

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene**

**Thèse présentée pour l'obtention du grade de MAGISTER**

**En : CHIMIE INDUSTRIELLE**

**Spécialité : Procédés Chimiques et Environnement**

**Par : LASSAS Boualem**

**Sujet :**

**INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT  
THERMIQUE ET CHIMIQUE SUR  
LES PROPRIETES DU PVC UTILISE  
DANS UN MELANGE DE GAINAGE  
POUR CABLES ELECTRIQUES**

Soutenue le 20 juin 2002 devant le jury composé de :

F. BENTAHAR	Professeur	Présidente
R. MAACHIR	Professeur	Directrice de Thèse
Z. SADAoui	Maître de Conférence	Examinatrice
M. BELKACEM	Maître de Conférence	Examineur
R. KHAILI	Chef de Département (Cabel)	Invité

## **REMERCIEMENTS**

*Je suis très sensible à l'honneur que me fait Madame Maachi ; professeur et Directrice de l'institut de chimie industrielle à l'université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, qui a bien voulu accepter d'être mon professeur de suivi pour la préparation de ma thèse de magister.*

*Je tiens à exprimer ma plus vive reconnaissance à ma femme ; chef de service laboratoire à la câblerie d'Alger.*

*Au terme de ce modeste travail, je tiens à exprimer mes remerciements à Madame la présidente et à tous les membres de jury.*

*J'associe à mes remerciements Monsieur Tebbal ; Benziada ; ainsi que tout le personnel de laboratoire assurance qualité pour leur disponibilité et leur compétence.*

*Mes remerciements vont également à tous mes amis pour leur soutien et leur aide et je leur souhaite une bonne réussite dans tous les domaines.*

*Par ces simples mots, qui ne peuvent en aucun cas, exprimer fidèlement ma profonde gratitude aux gens à qui il s'adressent, je viens remercier tous ceux qui, de loin comme de près ont participé à ma formation et à l'élaboration de ce travail.*

---

# **NOMENCLATURE**

**F** : .....la force de traction à la rupture [N]

**S<sub>0</sub>** : .....la section transversale de l'éprouvette [mm<sup>2</sup>]

**L** : .....longueur finale de la partie calibrée de l'éprouvette [mm]

**L<sub>0</sub>** : .....longueur initiale de la partie calibrée de l'éprouvette [mm]

**e** : .....L'épaisseur de l'éprouvette [mm]

**E** : .....Energie d'activation du phénomène

**R** : .....Constante des gaz parfaits

**V<sub>0</sub>** : .....Constante

**T** : .....Température absolue[°K].

**A, B** : .....Constantes caractéristiques du polymère

**T** : .....Température absolue[°K].

**D** : .....déformation

**C** : .....facteurs chimiques

**S** : .....facteur structure

**Pa** : .....facteurs physiques ambiants

**t** : .....le temps [heure]

# Sommaire

# SOMMAIRE

## Partie théorique

### **Introduction**

<b>Chapitre. I</b>	<b>Matières plastiques</b>
<i>I.1 Généralités sur les polymères</i>	<b>10</b>
<i>I.1.a la polymérisation</i>	<b>10</b>
<i>I.1.b la polycondensation</i>	<b>11</b>
<i>I.1.1 Matières thermoplastiques</i>	<b>11</b>
<i>I.1.2 Matières thermodurcissables</i>	<b>12</b>
<i>I.1.3 Les plastiques techniques</i>	<b>12</b>
<i>I.2 Modes de fabrication schématiques des principaux</i>	
<i>Thermoplastiques</i>	<b>12</b>
<i>I.2.1 Production des matières plastiques et méthodes de transformation</i>	<b>13</b>
<i>I.2.2 Consommation des matières plastiques</i>	<b>14</b>
<i>I.2.3 Matières plastiques et adjuvants</i>	<b>15</b>
<i>I.2.3.a Plastifiants</i>	<b>15</b>
<i>I.2.3.b Charges</i>	<b>16</b>
<i>I.2.3.c Stabilisants</i>	<b>17</b>
<i>I.2.3.d Colorants et pigments</i>	<b>19</b>
<i>I.2.3.e Lubrifiants</i>	<b>19</b>
<b>Chapitre. II</b>	<b>Le polychlorure de vinyle(PVC)</b>
<i>Généralités sur le PVC</i>	<b>20</b>
<i>II.1 Historique</i>	<b>20</b>
<i>II.1.2 Production et consommation du PVC</i>	<b>22</b>
<i>II.1.3 Formulation et mise en œuvre du PVC</i>	<b>25</b>
<i>II.1.3.A Préparation et propriétés du monomère VCM</i>	<b>25</b>
<i>II.1.3.B Mélange du PVC et ses propriétés</i>	<b>28</b>
<i>II.1.4 Secteur d'utilisation du PVC</i>	<b>31</b>
<b>Chapitre. III</b>	<b>Toxicologie du PVC</b>
<b>Introduction</b>	
<i>II.1 Toxicologie du PVC</i>	<b>33</b>

<i>II.2 Toxicologie du VCM</i> .....	<b>34</b>
<b>Chapitre. IV</b> ..... <b><i>Vieillissement thermique et chimique du PVC</i></b>	
<i>IV. 1 Vieillissement thermique du PVC</i> .....	<b>38</b>
<i>IV.1.1 Dégradation d'acide chlorhydrique</i> .....	<b>38</b>
<i>IV.1.2 Déroulement de la réaction</i> .....	<b>39</b>
<i>IV.2 Résistance du PVC aux agents chimiques</i> .....	<b>40</b>
<i>IV.3 Processus chimiques intervenants dans la dégradation du PVC</i> .....	<b>41</b>
<i>IV.3.1 Schéma standard</i> .....	<b>41</b>
<i>IV.4 Conséquences de la dégradation</i> .....	<b>43</b>
<i>IV.5 Influence du vieillissement sur les propriétés du PVC</i> .....	<b>44</b>
<i>IV.6 Durée de vie du PVC</i> .....	<b>46</b>

### **Partie expérimentale**

<b>Chapitre. V</b> ..... <b><i>Essais mécaniques et physiques</i></b>	
<i>V.1 Réalisation d'une plaque du PVC</i> .....	<b>49</b>
<i>V.2 Dispositifs expérimentaux</i> .....	<b>50</b>
<i>V.3 Conditions générales et techniques des essais</i> .....	<b>51</b>
<b>Chapitre. VI</b> ..... <b><i>Résultats et discussion</i></b>	
<i>VI. 1 Tracer des courbes</i> .....	<b>57</b>
<i>VI. 2 Détermination de la durée de vie par la méthode statistique</i> .....	<b>97</b>
<i>VI.3 Interprétation des résultats</i> .....	<b>108</b>

### **Conclusion**

### *Bibliographie*

### *Annexe*

# Introduction

## **INTRODUCTION**

Depuis bientôt cinquante années les matières thermoplastiques ont été utilisées avec succès pour l'isolement et le gainage des câbles. Parmi ces plastiques, le PVC maintient une position dominante.

La part importante du PVC plastifié et du polyéthylène dans le marché du câble, est principalement due aux propriétés spécifiques de ces polymères et de leurs coûts relatifs.

Le polyéthylène a des pertes diélectriques très faibles et c'est pour cette raison que ce produit est préféré pour les applications de moyenne et haute tension ; il n'est pas utilisé dans le secteur bâtiment car il est inflammable. Au contraire, le PVC plastifié est moins inflammable et peut facilement être formulé en produit ignifuge ; c'est pour cette raison que ce produit est préféré dans l'industrie du bâtiment.

Les enveloppes isolantes et les gaines PVC peuvent également être utilisées dans les câbles de distribution de 6 à 11 KV.

Le PVC peut être utilisé comme composé de gainage pour des câbles qui sont soumis à de fréquents pics de surcharge.

D'autres applications pour le PVC concernent les gaines pour câbles armés, pour les câbles d'interrupteurs de haute tension, pour les câbles de mise à la terre.

Puisqu'une très large gamme de câbles sont produits pour un grand nombre d'applications différentes, il est compréhensible que les propriétés physiques et mécaniques exigées soient également très variées. C'est pour cette raison que le PVC, qui peut facilement être modifié en fonction de la propriété physique et mécanique exigée par l'addition de plastifiants et additifs appropriés, a pu maintenir une position dominante dans l'industrie du câble.

Toutefois bien que le gainage des câbles électriques en PVC présente des avantages sérieux, il n'en demeure pas moins que ce matériau présente certains inconvénients parmi lesquels nous pouvons citer les pertes de ses caractéristiques physiques et mécaniques.

La chaleur, le champs électrique, les produits chimiques ainsi que les radiations peuvent avoir, à long terme, un effet néfaste sur les gaines en polymères.

Ainsi au cours de leur utilisation, ces gaines peuvent être amenées à perdre leurs qualités. Ce phénomène est connu sous le nom du vieillissement du matériau.

---

---

Petit à petit, cependant, grâce à une considérable accumulation de connaissances d'origines industrielles et universitaires, l'étude du vieillissement se constitue en discipline scientifique à part entière, branche de la physico-chimie macromoléculaire possédant une multitude de ramifications dans les domaines aussi divers que la chimie radicalaire, la photochimie et la radiochimie, la mécanique des polymères, etc.

Dans un grand nombre de cas, les conditions d'exploitation, d'installation et d'environnement rencontrées dans les industries pétrolière et chimique ne diffèrent pas de celles caractérisant les autres branches de l'industrie.

En outre, dans de nombreux cas, c'est la spécification du câble dans son entier qui devra être adaptée en fonction des conditions exactes rencontrées (nature et concentration des produits, température, durée et fréquence des contacts) ainsi que des caractéristiques requises éventuellement sur d'autres plans (mécanique, thermique, électrique). En fonction de ces éléments, on étudiera en particulier : la nature de la gaine ainsi que les différents additifs tels que les stabilisants et les plastifiants.

Ce présent travail sera consacré principalement à l'étude des modifications subies par le polychlorure de vinyle sous l'influence de la chaleur et de produit chimique.

Nous nous intéressons donc à l'influence du vieillissement sur les propriétés mécaniques et physiques du PVC utilisé dans le gainage des câbles électriques. Cette étude est justifiée par le fait que durant leur utilisation, les câbles peuvent être en contact avec divers produits chimiques et soumis à différentes températures de vieillissement. Il est donc tout à fait naturel de chercher à comprendre comment ces différents produits chimiques et températures pouvaient influencer sur le matériau et éventuellement prévoir ou prévenir sa dégradation.

Cet effet de la chaleur et des produits chimiques peut avoir plusieurs conséquences sur le PVC. Ces conséquences peuvent se manifester par une modification de la structure, un rétrécissement du matériau et un changement de couleur, ainsi qu'une perte de masse.

Par souci d'étudier, de la façon la plus complète possible les phénomènes inhérents au vieillissement du PVC, il nous a semblé judicieux de déterminer les causes des dégradations subies afin d'essayer d'en apprécier les effets.

---

---

Notre travail se présente de la manière suivante :

Une première partie réservée à une recherche bibliographique permettant de cerner les connaissances actuelles se rapportant au sujet traité. C'est à partir de ce premier volet théorique que nous essayerons par la suite d'interpréter les résultats provenant de nos expériences.

Une deuxième partie, sera consacrée aux travaux expérimentaux réalisés.

Une troisième partie concerne l'étude des méthodes permettant d'estimer les propriétés de vieillissement pour déterminer la durée de vie de notre matériau.

En fin, dans la conclusion une comparaison entre les valeurs théoriques et pratiques et des propositions d'interprétation émises.

---

---

# **Matières plastiques**

## ***LES MATIÈRES PLASTIQUES***

Bien que les (matières) plastiques soient de plus en plus utilisé(e)s comme matériaux, leur nature et leurs caractéristiques sont généralement mal connues. Chaque plastique possède un ensemble de propriétés, de procédés de fabrication et de considérations d'ordre économique qui le rend idéal pour certaines applications et impropre à d'autres. Par conséquent, il est important que les usagers connaissent la nature de ces matériaux, afin d'être en mesure de s'en servir avantageusement dans des applications appropriées.

Dans un sens général, on dit qu'un matériau est plastique lorsqu'il peut se déformer sous l'action d'une force sans perdre sa cohésion, tout en conservant sa nouvelle forme lorsque la force a cessé d'agir. Le terme «plastique» est utilisé dans l'industrie pour désigner les substances et les matériaux (matières premières ou produits finis) à base de polymères organiques synthétiques qui peuvent devenir fluides et se prêter au moulage. La définition actuelle se restreint, en outre, aux matières plastiques à base de polymères organiques, à l'exclusion des élastomères et des fibres. Dans le domaine de la technologie on appelle matière plastique, un mélange comportant un polymère et divers ingrédients (par exemple, des plastifiants, des stabilisants, des charges, etc.), transformé en produit fini. Une matière dite plastique au sens usuel de terme est susceptible de se déformer et de se mouler, puis de conserver sa nouvelle forme lorsque la cause ayant provoqué sa déformation cesse d'agir. Dans l'industrie, on désigne sous l'appellation générale de plastique des matériaux facilement façonnables par plasticité à la température ambiante ou sous l'effet d'une température relativement plus élevée.

Les plastiques peuvent être d'origine naturelle (argile, asphalte, corne...)ou synthétique. Notre étude concerne le vieillissement thermique et chimique d'une gaine pour câble électrique à base des plastiques synthétiques.

Les plastiques synthétiques sont très nombreux. Ce sont des produits de synthèse élaborés par l'industrie chimique à partir principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, avec parfois des atomes d'oxygène, d'azote et de chlore.

Les principales matières utilisées au point de départ de la synthèse des plastiques sont la houille, le pétrole et la cellulose.

## I.1. Généralités sur les polymères

### Les polymères organiques

Pour comprendre la nature des plastiques, il est nécessaire d'examiner les substances qui en constituent la base, c'est-à-dire, les polymères organiques. Ces derniers sont des substances formées de grosses molécules en forme de chaîne, composées d'atomes de carbone, dans lesquelles s'intercalent parfois d'autres atomes. Bien que les polymères organiques existent dans les substances naturelles telles que la cellulose et le caoutchouc naturel, les plastiques sont presque tous à base de polymères artificiels (ou synthétiques). Les polymères organiques synthétiques proviennent de substances comportant des molécules relativement petites qui se joignent dans certaines conditions en formant un motif de groupement d'atomes répété dans la structure de la grosse molécule, de la même façon que les maillons forment une chaîne. Les substances dont proviennent les polymères sont appelées monomères; le processus de production des polymères s'appelle polymérisation. Si l'on utilise un seul type de monomère, le polymère qui en résulte est appelé homopolymère; si l'on utilise deux ou plusieurs types de monomères, le produit est un copolymère. La meilleure illustration de la molécule de polymère est la molécule de polyéthylène qui peut être représentée par une longue chaîne d'atomes de carbone (squelette carboné) liés les uns aux autres, chaque atome de carbone étant à son tour, lié à deux atomes d'hydrogène (figure 1).

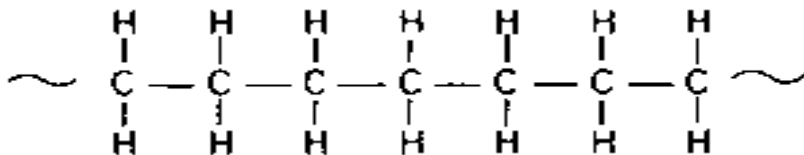


Figure 1. Molécule de polyéthylène

Selon les méthodes de production et leur nature chimique, les molécules peuvent être linéaires et en forme de chaîne, avec ou sans ramifications, ou bien, elles peuvent constituer des structures en réseaux tridimensionnels résultant de la formation des liaisons de pontage permanentes entre les chaînes linéaires (figure 2). Les molécules en forme de chaîne d'une masse polymère solide peuvent prendre trois types de dispositions spatiales, donnant lieu à un état soit amorphe, soit cristallin, soit orienté. A l'état amorphe, les molécules sont disposées complètement au hasard, à peu près comme une masse de spaghetti cuits.

Le poly (méthacrylate de méthyle) et le polystyrène sont des polymères amorphes bien connus.



Figure 2. Représentation schématique des molécules polymères: (a) linéaire (b) ramifiée (c) tridimensionnelle (réticulée)

Les procédés fondamentaux appliqués dans l'élaboration des plastiques synthétiques sont :

### ***1.1.a. La polymérisation***

C'est un procédé qui consiste à souder bout à bout en une longue chaîne un grand nombre de molécules identiques du produit de base. Cet assemblage forme des molécules géantes ou macromolécules, constituant un nouveau produit sous l'effet d'une température et d'une pression élevées, ainsi que sous l'influence d'un catalyseur éventuel.

Le produit de base qui apporte les molécules est appelé monomère. Le nouveau produit obtenu par la soudure de molécules est un polymère.

La polymérisation du chlorure vinyle monomère (CVM) peut être réalisée selon trois procédés, en % de la production mondiale :

- En suspension dans l'eau (82 %) : donne des produits transparents avec une faible absorption d'eau. La température de réaction est de 50 à 70°C, le volume des autoclaves de 80 à 150 m<sup>3</sup>, la durée d'un cycle de l'ordre de 8 heures.
- En émulsion dans l'eau (11 %) : donne des produits non transparents, faciles à mettre en œuvre et ayant tendance à absorber l'eau.
- En masse (7 %) : le PVC est alors exempt d'adjuvant ce qui permet d'obtenir des produits encore plus transparents et brillants. Ce procédé est développé par Elf atochem.

### ***1.1.b. La polycondensation***

C'est un phénomène semblable à la polymérisation, mais en se soudant, les molécules du monomère abandonnent des atomes qui sont généralement des atomes d'hydrogène et d'oxygène éliminés sous forme des molécules d'eau.

La polycondensation se fait par des molécules identiques ou le plus souvent différentes. D'autre part, elle donne généralement naissance à des chaînes ramifiées et se développant dans un espace à trois dimensions. Le produit obtenu est infusible et dur. [1]

Selon le comportement des plastiques sous l'effet de la chaleur, on les classe en trois grandes familles de matières plastiques très différentes :

Selon leur comportement à la chaleur, les plastiques peuvent être divisés en deux grandes classes: les thermoplastiques et les thermodurcissables.

### ***1.1.1. Matières thermoplastiques***

Les thermoplastiques sont à base de polymères linéaires ou ramifiés. Ils sont susceptibles de se ramollir sous l'action de la chaleur et de se durcir par refroidissement, et cela un nombre indéfini de fois. A cet égard, on peut les comparer à la cire ou au fer. Les thermoplastiques typiques sont ceux à base de polyéthylène, de polypropylène, de poly (chlorure de vinyle), de homopolymères et copolymères du styrène, de résines acryliques, de cellulosiques, de nylons et de diverses résines fluorées.

Ces matières se ramollissent et deviennent plastiques sous l'effet de la chaleur, mais sans subir de modifications chimiques. Elles peuvent être mises en forme à chaud et conserver cette forme après refroidissement, sans qu'un changement de leur structure chimique soit intervenu.

Elles sont généralement constituées par des macromolécules de forme linéaire, qui sous l'effet de la chaleur peuvent glisser les une par rapport aux autres. Le polyéthylène, le polypropylène, le polychlorure de vinyle et le polystyrène sont des thermoplastiques (voir les tableaux des modes de fabrication). En France, 81 % de la production de matières plastiques porte sur les thermoplastiques dont 71 % sur les trois thermoplastiques : PVC, polyéthylène et polypropylène. [2]

### ***1.1.2. Matières thermodurcissables***

Les thermodurcissables sont des plastiques à base de polymères qui, ayant subi une réaction chimique (amorcée par la chaleur, par les catalyseurs ou par la lumière UV), se transforment en un produit relativement infusible, intraitable et insoluble. Le composant polymère du produit est à l'état réticulé. Les thermodurcissables se comportent donc comme le béton: après

la réticulation, on ne peut plus les fondre ou les mouler à nouveau. Les plastiques thermodurcissables typiques sont les phénoliques, les alkydes, les polyuréthanes, les mélamines et les uréeformaldéhydes (urée-formols) et ceux à base de résines époxydes.

Ces matières deviennent dures et infusibles sous l'effet de la chaleur, et subissent une modification de leur structure moléculaire, le phénomène étant irréversible.

Les matières thermodurcissables sont élaborées par des réactions de polycondensation et sont formées de macromolécules tridimensionnelles. Elles sont livrées par le fabricant à un stade d'élaboration intermédiaire. Lors de la mise en forme, sous l'effet de la chaleur et de la pression, le matériau thermodurcissable se plastifie épouse la forme du moule puis devient dur progressivement. Ce durcissement est dû à la réaction de polycondensation qui se poursuit jusqu'à l'achèvement de la formation du réseau macromoléculaire tridimensionnel. Les thermodurcissables (7 % de la production française de matières plastiques) sont donc formables à chaud avec modification chimique. Les phénoplastes, aminoplastes et les résines époxydes sont des thermodurcissables.

### ***1.1.3. Les plastiques techniques***

Comme leur nom l'indique, ils sont destinés à des applications très précises en raison de leurs propriétés. (Le PTFE est un exemple de plastique technique). [3]

**I.2. Modes de fabrication schématiques des principaux thermoplastiques :**

**I.2.1. Production de matières plastiques en 1991 :**

**Tableau I.1**

<b>Pays</b>	<b>Million de tonnes</b>
<b>Etas-Unis</b>	<b>28.5</b>
<b>Allemagne</b>	<b>9</b>
<b>Japon</b>	<b>12.8</b>
<b>France</b>	<b>4.4</b>

**Production de matières thermoplastiques en 1993 :**

Tableau I.2

<b>Pays</b>	<b>Million de tonnes</b>
<b>Etas-Unis</b>	<b>21</b>
<b>Allemagne</b>	<b>6.8</b>
<b>Japon</b>	<b>7.9</b>
<b>France</b>	<b>3.9</b>

**Situation française**

**Productions et commerce extérieur, en milliers de tonnes :**

**Tableau I.3**

<b><u>Produit</u></b>	<b>Productions</b>	<b>Exportations</b>	<b>Importations</b>
<b>Total matières plastiques</b>	<b>4 778</b>	<b>3 585</b>	<b>2 472</b>
<b>Polyéthylène basse densité</b>	<b>959</b>	<b>681</b>	<b>412</b>
<b>Polyéthylène haute densité</b>	<b>343</b>	<b>292</b>	<b>311</b>
<b>PVC</b>	<b>1 149</b>	<b>659</b>	<b>248</b>
<b>Polypropylène</b>	<b>960</b>	<b>664</b>	<b>192</b>
<b>Polystyrène</b>	<b>475</b>	<b>303</b>	<b>204</b>
<b>Résines aminoplastes</b>	<b>149</b>	<b>24</b>	<b>125</b>
<b>Polyesters insaturés</b>	<b>77</b>	<b>23</b>	<b>16</b>
<b>Résines phénoplastes</b>	<b>48</b>	<b>31</b>	<b>30</b>
<b>Résines alkydes</b>	<b>423</b>	<b>4</b>	<b>11</b>

### **TRANSFORMATION**

Les techniques de la plasturgie sont variées et souvent spécifiques à un type particulier de plastique. Néanmoins, on peut citer les grandes méthodes de transformation : extrusion, extrusion-soufflage, injection sous pression, moulage...

#### ***I.2.2. Consommation des matières plastiques en 1991 :***

**Tableau I.4**

<b>Pays</b>	<b>Kg/habitant</b>
<b>Allemagne</b>	<b>133</b>
<b>Danemark</b>	<b>102</b>
<b>Autriche</b>	<b>127</b>
<b>Japon</b>	<b>94</b>
<b>Finlande</b>	<b>70</b>
<b>Canada</b>	<b>70</b>
<b>Etas-Unis</b>	<b>102</b>
<b>Italie</b>	<b>74</b>
<b>France</b>	<b>66</b>

#### ***Répartition de la consommation, par secteur, en tonnage***

Emballages : **37 %** dont en 1992 produits alimentaires non liquides : **12,6 %** ; produits alimentaires liquides : **10,8 %**

Divers : 8,3 %.

Produits de beauté et médicaments : **4,3 %**

Bâtiment (isolation, canalisations, portes et fenêtres, couvertures...) : **22 %**

Transports : **9 %**

Electricité, Electronique (câbles,...) : **8 %**

Divers (agriculture, santé, sport, loisirs, ameublement, jouets...) : **24 %**

#### ***Recyclage***

##### ***Valorisation énergétique***

En 1990, les matières plastiques représentaient 10 % des ordures ménagères. Elles ont un fort pouvoir calorifique et facilitent l'incinération des autres déchets.

Pouvoir calorifique en GJ/t de quelques matériaux présents dans les ordures ménagères :

Polyéthylène, Polypropylène : 46,0 PVC rigide : 18,4

Polystyrène : 41,0 Papier, cartons : 15 à 19 [4][5]

### **I.2.3. Matière plastique et adjuvants**

#### **Les polymères et les plastiques**

Le terme polymère se rapporte soit à la substance chimique pure, soit au produit résultant du processus de polymérisation. Les hauts polymères industriels contiennent un polymère pur et des traces d'impuretés telles que du monomère résiduel, des catalyseurs et des solvants, qu'il n'est pas économique d'éliminer. Cependant, ils constituent une entité chimique. Normalement, les impuretés nuisent aux propriétés des polymères purs, dont elles diminuent la résistance à l'oxydation, à la chaleur et au rayonnement solaire.

Bien que la grande variété de polymères fournit une gamme étendue de propriétés, cela n'est pas suffisant pour répondre aux exigences des diverses applications. L'incorporation de diverses substances aux polymères augmente la gamme des propriétés, réduit la détérioration au cours de la fabrication et de l'utilisation et facilite aussi la mise en forme. C'est ordinairement ce mélange physique de polymères et d'adjuvants qui constitue un plastique, de sorte qu'il est important d'établir la distinction entre un polymère et un plastique. Bien que les deux termes soient souvent synonymes, ils désignent des substances différentes.

Il convient aussi de parler du terme «résine» initialement utilisé à propos de certains produits naturels. Quand on eut reconnu la nature polymère de ces substances naturelles, on accorda aux polymères synthétiques le nom de «résines synthétiques» et par la suite, aux Etats-Unis, on les appela tout simplement «résines». Couramment, les termes «résine» et «résine de base» servent souvent à désigner un polymère commercial, c'est-à-dire, une substance polymère qui ne contient aucun adjuvant.

#### **Prémix ou compound plastique**

Le mélange physique de polymère et d'adjuvant (additif) est appelé prémix ou compound. La nature précise et la proportion des substances à ajouter dépend du polymère, de la méthode de traitement utilisée pour convertir le plastique et des propriétés exigées pour la pièce finie. Le choix des adjuvants et l'opération de mélangeage de ces derniers avec le composant polymère constitue la préparation du compound (ou compoundage). Les proportions des divers ingrédients d'un plastique constituent sa formulation. La résine de base d'un plastique peut être un homopolymère ou un copolymère ou un mélange des deux.

