n'est plus utilisé pour les liaisons sous tensions alternatives terrestres quelle que soit la tension de service, mais de nombreux réseaux de câbles réalisés avec ce type d'isolant sont encore en service. De tels câbles sont encore fabriqués dans certains pays.

II.3.2- Polychlorure de vinyle (PVC)

Le PVC est en général, mélangé avec des plastifiants et des charges appropriés de façon à donner une matière thermoplastique isolante, difficilement inflammable, insensible à l'ozone, résistant aux huiles, aux solvants, aux acides et absorbant peu l'humidité. Ce matériau est sensible à la diffusion éventuelle d'additifs provenant des constituants adjacents.

II.3.3- Polyéthylène (PE)

Polymère d'éthylène fabriqué par divers procédés de haute et basse pressions avec des masses moléculaires très diverses ; il s'oxyde très rapidement, et inflammable et peu hygroscopique.

II.3.4- Polyéthylène réticulé (PR)

Le PR possède sensiblement les mêmes qualités électriques que le polyéthylène mais de meilleures qualités thermiques. La mise en œuvre de charges minérales dans le PR améliore le comportement mécanique à la température de fusion, mais diminue les propriétés diélectriques.

II.3.5- Caoutchouc éthylène-propylène

Il s'agit de EPR (éthylène-propylène rubber), de EPM (éthylène-propylène monomère) et de EPDM (éthylène-propylène diène monomère). Ce matériau présente une excellente résistance à l'ozone et aux intempéries et une grande souplesse, et surtout réservé aux applications spéciales, telle que les câbles souples BT et HTA ou il s'est substitué au caoutchouc butyl [19].

Chapitre III

Vieillissement climatique des isolants de câbles

III.1- Introduction :

Les essais d'environnement consistent à exposer des éprouvettes ou des objets en plastique dans un milieu défini (microorganismes, lumière naturelle, chaleur, humidité, brouillard d'eau, etc....) et à évaluer l'effet de ce milieu sur les plastiques en mesurant une ou plusieurs de leurs caractéristiques avant et après exposition [21].

III.2- Exposition aux microorganismes

III .2.1- Principe des essais

L'étude du comportement des plastiques en présence de microorganismes nécessite l'application de techniques dont la mise en œuvre ne peut être effectuée que par un personnel qualifié, spécialement formé aux techniques et disposant d'un matériel approprié. L'action des microorganismes sur les plastiques comporte deux processus qui se déroulent en général simultanément :

- d'une part, le développement des microorganismes aux dépens du plastique (seule source de carbone).
- d'autre part, l'action des produits de métabolisme des microorganismes sur les plastiques.

Dans les deux cas, il s'en suit une altération des propriétés. Les études peuvent porter sur :

- la résistance des constituants de base des plastiques aux microorganismes.
- la résistance des plastiques aux microorganismes.
- l'évaluation de l'action des microorganismes sur les pièces détachées, matériels et appareillages en plastiques, ou comportant des éléments ou des revêtements plastiques.

II.2.1.a- La résistance des constituants de base des plastiques au microorganisme

Pour les constituants solides, on s'intéresse à l'évaluation du degré de comestibilité et de la résistance à l'envahissement. Pour les plastifiants et les constituants liquides, on étudie l'évaluation du degré de comestibilité du pouvoir fongistatique (inhibition du développement des champignons) et la détermination de la valeur d'un traitement anticryptogamique.

II.2.1.b- Résistance des plastiques et des appareillages aux microorganismes

L'inoculation est réalisée dans une chambre à chaleur et humidité contrôlées, dont la température est réglée par période de 24h de la façon suivante: 18h à $30 \pm 2^\circ\text{C}$, suivie de 6h à $24 \pm 2^\circ\text{C}$. L'humidité relative doit toujours être maintenue à $95 \pm 5\%$. Dans certains cas, l'essai peut être suivi par un essai de vieillissement artificiel. Selon la taille des matériels et des appareillages, on expose le matériel entier, ou une partie de celui-ci, ou simplement une

pièce ou une éprouvette. On détermine également les variations de caractéristiques physiques par mesure sur les pièces exposées avant et après exposition. Les variations de caractéristiques sont exprimées en % de la valeur initiale [21].

III.2.2- Protection des matériels contre les microorganismes

Ce problème est difficile à résoudre et l'on note d'abord que le matériel doit être protégé contre l'humidité, en effet, les moisissures ne se développent qu'en milieu humide. On protège les plastiques par exemple avec des vernis fongicides, il y a lieu de réaliser des mélanges. On peut utiliser par exemple, des phényles mercurifères, des fluorures, des phénols chlorés, des salicylates et des stéarates de mercure [22].

III.3- Exposition à la lumière de jour

Le comportement des plastiques soumis à l'action de la lumière du jour varie considérablement selon la famille des polymères envisagés et, à l'intérieur d'une même famille, selon les adjuvants utilisés pour améliorer la tenue à la lumière [21].

III.3.1- Spectrométrie d'absorption du rayonnement UV visible

Les principales applications de la spectrométrie UV visible dans le domaine des polymères concernent plus spécialement l'analyse d'adjuvants, colorants, pigments et l'analyse de vieillissement des polymères absorbé sur un plan qualitatif (identification des chromophores) ou purement quantitatif (mesure du jaunissement).

III.3.2- Méthode d'exposition sous verre à la lumière de jour

Les éprouvettes sont disposées dans une boîte d'exposition sans fond munie d'un couvercle formé par un verre encadré. La boîte est placée de façon telle que son couvercle soit face à l'équateur. Les éprouvettes sont inclinées à 45° par rapport à l'horizontale, en direction de l'équateur.

Dans la gamme des longueurs d'onde, ce sont les rayons ultra-violetts qui occasionnent, d'une manière générale, le plus de dégradation aux macromolécules. On sait par ailleurs qu'une quantité importante de radiation ultraviolette est reçue par diffusion provenant du ciel dans les directions entourant du Zénith. Il est donc possible, par accord entre les parties intéressées, d'exposer les éprouvettes avec une inclinaison inférieure à 45° pour augmenter la quantité de rayonnement UV reçue [21].

En même temps que les éprouvettes, on expose les moyens d'évaluation de la quantité de rayonnement reçus, qui sont soit des étalons de laine bleue, soit des instruments de mesurage

de l'intensité et d'intégration de celle-ci ; permettant de connaître la quantité de rayonnement reçue pendant une période déterminée.

III.3.3- Méthode d'exposition directe aux intempéries, ou d'exposition indirecte sous verre, et à la lumière du jour intensifiée par des miroirs de Fresnel

Trois méthodes d'exposition sont proposées :

- Exposition direct au rayonnement solaire et aux intempéries, cette méthode correspondant à une utilisation en extérieur sans protection particulière.
- Exposition sous verre au rayonnement solaire et aux intempéries, cette méthode peut être utilisée pour simuler le vieillissement des plastiques derrière le verre employé dans le bâtiment ou derrière le verre à vitrage automobile.
- Exposition au rayonnement solaire intensifié par un concentrateur à miroirs de Fresnel comprenant 10 miroirs disposés de manière à simuler des tangentes par rapport à un puit parabolique et à réfléchir la lumière solaire de façon uniforme sur les éprouvettes montées sur la zone cible, cette méthode est utilisée pour obtenir une accélération des processus de vieillissement.

Les résultats obtenus avec ces trois méthodes ne sont pas comparables entre eux. Des matériaux identiques exposés à différentes périodes pendant plusieurs années présentent généralement des comportements comparables après des intervalles d'exposition égaux. Cependant, même en ce qui concerne les essais à long terme, les résultats peuvent être influencés par la saison à laquelle les essais ont été commencés.

A la fin de la durée d'exposition prescrite, les éprouvettes sont soumises à des essais pour déterminer les modifications de propriétés aspect, couleur, propriétés physiques, etc. les variations sont exprimées en pour-cent de la valeur initiale [21].

III.4- Absorption d'eau

L'absorption d'eau dans les composites se fait par diffusion à travers les micro-espaces et micropores, ou encore par capillarité le long de l'interface fibre matrice. De façon générale, les caoutchoucs n'absorbent qu'une petite quantité d'eau, mais certains facteurs tels que les conditions d'exposition (température, environnement), la nature chimique de l'élastomère et son taux de vulcanisation peuvent augmenter cette quantité.

De nombreuses études ont été menées sur l'absorption et la diffusion de l'eau à travers le caoutchouc. L'étude de Pillali a montré que le Néoprène avait absorbé plus de 200% d'eau distillée en seulement 20 jours d'immersion à 60°C. Ce phénomène est attribuable à la

présence d'oxydes de Zinc et de Magnésium dans le système de vulcanisation car ils présentent une affinité avec l'eau. Par opposition, le taux d'absorption de la silicone se situe autour de 0.05%.

III.4.1- Influence des conditions d'exposition à l'eau

En milieu atmosphérique, la concentration d'eau à l'équilibre dans le polymère w_m est une fonction croissante de l'hygrométrie relative HR, on peut généralement écrire

$$w_m = K(HR)^\alpha \quad \text{III. 1}$$

avec K : une constante dépendant de la nature du polymère et de la température.

α : un exposant généralement voisin de l'unité.

L'effet de la température est fonction de la nature chimique du polymère donneur, des liaisons hydrogène tel que les époxy réticulés par des amines, w_m est indépendant de T (entre 20 et 100°C) ou légèrement décroissant avec T. Pour les polymères modérément polaires tels que les polyesters, w_m est une fonction croissante de T et peut typiquement doubler ou tripler entre 20 et 100°C [24].

III.4.2- Suivi de l'absorption d'eau

L'absorption d'eau par les élastomères se caractérise par une prise de masse au cours du temps. Le processus est décrit par la figure (III.2). La première partie de la courbe, entre 0 et 5 jours, dépend du coefficient de diffusion de l'eau dans l'élastomère. Au bout d'un certain temps (après 30 jours ici), il y a une stabilisation (équilibre avec l'environnement).

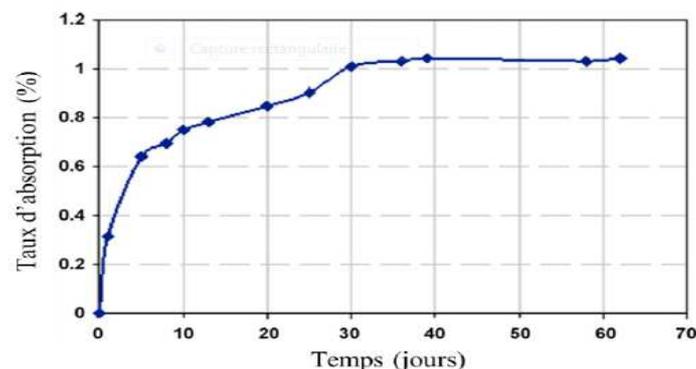


Figure III.1. Taux d'absorption d'une silicone de type LRS pour une exposition dans l'eau à 70°C [25].

La température a une forte influence sur la cinétique d'absorption. En effet, plus la température est élevée, plus l'absorption d'eau est déterminée suivant la formule suivante [25]:

$$W = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad \text{III. 2}$$

où w_0 est le poids de l'échantillon sec avant immersion.

w_t est le poids de l'échantillon sec après immersion.

III.4.3- Tolérance à l'eau

On détermine le pourcentage en masse d'eau nécessaire à l'obtention d'un trouble de la résine phénolique liquide $23 \pm 0.1^\circ\text{C}$, l'addition d'eau est poursuivie jusqu'à ce qu'une dernière addition crée un trouble persistant au moins 30s après agitation [21].

III.4.4- Conséquences physiques de l'absorption d'eau

III.4.4.a- Propriétés diélectriques

L'absorption d'eau se traduit par une chute des propriétés diélectriques : augmentation de facteur de dissipation diélectrique ($\text{tg } \delta$), diminution de la rigidité diélectrique [24].

III.4.4.b- Pertes d'adjuvants

En cas d'immersion ou d'aspersion (pluie), on peut observer l'extraction de plastifiants, de stabilisants et d'autres adjuvants, ou celle de leur produit d'hydrolyse. Ainsi le phtalate de butyle (plastifiant) est assez facilement extrait par l'eau. Par contre, les phtalates plus lourds à chaîne alkyle sont pratiquement insensibles à l'eau.

Par ailleurs, le phénomène d'extraction, éventuellement peu important par lui-même, peut contribuer à raccourcir considérablement les durées de vie en vieillissement si les adjuvants en cause sont des stabilisants.

III.4.5- Endommagement par démixtion

Nous désignons en fait deux mécanismes : l'un rapide, induit en fait deux mécanismes et l'autre lent, induit par la dégradation hydrolytique.

III.4.5.a- Endommagement induit par choc thermique :

Considérons le cas d'un polymère pour lequel la fraction massique w_m d'eau à l'équilibre est d'une fonction croissante de la température. La figure III.3 représente la courbe $W_m = f(T)$, elle constitue la frontière, dans le plan (W,T) entre le domaine où polymère et eau sont miscibles et le domaine où ils sont non miscible.

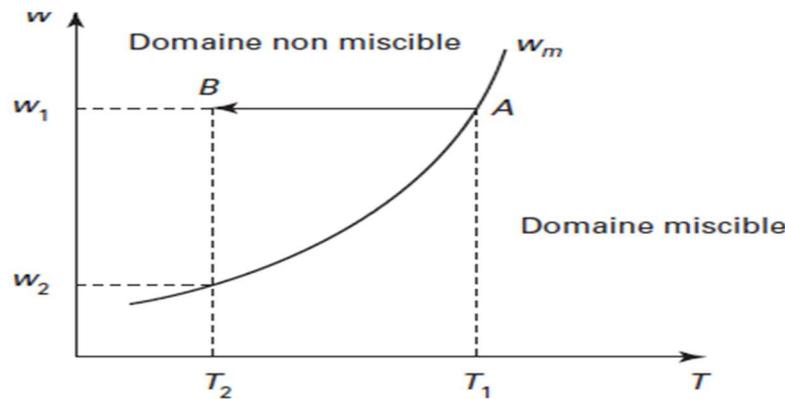


Figure III.2. Concentration à l'équilibre en fonction de la température. Schématisation d'un choc thermique (refroidissement brutal de T_1 à T_2) [24].

Considérons la situation de départ représentée par le point A. A la température T_1 , l'échantillon est saturé (concentration w_1). Il est brutalement refroidi à la température T_2 , pour laquelle la concentration à l'équilibre est w_2 , l'échantillon contient alors un excès $(w_1 - w_2)$ d'eau par rapport à l'équilibre.

III.4.5.b- Endommagement induit par dégradation hydrolytique

Dans certains cas, par exemple celui du polycarbonate, on observe une démixtion lors d'exposition isotherme dans une échelle de temps nettement supérieure à celle de la diffusion. La figure III.4 ci-dessous représente la courbe de variation de masse avec le temps d'exposition, on observe les phases cinétiques suivantes :

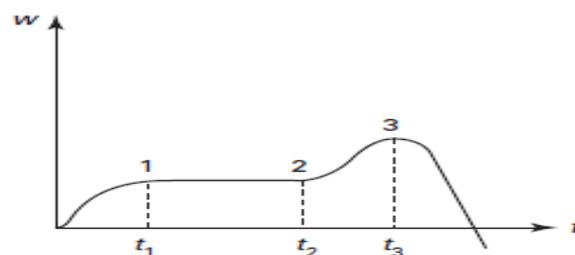


Figure III.3. Allure d'une courbe de variation de masse avec le temps d'exposition dans le cas d'un endommagement induit par dégradation hydrolytique [24].

- Absorption d'eau : le système atteint l'équilibre au voisinage du temps t_1 et conserve cet équilibre jusqu'au temps t_2 .
- Démixtion : au temps t_2 , on observe le début de la démixtion du mélange polymère eau.

- Propagation de fissure : les microcavités formées au temps t_2 croissent en taille jusqu'au temps t_3 .
- Coalescence du réseau de fissures, lesquelles débouchent dans le bain au temps t_3 , et début d'un processus de perte de masse rapide. A ce stade, les propriétés mécaniques ont généralement chuté d'une façon catastrophique [24].

III.4.6- Absorption d'eau chaude

Cet essai est réalisé soit sur des éprouvettes utilisées pour la mesure de la propriété à étudier avant et après absorption d'eau, soit sur des plaques de 200 mm x 200 mm x 4mm ou des disques de 200 mm de diamètre dont les chants ne sont pas protégés pendant l'immersion. La température et la durée de l'immersion dans l'eau sont choisies dans les gammes suivantes [26]:

- température (°C) :40, 55, 70, 85,100 ; Tolérance $\pm 2^\circ\text{C}$.
- durés : 1, 2, 4, 16, 24, 48,72 ou 96 heures, 1, 2,4 ou 8 semaines.

Dans le but de comparaison, il peut être intéressant d'effectuer un traitement dans l'eau distillée, à la température et pendant la durée choisie. Les éprouvettes sont ensuite refroidies dans l'eau distillée pour l'essai, jusqu'à 23°C pendant 24h au maximum, puis placées dans un humidificateur régie à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et à 90% d'humidité relative. Immédiatement avant la détermination des caractéristiques des éprouvettes, on les essuie, on les pèse et on les mesure. On note également les éventuelles modifications d'aspect [26].

III.4.7- Résistance à la vapeur d'eau

Une éprouvette prélevée dans la plaque soumise à l'essai est maintenue dans la vapeur d'eau bouillante pendant 1h, la face décorative étant exposée au courant de vapeur d'eau. Après un repos de 24h, l'éprouvette est examinée et l'effet produit sur sa surface notée selon une échelle allant de 5(pas de changement visible) à 1 (cloquage et / ou délaminage) [26].

III.5- Exposition à la chaleur et à l'humidité

III.5.1- Vieillesse thermique avec et sans humidité

Une série d'éprouvettes est exposée aux influences conjuguées ou non, de la chaleur et de l'humidité dans des conditions déterminées, l'effet de cette exposition est évalué par comparaison des valeurs d'une caractéristique physique déterminée sur la série d'éprouvettes vieilles et sur une série d'éprouvettes témoins. Les spécifications doivent préciser les conditions opératoires (température, humidité, durée de l'essai). Les variations de

caractéristiques (couleur, variation de masse, propriétés physiques...etc.) sont les résultats de l'essai, ils sont exprimés en pourcent de variation par rapport à la valeur déterminée sur le lot d'éprouvettes témoins [26].