Le terme adjuvant (ou additif) peut servir à désigner toute substance incorporée généralement en faible concentration (il y a quelques exceptions) aux plastiques, de façon à modifier les propriétés de la résine, soit pour faciliter la mise en forme (ou mise en oeuvre), soit pour

changer les propriétés physiques, chimiques ou électriques du produit fini. Nous parlerons succinctement des principales classes de divers adjuvants utilisés dans la fabrication des produits en plastique. [3]

Ainsi pour faciliter la mise en œuvre du polymère et obtenir des propriétés particulières de l'objet fini, il est nécessaire de lui adjoindre certains adjuvants spécifiques. Un mélange à base de PVC, contient généralement les ingrédients suivants: polymère, stabilisant, plastifiant, lubrifiant, charge et pigment [6,7]

### ***1.23.a. Plastifiants***

Substance de volatilité faible ou négligeable incorporée à un plastique, destinée à abaisser son intervalle de ramollissement, faciliter sa mise en œuvre et augmenter sa flexibilité ou son extensibilité.

Son addition peut aussi se traduire par une réduction de la viscosité à l'état fondu, un abaissement de la température de la transition vitreuse ou une diminution du module d'élasticité de l'objet plastifié.

Près de 85% des plastifiants sont utilisés pour la fabrication du PVC flexible (ou souple plastifié). Historiquement, c'est grâce, entre autres, aux plastifiants que la mise en œuvre du PVC a été possible.

On a constaté alors que la matière thermoplastique qui résulte de cette plastification externe (sans réaction chimique) conservait ses propriétés sur une très longue période, on peut donc considérer, avec juste raison, le PVC flexible comme un matériau différent du PVC non plastifié dit PVC rigide. Puisque le PVC flexible résulte du mélange de deux constituants ( l'un liquide, l'autre solide ) en proportions très larges, la gamme des souplesse est extrêmement étendue. [8]

La grande variété chimique de plastifiants utilisables et le choix des quantités incorporables aux résines, ainsi que celui des procédés possibles pour la transformation des plastiques permettent :

De moduler les propriétés du produit fini selon les prescriptions de cahier de charge,

De choisir le ou les procédés les mieux adaptés, en fonction des machines disponibles et des séries à réaliser,

D'optimiser les prix de revient en maîtrisant tous les facteurs de coût. [9]

Les principaux plastifiants utilisés sont les phtalates, les phosphates et les esters d'acide gras [11,12]. Ils sont utilisés à raison de 30 à 90 parties en poids pour 100 parties du PVC[1,12].

### ***L'influence des plastifiants sur quelques caractéristiques physiques des plastiques***

Les qualités d'un plastifiant se mesurent aux propriétés qu'il confère aux objets en plastique dans lesquels il est incorporé. Les critères de jugement varient suivant l'utilisation des produits finis. Le chapitre le plus important de cahier des charges concerne les caractéristiques mécaniques des objets plastifiés dans diverses conditions d'application des contraintes :

- Caractéristiques en traction à vitesse imposée à la température d'utilisation ;
- Résistance à la déchirure ;
- Variation des propriétés après un ou plusieurs cycles sous contraintes (vieillessement artificiel à haute ou basse température, exposition aux rayonnements UV) ;
- Température de fragilité à froid ;
- Flexibilité.

Parmi les caractéristiques mécaniques, on retiendra trois mesures les plus courantes qui montrent que la valeur des caractéristiques dépend de la concentration et du type de plastifiant.

#### ***1.2.3.b. Charges***

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé[12,14,7].

Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences énoncées ci-après :

**Compatibilité avec la résine de base** : non-toxicité, absence de coloration ou d'impuretés gênantes, neutralité et inertie chimique, stabilité à la chaleur et à la lumière, faible absorption d'eau, aucune influence sur la stabilité du polymère ou sa couleur ;

**mouillabilité** : bonne répartition des poudres dans la matrice polymérique ou adhérence des fibres à la résine de base ;

**Uniformité de qualité et de granulométrie** ;

**Faible action abrasive sur l'outillage de mise en oeuvre** ;

**Bas prix de revient.**

On distingue des charges minérales, charges organiques naturelles et synthétiques, charges métalliques, verre, oxydes et hydratates métalliques.

Les charges minérales permettent souvent l'amélioration des propriétés diélectriques, l'augmentation de la résistance à la chaleur et à l'humidité, l'augmentation de densité de la matière à mouler et la diminution du retrait[14].

### ***1.2.3.C. Stabilisants***

Les stabilisants assurent une protection contre la dégradation provoquée par la chaleur, par l'oxydation ou par le rayonnement solaire. Par conséquent, lorsqu'ils sont utilisés dans les plastiques, ils peuvent être classés comme stabilisants thermiques, antioxydants et stabilisants à la lumière UV (ultraviolette).

Le rôle des stabilisants thermiques est d'empêcher la dégradation du polymère pendant la courte période de mise en forme à température élevée (de 150 à 300°C) et de protéger la pièce finie contre le vieillissement lent, pendant de longues périodes aux températures de service.

Les antioxydants empêchent ou retardent la dégradation par oxydation (CBD 117F et 122F) aux températures normales ou élevées, pendant la mise en forme, l'entreposage ou le service. La plupart des polymères subissent une certaine dégradation par oxydation, mais les polymères hydrocarbures y sont particulièrement susceptibles. Par conséquent, des antioxydants sont généralement ajoutés en faible quantité.

La plupart des plastiques exposés à l'extérieur pour des périodes prolongées présentent divers degrés de dégradation (CBD 117F et 122F). Les plus susceptibles sont: le polypropylène, le poly(chlorure de vinyle), le polyéthylène, les polyesters, les polystyrènes standard et choc, et le ABS. Les autres plastiques, notamment le poly-(méthacrylate de méthyle) et ceux à base de

résines fluorées, sont bien plus résistants. Les formulations des plastiques comprennent des absorbants de rayons UV qui doivent arrêter ou retarder la dégradation imputable à la lumière ultraviolette. Ce sont des composés tels que les dérivés de benzophénones, de benzotriazoles et d'acrylonitriles, qui absorbent sélectivement les rayons nocifs et les convertissent en énergie thermique.

Les pigments tels que le bioxyde de titane et l'oxyde de zinc servent aussi à protéger les plastiques contre les effets nocifs des rayons ultraviolets. Ils absorbent une partie des rayons ultraviolets, mais leur efficacité provient surtout de leur aptitude à réfléchir le rayonnement (la chaleur et la lumière). Dans les applications où les couleurs ne sont pas exigées, le noir de fumée, qui absorbe la lumière UV, est souvent utilisé et constitue un stabilisant très efficace (par ex., dans le polyéthylène noir).

Sous l'action de la chaleur le PVC peut libérer de l'acide chlorhydrique. L'effet des stabilisants est d'éviter le dégagement d'acide chlorhydrique et de le capturer s'il se produit[15]. Pour cela, ils empêchent l'oxydation et la rupture des liaisons doubles[16].

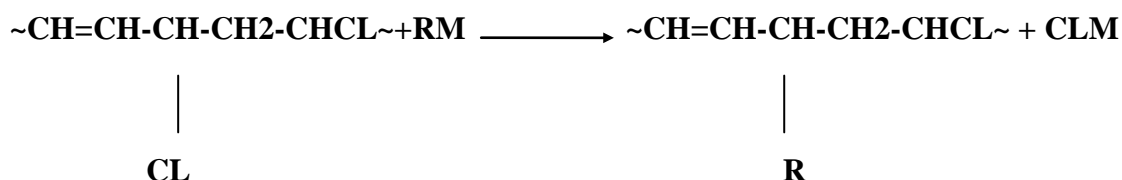
### *Différents types de stabilisants du PVC*

Il est actuellement impossible de prévenir les actes initiateurs de la dégradation. La stabilisation du PVC consiste donc :

A retenir la propagation de la déshydrochloruration en chaîne ;

A éliminer l'acide chlorhydrique libéré (protection des outils de transformation et inhibition de l'effet auto catalytique de HCL) ;

Les stabilisants du PVC sont généralement des dérivés organo-métalliques et leur action sur le PVC peut être schématisée par :



La nouvelle liaison C-R formée étant plus stable que la liaison C-CL qu'elle remplace.

D'autres stabilisants sont également utilisés dans les différentes unités de fabrication,

Tels que :

Les savons ou les acides organiques, en particulier ceux du baryum, cadmium, calcium, magnésium, zinc, lithium... ;

Complexes des métaux, en particulier baryum/cadmium/zinc ;  
compounds d'époxyde. [17,18 ]

#### ***1.2.3.d. Colorants et pigments***

Les polymères sont, par nature, dans leur grande majorité, peu ou pas colorés.

Leur coloration doit satisfaire à des exigences très diverses :

**Esthétique** :tissus, enduits, ameublement.... ;

**Technique** : amélioration de certaines caractéristiques physiques du polymère ou protection contre la lumière visible ou les radiations ultraviolettes ;

**Sécurité** :signalisations fluorescentes des véhicules et des travaux routiers ;

**Repérage** :câblerie ;

**Camouflage** :

Les colorants, qui peuvent être des teintures ou des pigments, sont ajoutés aux plastiques pour en rehausser les qualités esthétiques. Ordinairement, les teintures servent à produire les effets de transparence brillante dans les plastiques clairs tels que le polystyrène, ainsi que les résines acryliques et cellulosiques. Parfois, elles sont ajoutées en même temps qu'un pigment. Les noirs de carbone constituent un important groupe de pigments qui servent aussi de charge et sont de bons stabilisants contre la lumière UV.

Les matières colorantes se divisent en deux grands groupes définis par la norme DIN 55944 :

**Colorant** :matière colorante sous forme de poudre, de couleur ou noir, soluble dans les solvants et les substrats ;

**Pigment** :- matière colorante sous forme de poudre, de couleur ou noir, insoluble dans les solvants. [9]

#### ***1.2.3.e. Lubrifiants***

Les lubrifiants sont incorporés aux compounds plastiques afin d'assurer une lubrification externe et interne. D'une part, ils éliminent le frottement externe entre le polymère et la surface métallique de l'équipement de mise en forme; d'autre part, ils améliorent les caractéristiques d'écoulement interne du polymère, tout en augmentant les propriétés de mouillage des composants. De nombreux lubrifiants utilisés dans les plastiques remplissent les deux fonctions (lubrification externe et interne). Les lubrifiants les plus couramment utilisés à l'heure actuelle sont les cires synthétiques et naturelles, le polyéthylène à faible

poids moléculaire et les stéarates métalliques. L'une des principales applications de la lubrification interne se trouve dans le PVC rigide où il est nécessaire d'éliminer le taux élevé de cisaillement qui se produit dans la masse fondue au cours de la mise en forme. L'absence de lubrification provoque la dégradation pendant la mise en forme; elle peut aussi réduire la durabilité à long terme ou affecter la performance adéquate du produit plastique en service. Les plastiques qui nécessitent une lubrification interne comprennent entre autres les polyoléfines, les polystyrènes, les résines phénoliques (ou phénoplastes), les mélamines, l'acétate de cellulose, le polymère acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), le nylon, les polyesters non saturés (insaturés) et de nombreux produits caoutchouteux. [7] [19,20].

### ***Les ignifugeants***

Les plastiques peuvent aussi contenir des composants qui augmentent la résistance au feu du produit fini. Les agents ignifugeants ordinairement utilisés sont des composés qui contiennent des halogènes, des dérivés de l'antimoine, du phosphore, du bore et de l'azote. On peut rendre la résine polymère de base ignifuge en copolymérisant des monomères halogénés avec des monomères normalement inflammables.

**Polyvinyle de chlorure**

**POLYCHLORURE DE VINYLE (PVC)****Généralité sur le PVC**

Ces polymères appartiennent à la très grande famille des polymères généralement connus sous le nom de vinyles. Ce nom est employé également pour désigner un grand nombre de produits thermoplastiques comme le polystyrène, mais il est normalement employé maintenant pour désigner d'une façon un peu vague, les polymères basés sur le chlorure de vinyle.

La série des polymères vinyliques peut se diviser en trois principaux groupes :

1. Le chlorure de polyvinyle (polymère homologue)
2. Les copolymères de chlorure de polyvinyle, par exemple avec l'acétate de polyvinyle et le chlorure de polyvinylidène ;
3. Les polymères homologues du chlorure de polyvinylidène, de l'acétate de polyvinyle et de l'alcool polyvinylique.

Parmi ces polymères le chlorure de polyvinyle, les copolymères de chlorure de polyvinyle, acétate de polyvinyle.....sont les plus importants .

**II.1. Historique**

Le chlorure de vinyle ( $CH_2=CHCl$ ) est un gaz incolore qui se liquéfie par refroidissement à  $-14^{\circ}C$  ou par compression sous 3 à 4  $kg/cm^2$  à la température ambiante.

L'existence de chlorure de vinyle monomère a été connue dès 1838, période à laquelle on a supposé qu'il fut obtenu par synthèse pour la première fois par le chimiste français REGNAULT à partir du dichloréthylène.

La priorité de ce monomère de se polymériser n'était pas connue à cette époque, bien que REGNAULT ait rapporté qu'une substance blanche s'était formée lorsqu'il mettait dans un tube bien bouché et qu'il exposait à la lumière du soleil[21].

Cet effet de la lumière solaire sur le chlorure de vinyle fut étudié plus tard en 1872 par BAUMANN qui remarque qu'une substance blanche et dure s'était formée[17]. Très peu de progrès significatifs ont été réalisés dans ce domaine jusqu'en 1912, lorsqu'un chimiste russe OSTROMUISLENSKI rapporta que la lumière solaire catalysait la polymérisation des halogénures de vinyle pour donner naissance à des produits résineux. A peu près à la même époque, un brevet fut délivré en Allemagne pour la fabrication du chlorure de vinyle par réaction du gaz chlorhydrique sur l'acétylène à 180°C en présence de chlorures métalliques comme catalyseur.

Cette période est considérée comme celle de la naissance du chlorure de polyvinyle bien que ce dernier ait commencé à être un produit techniquement utilisable qu'à partir des brevets déposés par SEMON, de la société B.F GOODRICH en 1934 et par REID de la CABRIDE AND CARBON CHEMICALS en 1934[18].

L'inconvénient principal de ces polymères avant les années 1930 était leur insolubilité dans les solvants courants, mais lorsqu'il fut découvert ensuite qu'il est possible de les dissoudre dans des solvants à haut point d'ébullition, tel que le tritolyphosphate, de nombreuses applications nouvelles furent alors possibles.

Vers le début de la deuxième guerre mondiale, l'importance du chlorure de polyvinyle de plastification fut totalement reconnue, de même que la nécessité d'entreprendre un travail considérable de développement si l'on voulait que ce polymère ait une importance industrielle quelconque.

Ce fut pendant la deuxième guerre mondiale que l'importance véritable de ce polymère devient évidente, au moment où en raison de la grande pénurie du caoutchouc de nombreuses sociétés commencèrent à chercher un produit de remplaçant. Elles trouvèrent que le chlorure de polyvinyle plastifié se prêtait à de nombreuses applications jusqu'alors réservée au caoutchouc, y compris comme isolant et gaines de câbles.

Après la guerre, plusieurs pays revinrent au caoutchouc, mais beaucoup d'autres continuaient à utiliser le chlorure de polyvinyle et aujourd'hui ce polymère est l'une des matières thermoplastiques prépondérantes [22].

### II.1.2. Production et consommation du PVC

#### Principaux producteurs du PVC

Capacité de production en Europe de l'ouest en 1989

**Tableau II.1** [15;18]

Sociétés et pays	Capacité en tonnes
<b>Belgique</b> : EVC- SOLVAY	<b>1.035.000</b> <b>950.000</b>
<b>France</b> : ATOCHEM	<b>540.000</b>
<b>Pays Bas</b> : LVM - SCELLCHEMIE	<b>390.000</b> <b>345.000</b>
<b>Allemagne</b> : HULS-WACKERCHEMIE HOECHST- BASF	<b>380.000-350.000</b> <b>240.000-230.000</b>
<b>Norvège</b> : NORSK HYDRO	<b>350.000</b>
<b>Espagne</b> : PRIORODANO AISCONDEL	<b>105.000</b> <b>100.000</b>
<b>Finlande</b> : NESTEOY	<b>100.000</b>
<b>Grèce</b> : EKO CHEMICAL AE	<b>70.000</b>
<b>Portugal</b> : CIRES	<b>60.000</b>

Production du PVC en 1994, capacités annuelles par zones en milliers de tonnes.

**Tableau II.2**

Asie Pacifique :	6 110	Europe de l'Est :	1 915	Afrique :	335
Europe de l'Ouest :	5 940	Amérique Latine :	1 118		
ALENA* :	5 700	Moyen-Orient :	350		

**Consommation mondiale du PVC en 1988****Tableau II.3**

<b>Pays</b>	<b>Consommation</b>
EUROPE :	
Europe de l'ouest	<b>4900.000</b>
Europe de l'est	<b>1900.000</b>
ASIE :	
Japon	<b>1730.000</b>
Taiwan	<b>930.000</b>
Chine	<b>620.000</b>
Moyen-Orient	<b>580.000</b>
Corée du sud	<b>390.000</b>
Divers	<b>660.000</b>
Amérique :	
Etats-Unis	<b>3650.000</b>
Brésil	<b>390.000</b>
Canada	<b>360.000</b>
Divers	<b>460.000</b>
Afrique :	<b>520.000</b>
Océane :	<b>210.000</b>
Total :	<b>17300.000</b>

**Capacité de productions de VCM en 1991****Tableau II.4**

<b>Pays</b>	<b>Milliers de tonnes annuelles</b>
Monde	<b>22190</b>
Union Européenne	<b>5390</b>
Etas-Unis	<b>5200</b>
France	<b>1260</b>
URSS	<b>830</b>
Japon	<b>2180</b>
Belgique	<b>315</b>
Chine	<b>1160</b>
Taiwan	<b>1195</b>
Allemagne	<b>1600</b>

**Capacité de productions de PVC en 1992****Tableau II.5**

<b>Pays</b>	<b>Milliers de tonnes annuelles (1992)</b>
Monde	<b>20934</b>
Union Européenne	<b>5385</b>
Etas-Unis	<b>5662</b>
France	<b>1090</b>
URSS	<b>800</b>
Japon	<b>2563</b>
Belgique	<b>920</b>
Chine	<b>760</b>
Taiwan	<b>840</b>
Allemagne	<b>1425</b>

**Producteurs principaux****Tableau II.6** [23]

Société	Milliers de tonnes du PVC
<b>Etas-Unis et Taiwan:</b> Formosa Plastics Corp	1665
<b>Europe :</b> EVC	1105
<b>Europe ; Brésil et Thaïlande:</b> Solvay	1345
<b>Etas-Unis ;Canada et Australie :</b> BF Goodrich	1140

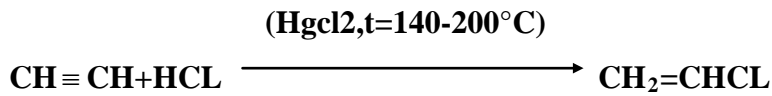
**II.1.3. FORMULATION ET MISE EN OEUVRE DU PVC****II.1.3.A. Préparation du monomère VCM**

Il y a fondamentalement deux sources de chlorure de vinyle monomère, selon l'acétylène  $\text{CH} \equiv \text{CH}$  ou le gaz naturel qui est le plus facile à obtenir. Le chlorure de polyvinyle fabriqué en Europe est basé en grande partie sur l'acétylène obtenu à partir du carbure de calcium, et celui fabriqué aux Etats-Unis est préparé à partir de l'éthylène.

A l'heure actuelle, c'est la préparation à partir de l'éthylène qui devient de plus en plus importante à cause du développement de l'industrie pétrochimique. L'éthylène de base s'obtient évidemment par craquage de pétrole, et les deux méthodes principales sont les suivantes :

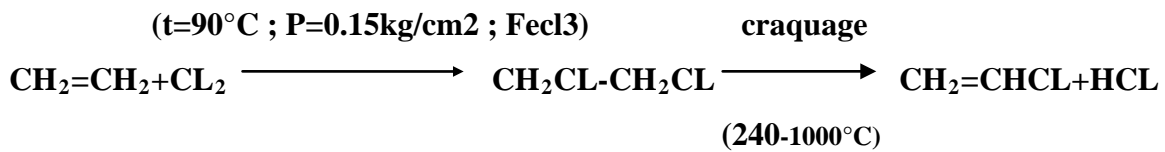
***A partir de l'acétylène  $\text{CH} \equiv \text{CH}$*** **Addition directe**

La première méthode est l'addition directe de l'acide chlorhydrique à l'acétylène en présence d'un catalyseur tel que le chlorure mercurique :



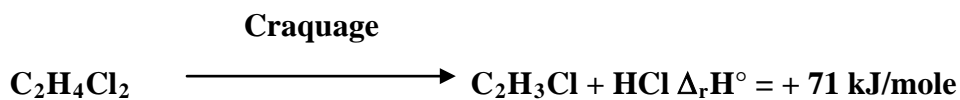
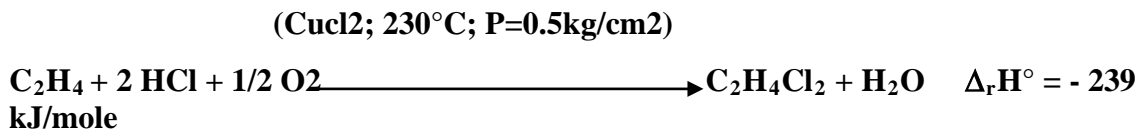
A partir de l'éthylène  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$

a) - Réaction de chloration directe



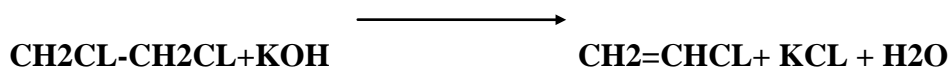
b)- Réaction d'oxychloration

L'oxychloration est réalisée sur un lit fluidisé de catalyseur  $\text{CuCl}/\text{CuCl}_2$  sur  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sous 0,5 MPa, vers  $250^\circ\text{C}$ . La réaction est pratiquement totale. La température dépend du catalyseur utilisé.[24]La capacité des unités de production est de 250 à 300 000 tonnes et peut atteindre 500 000 t/an.



*Préparation du VCM au laboratoire*

La préparation du VCM à l'échelle laboratoire est réalisée suite à une réaction d'élimination de HCl de s-dichloroéthane par addition de KOH [25; 26].



**Propriétés du VCM**

Le chlorure de vinyle monomère reçu devra répondre aux résultats d'analyse suivants :

**Tableau II.7**

Chlorure de vinyle	99.9 % min (rapport massique)
Fer	1 ppm max
Hcl	1 ppm max
Composés acétyléniques	4 ppm max
Butadiène	10 ppm max
Composés chlorés	100 ppm max
Eau	100 ppm max
Poids moléculaire	62.5 gramme

**1) - Propriétés Physiques**

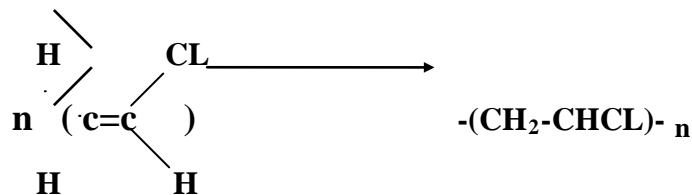
Gaz inflammable à la température et la pression ordinaire. Facilement liquéfiable, il est incolore et possède une odeur étherée plaisante. Légèrement soluble dans l'eau, soluble dans l'alcool, très soluble dans l'éther et le tétrachlorure de carbone.

**Tableau II.8**

Aspect	gaz incolore à la température et à la pression normale
Odeur	particulièrement semblable à celle de chlorure
Point d'ébullition	-13.8°C
Point de fusion	-153.71°C
Point éclair	-78°C
Point d'inflammation	472°C
Viscosité	0.18Cp à 30°C
Tension superficielle	2.133E-3 kg/m à -10°C
Indice de réfraction	nd20 :1.4046-nd15 :1.398
Chaleur spécifique	0.39 kcal/kg °C
Chaleur de vaporisation	0.39 kcal/kg °C
Conductibilité thermique	0.103 kcal/mh°C à 30°C
Température critique	158.4 °C
Pression critique	52.7 atm
Solubilité dans l'eau	25.7 mg/100cc(20°C)
Limite d'explosivité	3.5 à 26.4 v/v dans l'air (rapport volumique)
Chaleur de formation	7.45 kcal/mole

## 2) - Propriétés Chimiques Principales

- a) Le vcm possède deux groupes fonctionnels (doubles liaisons et radical cl) qui en font un produit actif.
- b) Le vcm se polymérise facilement sous l'action de la chaleur et de la lumière ou d'un catalyseur :



- c) Corrosion : A la température ambiante et lorsqu'il est sec le vcm n'est pas corrosif. Au contact de l'eau il dégage une petite quantité d'acide chlorhydrique qui peut attaquer le fer et l'acier [27].

### II.1.3.B. Mélange de PVC prêt à l'emploi

La formulation et le mélange du PVC ont longtemps été plus qu'un art qu'une science. Cependant l'établissement d'une formulation satisfaisante nécessite une bonne connaissance du PVC, des additifs utilisés et des techniques des mélanges appropriées.

Bien que la plupart des producteurs tendent à fournir des compositions prêtes à l'emploi et adoptées à chaque cas particulier, les grands transformateurs préfèrent être maîtres de leur matière pour des raisons économiques et par souci de confidentialité de leur fabrication.

Les procédés de mise en œuvre sont nombreux et variés, la sensibilité à la chaleur et à la lumière, la tendance à coller à la surface des outils de plastification et de moulage ainsi que les exigences auxquelles doivent répondre certains articles rendent nécessaire l'utilisation des ingrédients qui améliorent ces propriétés intrinsèques ou permettent de travailler aisément dans de bonnes conditions.

#### 1) - Les adjuvants

Le pvc seul est une résine dure. A cause de cela ,on y ajoute un certain nombre d'adjuvants. Ces derniers sont des substances mélangées physiquement aux polymères et destinées à modifier l'aspect du matériau, ses propriétés physiques et sa stabilité à l'environnement.