III.5.2- Essais continus de la chaleur humide

Deux essais sont normalisés : l'essai Ca applicable plus particulièrement aux composants et l'essai Cb introduit pour les essais d'équipement.

III.5.2.a. Essai Ca

La chambre d'essai est réglée à 40°C et à 93% d'humidité relative. D'autres valeurs de température et d'humidité sont prescrites pour les semi-conducteurs et circuits intégrés (85°C - 85% d'humidité relative HR). Il s'agit d'un essai de durée assez longue : 4, 10, 21 ou 56 jours. La pénétration d'humidité s'effectue par les passages des connexions d'un dispositif en boîtier (parles de verre) par exemple ou lorsque le spécimen est enrobé par une résine, par cheminement à travers celle-ci. Dans ce cas, la pénétration peut être contrôlée en finement. Au cours de l'essai, il est parfois appliqué une tension de polarisation dont le but est de créer des phénomènes d'électrolyse favorisant les détériorations du revêtement, de l'enrobage, etc.

Cet essai est assez simple à réaliser correctement, moyennant certaines précautions :

- l'eau de condensation sur les parois de la chambre ne doit pas tomber sur les spécimens.
- les spécimens doivent être placés à quelques centimètres au moins des parois et aussi près que possible de l'emplacement où les conditions de l'essai sont effectivement contrôlées (température et humidité) .
- les spécimens doivent être chauffés avant introduction dans la chambre de telle sorte qu'aucun phénomène de condensation ne puisse prendre naissance.
- les conditions d'humidité spécifiées ne doivent être établies que lorsque les spécimens ont atteint l'équilibre thermique.
- les perturbations apportées par l'ouverture de la chambre d'essai doivent être évitées.

La tolérance concernant l'humidité relative de l'ordre de $\pm 3\%$, la température de l'étuve doit être assez stable($\pm 0.5^\circ C$).

III.5.2.b. Essai Cb

Dans le cas des composants électroniques, à la température ambiante du laboratoire, la température de la chambre est augmentée progressivement jusqu'à la température prévue pour l'essai. Lorsque la stabilité thermique du spécimen est atteinte, l'humidité est introduite dans

la chambre (cela évite la formation de condensation). L'opération inverse est réalisée à la fin de l'épreuve. Les conditions de température et d'humidité sont les suivantes :

- $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $93\% \pm 3\% \text{HR}$.
- $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $85\% \pm 3\% \text{HR}$.
- $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $93\% \pm 3\% \text{HR}$.
- $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $85\% \pm 3\% \text{HR}$.

Les durées d'essai sont de 2, 4, 10 ou 21 jours [27].

II.5.3- Essai cyclique de la chaleur humide

L'essai a pour objet d'observer le comportement des spécimens en milieu très humide lorsque la température varie. Le phénomène prépondérant est ici la condensation. La chambre d'essai est maintenue à une humidité relative voisine de 93 %. La température, au départ de 25°C , est augmentée progressivement jusqu'à 55°C en 3h. La température est maintenant à 55°C pendant 9h. Le cycle, d'une durée de 24h se termine par un retour à 25°C .

D'autres valeurs de température sont parfois prescrites (40°C par exemple). Les spécimens sont soumis à 2 ou 6 cycles de 24h. Cette épreuve est très souvent effectuée sur les composants, au cours d'un essai à contraintes appliquées successivement (séquence climatique) [27].

Chapitre IV
Polychlorure de vinyle (PVC)

IV.1- Introduction

Le polychlorure de vinyle (PVC) est un polymère très présent dans notre vie quotidienne. Il couvre tous les secteurs de l'activité économique. C'est aussi l'un des plus utilisés ces dernières années pour diverses applications, avec une consommation mondiale de plus de 20 millions de tonnes ; ceci est dû à l'ensemble de ses propriétés mécaniques et physiques et son aptitude à être modifié [7].

IV.2-Présentation du PVC

En 1872, E. Baumann a découvert le PVC. Ce polymère est largement utilisé dans le monde industriel, il se classe en deuxième position après le polyéthylène. La large utilisation du PVC dans la fabrication des câbles moyenne tension, comme isolant et matériau de gaine de protection revient, d'une part à son faible coût de revient et d'autre part à ses bonnes qualités d'isolation électrique. La souffrance de ce matériau de la mauvaise stabilité thermique freine son utilisation comme un isolant dans les câbles HT [6].

Ce matériau présente de multiples qualités. Néanmoins, il est choisi pour deux raisons majeures : sa plastification et surtout son incinération. La plastification consiste à ajouter au PVC des plastifiants qui ont une mauvaise réputation du point de vue environnemental, mais qui permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques et, notamment, la souplesse du PVC.

Le Polychlorure de vinyle ou chlorure de polyvinyle est un polymère thermoplastique. Connu généralement sous le sigle PVC, il est obtenu par polymérisation des monomères de chlorure de vinyle. Historiquement, le monomère de chlorure de vinyle est produit par réaction entre l'éthylène et du chlore gazeux mais, de nos jours, on peut faire réagir de l'acétylène avec de l'acide chlorhydrique en présence d'oxygène. Le produit intermédiaire de cette réaction, qui est le dichlorométhane, se transforme en chlorure de vinyle sous l'effet de la chaleur [13].

IV.3- Composition

Découvert en 1835 par le physicien français Victor Regnault, le PVC est composé de 57 % de chlore et de 43 % d'éthylène, hydrocarbure composé de carbone et d'hydrogène issu du pétrole. Le chlorure est obtenu par électrolyse du sel (chlorure de sodium : NaCl). Par suite on fixe une molécule du chlorure sur l'éthylène. Sous une grande température on obtient le chlorure de vinyle monomère (CVM) qui, par polymérisation, donne le PVC.

La polymérisation est la réaction chimique par laquelle les molécules s'additionnent les unes aux autres pour former une chaîne de grande longueur. Le schéma est le suivant [28].

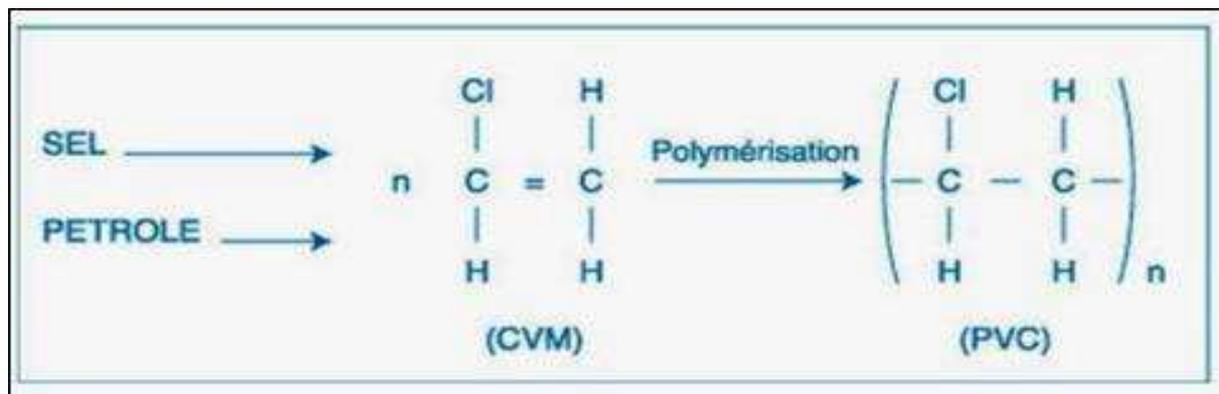


Figure VI.1: Polymérisation du PVC

IV.4- Formulation

La formulation permet l'utilisation et la mise en œuvre d'une substance active grâce à l'utilisation d'additifs. Elle vise le meilleur compromis entre les propriétés et la qualité du produit fini, sa facilité de mise en œuvre et son coût.

Le PVC pur est inutilisable dans le cas d'une application comme isolant électrique pour un câble. En effet la température de transition vitreuse du PVC (T_g) est assez élevée (78°C) et c'est donc un matériau vitreux rigide à température ambiante. Il est donc nécessaire de le chauffer pour permettre sa mise en œuvre. Ceci nécessite l'incorporation de stabilisant thermique afin d'empêcher la dégradation par déshydrochloruration du polymère. C'est également lors de cette mise en œuvre que seront incorporés un ou plusieurs plastifiants visant à diminuer la température de transition vitreuse afin de rendre le matériau plus souple et permettre son utilisation à température ambiante. Il existe plusieurs constituants qu'il est possible de retrouver dans un mélange PVC pour câble. On distingue :

IV.4.1-Les plastifiants

Le principal rôle des plastifiants est de diminuer la température de transition vitreuse (T_g) du PVC pour une diminution des forces d'interactions entre les différentes chaînes moléculaires du polymère. Il en résulte l'obtention d'un matériau présentant un comportement souple à température ambiante.

IV.4.1.a- Propriétés des plastifiants

Un plastifiant doit être miscible avec le polymère considéré. En d'autres termes, il doit être solvant de ce polymère.

Dans le cadre de l'application isolation électrique, les plastifiants utilisés dans la formulation du PVC doivent également répondre à des exigences plus spécifiques qui guident leur choix d'utilisation. Ce sont :

- une compatibilité avec la résine PVC (l'imitation du phénomène d'exsudation du ressuage c'est à dire laissé sortir l'excédent d'eau, humidité en surface du plastifiant. en surface du plastifiant).
- une tension de vapeur la plus faible possible (limitation du phénomène d'évaporation).
- le plastifiant doit être difficile à extraire par des liquides susceptibles d'entrer en contact avec le matériau.
- Il doit être non migrant (migration = passage du polymère à un autre matériau avec lequel il est en contact).
- enfin il doit être résistant à l'oxydation et proposer des bonnes propriétés électriques telles que tangente δ , rigidité diélectrique.

Ces critères ont permis de sélectionner des grandes catégories de composés servant régulièrement de plastifiant pour le PVC.

IV.4.1.b- Mode d'action des plastifiants

Ils permettent d'obtenir un mélange polymère + plastifiant dont la température de transition vitreuse présentera une valeur intermédiaire entre celle de résine pure et celle du plastifiant utilisé. Deux types de plastifiants existent :

- les plastifiants internes qui sont liés chimiquement au polymère mais ils sont moins efficaces et non utilisés avec les isolants électriques ; ils ne seront pas décrits par la suite pour qu'un plastifiant agisse sur le long terme. On utilise ainsi des esters au des phosphates auxquelles on greffe des longues chaînes alkyles ($\geq C_0$).
- les plastifiants polymères mais qui ne sont pas utilisés dans le cas du PVC. L'état ou le plastifiant vient s'insérer dans le réseau macromoléculaire rompant ainsi des liaisons physiques (liaisons de type liaison hydrogène) responsable de la cohésion. Les mouvements des segments de chaînes de la phase amorphe sont de cette manière favorisés, conduisant à une diminution de la température à laquelle ils peuvent apparaître (T_g).

IV.4.2- Les stabilisants

Le rôle des stabilisants est de fixer les chlorures d'hydrogène libérés lors de la déshydrochloruration, réaction auto-catalytique due à la chaleur, à la lumière ou à l'oxygène. Ainsi, les stabilisants permettent d'éviter les réactions secondaires lors la mise en œuvre du PVC, mais aussi d'augmenter sa stabilité thermique. Les stabilisants à base de plomb sont largement utilisés, mais ils sont progressivement éliminés de la formulation des PVC pour des raisons de toxicité. Ils sont essentiellement remplacés par des stabilisants à base d'étain ou de mélanges calcium/zinc ou calcium/stabilisants organiques [18].

IV.4.3- Les charges

Elles représentent toutes les substances inertes ajoutées à un polymère dans le but d'en modifier les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'en améliorer l'état de surface ou d'en réduire le prix de revient (du produit fini). Il s'agit généralement de substances minérales (principalement des carbonates de calcium) mais elles peuvent parfois être également végétales. Les charges doivent satisfaire aux exigences suivantes :

- compatibilité avec le PVC, pas d'impuretés.
- mouillabilité et bonne dispersion dans la matrice polymère.
- uniformité (qualité et granulométrie).
- prix de revient bas.
- faible action abrasive.

En général, les charges minérales permettent une amélioration des propriétés diélectriques, par un effet « barrière » au transport des charges électriques ou aux arborescences électriques, ainsi qu'une augmentation du transfert thermique. Ce dernier permet d'améliorer la tenue en température du matériau en augmentant sa conductivité thermique [18].

IV.4.4- Les lubrifiants

Il existe deux types de lubrifiants : externes et internes. Les lubrifiants externes limitent l'adhérence et réduisent les frottements du PVC contre les parois métalliques de l'outil de mise en œuvre. Ils facilitent ainsi l'écoulement du PVC sur le métal chaud et évitent sa décomposition. Des paraffines et des cires de polyéthylène, incompatibles avec le PVC, sont ainsi introduites pour faciliter le glissement. De plus, afin de limiter les interactions intermoléculaires au sein du PVC lors de sa transformation qui peuvent engendrer une dégradation thermique, des dérivés d'alcool et d'ester d'acides gras, souvent l'acide

stéarique, sont utilisés comme lubrifiants internes. Ces derniers sont compatibles avec le polymère afin de limiter leur risque de migration.

IV.5- Mise en œuvre

Dans le cas du PVC, le comportement des matériaux mis en œuvre est dominé par des problèmes de rhéologie des polymères fondus et de gélification. De plus, la température de transition vitreuse T_g (voisine de 80°C pour le PVC non plastifié) et la température de décomposition thermique (très variable suivant les formulations et les conditions opératoires), interviennent directement. La gélification est une prise en masse et une homogénéisation sous une forme donnée de la matière transformée. La cohésion qui caractérise la gélification est assurée par l'enchevêtrement et la polarité des chaînes. De la même façon, il faut signaler que la technique des poudres, qui est applicable à un certain nombre de matières thermoplastiques, peut être utilisée avec le PVC plus ou moins plastifié, sous forme d'une pâte appelée plastisol [28].

IV.6- Propriétés du PVC

IV.6.1- Propriétés électriques

IV.6.1.a-Cas général

Les propriétés diélectriques varient avec le taux de plastifiant.

Tableau IV.1 : Caractéristiques pour un PVC peu plastifié et un PVC très plastifié [50].

PVC	Résistivité transversale ρ_t (Ω /cm)	Rigidité diélectrique E (kV/mm)	Permittivité relative ϵ_r	Tangente δ (* 10^{-4})
Rigide	10^{15} à 10^{17}	16 à 20	3,5 à 4	70 à 400
Souple	10^{11} à 10^{15}	10 à 40	5 à 9	800 à 1500

On remarque que le PVC présente des valeurs de permittivité relative et de tangente δ relativement élevées pour un isolant. A titre de comparaison le polyéthylène moyenne densité a une valeur de permittivité relative compris entre 2,25 et 2,35 et une tangente δ compris entre 10^{-14} et 10^{-4} (à 50 Hz). Pour ces raisons, l'utilisation du PVC comme matériaux d'isolation a rapidement été restreinte à des câbles basses et moyennes tensions (jusqu'à 10 kV) alors que l'utilisation de polyéthylène réticulé a été généralisée pour les câbles hautes tensions.

IV.6.1.b- Cas des câbles électriques

Application aux câbles électriques et spécification des valeurs des références EDF P&D :

❖ Constante d'isolement K_i :

La résistance d'isolement R d'un câble est déterminée à partir de la mesure du courant lorsque on applique une tension continue à un échantillon. L'appareil utilisé est un mégohmmètre qui indique directement la valeur R permettant ensuite de remonter à la résistivité ρ du câble puis à la constante d'isolement K_i , paramètre utilisé comme référence dans les spécifications et cahiers des charges des câbles.

A partir de la valeur de la résistance d'isolement R mesuré, la résistivité volumique et la constante d'isolement K_i sont calculés de la manière suivante :

$$\rho = \frac{2\pi l R}{\text{Log} \frac{D}{d}} \quad \text{IV. 1}$$

$$K_i = \frac{l \cdot R \cdot 10^{11}}{\text{Log} \frac{D}{d}} = \frac{\text{Ln} 10}{2\pi} \cdot \rho \cdot 10^{-11} = \rho \cdot 0.367 \quad \text{IV. 2}$$

avec :

ρ : Résistivité volumique en $\Omega \cdot \text{cm}$.

l : Longueur du conducteur, en cm

D : Diamètre extérieure d'enveloppe isolante, en mm

d : Diamètre intérieur de l'enveloppe isolante en mm

R : Résistance d'isolement, en Ω .

K_i : Constante d'isolement, en $M\Omega \cdot \text{km}$.

Les valeurs référence de K_i définies pour le type de câble étudié sont les suivantes [50]:

$K_i \geq 3000 M\Omega \cdot \text{km}$ à 20°C .

$K_i \geq 20 M\Omega \cdot \text{km}$ à 60°C .

$K_i \geq 1,5 M\Omega \cdot \text{km}$ à 80°C .

IV.6.2-Propriétés physiques

Le PVC est un polymère atactique, donc essentiellement amorphe, mais il arrive que, localement, sur des courts segments de chaînes, le PVC soit syndiotactique et puisse s'organiser en phase cristalline, bien que le taux de cristallinité ne dépasse pas les 10 à 15%.

La masse volumique est de $1,38 \text{ g/cm}^3$. Le PVC amorphe est transparent et relativement perméable à la vapeur d'eau [28].

IV.6.3- Propriétés mécaniques

Elles sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Propriétés mécaniques du PVC [28].

Propriétés	Unité	PVC rigide	PVC souple
Masse volumique	g/cm^3	1.38	1.3-1.7
Contrainte à la rupture	MPa	50	10-20
Allongement à la rupture	%	10-50	200 à 500
Résistance à la flexion	MPa	70-80	-
Module de traction	MPa	2400	-
Module de flexion	MPa	2000	-
Résilience	J/m	50-200	-

IV.6.4- Propriétés chimiques

IV.6.4.a-Résistance aux agents chimiques

Le PVC non plastifié possède une résistance remarquable à bon nombre de produits chimiques, une gamme étendue d'application où cette qualité revêt une importance primordiale. Par contre, le PVC plastifié est sensible à certains solvants organiques (aromatiques, cétoniques et chlorés) [4].

IV.6.4.b- Tenue à la lumière (Résistance photochimique)

Compte tenu des précautions spéciales prises au stade de la formulation qu'à celui de la transformation, les compositions à base de PVC présente une bonne tenue au vieillissement naturel, qui peut être améliorée par l'addition d'agents de protection anti-UV et le choix de colorants ou pigments sélectionnés en vue d'utilisations particulières [4].