En général, les adjuvants sont des composés organiques ou organo-métalliques dont la masse moléculaire est faible par rapport à celle du polymère. [20; 28]

## 2) - Propriétés du PVC

### a) - Propriétés physico-chimiques du PVC

- la masse volumique des compositions du PVC varie entre 1.0 et 2.0 g/cm<sup>3</sup> à la température ambiante (1.4 g/cm<sup>3</sup> pour les mélanges non plastifiés et 1.2 à 1.3 g/cm<sup>3</sup> pour les formules plastifiés) [9].
- Le PVC transmet mal la flamme mais sa combustion entraîne un dégagement de gaz corrosif et de fumées. Ce dégagement peut être réduit par l'emploi d'un mélange de formulation spéciale[29].
- Le PVC a un bon vieillissement thermique et chimique. Sous l'action prolongée de la chaleur, il devient jaune puis brun, puis rouge et enfin noire et forme en général une intumescence.
- Le PVC a une résistance exceptionnelle à l'ozone. Il possède une résistance moyenne aux hydrocarbures aliphatiques, aux acides et aux bases [30].
- Le PVC résiste au fluage à une température élevée (il a de point de fusion franc) mais il est fragile aux basses températures (demande des précautions pour la pose à temps plus froid) [29].
- Le PVC rigide résiste bien aux agents chimiques inorganiques; il est soluble dans les cétones, le cyclohexanone et le dichloroéthylène [7].
- La température de transition vitreuse du PVC est élevée, elle se situe entre 75 et 80 °C, ce qui le rend impropre à de nombreuses applications (câbles par exemple) sans l'adjonction de plastifiants. Avec l'emploi de plastifiants, la température de transition vitreuse se situe entre -10 et -5°C [31].
- Le PVC est colorable en couleurs vives [29].
- Le PVC a une bonne résistance à la traction : 505 à 6 kgf/mm<sup>2</sup> à 20°C [29].
- L'allongement à la rupture est de l'ordre de 200 à 400 % pour les compositions plastifiées [31].
- Les propriétés mécaniques sont fortement dépendantes de la température. Au dessus de 140°C à 150°C, le PVC perd toutes ses propriétés mécaniques [32].
- La résistance à la rupture varie environ de 10 à 25 MPa pour la plupart de PVC plastifiés [19].

**b) - Propriétés électriques**

- La rigidité diélectrique est de 37 kv/mm pour une éprouvette de 3 mm d'épaisseur à 20°C;
- Le facteur de perte électrique est élevé :  $\text{tg } \delta$  (à 50 Hz) = 0.015 à 20°C ;
- La constante diélectrique est élevée :  $\epsilon_r$  (à 50 Hz) = 3.4 à 20°C ;
- La résistance transversale est élevée :  $\rho_t = 1E16 \text{ } \Omega\text{cm}$  à 20°C pour les produits non plastifiés ;

:  $\rho_t = 1E10 \text{ à } 1E15 \text{ } \Omega\text{cm}$  à 20°C pour les produits plastifiés [7].

**Utilisation du PVC**

C'est le deuxième plastique utilisé dans le monde (20% de l'ensemble des plastiques ) après le polyéthylène (32 % ).

Consommation de PVC dans le monde en 1993

Tableau II.9

<b>Pays</b>	<b>Millier de tonnes</b>
Monde	<b>18100</b>
Europe de l'ouest	<b>5170</b>
Etas-Unis	<b>3915</b>
Taiwan	<b>1110</b>
Japon	<b>1795</b>
France	<b>835</b>

**Secteur d'utilisation**

Le PVC est un matériau largement utilisé dans des applications à longue durée de vie telles que le bâtiment :

65 % des articles fabriqués ont des durées de vie supérieures à 15 ans , 24 % entre 2 et 15 ans, 12 % de moins de 2 ans[33].

**Tableau II.10**

<b>Secteur d'utilisation</b>	<b>Pourcentages (%)</b>
Bâtiment, Travaux publiques	<b>44</b>
Produits de consommation	<b>8</b>
Emballage	<b>30</b>
Transport	<b>3</b>
Electricité et électronique	<b>9</b>
Divers	<b>6</b>

Forme d'utilisation du PVC

**Tableau II.11**

<b>Forme d'utilisation du PVC</b>	<b>Pourcentages (%)</b>
Corps creux	<b>35</b>
Films, Feuilles	<b>12</b>
Tubes	<b>20</b>
Câbles, Fils électriques	<b>12</b>
Profilés	<b>13</b>
Revêtement de sols	<b>8</b>

# Toxicologie

## **TOXICOLOGIE DU PVC**

### ***Introduction***

Les différentes substances qui se trouvent au contact d'une paroi en matière plastiques sont rarement totalement inertes, sans action vis à vis de cette paroi, des certains nombres de phénomènes peuvent se produire, suivant les cas à des manifestations diverses.

Le danger de toxicité d'une matière plastique est fonction des possibilités d'extraction ou de migration des composants, éventuellement nocifs, ainsi qu'une dégradation éventuelle des produits utilisés [R.Lefaux, «les matières plastiques dans l'industrie alimentaire »publications techniques associées, 1972]. [E.Leclerc, «matières plastiques et toxicité », édition Cebedoc, 1971].

A coté des produits de synthèse inoffensifs, tels que les hauts polymères, nous rencontrons toute une gamme de produits employés comme adjuvants dans l'industrie des matières plastiques. L'emploi de ces produits ne peut donc se faire qu'avec les réserves qu'appelle le comportement de ce produit vis à vis du milieu de contact et de l'action du composé éventuellement libéré vis à vis de l'organisme humain.

### ***TOXICOLOGIE DU POLYCHLORURE DE VINYLE (PVC)***

Les résines vinyliques sont très fréquemment employées dans l'industrie de l'emballage, elles sont produites en grande quantité à l'échelle mondiale.

Du point de vue toxicologique, le PVC pur est inerte et insoluble et donc d'une innocuité totale, même en mélange, pour autant que ce mélange ne contienne aucun adjuvant toxique [ E.Leclerc 1971].

Ces insolubilités et inertie chimique se manifestent, notamment dans l'appareil digestif de l'animal et de l'homme, avec comme conséquence, la non-absorption intestinale et le rejet du polymère dans sa totalité. Les enzymes digestifs n'ont pas de prise sur les longues chaînes macromoléculaires et ne peuvent rompre ces dernières en fragments digestibles. Dans l'ensemble, donc, ces corps sont démunis de toxicité.

## **TOXICOLOGIE INDUSTRIELLE ET INTOXICATIONS PROFESSIONNELLES DU VCM**

Le chlorure de vinyle :  $\text{CH}_2=\text{CHCL}$  (VCM) est un gaz dont l'action locale se manifeste par une irritation des yeux et de la peau ; comme action générale on distingue :

### ***La toxicité aiguë :***

Dépression du système nerveux central parfois précédé d'un état d'euphorie (seciu et al).

Plusieurs cas d'intoxications aiguës sont survenus chez les ouvriers occupés à nettoyer des réservoirs ayant contenus du chlorure de vinyle ou se trouvant près d'un réservoir de polymérisation ouvert. Vertiges, désorientation, perte de conscience, mort ou rapide amélioration si l'ouvrier est amené promptement à l'air frais.

### ***La toxicité chronique :***

En intoxication chronique, les premiers signes qui furent décrits dans la littérature sont l'acroostéolyse distale des doigts, accompagnée de signes angioneurotiques de type Raynaud, avec diverses malformations du système vasculaire à ce niveau (observation belge publiée en 1967 : JM Cordier).

A la même époque sont rapportés d'autres lésions dermatologique de type sclérodémie au niveau des espaces exposés. Des manifestations digestives sont rapportées par des équipes allemandes (nausées, hépatomégalie), mais également de la crise sanguine (thrombocytopénie, leucopénie avec splénomégalie).

Très rapidement, des chercheurs italiens (Maltoni, 1973) observeront des cancers du foie, des angiosarcomes, cancers largement spécifiques à cette exposition, mais également des néphroblastomes. Les observations sur animal avaient été réalisées peu de temps auparavant, toujours en Italie, dès 1970.

Notons que c'est le métabolisme (oxydation) des vinyles en composés époxydes qui crée leur toxicité (idem pour d'autres monomères de plastique comme l'acétate de vinyl, le chlorure de vinylidène, le bromure de vinyl).

Il peut produire des lésions d'acroostéolyse (ostéolyse de la phalange discale des doigts associée à un syndrome de Raynaud). Occasionnellement, la lyse osseuse peut être observée

au niveau de la rotule et des os iliaques (Mc Cord). Certains patients, atteints d'acroostétyse peuvent aussi présenter des lésions entamées au niveau des doigts et de l'avant bras, ressemblant à la sclérodermie (Châtelain et Motillon ; Adams ; Wilson).

Cette lésion dont l'incidence est cependant faible (environ 3 personnes par cent des travailleurs occupés à la production de polyvinyle) survient plus particulièrement chez les travailleurs occupés au nettoyage à la main des autoclaves de polymérisation du chlorure de vinyle (Benoît, Din man et al ; Wilson et al ). Bien que Christophers suggéré qu'il s'agisse peut être d'une simple maladie de Raynaud induite par le froid, les lésions paraissent trop caractéristiques pour nier le rôle principal de l'agent chimique. On a d'ailleurs pu reproduire les mêmes lésions osseuses et dermiques chez l'animal (Viola en 1970). Le nettoyage automatique des autoclaves réduit le risque d'exposition excessive.

Sucin et al ont déjà rapporté en 1967 des manifestations digestives chez les travailleurs exposés au chlorure de vinyle : anorexie, nausées, pesanteur épigastrique, hépatomélie. Il est actuellement bien établi que, comme la plupart des hydrocarbures chlorés, le chlorure de vinyle peut léser le foie. Selon Kramer et Mutchler, une exposition prolongée à une concentration de l'ordre de 300 ppm altérerait déjà la fonction hépatique (rétention de la BSP).

En plus de l'atteinte cutanée, osseuse et hépatique, des auteurs allemands observèrent parmi les travailleurs employés entre 6 mois et 22 ans dans une usine fabricant du polyvinyle une thrombocytopenie (Bachner et al), une réticulocytose, une leucopénie et une splénomégalie (Veltman et al en 1974,1975). La thrombocytopenie résulterait de la destruction accrue des plaquettes dans la rate (Smith et al).

Les plaintes qu'accusaient ces travailleurs étaient en ordre décroissant de fréquence : gêne abdominal, fatigue, vertiges fréquents, paresthésies dans les doigts et les orteils, transpiration excessive, sensation de froid dans les extrémités, impotence, douleurs dans les mollets (Veltman et al ). Les auteurs allemands proposent d'appeler cette maladie systémique la maladie du chlorure de vinyle. Certaines observations biologiques (augmentation des immunoglobulines en particulier les Igg et la présence de complexes immuns circulants) suggèrent que cette infection soit d'origine immunologique (Ward et al). Cependant le risque le plus sérieux pour les travailleurs et dont on n'a pas pris connaissance qu'en 1973 et l'action cancérogène.

Viola (1970-1971) a le premier rapporté que le VCM était doué de propriétés cancérogènes pour l'animal. Il constata que l'exposition de rats à 30.000 ppm de VCM 4 heures par jour 5 jours par semaine pendant 12 mois provoquait l'apparition de carcinome cutané dans la région. La relation entre cancer chez l'homme et exposition au VCM a fait l'objet de

nombreuses investigations suite à l'observation de six angiocarcomes de foie (tumeur dont l'incidence est très rare) dans une usine américaine fabricant du PVC. Depuis lors, des tumeurs similaires ont été rapportées chez les travailleurs de divers pays (Angleterre, France, Allemagne, Belgique...) Ayant été en contact avec le VCM (Lange et al ; 1974).

Des altérations chromosomiques ont aussi été observées chez certains travailleurs exposés au chlorure de vinyle (Funèse, Gravioto et al).

Il faut cependant garder à l'esprit que ces travailleurs ont souvent subi de nombreux examens radiologiques pour le dépistage de l'acroostédyse.

Une étude épidémiologique a aussi suggéré que les femmes des travailleurs exposés au VCM présentent une plus grande prévalence d'avortements (Infante et al).

Des expériences sur bactéries ont démontré qu'un métabolite du vcm était mutagène (Makk ; Malaveille et al). Le VCM n'est toxique par lui-même mais il est activé dans l'organisme.

Dés lors tous les postes où le chlorure de vinyle est détectable, les travailleurs devraient porter un appareil à adduction d'air sous pression en plus de vêtements prévenant l'adsorption cutanée (Nioshima report, mai 1974).

La teneur de VCM admissible selon L'osha est de 1 ppm ; quant à la CEE, elle a fixé la norme à 3 ppm.

Actuellement, la toxicologie du VCM et du PVC est de divers ordre :

Le VCM en faible exposition est soupçonné d'être un petit cancérigène tant au niveau du foie, que pour d'autres localisations. Données pas très fiables actuellement.

Il est également réputé pour occasionner des pathologies pulmonaires restrictives (fibrosant), éventuellement obstructives. Les données de la littérature restent fragmentaires. La fabrication du PVC utilise notamment des stabilisateurs. En effet, la décomposition, notamment thermique (300°C), fait apparaître de l'acide chlorhydrique, lequel va entamer un travail de saponification du polymère : plus l'acide ronge le polymère, plus il apparaîtra d'acide. Ce processus conduit à la destruction large du composé. Pour éviter ce processus, les fabricants vont incorporer diverses molécules qui vont réagir avec l'acide chlorhydrique.

L'incorporation de divers métaux permettra par exemple la transformation de l'acide en sels de chlore, non destructeur du PVC. Le cadmium fut utilisé, mais ne l'est apparemment plus.

Par contre on rencontre encore du plomb. Comme le métal n'est pas lié chimiquement au polymère, il s'en détache assez facilement. D'autres métaux sont ou furent utilisés, comme le barium, le calcium ou le zinc. De même certains composés organiques de l'étain (organotin), interdits dans certains pays.

Le problème apparaît lorsque le composé PVC est en contact avec les muqueuses (la bouche par exemple pour des jouets). On ajoute également des anti-oxydants pour rendre le PVC plus résistant à la lumière et à la chaleur (amines, phénols). Des plastifiants sont souvent utilisés pour rendre le PVC plus souple (diminution des forces d'attraction entre molécules).

Souvent c'est le di-éthylhexyl **Phtalate** (DEHP) qui est employé.

Ce composé peut facilement être relâché par le plastique, il se cumule bien dans les graisses, ce qui pose le problème des emballages de matières grasses avec du PVC.

C'est un composé cumulatif dans l'organisme, notamment au niveau des graisses, du poumon et du foie.

La toxicologie humaine est pauvre. L'expérimentation animale a cependant montré une toxicité hépatique et un certain degré mutagène et même cancérigène chez les rongeurs, par induction de peroxyosomes.

Chez les personnes dialysées avec du sang contenu dans des pochettes en PVC, on accuse les phtalates d'être à l'origine de certaines hépatopathies.

**Vieillissement  
thermique  
&  
chimique du PVC**

## ***VIEILLISSEMENT THERMIQUE ET CHIMIQUE DU PVC***

On peut définir le vieillissement des plastiques [38] [39] [40] [41] par l'évolution irréversible, généralement lente, de certaines de leurs propriétés, dans un sens qui est le plus souvent défavorable à l'usage.

Cette définition relative à des matériaux organiques, paraît d'ailleurs assez transposable aux autres matériaux et même aux êtres vivants. L'irréversibilité des propriétés acquises par le vieillissement, signifie donc une transformation définitive plus ou moins accusée dans le matériau, après la suppression de la cause qui l'a provoquée.

Le vieillissement des matières plastiques peut être défini par une détérioration des propriétés mécaniques, physiques et électriques de ces derniers, dans un sens qui est le plus défavorable à l'usage [42]. Cette altération est due principalement à une seule cause telle que la température ou aux combinaisons de plusieurs contraintes mécaniques et chimiques par exemple [1].

Cette altération est due principalement à une seule cause telle que la température ou aux combinaisons de plusieurs contraintes mécaniques et chimiques par exemple [1].

Contrainte mécanique

- |   |                       |
|---|-----------------------|
| • Température                             | Conditions de service |
| • Contrainte chimique                     |                       |
| • Oxydation ( $O_2$ , $O_3$ ) ; radiation |                       |
| • Pluie                                   | Agents atmosphériques |
| • Rayonnement U.V                         |                       |

### ***IV.1. Vieillessement thermique du PVC***

La dégradation du PVC est principalement régie par deux réactions de décomposition :  
Une déhydrochloration et une auto oxydation, la première étant la plus importante.

### IV.1.1. Dégagement d'acide chlorhydrique

L'action de la chaleur sur le PVC peut mener à la production de l'acide chlorhydrique. La perte en HCL résulte de la formation de liaisons doubles dans la chaîne carbonée, ce qui active un atome de chlore adjacent et entraîne une déhydrochloration.

Les séquences polyènes obtenues par ce procédé sont colorés et le changement de couleur s'accroît au fur et à mesure que les polyènes sont plus nombreux et sont aptes à former des sels carbonium. Il s'ensuit un noircissement considérable de l'enveloppe isolante et de la gaine sans qu'il y ait pour autant une détérioration des propriétés mécaniques.

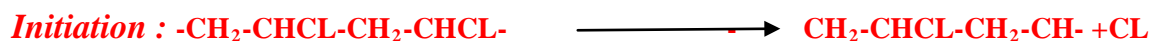
Les polyènes peuvent par la suite être oxydés par l'oxygène atmosphérique, ce qui entraîne une rupture de la chaîne carbonée et la perte des propriétés mécaniques.

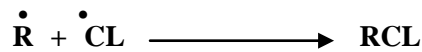
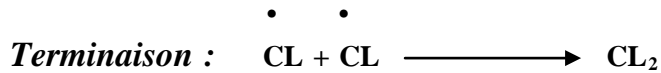
La nature de plastifiant n'a que peu d'influence sur ce phénomène et on ne peut le contrôler de manière effective qu'en utilisant un taux correct de stabilisant de sel métallique et d'esters époxydés qui ont la possibilité de se lier à l'acide chlorhydrique.

Il est intéressant de noter que la présence d'un anti oxydant phénolique retarde également le taux de dégagement de l'acide chlorhydrique [43].

### IV.1.2. Déroulement de la réaction

Différents mécanismes réactionnels ont été proposés, le mécanisme le plus proche par rapport à nos résultats serait le suivant qui répond à un mécanisme complexe [28].





### IV.2. Résistance du PVC aux agents chimiques

Les bases théoriques sur la prévision de la résistance aux produits chimiques sont les plus sérieuses dans le cas des résines pures. On peut, en effet, estimer, dans une mesure, cette résistance d'après la présence de certains éléments (F dans les polyvinyl-tétrafluor).

Les prévisions sont plus compliquées dans le cas général de plastiques contenant des adjuvants divers : plastifiant, charge, lubrifiant, stabilisant et colorant.

La corrosion peut être causée principalement par trois catégories de réactifs : les éléments (Cl<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>.....), les électrolytes (acides, bases, sels surtout s'ils sont oxygénés), les non électrolytes (hydrocarbures, alcools, cétone.....)

Le PVC plastifié possède une excellente résistance à de nombreux produits chimiques, ce qui permet de l'utiliser dans une gamme étendue d'applications où cette qualité revêt une importance primordiale :

- Réservoirs et canalisations utilisés pour le stockage et le transport de produits corrosifs (acides, bases, etc. .). Il a été signalé que des canalisations en PVC résistent depuis 10 ans au transport d'une saumure de chlorure de sodium dont la température est de 80°C.
- Canalisations de décharges, ventilateurs d'extraction, hottes ;
- Canalisations souterraines pour adduction, drainage et évacuation d'eau, grâce à sa résistance à l'action des sols corrosifs.

En galvanoplastie, l'excellente résistance chimique du PVC rigide est mise à profit pour le revêtement des bacs et d'autres accessoires (tuyaux, soupapes ...).

Par ailleurs, la résistance du PVC rigide aux huiles et graisses revêt une importance essentielle pour la plupart des industries, notamment pour l'industrie automobile.

Par contre le PVC plastifié :

- Il est sensible à certains solvants organiques (aromatiques, cétoniques, chlorés ) ;
- Résiste parfaitement au chlore à la température ambiante, mais il est attaqué par le brome et le fluor.

L'action de différents agents chimiques corrosifs sur le polychlorure de vinyle plastifié a été suivie par les variations de la résistance à la rupture de l'allongement et des propriétés physiques (perte de masse, rétraction du matériau).

L'eau provoque seulement un blanchissement. Les acides sulfuriques à 40%, azotiques à 40% et hydrate de sodium à 20% provoquent une faible corrosion, l'agent le plus actif est l'acide sulfurique à 80%.

- La résistance du PVC plastifié aux agents chimiques varie en fonction du type et de la quantité de plastifiant incorporé dans la composition. [1]

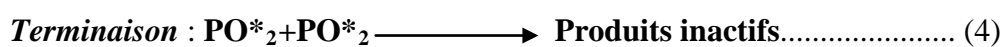
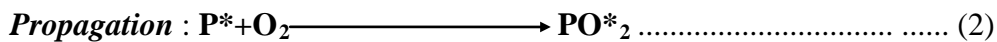
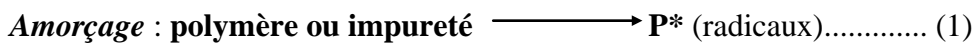
### IV.3. Processus chimiques intervenant dans la dégradation du PVC

#### a) - Oxydation

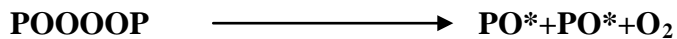
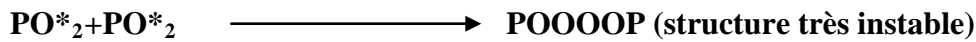
En présence de l'air et en contact avec des différents produits chimiques, le PVC subit une oxydation qui à pour conséquence la formation de produits acides ainsi que la rupture de chaînes.

#### IV.3.1. Schéma standard :

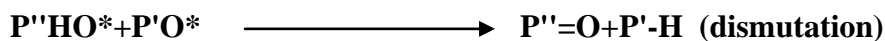
Le schéma standard du mécanisme d'oxydation est caractérisé par trois étapes qu'on peut écrire comme suit :



Plusieurs mécanismes de terminaison sont possibles :



Ou



On peut donc s'attendre à ce que des hydroperoxydes (PO<sub>2</sub>H), des peroxydes (POOP), des cétones ou des aldéhydes ( P'=O ) et des alcools (POH ) soient formés au cours du processus[44].

### ***Réactions de dépolymérisation***

Les réactions de dépolymérisation sont, comme leur nom l'indique, l'inverse des réactions de polymérisation. Elles font donc intervenir une élimination séquentielle de molécules de monomère, à partir d'un site particulièrement instable préexistant (par exemple extrémité de chaîne) ou résultant d'une coupure statistique [44].

Lorsque l'on intéresse au comportement à long terme des plastiques, les processus de dépolymérisation sont purement anecdotiques, car ils n'interviennent pratiquement qu'à la température élevée, loin des conditions usuelles d'utilisation.

### ***IV.4. Conséquences de la dégradation***

- ***Rétrécissement de la molécule de PVC***

La déshydroruration et l'auto oxydation modifient la grandeur de la molécule de PVC par l'intervention simultanée d'une rupture de chaînes et de réactions de réticulation.

### ***Réactions de réticulation***

Elles peuvent être classés en deux familles :

- **Les post-réactions** : Elles concernent en fait des matériaux initialement déjà utilisés, mais incomplètement, ce qui est le cas de la grande majorité des réticulats industriels.
- **Les réactions** : On connaît essentiellement les deux mécanismes importants [45][46].

### ***Autres mécanismes :***

Aux mécanismes que nous venons de citer peuvent s'ajouter d'autres effets que nous pouvons considérer comme secondaires. Parmi ces effets, nous pouvons citer, suivant les cas, une hydrolyse, une incompatibilité chimique entre deux constituants ou une altération due à la présence de solvants insuffisamment évacués.

### ***Vitesse de dégradation***

La vitesse de dégradation "v" des polymères varie avec la température de vieillissement "T" selon la loi d'Arrhenius.

Cette vitesse est donnée par la relation suivante :

$$V = V_0 \exp(-E/RT) \quad [47]$$

La vitesse de dégradation est aussi donnée par une relation identique à la première relation :

$$\ln V = -A/T + B$$

### ***IV.5. Influence du vieillissement sur les propriétés du PVC***

Pendant la dégradation des polymères, des réactions chimiques telles que l'oxydation, l'hydrolyse, les ruptures de chaînes, la réticulation et les pertes de plastifiants peuvent influencer sur la plupart de leurs propriétés[48][49].

### 1. Propriétés mécaniques

Une propriété mécanique est une fonction qui exprime les relations qui existent entre la déformation d'un corps et la sollicitation qui la provoque.

Il s'agit le plus souvent d'une sollicitation mécanique ; traction, torsion appliquée à un corps solide bien que d'autres sollicitations, chimiques, thermiques puissent engendrer une déformation.

Les facteurs complexes parfois interdépendants, qui sont à l'origine de la déformation peuvent être rassemblés sous forme symbolique :

$$D = F(C, S, Pa, t) \dots \dots \dots (IV.1)$$

#### *Essai de traction*

L'essai de traction permet une étude expérimentale du comportement, jusqu'à la rupture instantanée du polymère.

L'essai s'effectue sur des éprouvettes sous forme haltère normalisées.

Cet essai consiste à étirer l'éprouvette à vitesse constante jusqu'à la rupture sur une machine de traction en mesurant simultanément la force et l'allongement.

On détermine les contraintes et allongements à la rupture à partir de la courbe de traction (Contrainte et déformation).

- **La contrainte à la rupture  $\sigma$  (MPa) :** quotient de la force appliquée au moment du bris par la section initiale de chaque éprouvette.

$$\sigma = F/S_0 \quad (IV.2) \quad [50]$$

- **L'allongement à la rupture  $\varepsilon$  % :**

$$\varepsilon = (\Delta L/L_0) \times 100 \quad (IV.3) \quad [51]$$

$$\Delta L = L - L_0 \dots \dots \dots (IV.4.)$$

**\*La résistance à la traction du PVC diminue en fonction de la température[51].**

**Elle augmente en fonction du temps de vieillissement[52].**

**\*L'allongement à la rupture du PVC décroît ou bien diminue en fonction du temps de vieillissement[52].**

**Il augmente en fonction de la température[53].**

## **2. Propriétés physiques**

### ***2.1 Perte de masse***

Cette caractéristique est déterminée par une pesée directe de l'éprouvette après vieillissement thermique et chimique. La perte de la masse est due principalement à la migration de plastifiant du PVC compound vers l'agent chimique où l'éprouvette est immergée. La perte de plastifiant est considérée comme la cause principale et dominante de la dégradation du polymère [54].

### ***2.2. Caractéristiques dimensionnelles***

Une matière plastique est caractérisée par ses dimensions qui donnent une idée sur le comportement de cette dernière en contact avec la température et le produit chimique. On peut déterminer la longueur d'une éprouvette à l'aide d'un pied à coulisse, par contre l'épaisseur est déterminée par un micromètre.

### ***2.3. Changement de couleur***

La dégradation du PVC se traduit par une modification de la couleur de la résine.

La manifestation la plus subjective est celle de la discoloration ou changement de teinte qui est aussi frappante que celle de la décoloration, C'est à dire de l'effacement de la couleur. Toutefois, sauf le cas où les qualités d'aspect sont fondamentales, il arrive souvent que

d'autres qualités fonctionnelles ne dépendent nullement du colorant incorporé dans la résine dont la teinte est parfois susceptible d'évolution [55].

#### ***2.4. Gonflement du PVC***

Le gonflement du PVC est dû principalement au phénomène de la diffusion, c'est à dire, le déplacement de l'agent chimique vers l'éprouvette.

La diffusion d'un liquide à travers un polymère dépend du mouvement désordonné de ses segments de chaînes. Les segments de chaînes capables de mouvements autour des liaisons charnières peuvent créer des trous momentanés, dans les quels transitent les molécules de diffusant. Pour un élastomère, l'absorption d'un liquide entraîne un déploiement des chaînes macromoléculaires de réseau qui se déforme et il en résulte un gonflement du matériau[56].

#### ***IV.6. Durée de vie du PVC***

La durée de vie du PVC est le temps nécessaire pour qu'une propriété techniquement importante atteigne une valeur limite telle que le matériel puisse encore fonctionner de façon satisfaisante.

La durée de vie d'un matériau isolant en fonction de la température de vieillissement est donnée par une relation de type Arrhenius[57].

# Étude expérimentale

# Etude sur éprouvettes

Ce chapitre est consacré aux essais réalisés au niveau de laboratoire de la câblerie électrique d'Alger.

Les essais ont été effectués sur la gaine de protection F3, qui a la composition suivante :

PVC (résine)	.....	<b>100</b> Parties
DOP ou DIDP (plastifiant)	.....	<b>49</b> Parties
BSH (charge inerte)	.....	<b>35</b> Parties
Interstab (stabilisant)	.....	<b>5</b> Parties
TiO <sub>2</sub>	.....	<b>1</b> Partie

Avant de décrire en détail le mode opératoire de nos expériences, il nous semble judicieux de donner plus d'information sur la mise en œuvre du matériau, et d'expliquer en bref les différentes étapes de préparation du produit fini qui est le PVC compound.

### ***Réalisation d'une plaque du PVC et préparation des échantillons :***

La préparation d'une plaque du PVC au niveau de laboratoire est réalisée en deux étapes :

#### ***1. Mélangeage :***

La résine du PVC et les différents adjuvants sous forme de granulés "compound" sont introduits dans un mélangeur de forme cylindrique. Dans ce mélangeur, la résine et les adjuvants sont chauffés jusqu'à 140 °c pour permettre une bonne liaison entre eux.

#### ***Description et utilisation du mélangeur et préparation des dry blend :***

#### ***Domaine d'application :***

Les mélangeur dry blend sont utilisés pour un mélange à sec et un mélange de produits liquides à composants solides et pâteux à base de PVC en vue d'obtenir des dry blend.

### ***Description de l'appareil :***

- Le mélangeur est monté sur un bâti en acier ;
- Le moteur d'entraînement est bridé sur le bâti verticalement ;
- Une cuve en forme de verres à cognac ;
- Un agitateur (se compose d'une partie inférieure sous forme d'hélice et une partie supérieure sous forme de couronne) ;
- Un déflecteur logé dans le couvercle comporte la sonde pour régler la température ;
- Une trappe de vidange au point le plus bas.

### ***Mode opératoire :***

- Le volume du mélangeur à préparer doit remplir au moins  $\frac{3}{4}$  de la cuve ;
- Vérifier la propreté du mélangeur ;
- Vérifier le serrage des outils (filetage à gauche) ;
- Assurez-vous que la trappe de vidange est bien fermée ;
- Introduire les ingrédients (poudre seulement) ;
- Bien fermer le couvercle ;
- Mettre en marche le mélangeur en n'omettant pas de régler la minuterie ;
- Attendre environ 5min. pour introduire les ingrédients liquides par le raccord de  $\frac{3}{4}$  " soudé sur le couvercle ;
- Régler le déflecteur de sorte qu'il doit faire barrage au sens de rotation de la matière et s'assurer que le bord inférieur du déflecteur doit toucher la matière à mélanger ;
- Quand la température atteint  $80^{\circ}\text{C}$  à  $100^{\circ}\text{C}$  et que le mélange paraît être sec, diminuer la vitesse de rotation à 1000t/min. et arrêter le moteur ;
- Ouvrir la trappe de vidange pour récupérer le mélange sec, et remettre en marche le moteur à faible vitesse pour la vidange complète et enfin couper le courant, ouvrir le couvercle, laisser refroidir et nettoyer soigneusement la cuve et les outils.

### ***Description et utilisation du mélangeur et préparation des plaques.***

Le mélangeur utilisé convient pour tout types de travaux de mélange, de recherche et de contrôle et pour tirer des feuilles ou des plaques pour les mélanges caoutchoucs et pour la gélification des matières plastiques.

**Description de l'appareil :** l'appareil est constitué des éléments suivants :

- Un châssis en mécano soudure ;
- Deux bâtis porte cylindres : Un bâti fixe portant le cylindre avant et un bâti pivotant portant le cylindre arrière ;
- Deux cylindres identiques, chaque cylindre a un diamètre de 150mm ;
- Régulation thermique des cylindres par thermo-fluide ; Température Max.240°C avec boîtiers tournants basse pression et poste de thermorégulation (10KV) ;
- Réglage d'écartement des cylindres manuel et servocommande ;
- Limite gomme télescopique ;
- Bac en acier inox ;
- Balancier de sécurité et sécurité aux genoux ;
- Boite à boutons "préparation – marche -arrêt " ;
- Variation continue de la vitesse, avec indicateur de 10 à35Tr/min.

**Mode opératoire :**

- Mettre le mélangeur en marche ;
- Programmer la température de mise en œuvre ;
- La masse du mélange à mettre en œuvre ne doit pas dépasser 1000g ;
- La vitesse des cylindres doit être 20+/-1Tr/min ;
- L'écartement doit être régler selon le produit à mettre en œuvre ;
- Introduire le mélange entre les 2 cylindres et former un manchon, en récupérant les ingrédients du bac et les mettre sur les cylindres jusqu'à formation d'un bourrelet exempt de produits pulvérulents ;
- Faire des coupes au 3/4de chaque coté du manchon alternativement dans un sens et dans l'autre, jusqu'à obtention d'un mélange bien homogène ;

- Régler l'écartement des cylindres à 2 ou 3mm selon le mélange et retirer la feuille ou plaque qui sera placée sur une surface propre et sèche pour la laisser refroidir.

## **2. Mise en œuvre :**

Le mélange sorti du mélangeur sous forme de lambeau est découpé en plaques ayant une épaisseur supérieure à celle désirée.

Ensuite, chaque plaque est introduite entre les plateaux d'une presse chauffée à 180°C. Cette presse exerce sur la plaque une force de 400KN pendant 5 minutes environ.

### ***Description et utilisation de la presse***

#### ***Domaine d'application :***

- Vulcanisation et réticulation des caoutchoucs ;
- Plastification et gélification des matières plastiques.

#### ***Description de l'appareil :***

C'est une unité autonome conçue pour être montée sur un établi ,comportant :

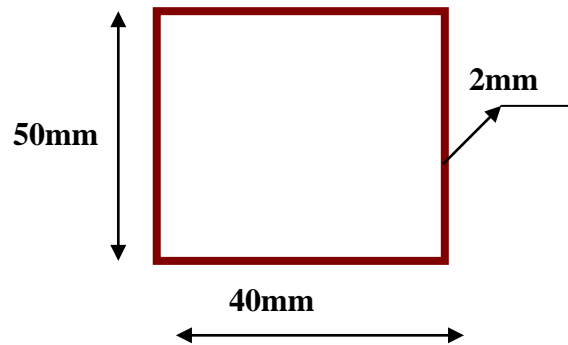
- Châssis principal ;
- Cylindre hydraulique à double effet ;
- Deux plateaux chauffés électriquement T°max.300C° ;
- Motopompe ;
- Démarrage par boutons poussoirs double ;
- Cycle de temps de la pression automatiquement ;
- Dégazage automatique.

#### ***Mode opératoire :***

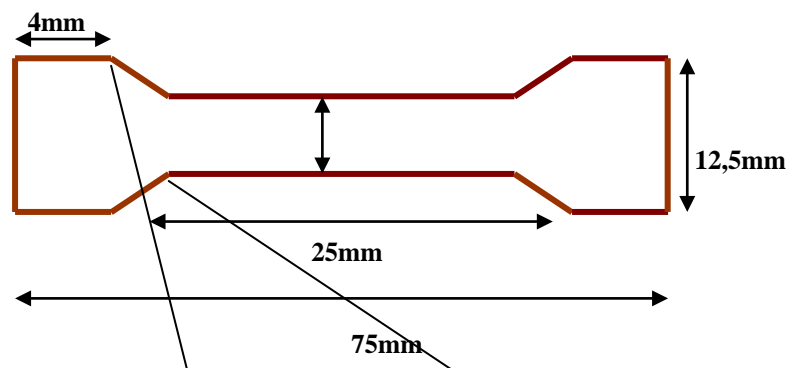
- Mettre en marche la presse de table ;
- Chauffer les moules à la température de vulcanisation ou plastification à 0,5°C près  
Voir DAQ- PP 0 A préparation des mélanges au laboratoire ;
- Régler le temps de séjour des ébauches à partir de la minuterie montée sur le panneau de contrôle ;
- Régler la pression minimum et maximum ;

- Maintenir la presse fermée pendant au moins 20 mn, avant d'introduire les ébauches ;
- Ouvrir la presse et introduire les ébauches dans les moules et refermer aussi rapidement que possible en appuyant sur les deux boutons verts ;
- Maintenir ceux-ci en position « enfoncée » jusqu'à ce que le contact maximal autorisé arrête la pompe ;
- Après l'ouverture automatique de la presse retirer les plaques et les refroidir dans l'eau ou sur une plaque métallique.

Les plaques ainsi formées sont carrées d'environ 25 cm de côté et de 2 mm d'épaisseur. Après cette opération, les plaques sont découpées en éprouvettes haltères type- H2 pour les essais mécaniques et carrées pour les essais dimensionnels (mesure de longueur) et de perte de masse conformément à la norme CEI 811-1-2 et parties 3 pour les caractéristiques mécaniques et NFC T 51-029 pour les essais physiques.



**Fig V.1.EPROUVETTE CAREE**



R8

R12,5

**Fig V.2 EPROUVETTE HALTERE TYPE-2*****Dispositifs expérimentaux :******1. Dispositif pour les essais mécaniques :***

L'appareil utilisé pour les essais mécaniques comprend un dynamomètre muni de deux mâchoires exerçant un effort de traction croissant. L'une des mâchoires est fixe, l'autre se déplace à une vitesse constante.

***Description et utilisation de l'installation pour essai de traction :******Domaine d'application :***

Le dynamomètre est utilisé pour la détermination de l'allongement ainsi que la résistance à la rupture des fils et feuilards en cuivre, en aluminium et en alliage d'aluminium entrant dans la construction des conducteurs électriques ainsi que les différentes gaines de protection.

***Description de l'appareil :***

L'appareil comprend :

- Une mâchoire fixe ;
- Une mâchoire mobile entraînée par une vis continue ;
- Cadrons ;
- Une aiguille statique (témoin) ;
- Une aiguille dynamique : Gamme de : 0 à 100Kkf  
100 à 500Kgf avec un contre poids ;

***Mode opératoire:***

- Régler la distance des mâchoires à 200mm ;
- Préparer l'éprouvette avec longueur entre repère 200mm plus une longueur à chaque extrémité pour fixation ;
- Fixer l'extrémité inférieure puis l'extrémité supérieure de l'éprouvette ;
- Régler le cadran de lecture à 0Kgf pour les deux aiguilles ;
- Pousser le bouton (traction) ;
- Après rupture, l'aiguille dynamique revient à la valeur "0" tandis que l'aiguille statique (témoin) reste à la valeur de charge lue ;
- Enlever avec soin les deux morceaux de l'éprouvette pour la mesure de l'allongement.

La résistance à la rupture est exprimée en  $\text{N/mm}^2$  par contre l'allongement est exprimé en %.

## ***2. Dispositif pour les essais de perte de masse :***

Pour les essais de perte de masse, nous avons utilisé une balance électrique d'une précision de  $10^{-5}$  g. Cette balance est enfermée à l'intérieur d'une enceinte afin d'éviter toute pénétration d'air. L'éprouvette à peser est introduite par la porte de l'enceinte qui doit être fermée lors de l'essai.

### ***Description et utilisation de la balance électrique SARTORIUS***

C'est une balance électrique de référence 1206 MP étendue de pesée de 1300g avec une précision de lecture de 0,1 g.

### ***Description de l'appareil :***

- L'appareil est constitué d'un boîtier métallique et d'un plateau de pesée en acier inoxydable ;
- Le boîtier contient tous les éléments de commande et d'indications : interrupteur de mise en service, le bouton de tarage, d'affichage d'indication du poids et d'indication de stabilité.

**Mode opératoire :**

- Enclencher l'interrupteur de mise en marche ;
- L'échelle d'affichage s'allume et l'apparition du symbole « g » confirme la stabilité du système de pesée et l'indication correcte du poids ;
  - Appuyer sur la touche par l'affichage à zéro ;
  - Déposer le produit à peser sur le plateau et lire l'indication du poids qui apparaît instantanément.

**3. Dispositif pour déterminer la variation des dimensions :**

Pour déterminer la variation de la longueur des éprouvettes on utilise un pied à coulisse. Par contre la variation de l'épaisseur des éprouvettes est déterminée à l'aide d'un micromètre.

**Description et utilisation du micromètre à cadran :****Domaine d'application :**

Pour la mesure des épaisseurs de matériaux tels que : papier ,carton ,tissus et films plastiques.

**Description de l'appareil :**

- Appareil constitué d'un boîtier monté sur un socle en fonte avec cadran gradué de 0 à 2mm ;
- Palpeur à commande manuelle, avec précision de mesure de 1 bar.

**Mode opératoire :**

- Vérifier et régler le zéro par le bouton latéral ;
- Appuyer à fond sur le levier marquer, un temps d'arrêt ;
- Introduire l'éprouvette entre les deux vouchers, fixe et mobile puis lâcher le levier ;
- Lire le résultat après stabilisation de l'aiguille.

**Conditions générales et techniques des essais****1. Liquide d'essai**

Les liquides d'essai concernent respectivement :

- Produits chimiques minéraux purs ;
- Produits chimiques organiques purs ;
- Produits industriels divers. [voir tableau V.1]

## ***2. Températures d'essai***

La température est choisie d'une façon à correspondre à la température à laquelle la matière plastique peut être utilisée. Généralement les essais sont réalisés dans des conditions très sévères par rapport aux conditions de leur service.

La température a été choisie d'après l'échelle normalisée des températures par l'intermédiaire d'une étuve. [Norme NFCT51.000]

### ***Description et utilisation de l'étuve :***

#### ***Description de l'appareil :***

C'est une étuve électrique à éléments chauffants.

- L'étuve est munie d'un ventilateur ;
- Deux volets permettent d'assurer une circulation d'air frais réglable ;
- Un régulateur (thermostat) automatique pour régler la température de 50 à 200°C ;
- Un thermomètre sur la porte gradué de 30 à 220°C ;
- Un thermostat ;
- Le commutateur de chauffe ;
- Voyant de signalisation(chauffage) ;
- Voyant de signalisation (réseau) ;
- Interrupteur et la minuterie.

#### ***Mode opératoire :***

- Placer l'index du bouton du thermostat sur la graduation correspondant à la température désirée ;
- Régler les événements d'entrée et de sortie d'air pour renouveler complètement au moins 8 fois et au plus 20 fois par heure à la température prescrite ;
- Mettre en marche l'étuve, les voyants de signalisation ;
- Mise en place des éprouvettes à faire vieillir ;
- Les éprouvettes doivent être suspendues verticalement dans l'étuve ;
- Elles doivent être immobiles sans tension et exposées librement à l'air sur toutes leurs faces et à l'abri de la lumière ;
- L'étuve ne doit pas être ouverte plus d'une fois par jour pour la mise en place et le retrait des éprouvettes ;
- A la fin de l'essai retirer les éprouvettes et les laisser au repos dans les conditions prévues par la norme.

### ***3. Durée des essais***

La durée des essais est choisie dans une échelle normalisée selon la norme NFC T51.000

Nous avons exposé après immersion dans l'agent chimique plusieurs éprouvettes en forme d'haltères et carrées à différentes températures pendant des durées allant de 4 à 5000 heures. Ci-dessous quelques valeurs de temps et de températures appliqués sur les éprouvettes.

*Agents chimiques, Températures et Durées d'essais***Tableau V.1**

Agent chimique	Température °C	Durée d'essais (Heures)	
		Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques physiques
Huile TISKA220	70	2160	4725
	85	1080	3700
	105	336	3288
	125	72	155
	150	28	72
Pétrole	Ambiante	4320	7160
Gasoil	Ambiante	4320	8425
Essence	Ambiante	2880	5040
Acide sulfurique à 75 %	Ambiante	2880	3000
Soude caustique à 1%	Ambiante	4320	4550
Soude caustique à 40 %	Ambiante	4320	4550

*Essai mécanique*➤ *Essai de traction***1. Mode opératoire :**

Avant chaque essai de traction, nous avons mesuré la section droite de l'éprouvette à essayer. Ensuite cette dernière a été soumise à l'essai qui consiste à la rompre par traction

On note d'une part, la charge à la traction et d'autre part l'allongement à la rupture.

La vitesse d'étirement est de 450mm/s.

L'allongement est mesuré entre deux repères fixés avant l'étirement à une longueur donnée, il est exprimé en pourcentage.

La résistance à la traction est obtenue en faisant le rapport de la charge à la rupture par la section droite de l'éprouvette.

## ***2. Influence du vieillissement thermique sur l'allongement à la rupture pour L'huile TISKA 220***

Pour les températures de 70°, 85° et 105°C, nous avons constaté d'abord une diminution de l'allongement à la rupture en fonction temps de vieillissement, due à une rupture de chaînes carbonées du matériau et à une perte de plastifiant. Nous aussi remarqué l'influence de la température sur le matériau, plus la température est basse plus le temps de vieillissement est long, donc dans ce cas la durée de vie de notre câble est plus grande.

### **Remarque :**

Nous avons constaté des fois une augmentation des allongements en fonction de la température et du temps de vieillissement, voir le graphe d'immersion de notre échantillon dans l'huile à 85°C. Cette augmentation est interprétée par une réaction de réticulation du polymère.

Pour les températures de 125° et 150°C, le temps de vieillissement est court, l'allongement diminue avec le temps de vieillissement et sous l'effet de la température aussi. Cette diminution est due aux ruptures de chaînes carbonées du polymère.

## ***3. Influence du vieillissement thermique ( $T^\bullet$ ) sur la résistance à la rupture pour***

### **L'huile TISKA 220**

Comme dans le cas de l'allongement à la rupture nous avons essayé de vérifier si la gaine peut résister à la chaleur et à l'agent chimique.

Après exposition prolongée, nous avons constaté pour les températures (125° et 150°C) une augmentation de la résistance à la traction en fonction du temps dû aux ruptures de chaînes carbonées à long terme.

Pour les autres températures (70°, 85° et 105°C) la rupture à la traction varie d'une façon non monotone (augmentation, diminution puis augmentation) et lorsque l'allongement à la rupture augmente, la résistance à la rupture diminue et vis versa.

**Remarque :**

En général la contrainte à la rupture n'est pas un bon facteur ou critère de durée de vie, car elle peut subir des variations.

**4. Influence du vieillissement chimique par immersion dans les agents chimiques**

Pour tous les produits chimiques utilisés à la température ambiante (et à différentes températures pour l'huile TISKA 220), nous avons constaté une diminution de l'allongement et une augmentation de la charge qui sont dues à la réaction d'oxydation et d'hydrolyse qui sont généralement des processus de coupure statiques de chaînes.

**Essai physique**

➤ **Essai de perte de masse**

**1. Mode opératoire**

Afin de déterminer la perte de masse surfacique de la gaine, nous avons exposé plusieurs éprouvettes en forme carrée à des agents chimiques et à des températures différentes pour l'huile TISKA 220 (ambiante pour les autres agents). Après vieillissement de 24 – 9000 heures nous avons calculé la surface d'évaporation de chaque éprouvette :

$$A = \frac{1256 + (180 * e)}{100} \text{ (cm}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{(V.3)}$$

Ensuite nous avons calculé la perte de masse surfacique de chaque éprouvette qui est le rapport de la variation de masse et de la surface d'évaporation.

**2. Perte de masse surfacique**

Nous avons constaté une augmentation de perte de masse surfacique en fonction du temps et (de températures pour l'Huile TISKA 220). Elle serait due probablement au dégagement d'acide chlorhydrique et à la migration d'adjuvants.

### ***3. Changement de couleur de la gaine***

Un changement de couleur a eu lieu pour certaines températures et certains agents chimiques

Pour l'huile TISKA 220 à températures 85°C et 70°C aucun changement de couleur n'a eu lieu.

Pour les températures 105°C, 125°C et 150°C un virement de couleur du blanc au jaune et brun foncé a été constaté.

Pour l'acide sulfurique, l'essence, le gasoil, le pétrole et la soude caustique le matériau est passé du blanc au jaune foncé après longues durées d'immersion.

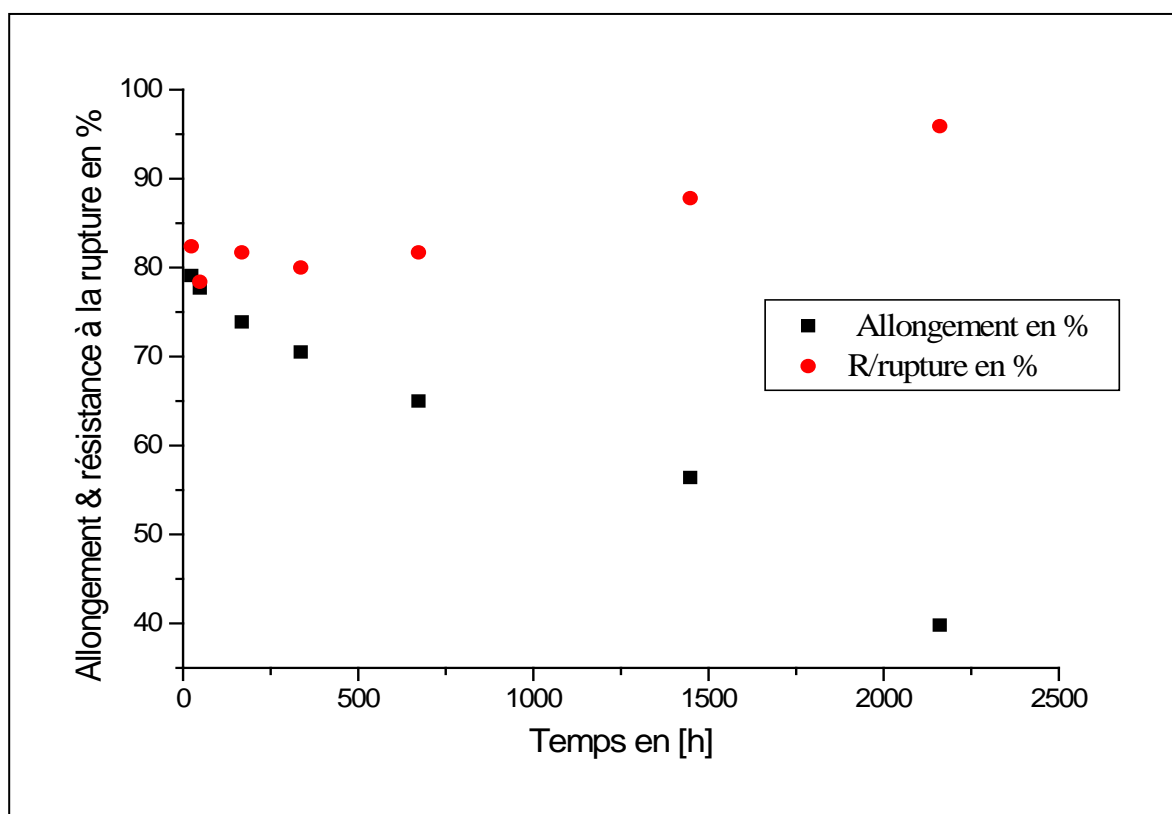
Le changement de couleur est du à un dégagement d'acide chlorhydrique et à la formation de chaînes polyéniques.

# Résultats & discussion

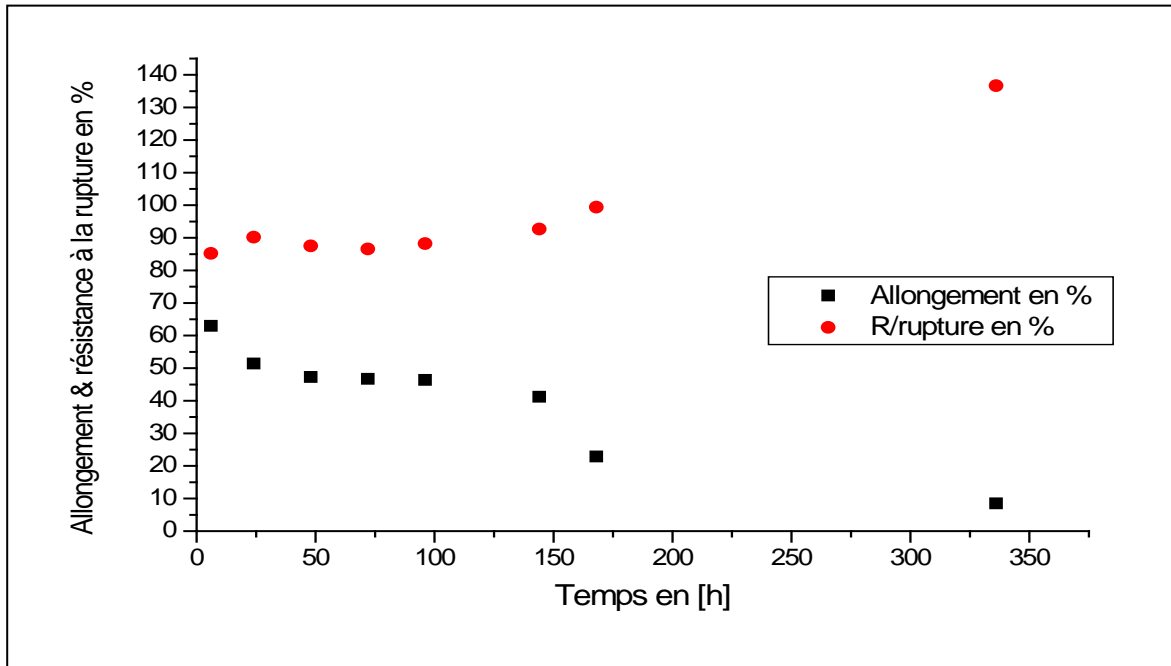
***Influence du vieillissement thermique sur l'allongement et la résistance à la rupture pendant l'immersion du PVC dans l'huile à différentes températures :***

Pour les températures de 70, 85 et 105°C, nous avons constaté une diminution de l'allongement à la rupture en fonction temps de vieillissement, due à une rupture de chaînes carbonées du matériau et à une perte de plastifiant. Quant à la résistance à la rupture elle croit en fonction du temps d'immersion. Voir figure 1, 2 et 3.

Concernant la résistance à la rupture pour les températures (70, 85 et 105°C) nous avons remarqué que la rupture à la traction varie d'une façon non monotone (augmentation, diminution puis augmentation) et lorsque l'allongement à la rupture augmente, la résistance à la rupture diminue et vis versa.