IV.6.5- Propriétés thermiques

La température de transition vitreuse est élevée, elle se situe entre 75 à 80°C . A température ambiante, le PVC devient rigide et au dessus de 90°C , il devient caoutchouteux

(faible résistance, grande déformation), ce qui le rend impropre à de nombreuses applications sans l'addition de plastifiants. L'incorporation de ces derniers permet de réduire la température de transition vitreuse : -10 à -5°C [16].

IV.6.6- Propriétés dimensionnelles

Le PVC présente une bonne stabilité dimensionnelle et un retrait limité dû à sa structure amorphe.

IV.7- Applications

Bien que son utilisation soit contestée, comme c'est le cas de toutes les substances halogénées, le poly (chlorure de vinyle) connaît encore un taux d'expansion élevé. Dans sa forme rigide, il est très utilisé pour la fabrication de tuyauteries, aisément assemblées au moyen d'un collodion dans le tétrahydrofurane. Cette application est liée à son faible cout, son inertie chimique et sa très bonne résistance au vieillissement à la température ambiante. Il est aussi très utilisé pour l'emballage alimentaire [6].

Depuis quelques décennies, le PVC trouve de nombreuses applications dans le bâtiment (huisseries) ou il apporte son caractère ignifuge. Les fibres de PVC obtenues par filage à sec à partir de collodions dans le tétrahydrofurane, servent à faire des tissus d'ameublement imputrescibles et auto-ignifuges [13].

Le PVC est utilisé dans les installations électriques nécessitant une protection élevée contre les risques d'incendie (centrales thermiques et nucléaires par exemple), contre les hydrocarbures aliphatiques et les agents chimiques, ainsi dans les équipements électriques de navires et de voitures, et également exploité pour l'alimentation d'appareils électroménagers et de moteurs moyenne tension [16].

Le PVC est utilisé comme gaine et comme isolant de câbles d'énergie électrique [6].

Chapitre V
Techniques expérimentales

V.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents essais expérimentaux réalisés en vue de l'étude de l'influence du vieillissement climatique sur les propriétés électriques (rigidité diélectrique, résistivité transversale et superficielle), mécaniques (allongement à la rupture, et résistance à la traction) et physiques (perte de masse, et changement de couleur) du polychlorure de vinyle PVC utilisé comme gaine de câble. Ces essais ont été effectués à l'entreprise électro industrie, Azazga.

V.2- Préparation des échantillons

Le matériau utilisé est le polychlorure de vinyle connu sous nom de PVC, destiné à la fabrication des câbles électriques moyenne tension (6/10 kV). Les plaques utilisées pour nos expériences ont été prélevées directement du câble au laboratoire de l'entreprise CABEL de Gué de Constantine (Alger), spécialisée dans la fabrication des câbles électriques.

Pour nos essais, nos plaques ont été découpées en :

- éprouvettes de forme carrée de 8,5 cm de côté pour la mesure des propriétés électriques (figure V.1).
- éprouvettes de forme haltère de longueur de 5 cm pour les mesures des propriétés mécaniques et physiques (figure V.2).



Figure V.1. Epreuve sous forme carrée utilisé pour les essais électriques



Figure V.2. Eprouvette sous forme d'haltère utilisée pour les essais mécaniques et la perte de masse.

Les essais ont été effectués une fois par 14 jours (336 h). Pour chaque point de mesure (prélèvement), le nombre d'échantillons soumis aux essais est de 3 pour les essais électriques et 5 pour les essais mécaniques et perte de masse.

V.3- Expositions des échantillons pour vieillissement climatique

Le vieillissement climatique des polymères est un processus très complexe et influencé par plusieurs éléments ; l'humidité, la pluie, les polluants atmosphériques, la température et l'énergie solaire. Ces deux derniers sont classés parmi les facteurs importants au cours de vieillissement climatique.

Les échantillons de poly chlorure de vinyle PVC sont bien fixés sur une plaque de contreplaqué. Cette dernière est montée sur un panneau métallique d'exposition, placé à 85 cm au-dessus du sol, inclinée à 30° par rapport à l'horizontale et orientée vers le plein sud (figure V.3). Les échantillons n'ont été soumis à aucune précontrainte. L'exposition a duré du mois d'Avril jusqu'au mois de Juillet 2019.



Figure V.3. Exposition des échantillons au vieillissement climatique.

V.4- Dispositif expérimentaux

V.4.1- Conditionnement des échantillons

Avant les tests de mesure, les éprouvettes ont été nettoyées puis conditionnées pendant au moins 24h dans un dessiccateur (figure V.4) contenant du gel de silicone régénéré afin d'éliminer toute présence d'humidité [12].



Figure V.4. Conditionnement des échantillons

V.4.2- Mesure de la rigidité diélectrique

L'éprouvette est placée entre deux électrodes planes. Afin d'éviter les contournements, l'ensemble (échantillon système d'électrodes) a été immergé dans une huile minérale isolante (BORAK 22). L'essai consiste à soumettre l'échantillon considéré à une rampe de tension de vitesse 2,5 kV/s jusqu'au claquage. Pour mesurer l'épaisseur des échantillons, nous avons utilisé un comparateur mécanique à cadran avec cours normale présenté à la figure V.5. Il présente une précision de l'ordre de 10^{-2} mm. Cette mesure est effectuée en trois points autour du point de claquage et l'épaisseur retenue a été calculée comme la moyenne arithmétique des trois mesures.

La rigidité diélectrique a été calculée comme étant le rapport de la tension de perforation et de l'épaisseur, elle est exprimée par la relation suivante :

$$E = \frac{U_d}{e} \quad (V.1)$$

avec U_d : tension de claquage (kV).

e : épaisseur de l'éprouvette au point de claquage en mm.

La tension a été délivrée par un générateur de haute tension présenté de la figure V.6

Cette opération a été faite pour toutes les éprouvettes testées à différents temps de vieillissement.



Figure V.5. Comparateur mécanique.



Figure V.6. Générateur de haute tension

V.4.3- Résistivité transversale et superficielle

La résistivité a été mesurée à l'aide d'un Téraohmètre équipé d'une électrode de garde. Les essais ont été effectués sous une tension continue de 500 V. La durée d'application de la tension est de 1 mn, et ceci dans le but d'avoir une position stable de l'aiguille du Téraohmètre.

Pour mesurer la résistivité transversale d'une éprouvette, il fallait s'affranchir du courant superficiel. Pour y parvenir, on utilise une troisième électrode appelée électrode de garde qui dérive à la terre les courants superficiels (figure V.7). La figure V.7-a montre la connexion à réaliser avec les trois électrodes pour mesurer la résistance transversale. L'électrode de garde a pour rôle d'écouler tous les courants ne passant pas directement entre l'électrode haute tension et l'électrode de mesure. La figure V.7-b montre la connexion à réaliser avec ces mêmes électrodes pour effectuer une mesure de résistance superficielle.

Ensuite on détermine la résistivité transversale et superficielle à l'aide des relations suivantes :

$$\rho_t = R_t * \frac{S}{e} \quad (V.2)$$

et

$$\rho_s = R_s * \frac{P}{h} \quad (V.3)$$

avec :

ρ_t : Résistivité transversale de l'éprouvette en $\Omega.cm$

R_t : Résistance transversale en Ω .

S : Surface de l'éprouvette, elle est donné par :

$$S = \pi * \frac{(d + h)^2}{4} \quad (V.4)$$

d : Diamètre de l'électrode gardé.

h : Distance entre électrode gardée et l'anneau de garde.

e : Epaisseur de l'éprouvette.

ρ_s : Résistivité superficielle.

$P = \pi(d + h)$

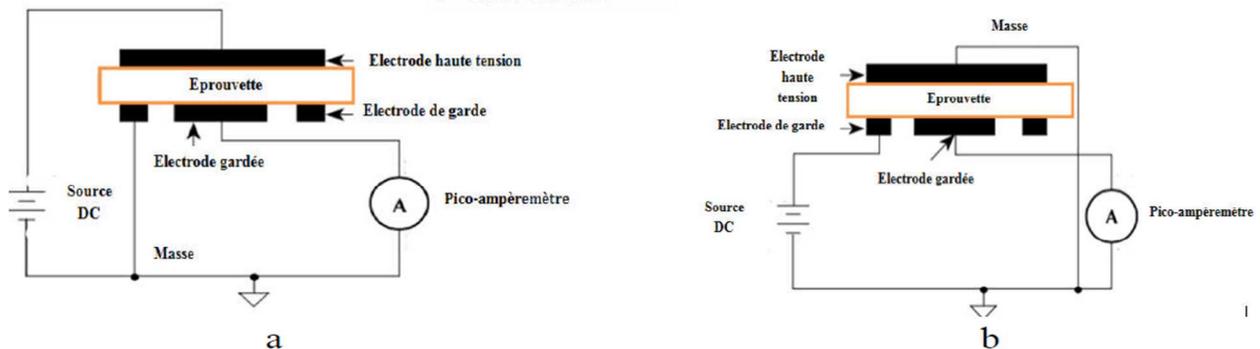


Figure V.7. Connexion de basse des électrodes pour la mesure de la résistivité transversale et de la résistivité superficielle [1].

V.4.4- Résistance à la traction et allongement à la rupture

Les essais mécaniques ont été réalisés avec un dynamomètre à une vitesse d'écartement de 150 mm/mn à la température ambiante de 22°C.