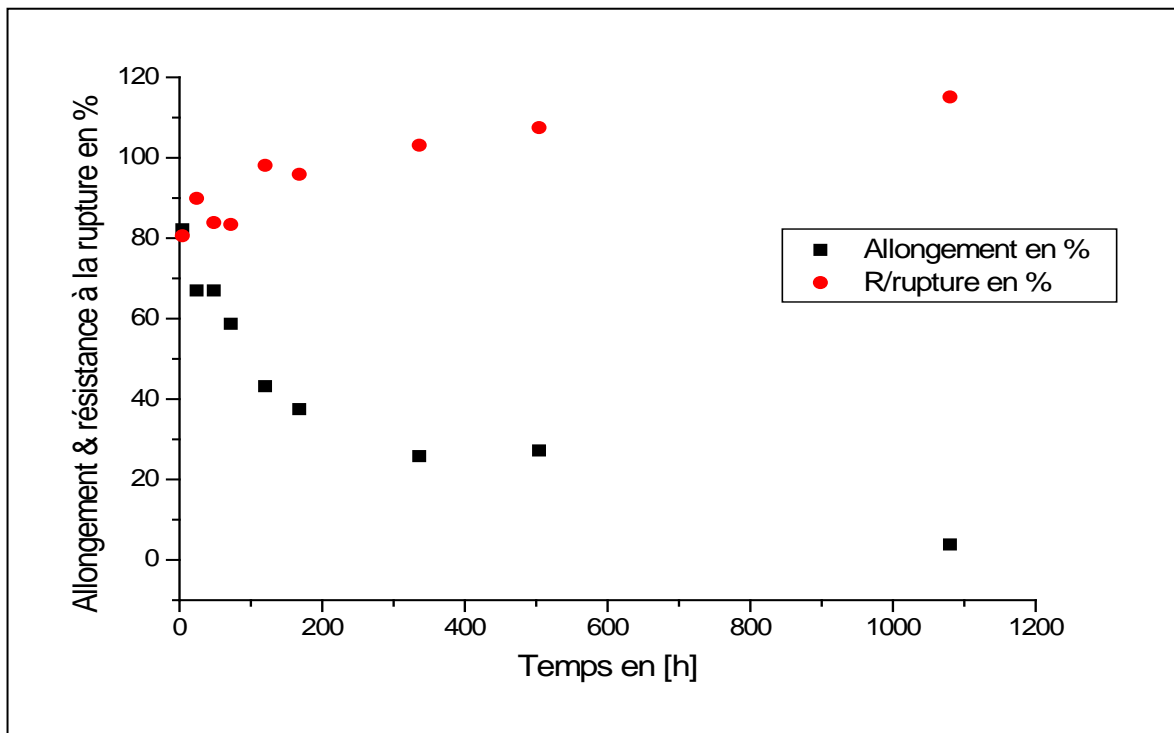


**Fig1. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 70°C**



**Fig3. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 105°C**

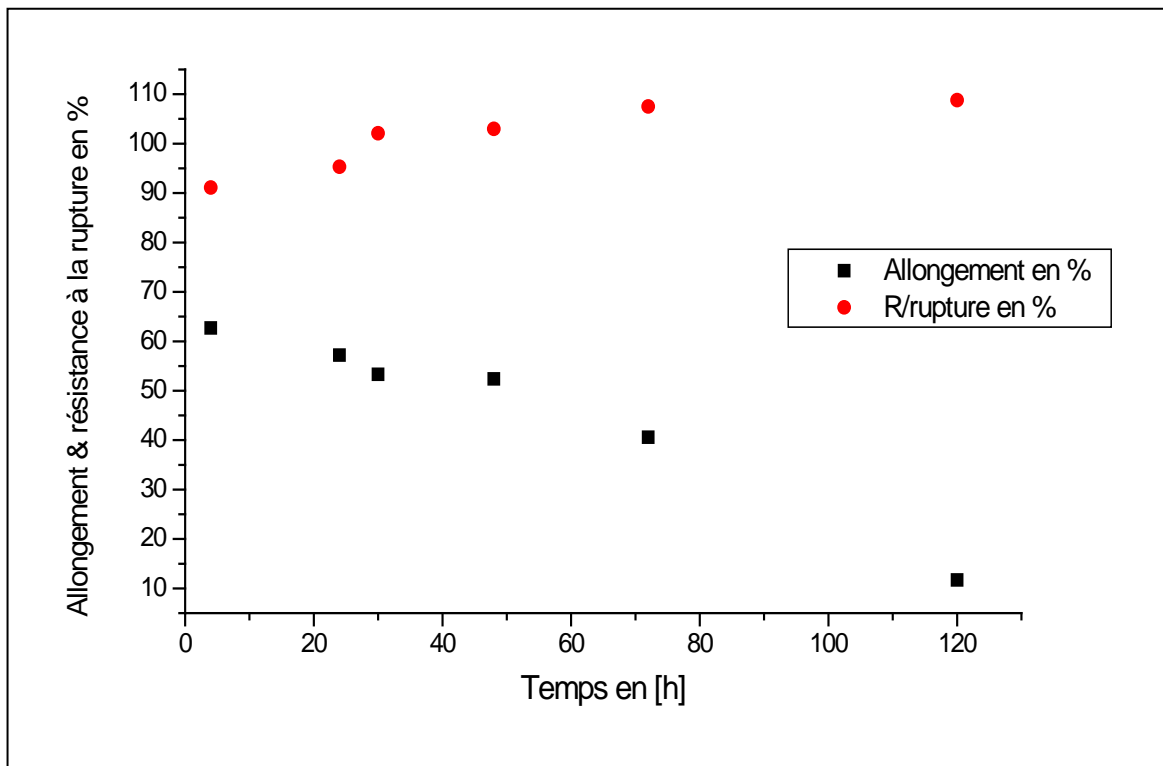
Le graphe 2 représente les caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 85°C.



**Fig2. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 85°C**

Nous avons constaté un comportement instable de notre échantillon en fonction de temps du vieillissement représenté par une augmentation des allongements. Cette augmentation est interprétée par une réaction de réticulation du polymère. La résistance à la rupture varie d'une façon non monotone.

Pour les températures de 125° et 150°C, le temps de vieillissement est court, l'allongement diminue avec le temps de vieillissement et sous l'effet de la température aussi. Cette diminution est due aux ruptures de chaînes carbonées du polymère. Nous avons aussi remarqué l'influence de la température sur le matériau, plus la température est basse plus le temps de vieillissement est long, donc dans ce cas la durée de vie de notre câble est plus grande. La figure 4 et la figure 5 montrent l'influence de l'huile et de la température en fonction du temps sur les caractéristiques mécaniques du PVC à savoir l'allongement à la rupture et la résistance à la rupture.

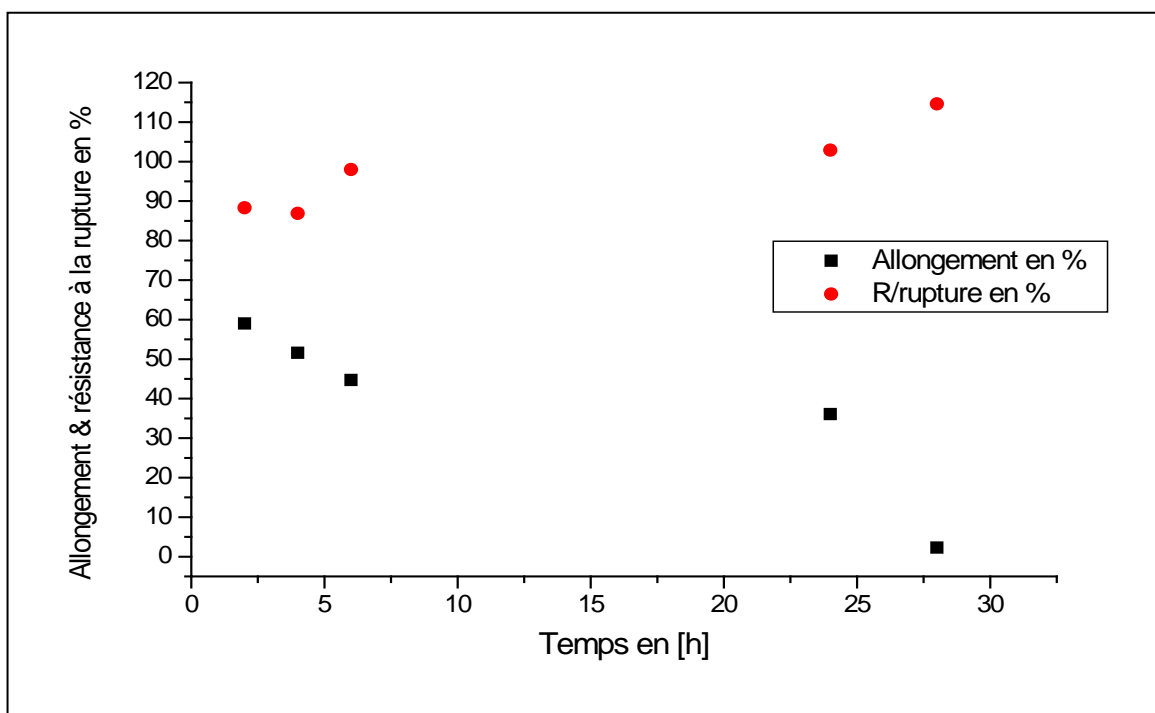


**Fig 4.** Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 125°C

ns l'huile à 125°C

Comme dans le cas de l'allongement à la rupture nous avons essayé de vérifier si la gaine peut résister à la chaleur et à l'agent chimique.

Après exposition prolongée, nous avons constaté pour les températures (125° et 150°C) une augmentation de la résistance à la traction en fonction du temps dû aux ruptures de chaînes carbonées à long terme et une diminution de l'allongement à la rupture. A noter aussi que le temps de vieillissement est très court dans ces deux cas.

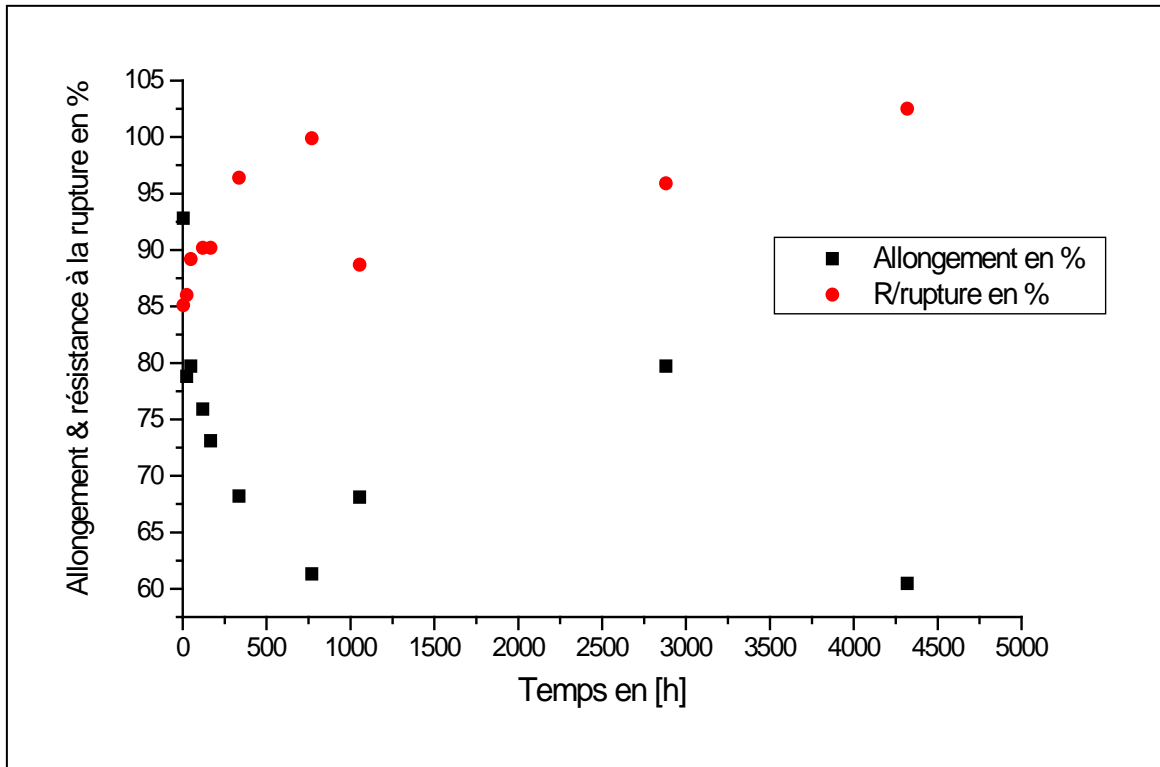


**Fig5. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 150°C**

#### *Influence des autres agents chimiques à la température ambiante*

Pour tous les produits chimiques utilisés à la température ambiante, nous avons constaté une diminution de l'allongement en fonction du temps d'immersion. La résistance à la rupture n'est pas stable, nous avons constaté des augmentations et des baisses de cette caractéristique tout au long de nos expériences, néanmoins l'exposition de notre câble aux différents produits chimiques à la température ambiante n'ont aucune influence grave sur le câble électrique.

Le comportement instable du câble vis à vis des produits chimiques est dû principalement à la réaction d'oxydation et d'hydrolyse qui sont généralement des processus de coupure statiques de chaînes. La variation des propriétés mécaniques du PVC immergé dans des produits chimiques à la température ambiante est illustrée dans les figures 6, 7, 8, 9,10 et 11.



**Fig6. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans le gasoil à 20°C**

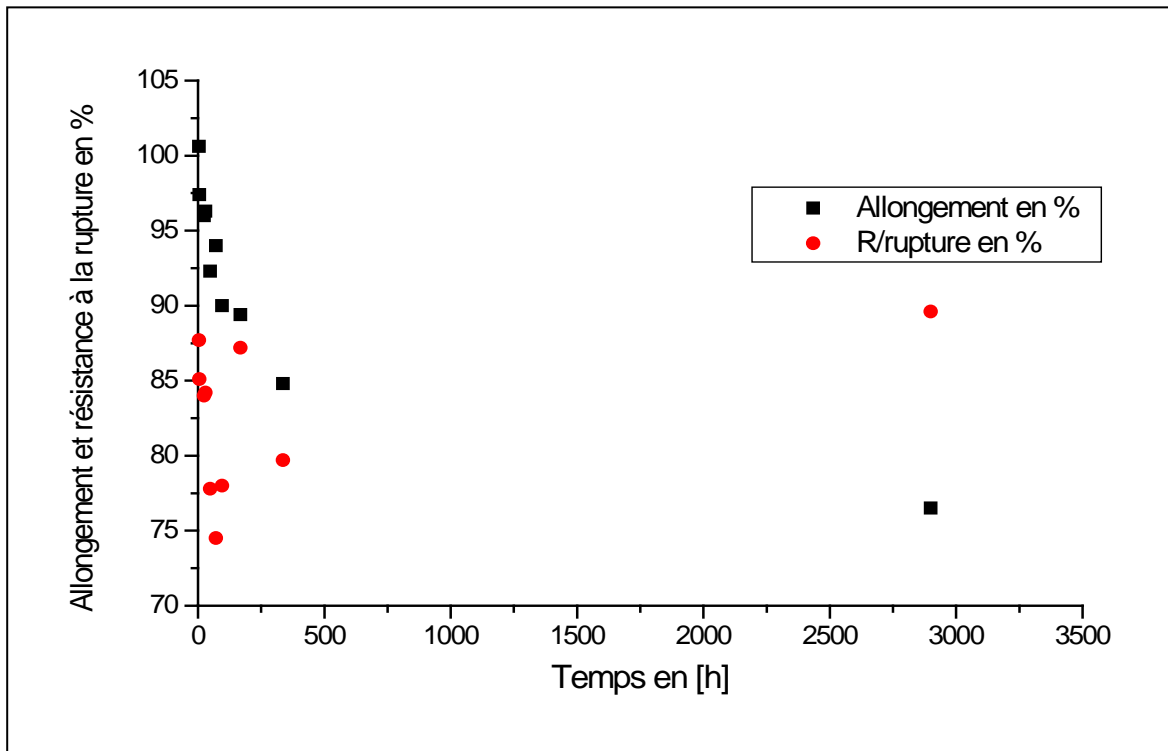


Fig7. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'essence à 20°C

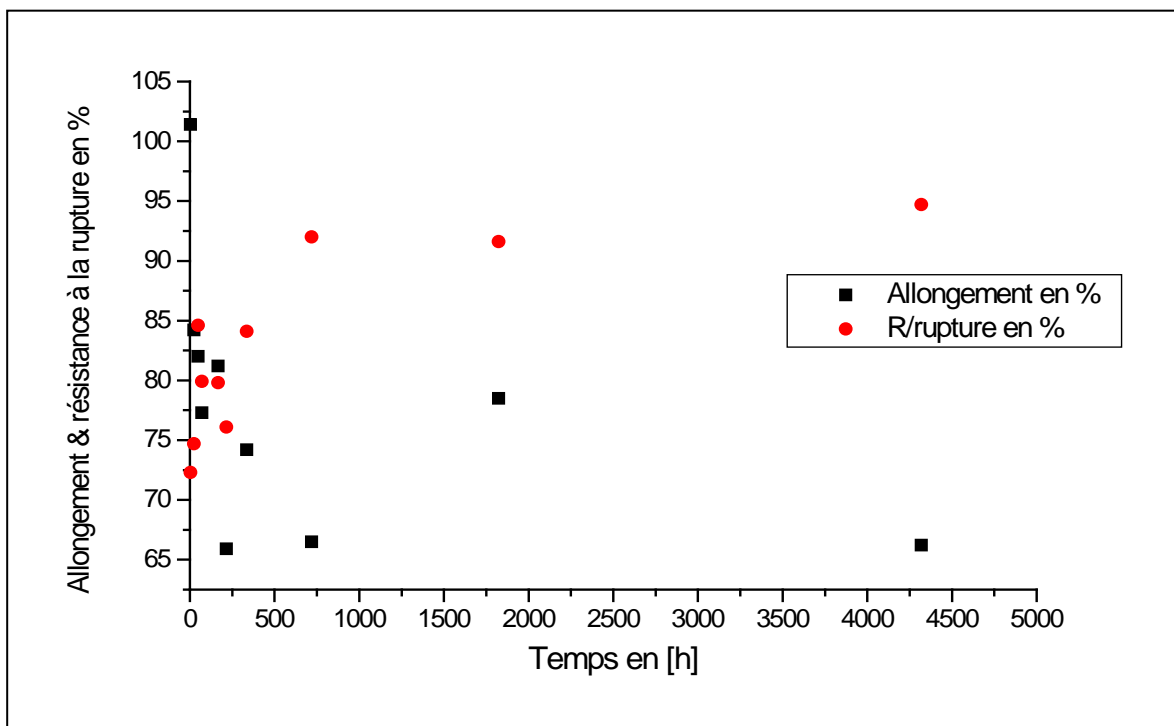
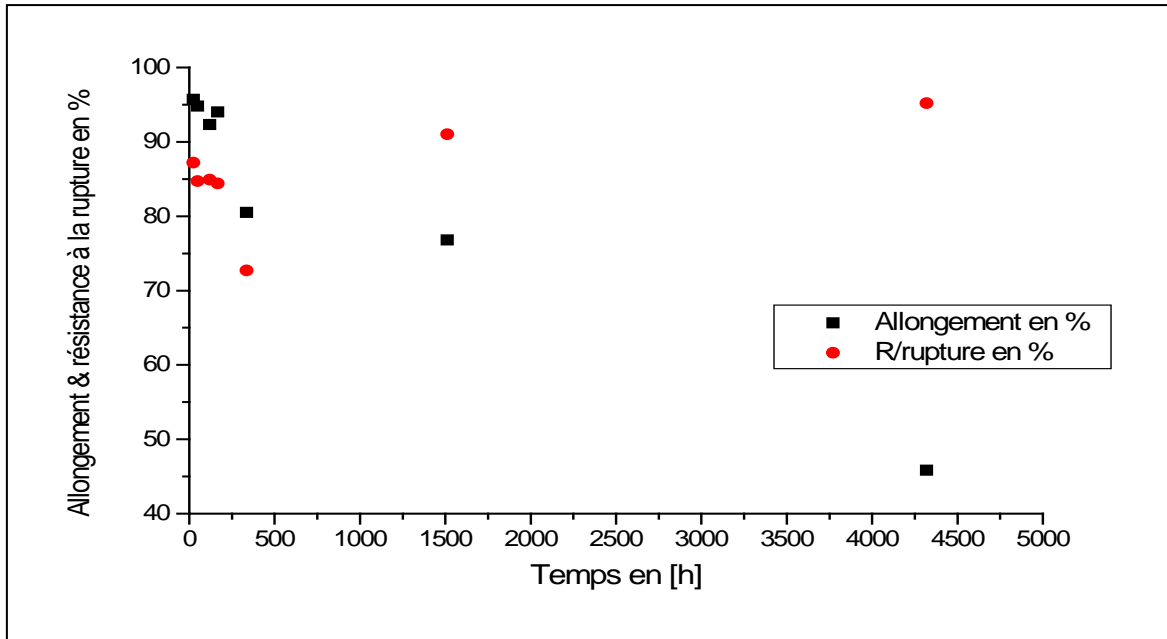
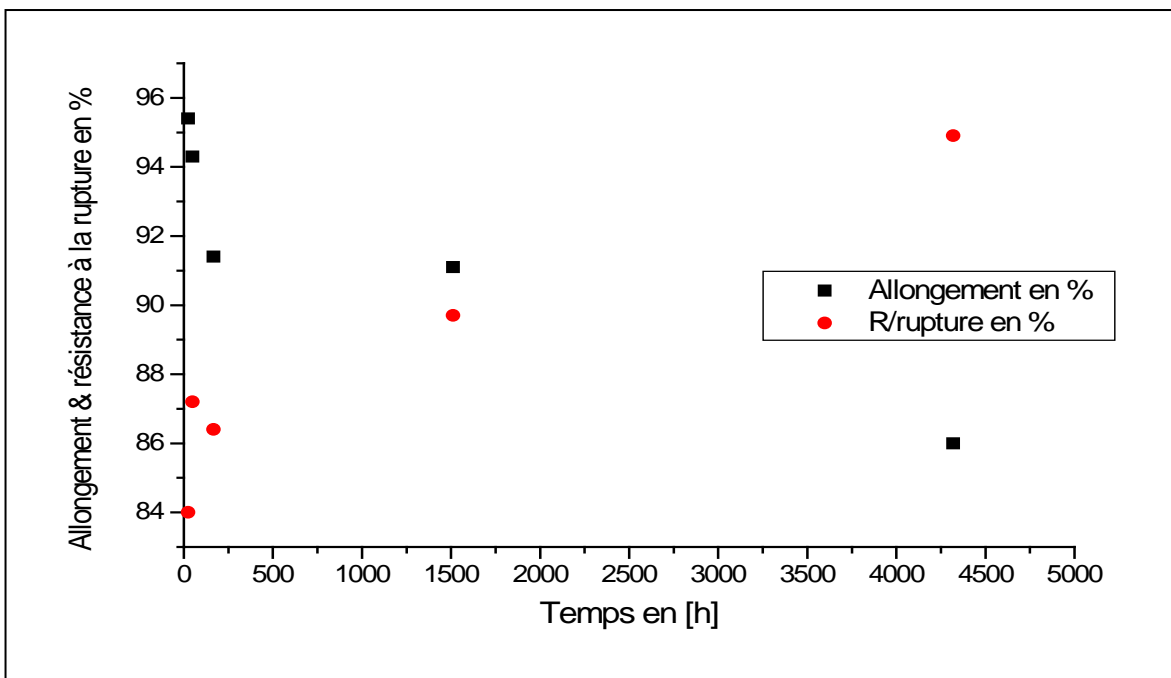


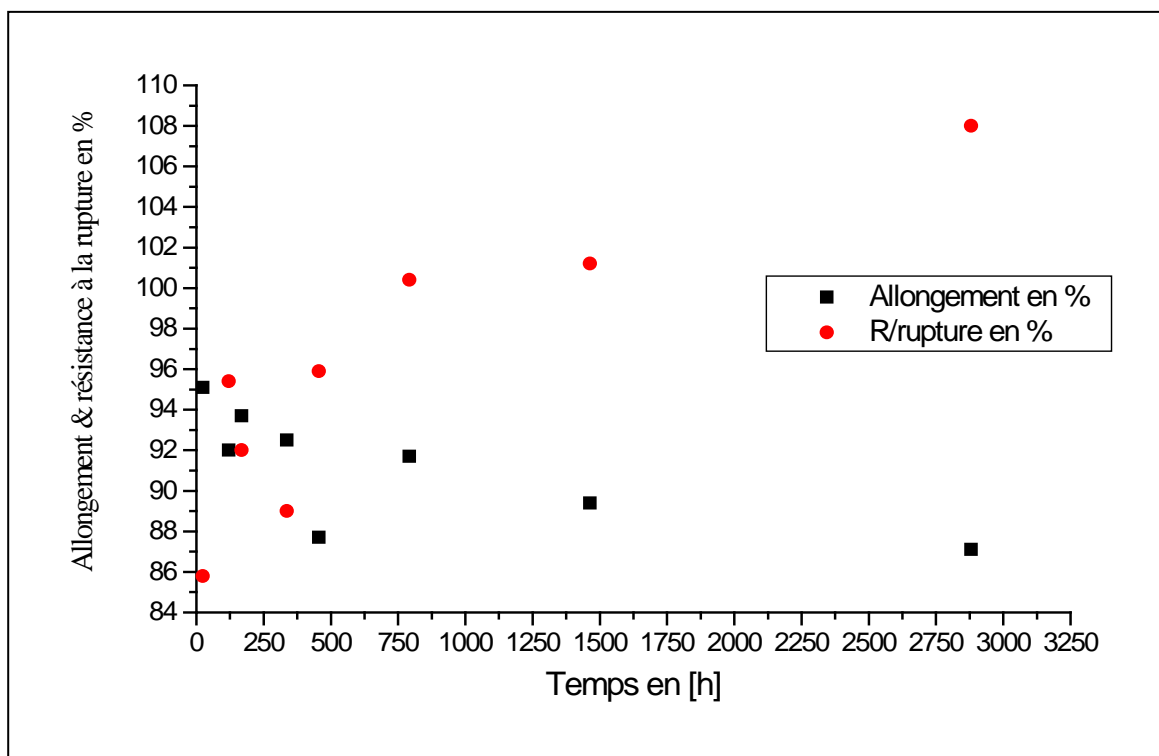
Fig8. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans le pétrole brut à 20°C