Avant les essais, nous avons tracé deux repères distants de 10 mm sur la partie étroite de l'éprouvette, ensuite on a mesuré l'épaisseur en trois points de la partie traçante ainsi la largeur

afin de calculer la section droite sachant qu'elle est mesurée comme le produit de l'épaisseur et la largeur. En effet sur cette partie se produit la rupture.

Des dispositifs adaptés à la machine permettent de mesurer à chaque essai l'effort de traction et l'allongement de l'éprouvette, il est exprimé en % et calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$A\% = \frac{L - L_0}{L_0} * 100 \quad (V.5)$$

avec L_0 : Longueur initiale entre les deux repères tracés avant rupture de l'éprouvette.

L : Longueur mesurée entre les deux repères après rupture de l'éprouvette.

La résistance à la traction a été calculée comme le rapport de la force et la section de l'éprouvette. L'épaisseur et la largeur retenue ont été mesurées comme la moyenne arithmétique des trois mesures prêtes pour chacune. Elle est déterminée selon l'équation ci-dessous :

$$R_t = \frac{F}{S} \quad (V.6)$$

R_t : La résistance à la traction en N/mm^2 .

F : La Force de traction en N.

S : La section droite de l'éprouvette en mm^2 .



Figure V.8. Machine de traction

V.4.5- Perte de masse

La perte de masse est basée sur la pesée des échantillons. Cette dernière a été réalisée à l'aide d'une balance analytique avec une précision 10^{-4} mg. Cette masse rapportée à la masse initiale de l'échantillon avant le vieillissement permet d'obtenir un pourcentage de perte de masse de l'échantillon, elle est calculée selon l'équation suivante :

$$\frac{\Delta m_x}{m} (\%) = \frac{m_0 - m_x}{m_0} * 100 \quad (V.7)$$

avec m_0 : La masse initiale en mg.

m_x : La masse en mg après vieillissement.

V.4.6- Changement de couleur

La couleur est pour de nombreux plastiques, une caractéristique importante, elle évolue dans le temps par action du vieillissement.

Dans nos essais, nous avons surveillé les échantillons au cours du vieillissement et pris des photographies à chaque prélèvement. Un examen visuel comparatif est effectué après chaque prélèvement.

Chapitre VI
Résultats et discussions

VI.1- Introduction :

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus des divers essais effectués sur des éprouvettes du PVC soumises au vieillissement climatique. Ainsi, on essaiera de donner quelques interprétations possibles de ces résultats.

VI.2- Mise on œuvre du vieillissement climatique

Le vieillissement climatique a été effectuée sur le site de Makouda (Tizi-ouzou). Cette ville est située au nord de Tizi-ouzou au nord de l'Algérie. Cette ville se situe à 500 m d'altitude par rapport au niveau de la mer.

Le climat de Makouda est dit tempéré chaud. La température annuelle moyenne est de 16,7°C, il tombe au moyenne 1012 mm de pluie par an. Aout est le mois le plus chaud de l'année ; la température maximale moyenne dans la journée est de 31,7°C et la température minimale moyenne dans la nuit est de 20,9°C.

Pour notre travail, les éprouvettes ont été exposées pendant une durée de 3 mois et demi environ (2012 h) : de Avril à Juillet dans les conditions climatiques suivantes :

Tableau VI.1 : Conditions climatiques d'exposition

Mois	Avril	Mai	Juin	Juillet
Humidité (%)	74,5	68,58	52,53	49.4
Température maximale (°C)	20,87	24 ,58	29,4	32.4
Température minimale (°C)	7,12	8 ,35	14 ,53	18.7

VI.3- Influence du vieillissement climatique sur les propriétés électriques

VI.3.1- Résistivité transversale

La figure VI.1 représente l'évolution de la résistivité transversale en fonction de la durée du vieillissement.

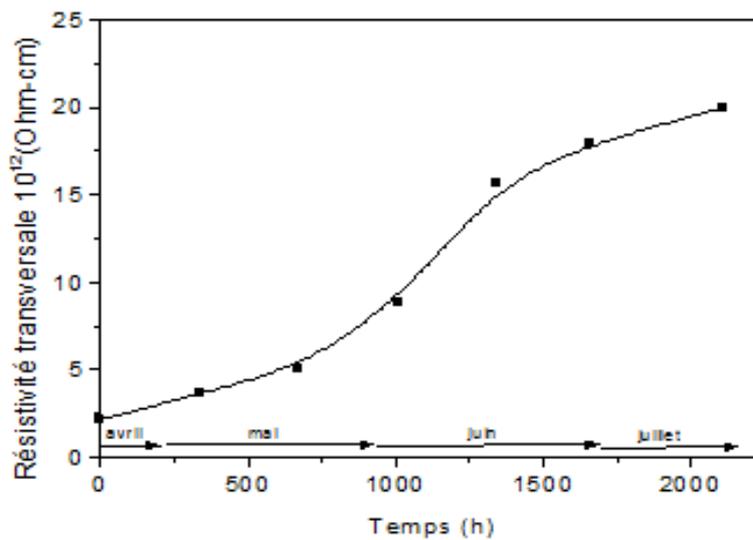


Fig.VI.1. Evolution de la résistivité transversale en fonction du temps d'exposition au vieillissement climatique.

La courbe montre une augmentation d'une valeur de $2,13.10^{12} \Omega\text{-cm}$ à l'état initiale à une valeur de $20.10^{12} \Omega\text{-cm}$ à la fin de vieillissement c'est-à-dire à 2112 h.

Si nous analysons les résultats obtenus (figure IV.2), on constate que l'augmentation de la caractéristique se fait selon trois phases avec différentes vitesses.

La vitesse d'augmentation est donnée par l'expression suivante

$$V = \frac{\Delta\rho_t}{\Delta t} \quad \text{VI.1}$$

avec :

$\Delta\rho_t$: variation de la résistivité transversale.

Δt : variation du temps de vieillissement.

Nous résumons les résultats obtenus dans le tableau suivant

Tableau VI.1 : Vitesse des différents paliers de la résistivité transversale

Phase	1	2	3
Intervalle de temps du vieillissement (h)	0-672	672-1344	1344-2112
Vitesse de d'évolution (10^9) Ω . /h	4,37	15,71	6,75

L'augmentation de cette caractéristique peut s'expliquer par l'amélioration de la qualité de l'isolant [15], ainsi qu'au piégeage des porteurs de charge au sein du polymère [16].

VI.3.2- Résistivité superficielle

La figure VI.2 représente la variation de la résistivité superficielle en fonction du temps de vieillissement.

La courbe montre une augmentation de la caractéristique. Au bout de 672 h, elle passe de $3,34 \cdot 10^{12} \Omega$ à $20 \cdot 10^{12} \Omega$. Après cette période on remarque une augmentation plus rapide de cette caractéristique pour atteindre $118,9 \cdot 10^{12} \Omega$ à la fin du vieillissement.

Les divers facteurs modifiant la résistivité transversale ont un effet analogie sur la résistivité superficielle, en particulier, l'humidité et les vapeurs diverses susceptibles de s'adsorber à la surface du polymère jouant un rôle prépondérant [29].

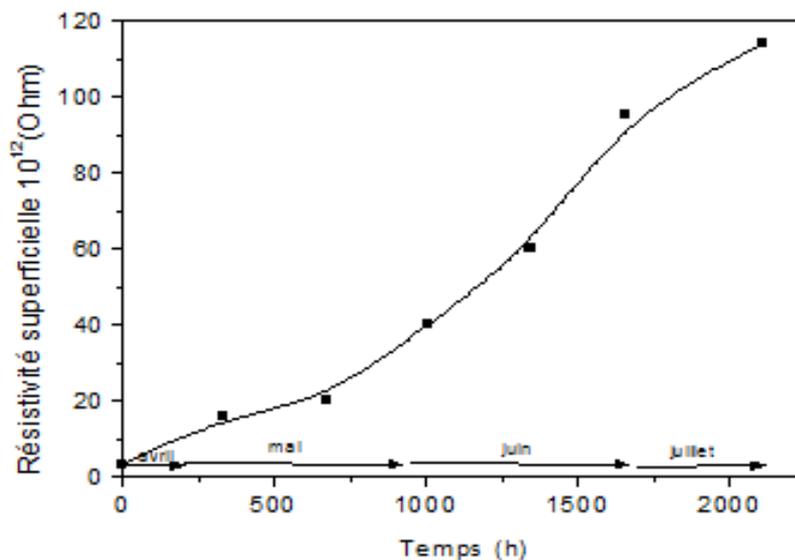


Fig.VI.2. Variation de la résistivité superficielle en fonction du temps d'exposition.

IV.3.3- Rigidité diélectrique

La figure VI.3 représente l'évolution de la rigidité diélectrique en fonction de la durée du vieillissement.

Comme on peut remarquer sur la figure, la variation de cette caractéristique est légère. Au bout de 2112 h environ, elle passe de 17,66 kV/mm à 19,2 kV /mm. En général, la rigidité diélectrique n'a pas été affectée par le vieillissement.

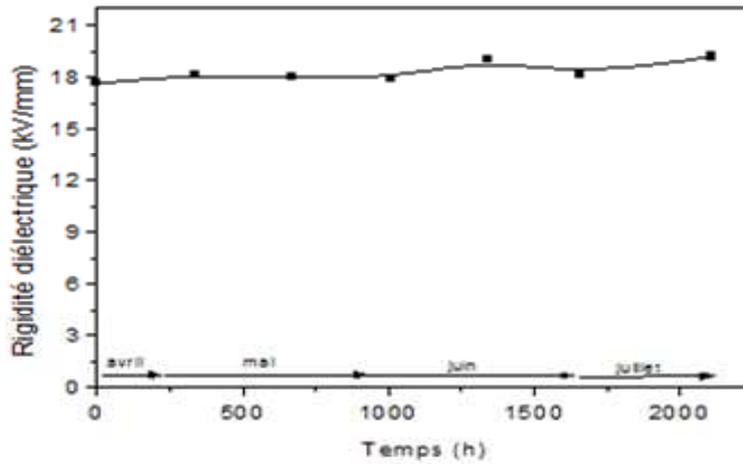


Fig. VI.3. Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps d'exposition

VI.4- Influence du vieillissement climatique sur les propriétés mécaniques

VI.4.1- Résistance à la traction

La figure VI.4 montre l'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps de vieillissement.

La courbe montre une légère diminution de la caractéristique au bout de 1008 h, elle passe de 17,89 N/mm² à 16,35 N/mm², après cette période des fluctuations sont observées jusqu'à la fin du vieillissement c'est à dire à 2112 h.

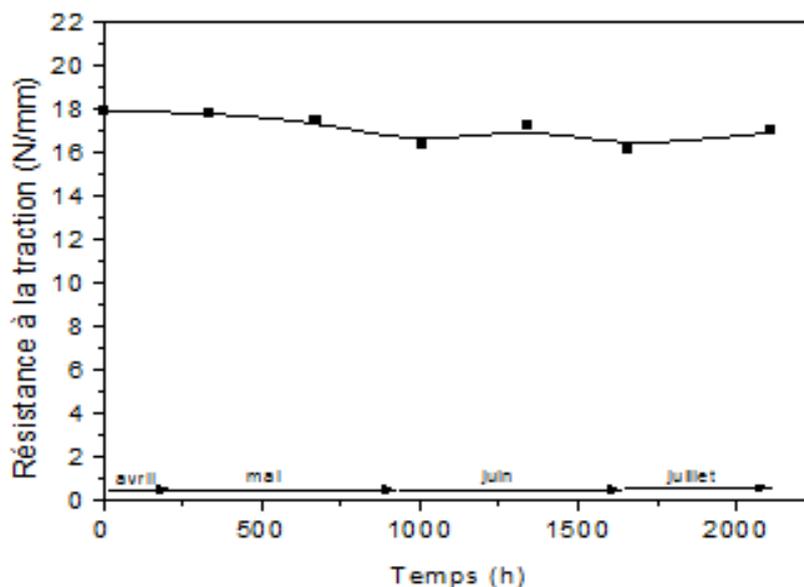


Fig. VI.4. Variation de la résistance à la traction en fonction du temps d'exposition.

La diminution de cette caractéristique est due probablement aux coupures de chaînes [15].

VI.4.2- Allongement à la rupture

La figure ci-dessous montre la variation de l'allongement à la rupture en fonction du temps de vieillissement.

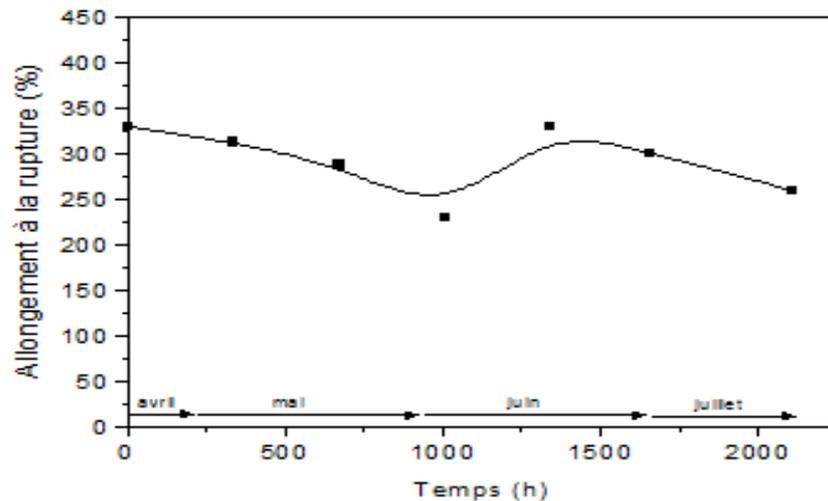


Fig.VI.5. Variation de l'allongement à la rupture en fonction du temps d'exposition

Pendant les 672 h de vieillissement, l'allongement à la rupture diminue de 330% à 287,8%, ensuite il augmente à 330% à 1344 h puis diminue de nouveau à 260% après un vieillissement de 2112 h.

La diminution de l'allongement à la rupture est due probablement à une rupture de chaînes carbonées du matériau [15] et à une perte de plastifiants [30].

VI.5- Influence du vieillissement climatique sur les propriétés physiques

VI.5.1- Perte de masse

La figure (VI.6) représente l'évolution de la perte de masse en fonction de la durée du vieillissement.

La courbe montre clairement une augmentation de la perte de masse, elle passe de 0 avant l'exposition à 0,103% à la fin du vieillissement.

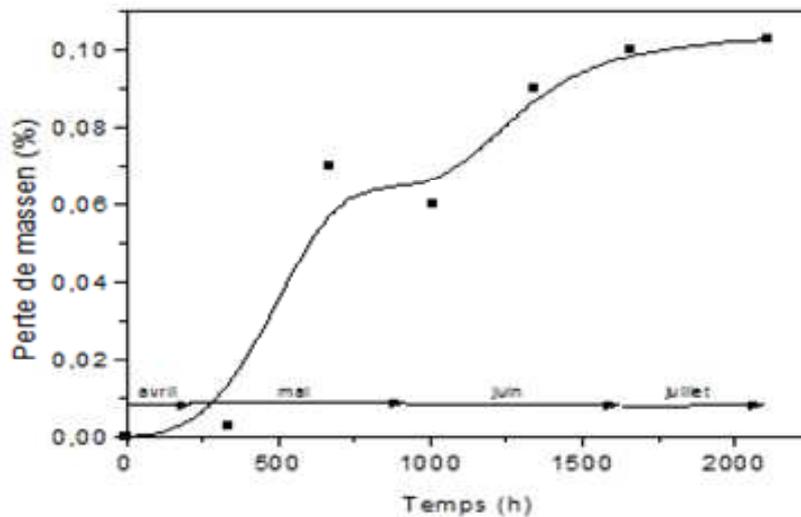


Fig. VI.6. Variation de la perte de masse en fonction du temps d'exposition

Si nous analysons les résultats obtenus (figure VI.6) du point de vue quantitatif, on constate que la dégradation se fait selon quatre phases avec différentes vitesses.

La vitesse de dégradation est donnée par l'expression suivante :

$$V = \frac{1}{m} * \frac{dm}{dt} \quad \text{VI.2}$$

avec :

m : masse de l'échantillon.

dm : variation de la masse.

dt : variation du temps de vieillissement.

Nous résumons les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Tableau VI.2. Vitesse des différents paliers de perte de masse

Phase	1	2	3	4
Intervalle de temps de vieillissement (h)	0- 672	672-1008	1008-1344	1344-2112
Variation de perte de masse (%)	0,07	0,02	0,008	0,002
Vitesse de dégradation ($10^{-3}h^{-1}$)	0,1	0,03	0,02	0,005

Nous pouvons expliquer cette perte de masse par le fait que l'huile utilisée comme plastifiant est une huile de faible viscosité, donc très volatile [15]. Elle est due en général à l'évaporation des produits volatiles.

VI.5.2- Changement de couleur

Nous présentons à la figure VI.7 des photographies montrant le changement de couleur apparu au cours du vieillissement.

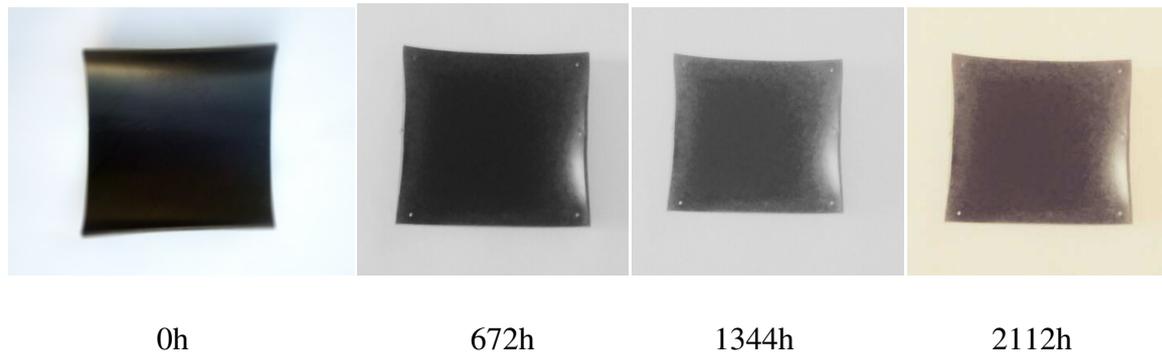


Fig.VI.7. Changement de couleur apparu au cours du vieillissement.