**Fig9. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans la soude caustique 40% à 20°C**



**Fig10. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans la soude caustique 1% à 20°C**



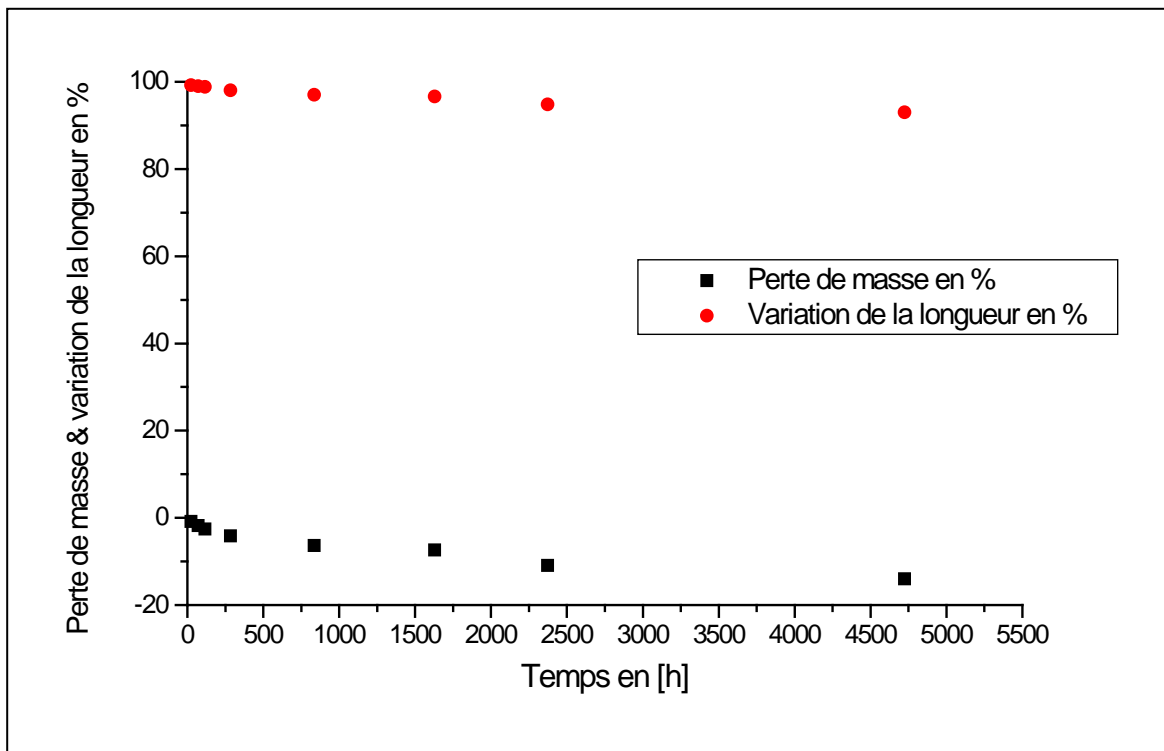
**Fig11. Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'acide sulfurique soude caustique 1% à 20°C**

#### *Influence du vieillissement sur les propriétés physiques :*

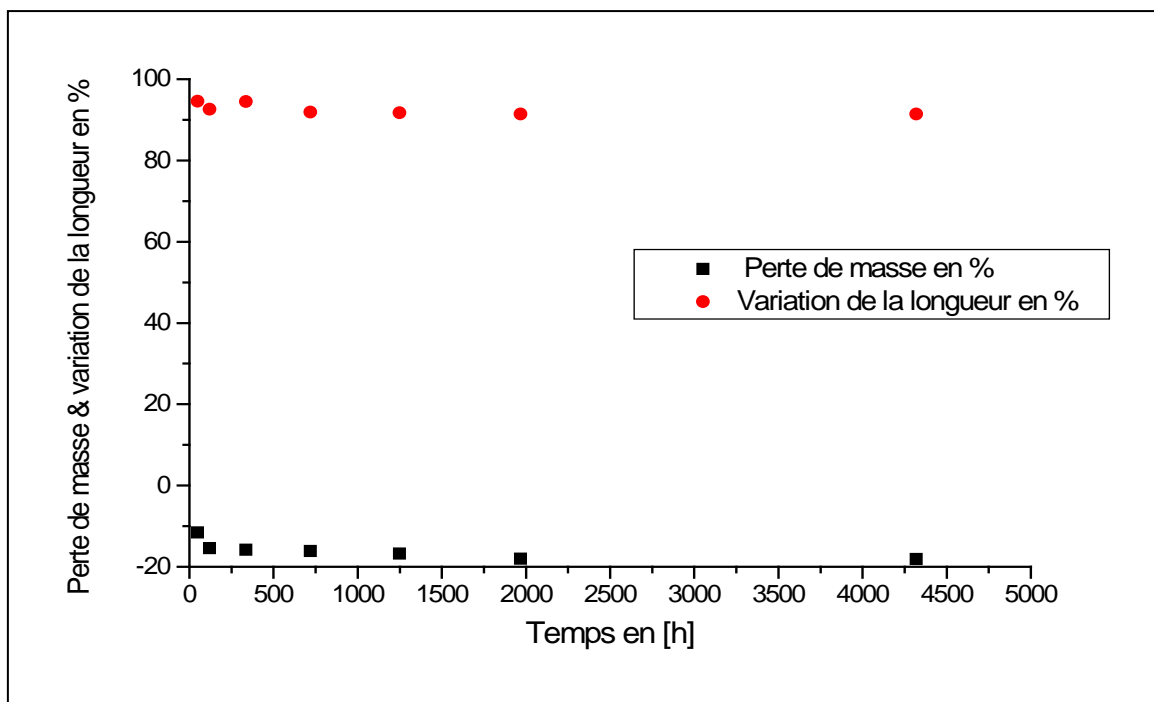
Nous avons constaté un changement de couleur pour certaines températures et certains produits chimiques. Pour l'huile à 70 et 85°C aucun changement de couleur n'a eu lieu, par contre pour les températures 105, 125 et 150°C un virement de couleur du blanc au jaune puis brun foncé a été constaté. Les figures 12, 13, 14, 15 et 16 représentent l'influence du vieillissement sur les propriétés physiques, nous avons constaté une augmentation de perte de masse surfacique en fonction du temps sans toutefois dépasser 30% de sa masse initiale un rétrécissement de l'épaisseur et de la longueur surtout à 125 et 150°C et un durcissement et un gonflement des éprouvettes.

Le changement de couleur, la perte de masse, le rétrécissement et le durcissement des éprouvettes est dû à un dégagement d'acide chlorhydrique, à la formation de chaînes polyéniques et la migration des adjuvants surtout le plastifiant. Par contre le gonflement est dû

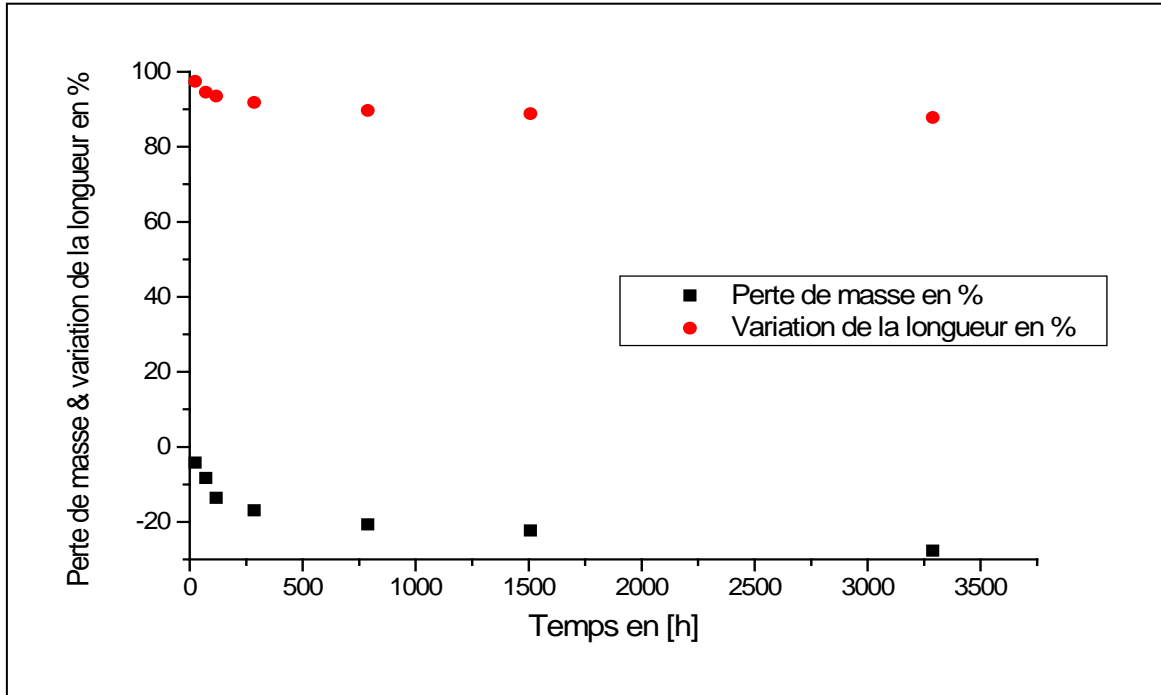
principalement au transfert du liquide extérieur dans le polymère. Ce transfert influe surtout sur les propriétés mécaniques et l'environnement.



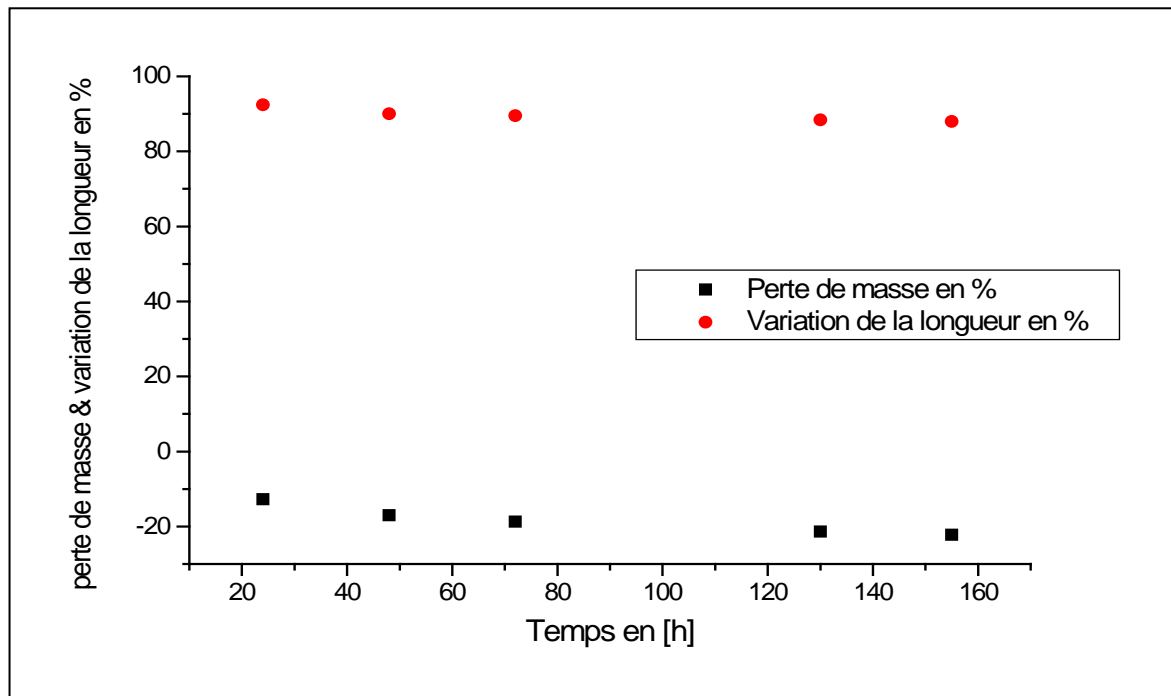
**Fig12. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 70°C**



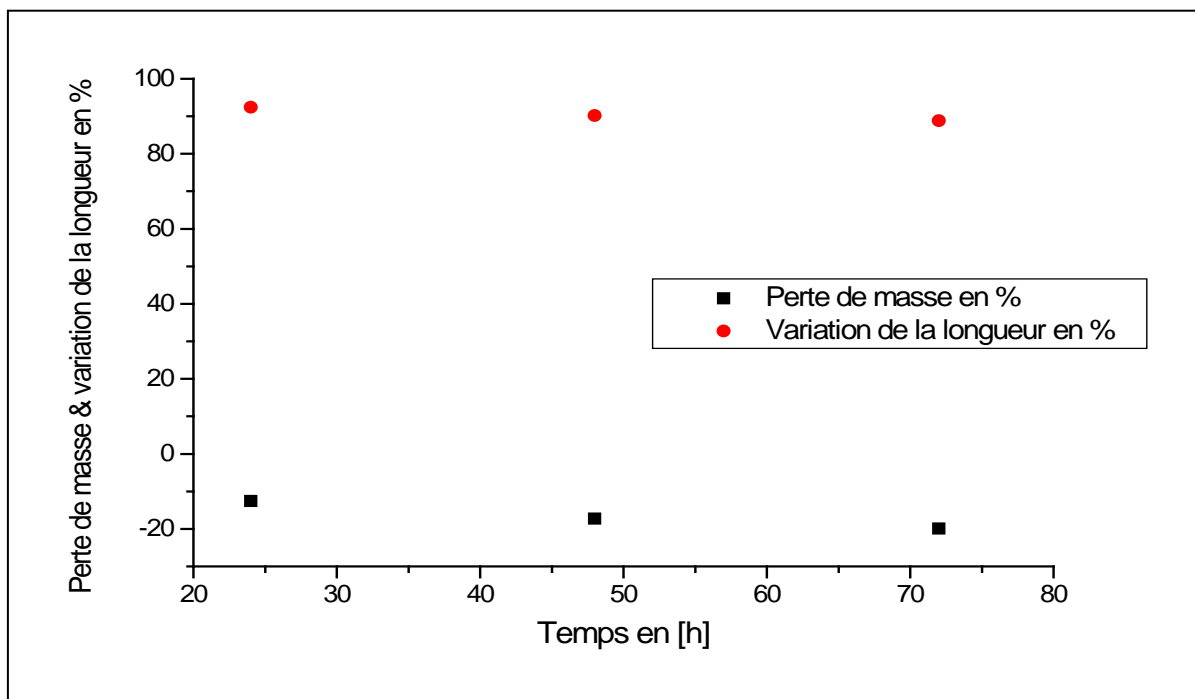
**Fig13. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 85°C**



**Fig14. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 105°C**

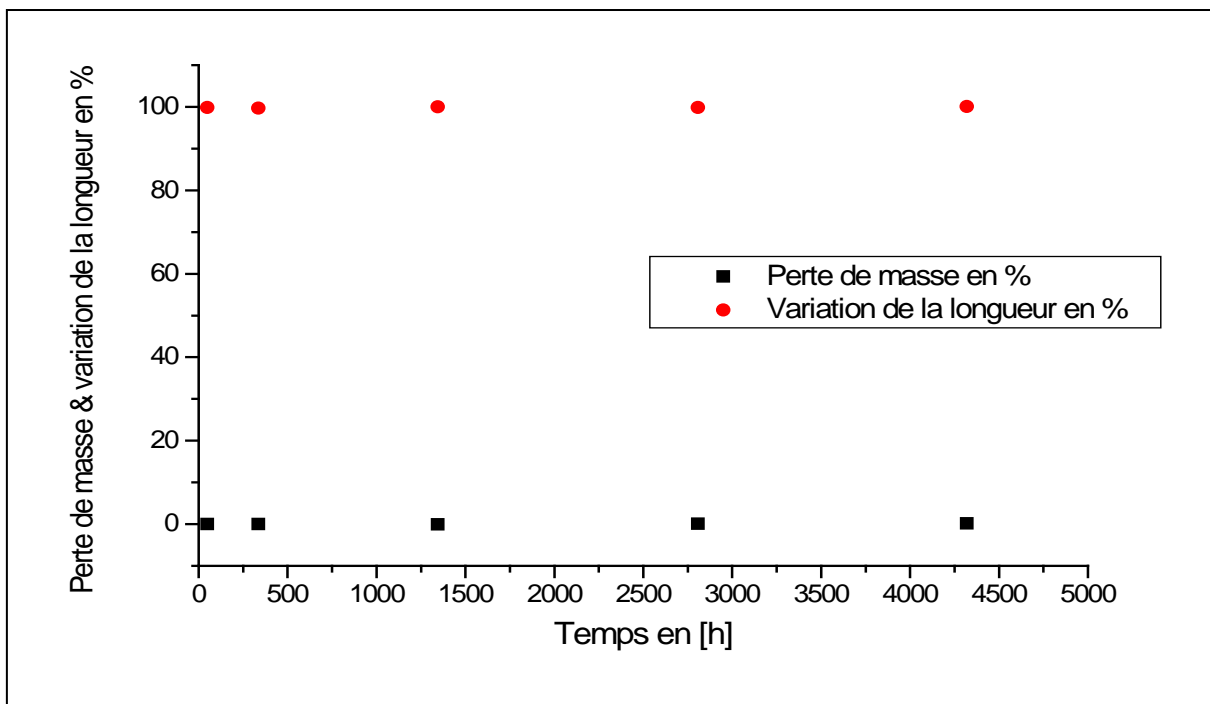


**Fig15. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 125°C**

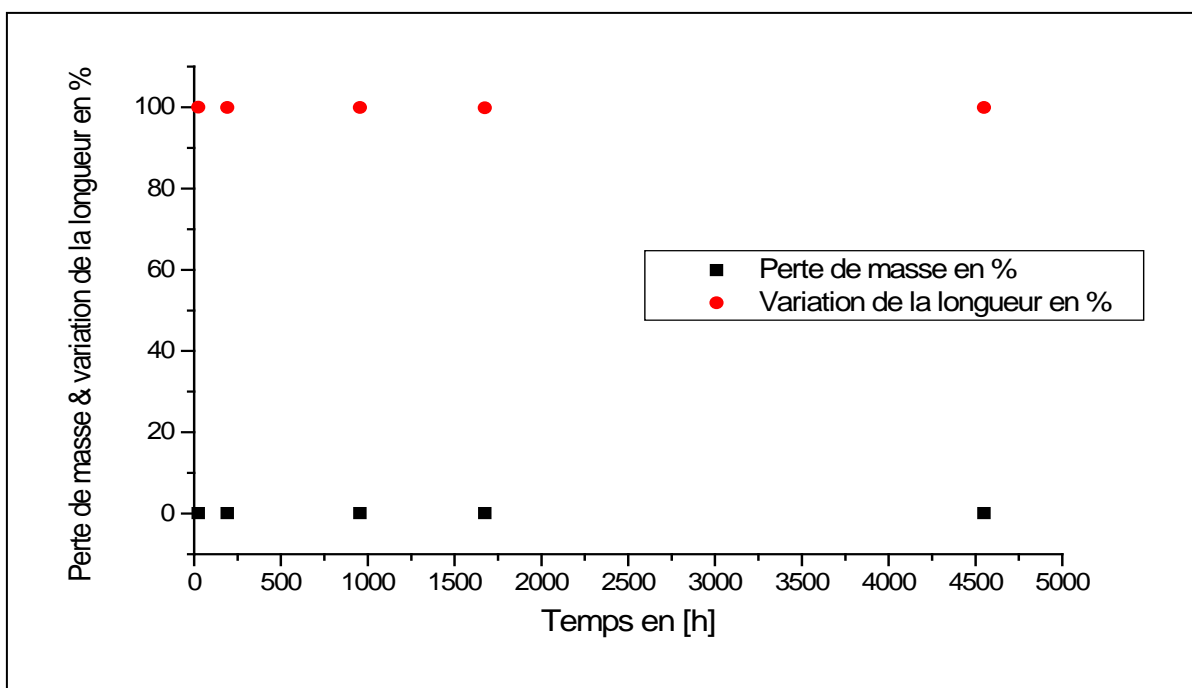


**Fig16. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 150°C**

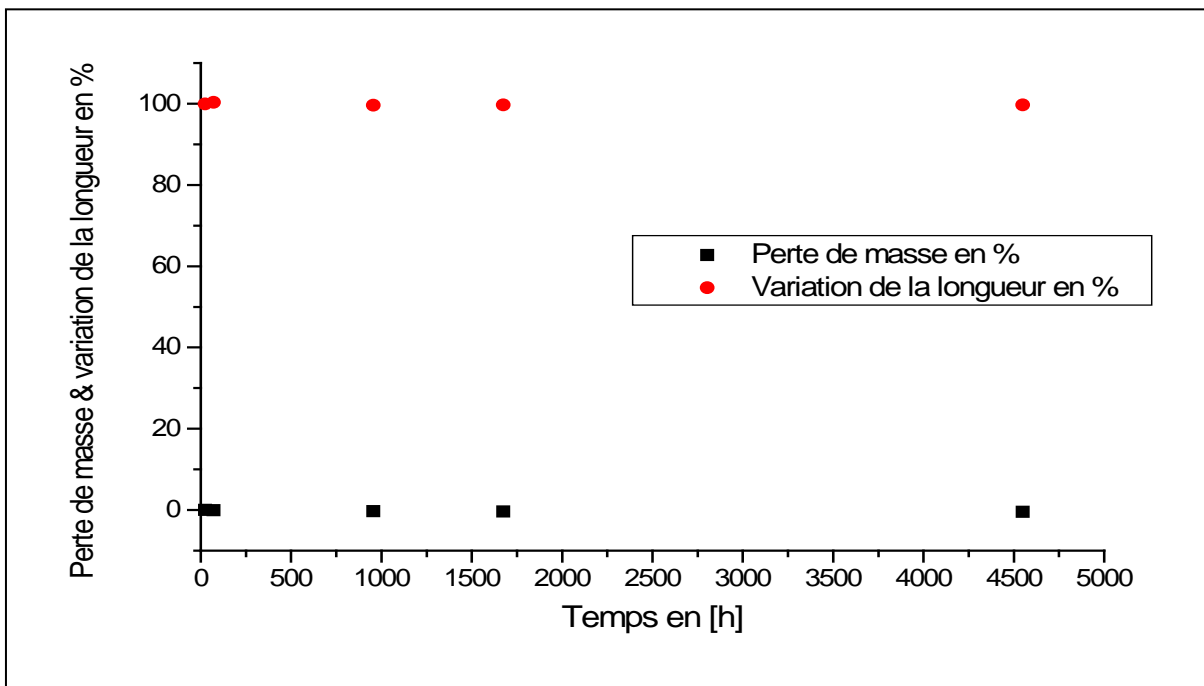
Pour les autres agents chimiques (l'acide sulfurique, le gasoil, l'essence, le pétrole et la soude caustique) à la température ambiante, le matériau est passé du blanc au jaune foncé après une longue durée d'immersion. Le changement de couleur est dû à un dégagement d'acide chlorhydrique et à la formation de chaînes polyéniques. La perte de masse dans ces cas est très minime ce qui ne va pas influencer sur les propriétés physiques du PVC. Par contre on a constaté le gonflement des éprouvettes qui est dû principalement au transfert du liquide extérieur dans le polymère. L'influence du vieillissement sur le PVC pour les produits chimiques à la température ambiante est illustrée sur les figures 17, 18, 19, 20, 21 et 22.



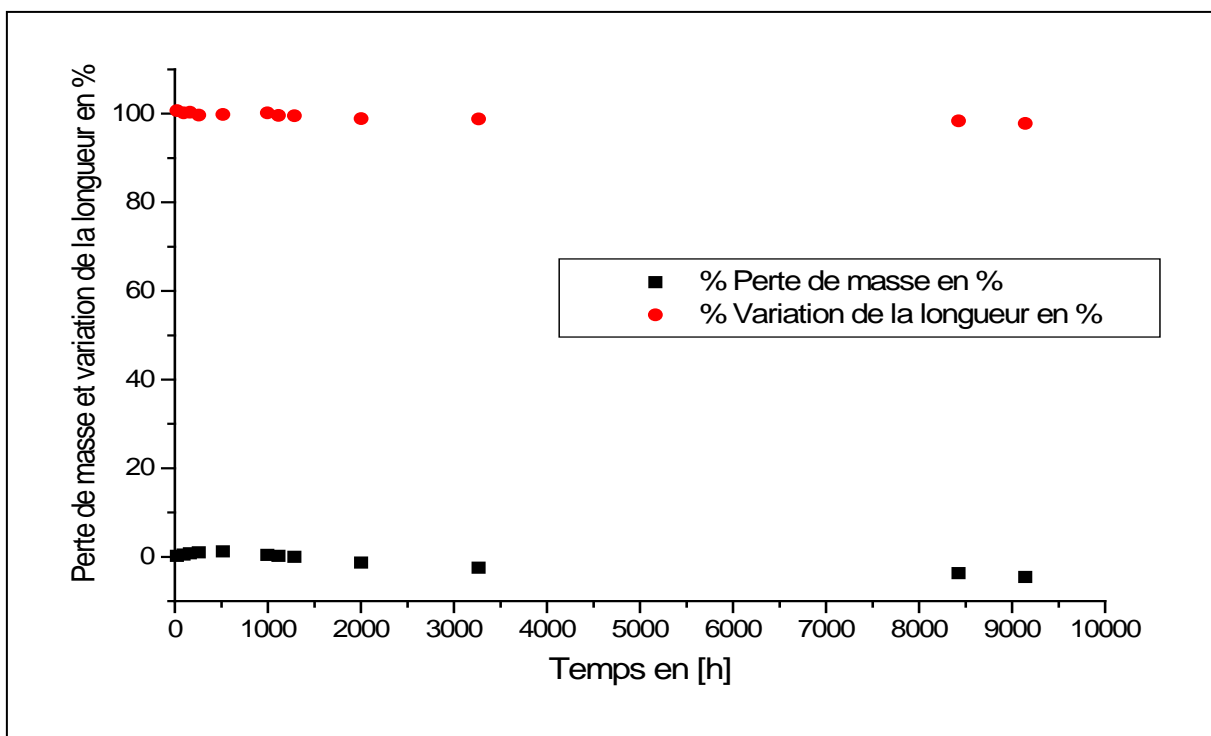
**Fig17. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'acide sulfurique à 20°C**



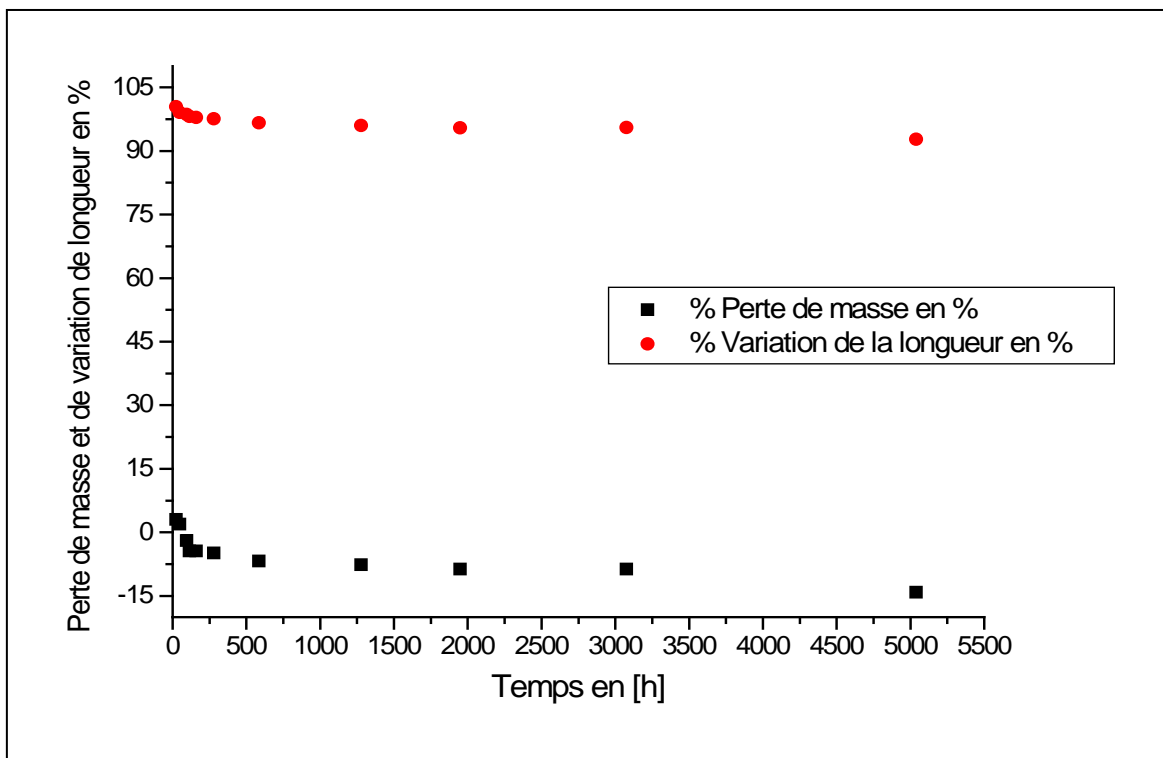
**Fig18. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans la soude 1% à 20 °C**



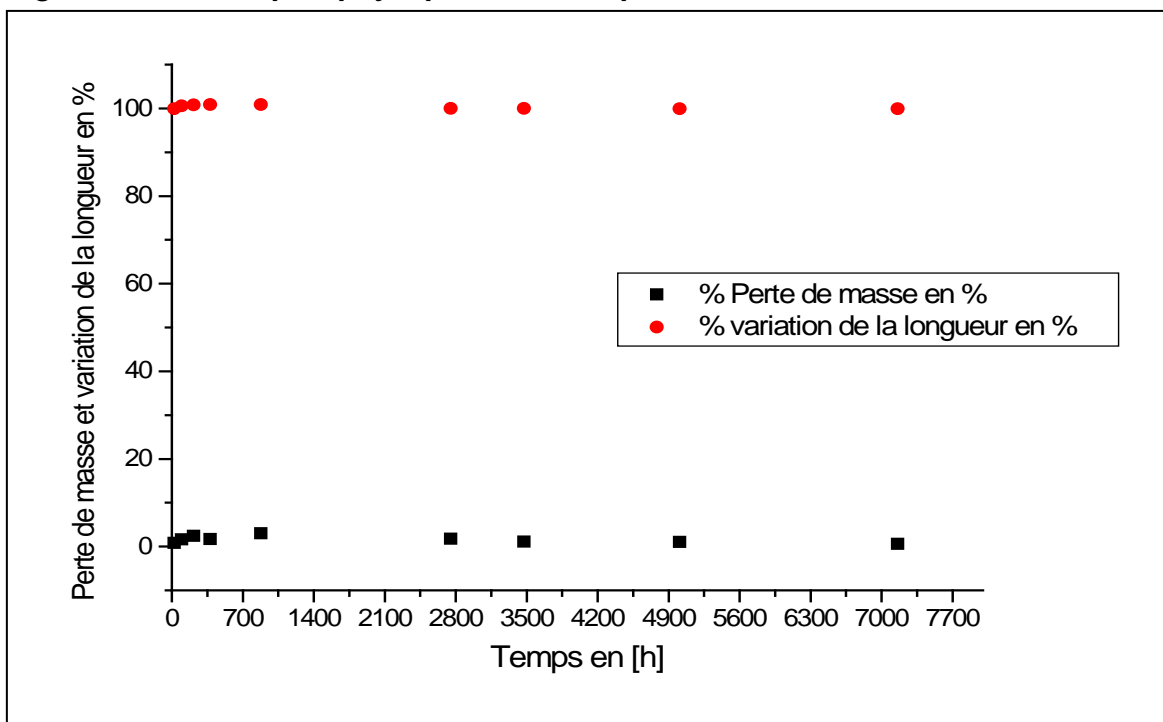
**Fig19. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans la soude 40% à 20 °C**



**Fig20. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans le gasoil à 20 °C**



**Fig21. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'essence à 20 °C**



**Fig22. Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans le pétrole brut à 20 °C**

# Méthode statistique

## **Détermination de la durée de vie par la méthode statistique**

*Statistiques*, branche des mathématiques qui a pour objet la collecte, le traitement et l'analyse des données numériques et qui traite de problèmes tels que l'expérimentation de projets et l'aide à la décision. Aujourd'hui, les statistiques constituent un moyen fiable pour donner une représentation exacte des valeurs de données économiques, politiques, sociales, psychologiques, biologiques et physiques, et servent d'outil pour mettre en corrélation de telles données et les analyser. Le travail du statisticien ne se limite plus à recueillir des données et à les présenter sous forme de tableaux. Il consiste désormais principalement à interpréter l'information. L'élaboration de la théorie des probabilités a élargi le champ d'action des applications statistiques. Certaines distributions de probabilité permettent d'arrondir précisément un plus grand nombre de données, et les résultats de ces distributions peuvent servir à analyser des données statistiques. Par ailleurs, la méthode des probabilités peut être utilisée pour vérifier la fiabilité des conclusions statistiques et pour indiquer la nature et le nombre de données nécessaires à la résolution d'un problème particulier.

### **Méthodes statistiques**

La matière première des statistiques est constituée d'ensembles de nombres, obtenus en comptant ou en mesurant des choses. Lors de la collecte de données statistiques, il convient de s'entourer de précautions pour s'assurer de l'exhaustivité et de la justesse des informations recueillies.

Le premier problème qui se pose au statisticien est de définir la nature et la quantité des données à recueillir. Le statisticien se trouve confronté à un problème complexe lorsque, par exemple, il souhaite réaliser un sondage d'opinion. En effet, il n'est pas aisé de sélectionner un échantillon susceptible de représenter la population dans son ensemble.

Pour établir une loi physique, biologique ou sociale, le statisticien a la possibilité de commencer par un ensemble de données, qu'il modifiera peu à peu en fonction de l'expérience acquise.

### **Mesures de la valeur centrale**

Après que les données ont été recueillies et présentées sous forme de tableaux, le travail d'analyse commence avec le calcul d'un seul nombre, qui résumera ou représentera à lui seul l'ensemble des données. Les données ont tendance à mettre en avant un groupe ou un point central!; on calcule la tendance centrale de l'ensemble des données.

Soient  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , les valeurs d'une série statistique. La mesure la plus couramment utilisée est la moyenne arithmétique, ou plus simplement moyenne, qui s'écrit :  $\bar{x}$ . La moyenne donnée par

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Le symbole ( $\Sigma$ ) (sigma) est employé pour noter la somme des valeurs qui suivent le symbole. Si l'on regroupe les variables  $x$  en  $k$  intervalles ayant respectivement pour milieux  $m_1, m_2, \dots, m_k$  et de fréquences  $f_1, f_2, \dots, f_k$ , la moyenne arithmétique est donnée par :

$$\frac{\sum f_i m_i}{\sum f_i}$$

avec  $i=1, 2, \dots, k$ .

La médiane et le mode sont deux autres mesures de la valeur centrale. La médiane d'une distribution est le nombre réel tel que la moitié des valeurs de l'échantillon lui sont inférieures ou égales (et la moitié des valeurs lui sont supérieures ou égales). Supposons que les variables  $x$  rangées dans l'ordre croissant ou décroissant. Si le nombre  $n$  de valeur est impair, la médiane est la valeur de la variable du rang  $(n+1)/2$ . Si  $n$  est pair, la médiane est la moyenne arithmétique des valeurs de rang  $n/2$  et  $(n+1)/2$ . Le mode est la valeur de la variable qui apparaît le plus souvent. Si au moins deux valeurs distinctes apparaissent avec des fréquences égales, l'ensemble des variables ne possède pas de mode, ou est *bimodal*. Si la distinction possède trois modes, on dit qu'elle est *trimodale*.

### Mesures de la dispersion

Le statisticien est souvent confronté au problème de la dispersion de la répartition des valeurs. En d'autres termes, il cherche à savoir si les mesures sont étroitement regroupées autour de la moyenne ou si elles sont dispersées. On peut mesurer la dispersion en calculant la différence entre deux pourcentages, en général le 25<sup>e</sup> et le 75<sup>e</sup> pourcentages sont respectivement appelés quartiles inférieur et supérieur. L'écart-type est une mesure de dispersion plus facile à utiliser

que les différences de pourcentages, car elle est définie par des notions arithmétiques simples. L'écart à la moyenne d'une valeur  $x_i$  est égale à  $|x_i - \bar{x}|$ . La variance de l'ensemble des données est égale à

$v = [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2] / n^2$ . Enfin l'écart-type, noté par la lettre grecque sigma ( $\sigma$ ) est la racine carrée de la variance

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2]} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Si l'écart-type est faible, les mesures sont regroupées autour de la moyenne!; s'il est important, les mesures sont très dispersées.

**Corrélation**

Lorsque les données de deux phénomènes sociaux, physiques ou biologiques augmentent ou diminuent de manière proportionnelle et simultanée en raison de facteurs externes identiques, on dit que ces phénomènes sont positivement corrélés!; si l'un des deux augmente pendant que l'autre diminue dans les mêmes proportions, on dit que les deux phénomènes sont négativement corrélés. Les statisticiens calculent le taux de corrélation en appliquant un coefficient de corrélation aux données concernées. Le coefficient de corrélation le plus commun :

$$\frac{\sum \left( \frac{x}{\sigma^x} \cdot \frac{y}{\sigma^y} \right)}{N}$$

x étant l'écart d'une variable par rapport à sa moyenne, y l'écart de l'autre variable par rapport à sa moyenne et N le nombre total de valeurs dans les 2 séries de données. Une parfaite corrélation positive entre les deux variables correspond à un coefficient égal à +1, une parfaite corrélation négative à un coefficient égal à -1 et une absence de corrélation correspond à un coefficient égal à 0. Ainsi, 0,89 indique une forte corrélation positive, -!0,76 une forte corrélation négative et 0,13 une faible corrélation positive.

**Modèles mathématiques**

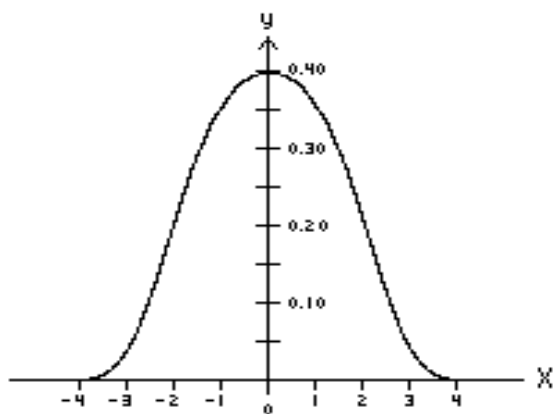
Un modèle mathématique est une représentation mathématique d'un phénomène physique, biologique ou social sous la forme d'un système, d'une proposition, d'une formule ou d'une équation. Par exemple, un dé théorique parfaitement équilibré, qui peut être lancé de façon purement aléatoire, est un modèle mathématique d'un dé réel. La probabilité, pour que le

lancement d'un dé mathématique donne k fois un 6, est  $P(k) = C_n^k \left(\frac{1}{6}\right)^k \left(\frac{5}{6}\right)^{n-k}$ ,  
 où  $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{n(n-1)\dots(n-k+1)}{1\cdot 2\cdot \dots\cdot k}$ ;  $\{C_n^0 = 1\}$ . Dans le cas d'un dé réel, les statisticiens font une expérience qui consiste à lancer le dé plusieurs fois de suite, pour déterminer, à partir des résultats observés, la probabilité pour que le dé soit équilibré et pour qu'il ait été lancé de façon aléatoire.

Dans un exemple de modèle mathématique plus complexe, bien que voisin du précédent, il s'est avéré que de nombreux ensembles de mesures avaient le même type de distribution, par exemple : le poids de N haricots prélevés au hasard dans un sac; les pressions barométriques enregistrées par différents étudiants, lisant successivement sur le même baromètre. Dans chacun des cas, les fréquences des valeurs observées ont des propriétés similaires. Le statisticien adopte un modèle qui est un prototype ou une idéalisation mathématique de tous ces exemples de distribution. L'un des aspects du modèle mathématique est la relation concernant la distribution des fréquences, dans laquelle le nombre d'observations ou valeurs, est supposé infini :

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

où e, base du logarithme népérien est environ égal à 2,7 et représente la fréquence de la valeur x. La représentation graphique de cette relation (figure 4) est la courbe en forme de cloche appelée courbe de distribution normale de probabilité ou courbe de Gauss.



Courbe normale de Gauss

**Figure 4**

Si une variable x a une distribution normale, la probabilité que x soit comprise entre a et b est donnée par :

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{(-x^2/2)} dx$$

La question de la chute des propriétés mécaniques et physiques des matériaux à base du PVC en cours de vieillissement a déjà été souvent évoquée à l'occasion de nombreuses conférences et publications, mais elle reste une des soucis majeurs des utilisateurs de pièces travaillantes. Même limitée à l'action des agents atmosphériques, la complexité des phénomènes mis en jeu, l'empirisme de la plupart des résultats acquis et l'apparente incohérence de certains comportements, laissent à cette question une place de grande actualité.

Des méthodes permettant d'estimer les propriétés de vieillissement sont décrites dans des méthodes d'essais spécifiques suivant lesquelles sont réalisés des vieillissements sous l'effet d'une contrainte d'environnement spécifique (pare exemple température, radiations, décharges partielles).

Dans de nombreux cas, une propriété donnée est déterminée en fonction du temps sous différentes contraintes de vieillissement et l'on détermine, pour chaque contrainte de vieillissement, un temps jusqu'à dégradation basé sur un critère de fin de vie déterminé. Un tracé des variations du temps jusqu'à dégradation, en fonction de la contrainte de vieillissement, peut être utilisé pour obtenir une estimation du temps jusqu'à dégradation d'éprouvettes similaires exposées à une contrainte donnée, ou pour obtenir une estimation de la valeur de la contrainte pour laquelle la dégradation est obtenue en un temps donné.

Les lois physiques qui gouvernent les phénomènes de vieillissement peuvent souvent conduire à l'hypothèse d'une relation linéaire reliant la propriété examinée et la durée du vieillissement sous des contraintes de vieillissement déterminées, ou entre des fonctions mathématiques de la propriété et de la durée de vieillissement, par exemple la racine carrée ou le logarithme. De même, il peut y avoir une relation linéaire entre le temps jusqu'à dégradation et la contrainte de vieillissement, ou des fonctions mathématiques de ces variables.

Notre programme informatique s'applique à de telles relations linéaires. Il peut être supposé dans notre cas que la dégradation suit la loi d'Arrhenius, c'est à dire où le logarithme du temps jusqu'à dégradation est une fonction linéaire de l'inverse de la température thermodynamique.

### Distributions et paramètres statistiques

La distribution d'une variable aléatoire X est décrite par la fonction de distribution :

$$F(x)=P(X\leq x)\dots\dots\dots (VI.1)$$

Où P(X<=x) est la probabilité que la valeur X soit inférieur ou égal x.

La densité de probabilité est déterminée par :  $f(x)=dF(x)/dx\dots\dots\dots (VI.2)$

La distribution est caractérisée par :

- La valeur moyenne :  $\xi=\int xf(x)dx\dots\dots\dots (VI.3)$

- La valeur médiane :  $F(\epsilon)=\int f(x) dx =0.5\dots\dots\dots (VI.4)$

- La variance :  $\delta^2 =\int (x-\epsilon)^2 f(x) dx\dots\dots\dots (VI.5)$

### Estimateurs des paramètres

- Estimateur de la valeur moyenne : La mesure la plus couramment utilisée est la moyenne arithmétique, ou plus simplement moyenne, qui s'écrit :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ Où } x_i : \text{ les valeurs individuelles de l'échantillon (i =1,2,\dots,n)}$$

- La valeur centrale de l'échantillon :

$$\bar{x} = x_{n+1/2} \text{ (n : impair)}$$

$$\bar{x} = 1/2 x_{n/2} + 1/2 x_{n/2 + 1} \text{ (n : pair)}$$

- Estimateur de variance :  $S^2 = n\sum xi^2 - (\sum xi)^2/n (n-1)$

### Test de signification

Lorsqu'une hypothèse a été établie sur la valeur correcte d'un paramètreε, cette hypothèse peut être contrôlée par un test statistique, dans lequel un estimateur du paramètre relatif à l'échantillon(e) est comparé à la valeur choisie par hypothèse. La gamme des valeurs possibles de l'estimateur (e) est divisée en deux parties, dont l'une contient les valeurs les

moins probables d'après l'hypothèse, ce qui correspond à une probabilité totale  $\alpha$  (par exemple 0.05) d'obtenir une valeur de (e) dans cette gamme si l'hypothèse est exacte, et dont l'autre réunit les valeurs les plus probables, suivant cette hypothèse, ce qui correspond à une probabilité de  $1-\alpha$ .

### **Limites de confiance :**

L'estimateur d'un paramètre donne seulement la meilleure évaluation de la valeur du paramètre, mais ne donne pas d'information sur l'incertitude probable sur cette valeur. C'est pourquoi on peut être amené à calculer des limites de confiance.

A partir de l'estimateur (e) d'un échantillon, on calcule dans chaque cas les limites  $e_1$  et  $e_2$  qui, avec une probabilité (confiance) donnée  $1-\alpha$ , englobent la vraie valeur du paramètre  $\varepsilon$ ; on peut avoir

$e_1 = -\infty$ , ou  $e_2 = +\infty$ . Cela implique que dans  $100(1-\alpha)\%$  (par exemple 95%) des cas, l'intervalle de  $e_1$  à  $e_2$  comprend effectivement la vraie valeur  $\varepsilon$ , tandis que dans  $100 \alpha\%$  (par exemple 5%) des cas, il ne la comprend pas.

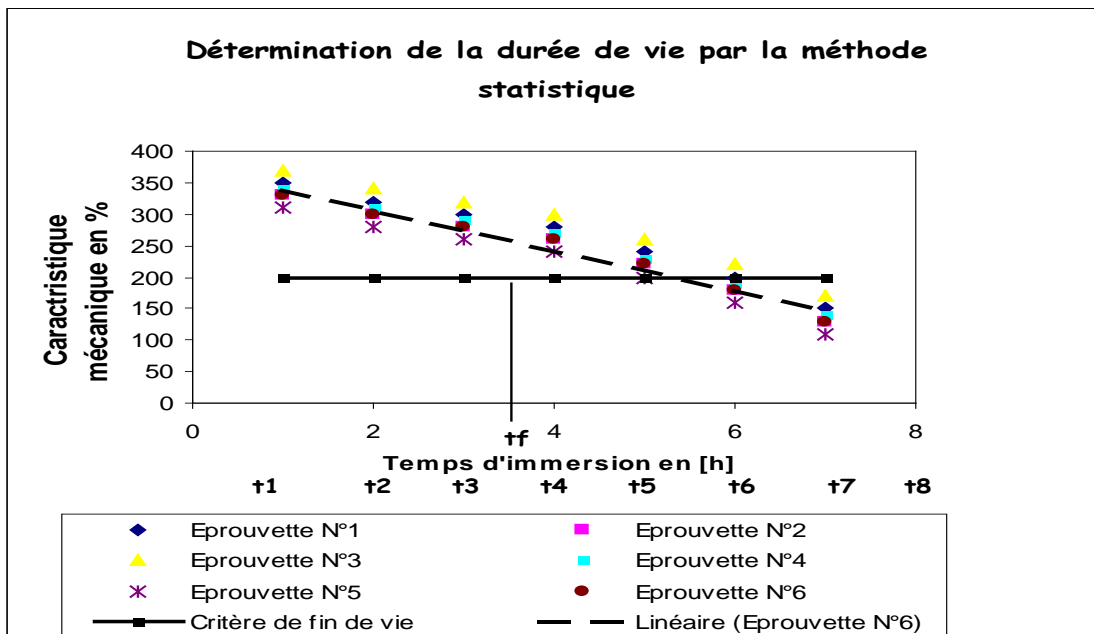
### **Régression linéaire :**

Le but de l'analyse de régression linéaire est de déterminer une fonction linéaire de  $x$ , par exemple une droite  $y = a+b*x$ , qui est la meilleure représentation de groupes d'observations d'une variable aléatoire (dépendante)  $y$  faites pour plusieurs valeurs d'une variable indépendante  $x$ . La détermination repose sur la méthode des moindres carrés.

Dans le cas de l'équation d'Arrhenius, la variable aléatoire est le logarithme des temps jusqu'à dégradation observée pour des groupes d'éprouvettes à plusieurs températures et la variable indépendante est l'inverse de la température thermodynamique.

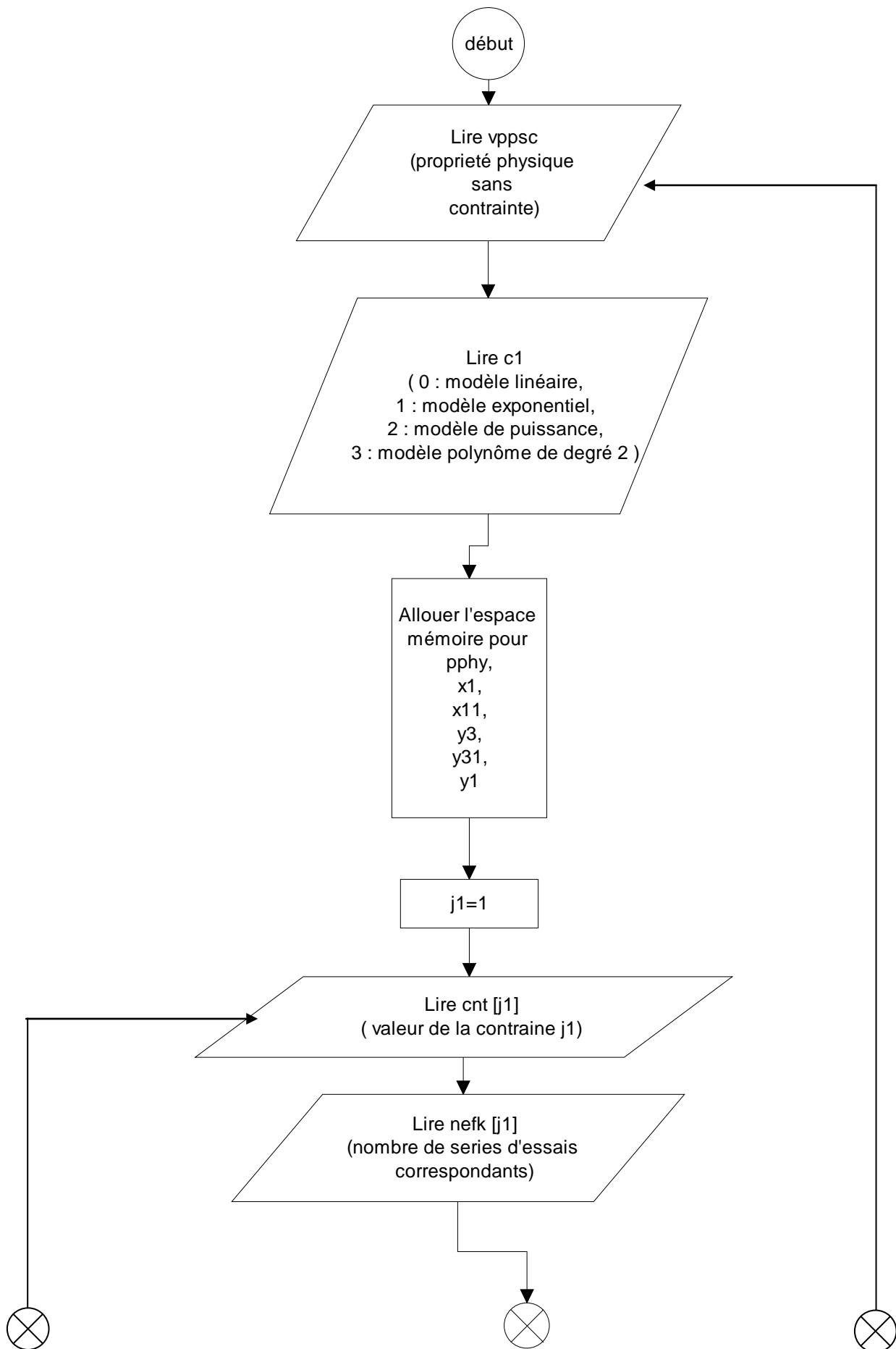
**Traitement des résultats d'essais de vieillissement :**

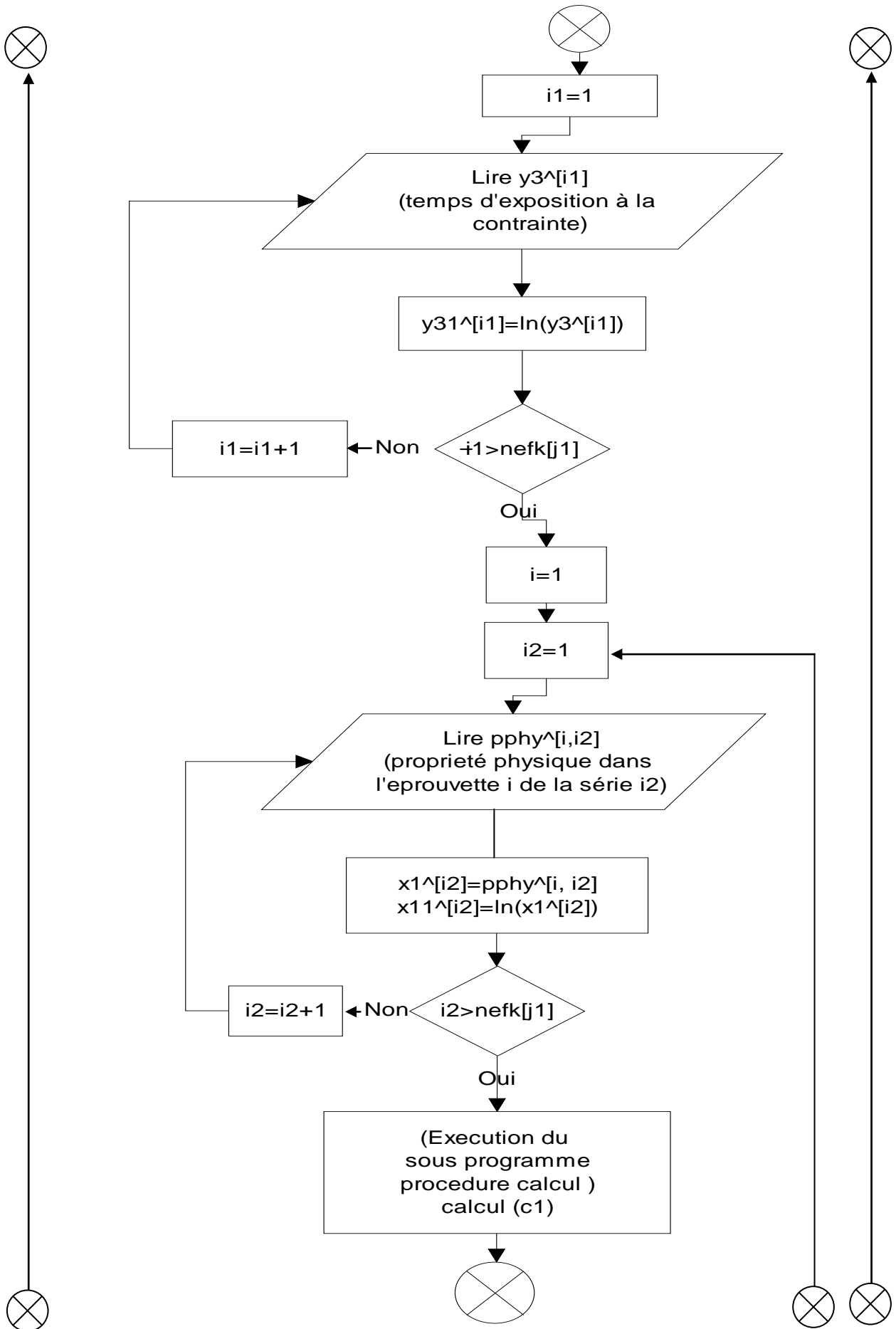
On traite l'analyse statistique des résultats d'essais de vieillissement en examinant la variation en fonction du temps d'une certaine propriété du matériau sous diverses contraintes de vieillissement (par exemple différentes températures) soit par des mesures, soit par des essais d'épreuve. On détermine le temps jusqu'à dégradation sous chaque contrainte de vieillissement et l'on établit la régression du temps jusqu'à dégradation en fonction des contraintes de vieillissement. Lorsque la mesure de la propriété observée nécessite la destruction de l'éprouvette, on peut utiliser la procédure décrite dans la partie théorique, puisqu'on obtient qu'une seule mesure sur chaque éprouvette individuelle. Dans de tels cas, les mesures individuelles peuvent être relevées sur un graphique donnant les variations de la propriété en fonction du temps. Le temps jusqu'à dégradation «  $t_f$  » à une certaine contrainte de vieillissement «  $T_f$  » est déterminé par le point d'intersection de la droite représentant le critère de fin de vie avec la courbe passant au mieux entre tous les points de mesure obtenus sous la contrainte  $T_f$ , voir la figure suivante.