Avant vieillissement, les éprouvettes avaient une couleur noir. Pour des temps plus longs, la couleur noir devient marron.

Ce changement de couleur serait probablement dû à la dépolymérisation du matériau [30].

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail a été réalisé dans le but d'étudier l'évolution des propriétés électriques, mécaniques et physiques du polychlorure de vinyle (PVC) utilisé comme gaine des câbles électriques moyenne tension en fonction du vieillissement climatique.

D'après les résultats obtenus on conclut que :

La rigidité diélectrique n'a pas été affectée par les contraintes climatiques, par contre, pour la résistivité transversale et superficielle, nous avons remarqué une augmentation de ces propriétés en fonction du temps de vieillissement. Ceci est dû à l'amélioration de la qualité de l'isolant du au phénomène de réticulation. L'augmentation de la résistivité transversale est caractérisée par l'existence de trois phases de vitesses dont la deuxième est la plus importante.

Le comportement mécanique nous montre que la résistance à la traction et l'allongement à la rupture du PVC présentaient des variations, vu qu'on a constaté une diminution et une augmentation au cours du vieillissement. Cela est dû probablement aux coupures des chaînes et à la réticulation.

La dégradation du matériau a été aussi mise en évidence par l'étude de la perte de masse. La dégradation est caractérisée par la présence de quatre phases à des vitesses différentes dont la première est la plus importante. Cette perte de masse est due à l'évaporation des produits volatiles constituant le matériau.

Un changement de couleur du matériau a été remarqué. Il revient au phénomène d'oxydation et à la dépolymérisation du matériau. Après un vieillissement à long terme, la couleur du matériau devient marron. Tous ces signes sont des conséquences de la dégradation de matériau.

En résumé, le vieillissement naturel caractérisé par l'association de nombreux éléments tels que la poussière, la pollution atmosphérique, l'effet des UV, l'eau, la succession des cycles jour/nuit et les saisons sèche et humide favorise l'accélération de la dégradation de l'isolant.

Le temps d'exposition réalisé à été court mais comme même a causé une légère dégradation du matériau. Pour avoir une dégradation conséquente, ces travaux peuvent durer plusieurs années.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] K. BOUALI, F. BENMEDJBER, « *Étude et réalisation d'une cellule de mesure de résistivité de polymère isolant* », Mémoire de Master en Electrotechnique, UMMTO, 2015.
- [2] Y. CHIBANI, B. BADJA, « *Effet du vieillissement thermique sur les caractéristiques du polyéthylène basse densité (PEBD)* », Mémoire de Master en Electrotechnique, UMMTO, 2018.
- [3] I. MEKACHER, « *Vieillissement thermique des Gaines PE et PVC des Câbles électriques* », Thèse de Doctorat en Mécanique-Matériaux, Institut Des Sciences Et Technologie Paris, 2012.
- [4] R. ATROUS , R. NACER, « *Développement d'un mélange à base d'une résine PVC de propriétés mécaniques ,thermiques, et économiques capables de remplacer le mélange standard utilisé pour le gainage au niveau de L'NICAB de Biskra* », Mémoire de Master En Génie des Procédés, Université Mohamed Khidar Biskra, 2013.
- [5] A. METHIA, M-A. REZZOUG, « *Etude de la diffusion de l'arganoxe de 1076 dans un polymère recyclé à Base de PEHD* », Mémoire de Master en Génie des Procédés, Université ABDERRAHMANE MIRA de Béjaïa , 2017.
- [6] M-E. MEGUIRECHE, « *Influence du vieillissement électrique sur les propriétés d'un polymère isolant utilisé dans le transport d'énergie électrique* », Mémoire de Master en Electrothechnique, Université De Mohamed Boudiaf – M'SILA, 2016.
- [7] D. ABID, « *Caractérisation des polymères par la méthode des courants thermiquement stimulés* », Mémoire de Magistère En Electrotechnique, Université Mohamed BOUDIAF d'Oran, 2010.
- [8] J. C. DUBOIS, « *Propriétés diélectriques des polymères* », Technique de l'ingénieur, E1850 ,1998 .
- [9] C. MENGUY, « *Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides* », Techniques de l'ingénieur, d 2310, 1997.
- [10] Z. DJENAN, « *Etude du mélange PVC/PS obtenus par malaxage et extrusion par analyse thermogravimétrique (ATG, ATGD)* », Mémoire de Master En Génie Des Procédés, Université Mohamed Khidar Biskra, 2015.
- [11] M. O. BENSAID, « *Etude des polymères par dynamique moléculaire* », Thèse de Doctorat En Physique, Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2015.
- [12] N. AZZI, « *Effet du vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du polyméthacrylate de méthyle* », Mémoire Magister en Electrotechnique, UMMTO, 2017.

- [13] H. BOULAHIA, « Etude du comportement physico-mécanique de nouveaux bio-composites poudre de liège-PVC », Thèse de doctorat, Université Mohamed BOUGARA Boumerdes, 2016.
- [14] F. Slimani, « Vieillissement hygrothermique du papier presspain », Mémoire de Magistère En Electrotechnique , Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2010.
- [15] D. BOUGUEDAD, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, UMMTO, 2010.
- [16] F. NAMANI, « Effet de l'humidité sur les propriétés diélectriques du polychlorure de vinyle utilisé dans l'isolation des câbles haute tension », Mémoire de Magistère En Electrotechnique, UMMTO, 2010.
- [17] B. PINEL, « Fonction isolation dans les matériels diélectriques », Technique de l'ingénieur, d2302 ,1999 .
- [18] P. RAIN, I. ROYAUD, « Étude de la dégradation de la fonction isolation de câbles HT isolés au PVC », Thèse de Doctorat en Electrochimie, Université de GRENOBLE, 2014.
- [19] M. PAYS, « Réseaux électriques et applications dans l'univers énergie », Techniques de l'ingénieur, d4520, 1994.
- [20] A. SAYAH, « Analyse des traitement d'eau », Thèse de Doctorat en Electrotechnique ; Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2017.
- [21] M. LABROUSSE, « Plastiques - Essais normalisés - Essais d'environnement », Techniques de l'ingénieur, A3521, 1996.
- [22] C. LECLERQ, « Essais d'environnement », Techniques de l'ingénieur, D2050, 1994.
- [23] J. L. GARDETTE, « Caractérisation des polymères par spectrométrie optique », Technique de l'ingénieur, AM3271, 1998.
- [24] J. VERDU, « Action de l'eau sur les plastiques », Techniques de l'ingénieur, AM3165, 2000.
- [25] A.FAVER, « Caractérisation de l'effet du vieillissement en milieu aqueux sur les propriétés mécanique de composites à matrice élastomères », Mémoire Maitrise en sciences appliquées Génie Mécanique, Ecole Polytechnique de MONTREAL, 2013.
- [26] M. LABROSSE, « Essais physico-chimiques normalisés des produits semi-finis » Technique de l'ingénieur, A3522, 1986.
- [27] C. LECLERQ, « Essais d'environnement des composants et matériels » Techniques de l'ingénieur, E3957, 1996.
- [28] S. MAOU, « Etude des propriété thermiques de mélange de PVC et PVC-PEHD et le phénomène de dégradation », Mémoire de Magistère En Chimie Des Matériaux, Université Kasdi Mrebah Ouargla, 2012.

- [29] J. C. DUBOIS, « Propriétés diélectriques des plastiques » Technique de l'ingénieur, AM3140, 2001.
- [30] K. HELLAL, O. IDDIR, « Influence du vieillissement climatique sur les propriétés de l'EPDM utilisé dans l'isolation des câbles MT » Mémoire de Master en Electrotechnique, UMMTO, 2017.

Résumé :

Notre travail a été réalisé dans le but d'étudier l'évolution des propriétés électriques (rigidité diélectrique, résistivité transversale et superficielle), propriétés mécaniques (résistance à la traction et l'allongement à la rupture), et propriétés physiques (perte de masse et changement de couleur) du polychlorure de vinyle (PVC) utilisé comme gaine des câbles électriques moyenne tension en fonction du vieillissement climatique.

Le vieillissement naturel est caractérisé par l'association de nombreux facteurs tels que la poussière, la pollution atmosphérique, les UV, l'eau, la succession des cycles jour/nuit et les saisons sèche et humide.

Le temps d'exposition réalisé (88 jours) a été court mais a causé comme même une légère dégradation du matériau. Pour avoir une dégradation conséquente, il est souhaitable d'augmenter le temps d'exposition .

Mots clés :

Vieillessement climatique, PVC, résistivité transversale, résistivité superficiel, résistance à la traction, allongement à la rupture, pertes de masse, changement de couleur.

Abstract:

The aim of this work is to study the evolution of electrical properties (dielectric strength, transverse and surface resistivity), mechanical properties (tensile strength and elongation at break) and physical properties (loss of mass and color change) of polyvinyl chloride (PVC) used as sheath of medium voltage electric cables according to climatic aging.

Natural aging is characterized by the association of many factors such as dust, atmospheric pollution, UV rays, water, the succession of day / night cycles and dry / wet seasons.

The exposure time achieved (88 days) was short but even caused slight degradation of the material. To have a consequent degradation, it is desirable to increase the exposure time.

Key words:

Climate aging, PVC, transverse resistivity, surface resistivity, tensile strength, elongation at break, mass losses, color change.