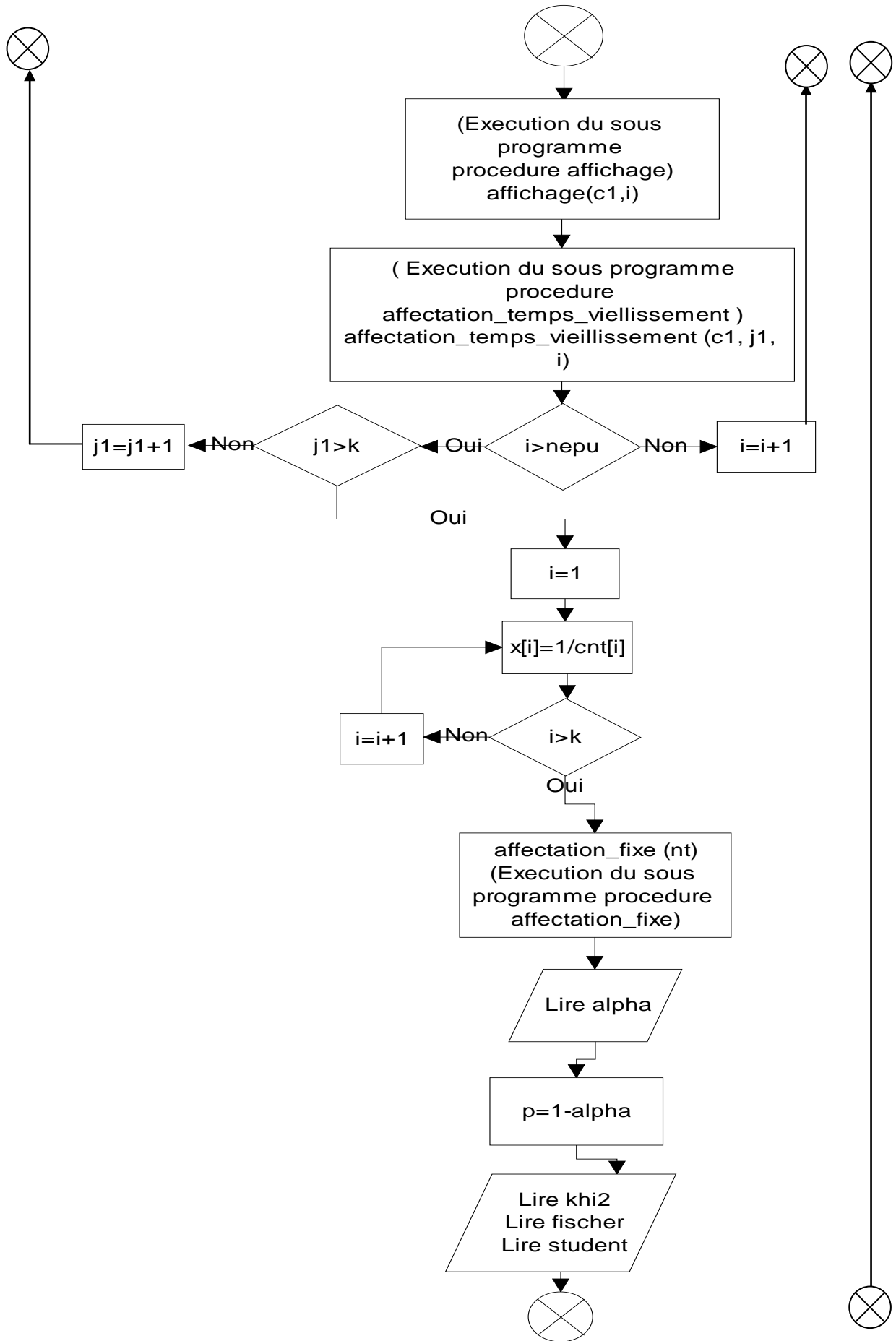


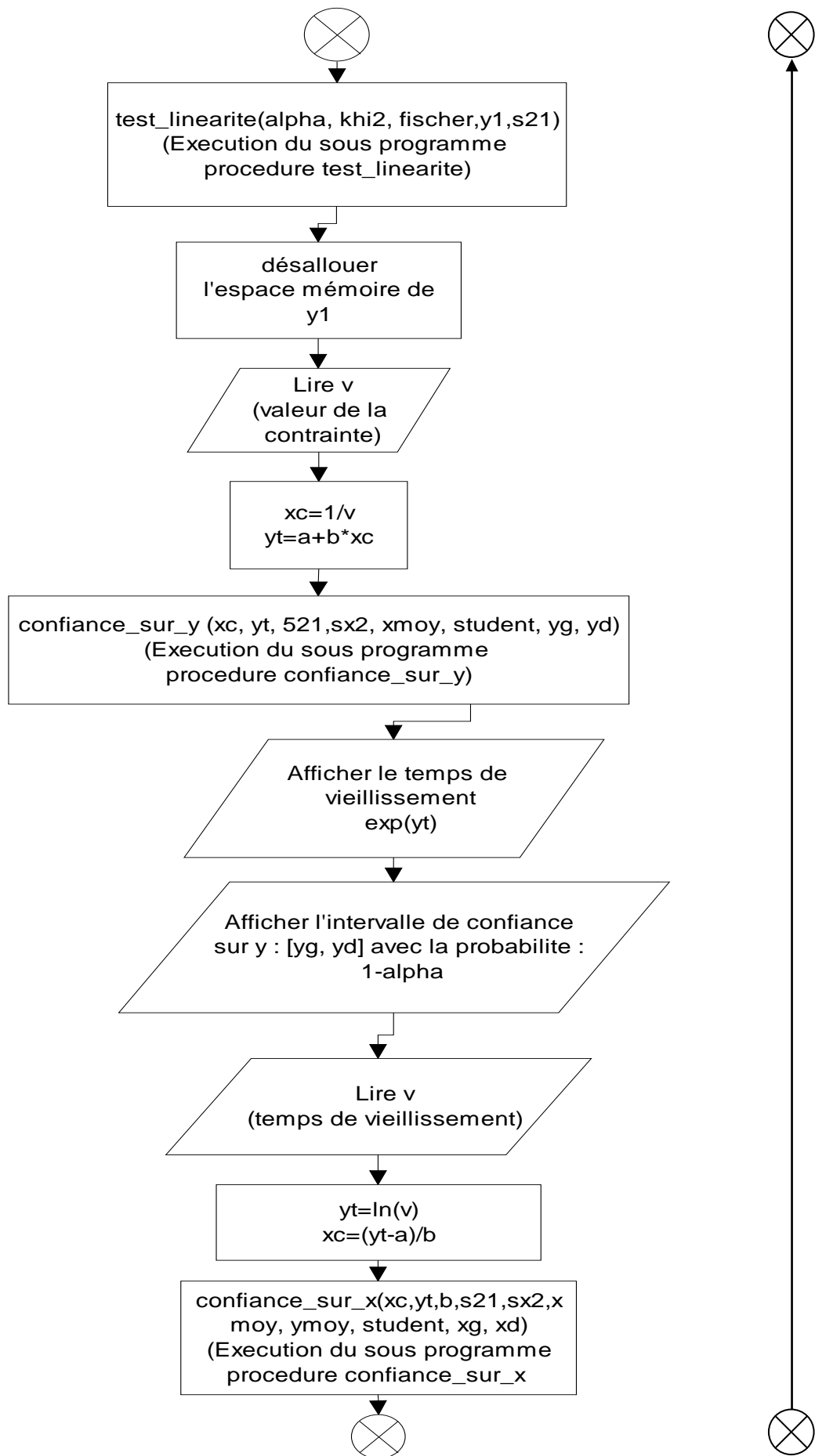
**Figure VI.1** représentant le critère de fin de vie

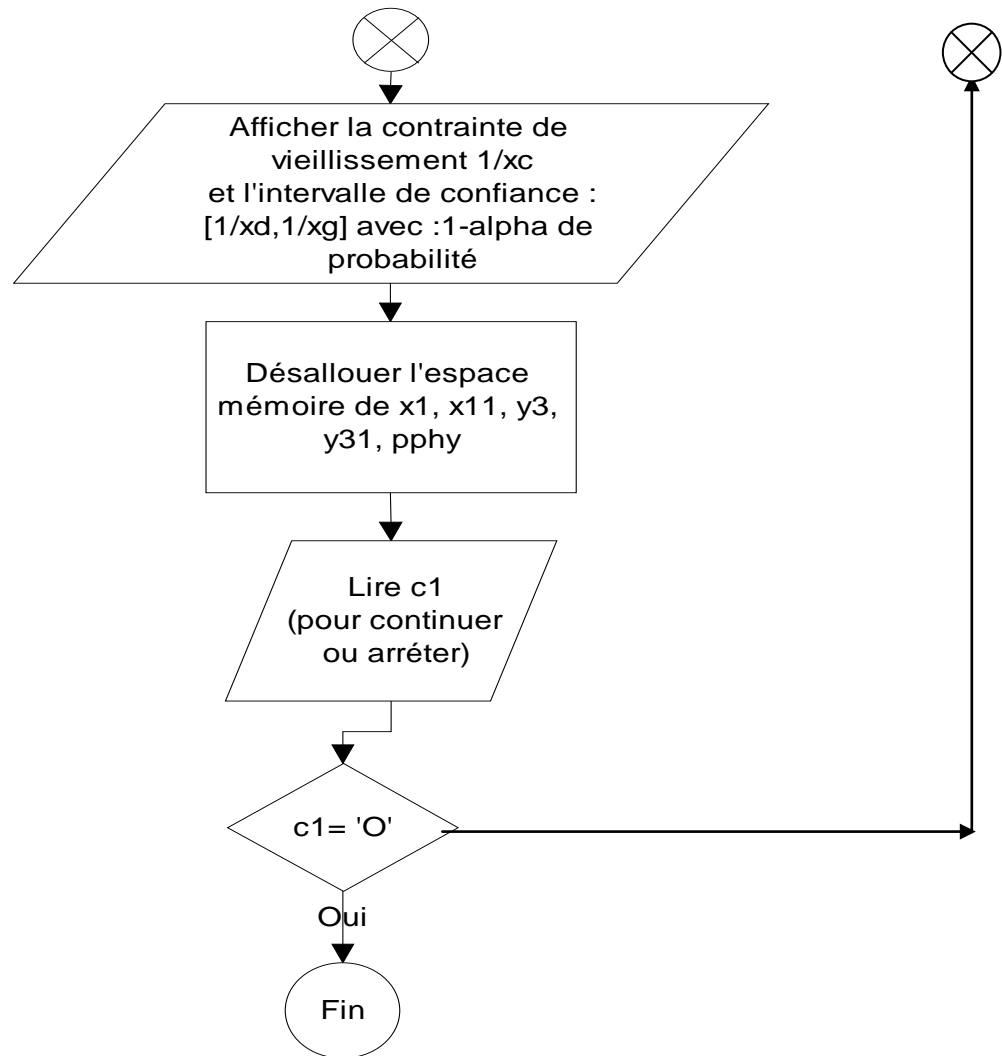
**Organigramme  
pour déterminer  
la durée de vie  
de la gaine**











# Programme principal

## Programme principal

```

(*****programme principal*****)
begin
  e1:clrscr;
  gotoxy(5,5);
  highvideo;
  textbackground(4);
  write('donnez la valeur de la propriété physique sans contraintes ');
  read(vppsc);
  clrscr;
  writeln('Choix du model de régression pour le calcul du temps de
vieillissement', ' [0:lineaire, 1:exponentiel, 2:de puissance, 3:polynôme de degré
deux]');

c1:=readkey;
  new(pphy);
  new(x1);
  new(x11);
  new(y3);
  new(y31);
  new(y1);
  for j1:=1 to k do
  begin
    clrscr;
    write('donnez la valeur de la contrainte n° ',j1,#9,'en [øk]');
    readln(cnt[j1]);
    writeln;
    write('donnez la valeur du nombre de série d'essais correspondant ...'
      , ' cette contrainte',#9);
    readln(nfk[j1]);
    for i1:=1 to nefk[j1] do
    begin
      writeln;
      writeln('série d'essais n°',i1);
      writeln;
      write('donnez la valeur du temps d'exposition à la contrainte [heures]?');
      readln(y3^[i1]);y31^[i1]:=ln(y3^[i1]);
      writeln;
    end;
    for i:=1 to nepu do
    begin
      clrscr;
      for i2:=1 to nefk[j1] do

```

```

begin
  writeln;
  writeln('série d'essais n°',i2);
  writeln;
  write('donnez la valeur mesuré de la propriété physique dans
        l'éprouvette n°',i,#9);
  readln(pphy^[i,i2]);
  x1^[i2]:=pphy^[i,i2];
  x11^[i2]:=ln(x1^[i2]);
end;
calcul(c1);
affichage(c1,i); readln;
(*test(c1);*)

affectation_temps_vieillesement(c1,j1,i);
writeln;
end;
end;

for i:=1 to k do
begin
  x[i]:=1/cnt[i];
  gotoxy(5,5);
  delline;
end;

affectation_fixe(nt);
clrscr;
write('donner le niveau de signification?');readln(alpha);
delline;
gotoxy(5,5);
write('donnez la valeur de la fonction khi2 ... ',k-1,
      ' degrés de libertés pour la probabilité,
p= ',1-alpha:4:2,' ');
readln(khi2);delline;delline;gotoxy(5,5);
write('donnez la valeur de la fonction de fisher ... ( ',k-2,',',nt-k,
' ) degrés de libertés correspondante au niveau ',alpha:4:2,' ');
readln(fischer);clrscr;gotoxy(5,6);
write('donnez la valeur de la fonction de student ... ',nt-2
,' degrés de liberté pour la probabilité:',1-alpha:4:2,' ');
readln(student);
delline;delline;delline;gotoxy(5,5);
test_linearite(alpha,khi2,fischer,y1,s2l);
dispose(y1);
clrscr;

```

```

gotoxy(5,5);
(*****)
write('donnez une valeur pour la contrainte [øk]?');readln(v);
xc:=1/v;
yt:=a+b*xc;
confiance_sur_y(xc,yt,s2l,sx2,xmoy,student,yg,yd);
clrscr;
gotoxy(5,5);
write('Vous avez un temps de vieillissement approximatif de:
',exp(yt),'[heures]');readln;
clrscr;
writeln(exp(yg),'< temps de vieillissement <',exp(yd),' avec une probabilité
de:',1-alpha:5:2);readln;
writeln;
clrscr;
(*****)
write('Donnez une valeur pour le temps de vieillissement [heures]? ');
readln(v);
yt:=ln(v);
xc:=(yt-a)/b;
confiance_sur_x(xc,yt,b,s2l,sx2,xmoy,ymoy,student,xg,xd);
clrscr;
gotoxy(5,5);
write('Vous devez appliquer une contrainte de vieillissement approximative
de:',1/xc,' [øk]'); readln;
clrscr;
write(1/xd,'< contrainte de vieillissement <',1/xg,' avec une probabilité
de:',1-alpha:5:2);
readln;
(*****)
dispose(x1);
dispose(x11);
dispose(y3);
dispose(y31);
dispose(pphy);
clrscr;
gotoxy(5,5);
write('voulez vous continuer? [press O or N ]');c:=readkey;
if c='o' then goto e1
    else goto e3;

e3:end.

```

# Execution du programme

Donner la valeur de la propriété sans contrainte ?

Choix du modèle de régression pour le calcul du temps de vieillissement ?

[ 0: linéaire, 1:exponentiel, 2:de puissance, 3:polynôme de degré deux ou plus]

Donner la valeur de la contrainte N°1 en [°C]

Donner la valeur du nombre de séries d'essais correspondant à cette contrainte ?

Série d'essais N°1

Donner la valeur du temps d'exposition à la contrainte [heure] ?

Série d'essais N°2

Donner la valeur du temps d'exposition à la contrainte [heure] ?

Série d'essais N°1

Donner la valeur de la propriété mécanique dans l'éprouvette N°1 [%] ?

Série d'essais N°2

Donner la valeur de la propriété mécanique dans l'éprouvette N°1 [%] ?

La valeur du temps de vieillissement dans l'éprouvette N°1 par le modèle choisi est estimé à.....

Le coefficient de corrélation est.....

L'équation du modèle est  $y=a+bx+cx^2$

Essayer un des autres modèles[o ou non]?

Série d'essais N°1

Donner la valeur de la propriété mécanique dans l'éprouvette N°2 [%] ?

Série d'essais N°2

Donner la valeur de la propriété mécanique dans l'éprouvette N°2 [%] ?

La valeur du temps de vieillissement dans l'éprouvette N°1 par le modèle choisi est estimé à.....

Le coefficient de corrélation est.....

L'équation du modèle est  $y=a+bx+cx^2$

Donner la valeur de la contrainte N°2 en [°C] ?

Le programme exécute les mêmes opérations

Donner le niveau de signification ?

Donner la valeur de la fonction  $\chi^2$  à nombre de degré de libertés pour la probabilité alpha

Donner la valeur de fonction de Fischer à (x, y) degré de libertés correspondante au niveau de signification.

Donner la valeur de fonction de Student à x degré de liberté pour la probabilité 1-alpha.

Donner n'importe quelle valeur pour la contrainte en [C°].

Vous avez un temps de vieillissement approximatif de [heure].

xg.....` temps de vieillissement.....xd avec une probabilité de .....

Donner une valeur pour le temps de vieillissement [heure] ?

Vous devez appliquer une contrainte approximative de .....en [°C].

.....contrainte.....

Voulez vous continuer ? [Press O ou N].

### Conclusions

Le programme a donné des résultats très satisfaisants et peut être très utile pour l'industrie des câbles électriques en Algérie.

*Fin*



**Résultats mécaniques  
pour le cas de l'huile  
après vieillissement  
aux différentes  
températures**

**CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU PVC AVANT VIEILLISSEMENT**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	350	14,4	18,95
2	1,75	7	350	13	18,57
3	1,75	7	375	12,6	18,00
4	1,7	6,8	375	14,2	20,88
5	1,8	7,2	375	14	19,44
6	1,8	7,2	350	15,6	21,67
7	2,15	8,6	350	13,5	15,70
8	2	8	350	13,8	17,25
9	1,8	7,2	350	13,8	19,17
10	2	8	350	14	17,50
11	1,9	7,6	350	14,6	19,21
12	2	8	375	15	18,75
13	2	8	350	13,8	17,25
14	2	8	350	15,4	19,25
15	2	8	350	14,6	18,25
16	2	8	375	14,8	18,50
17	2	8	400	15	18,75
18	1,9	7,6	350	14,4	18,95
19	2,1	8,4	350	14,6	17,38
20	1,9	7,6	375	13,2	17,37
21	2	8	400	13,6	17,00
22	2,1	8,4	400	13,2	15,71
23	1,9	7,6	350	14,5	19,08
24	1,8	7,2	375	13,8	19,17
<b>Moyenne</b>			<b>363,54</b>		<b>18,41</b>

**CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 70°C**

**TEMPS D'IMMERSION : 24 HEURES**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,75	7	300	10,3	14,71
2	1,75	7	275	9,9	14,14
3	1,8	7,2	300	11,3	15,69
4	1,9	7,6	275	10,7	14,08
5	1,8	7,2	275	11,1	15,42
6	1,8	7,2	300	10,4	14,44
7	1,8	7,2	275	10,2	14,17
8	1,85	7,4	300	11,1	15,00
9	1,9	7,6	275	10,2	13,42
10	2,1	8,4	275	11,1	13,21
11	1,95	7,8	275	10,5	13,46
12	1,9	7,6	275	9,9	13,03
13	1,8	7	300	10,3	14,71
14	1,9	7,2	275	10,7	14,86
15	1,95	7,6	300	11,5	15,13
16	1,85	7,8	275	10,1	12,95
17	1,9	7,4	275	10,1	13,65
18	1,8	7	300	10,7	15,29
19	1,8	7,6	300	10,9	14,34
20	2	7,2	300	11,5	15,97
21	1,8	7,2	300	11	15,28
22	1,85	7,4	300	10,9	14,73
23	2	8	300	11,6	14,50
24	1,9	7,6	275	11	14,47
Moyenne			287,50		14,44
<b>RESTE %</b>			<b>79,08</b>		<b>78,44</b>
<b>PERTE %</b>			<b>20,92</b>		<b>21,56</b>

**CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 70°C**

**TEMPS D'IMMERSION : 48 HEURES**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	300	11,1	14,61
2	1,85	7,4	275	11,1	15,00
3	1,9	7,6	275	11,6	15,26
4	1,9	7,6	275	11,8	15,53
5	1,9	7,6	275	11,2	14,74
6	1,8	7,2	275	10,8	15,00
7	1,8	7,2	300	11,1	15,42
8	1,8	7,2	275	11,1	15,42
9	1,8	7,2	275	11,1	15,42
10	1,9	7,6	275	11,6	15,26
11	1,8	7,2	275	11,3	15,69
12	1,85	7,4	300	11	14,86
13	1,8	7	275	10,9	15,57
14	2	7,2	300	10,5	14,58
15	1,85	8	275	11,4	14,25
16	1,85	7,4	300	11,9	16,08
17	1,9	7,4	275	11,3	15,27
18	1,95	7	275	10,7	15,29
19	1,95	7,6	275	11,6	15,26
20	2	7,8	275	11,7	15,00
21	1,85	7,8	300	11,1	14,23
22	1,8	7,2	275	11,5	15,97
23	1,85	7,4	275	11,1	15,00
24	1,85	7,4	300	11,4	15,41
<b>Moyenne</b>			<b>282,29</b>		<b>15,17</b>
<b>RESTE %</b>			<b>77,65</b>		<b>82,40</b>
<b>PERTE %</b>			<b>22,35</b>		<b>17,60</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 70°C

TEMPS D'IMMERSION : 168 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,85	7,4	250	10,7	14,46
2	1,85	7,4	300	11,8	15,95
3	1,8	7,2	275	10,8	15,00
4	1,9	7,6	275	11,4	15,00
5	1,9	7,6	275	11,2	14,74
6	1,8	7,2	275	11,1	15,42
7	1,9	7,6	275	11,7	15,39
8	2	8	250	11,8	14,75
9	1,85	7,4	250	10,7	14,46
10	1,85	7,4	275	11,1	15,00
11	1,85	7,4	275	10,9	14,73
12	1,9	7,6	275	11,7	15,39
13	1,9	7	275	11	15,71
14	1,9	7,6	250	11,1	14,61
15	2	7,6	275	11,5	15,13
16	1,9	8	275	11,9	14,88
17	1,8	7,6	250	10,5	13,82
18	1,8	7	250	10,2	14,57
19	1,95	7,2	250	11,8	16,39
20	1,85	7,2	275	11,3	15,69
21	1,8	7,8	300	11,4	14,62
22	1,9	7,6	250	11,4	15,00
23	1,85	7,4	275	10,8	14,59
24	1,85	7,4	275	11,6	15,68
<b>Moyenne</b>			<b>268,75</b>		<b>15,04</b>
<b>RESTE %</b>			<b>73,93</b>		<b>81,69</b>
<b>PERTE %</b>			<b>26,07</b>		<b>18,31</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 70°C

TEMPS D'IMMERSION : 336 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,85	7,4	250	10,9	14,73
2	1,9	7,6	275	11,3	14,87
3	1,8	7,2	250	10,5	14,58
4	1,85	7,4	250	10,4	14,05
5	1,9	7,6	250	11	14,47
6	1,9	7,6	250	11	14,47
7	2	8	275	12,1	15,13
8	1,8	7,2	250	10,6	14,72
9	1,8	7,2	250	10,5	14,58
10	1,9	7,6	275	11	14,47
11	1,9	7,6	275	11,2	14,74
12	1,85	7,4	300	11,3	15,27
13	1,8	7	250	10,7	15,29
14	1,85	7,2	250	10,8	15,00
15	2,05	7,4	250	11,8	15,95
16	1,9	8,2	250	11	13,41
17	2	7,6	275	12	15,79
18	1,75	7	250	10,4	14,86
19	1,9	8	250	10,9	13,63
20	1,75	7	275	10,1	14,43
21	1,85	7,6	200	10,5	13,82
22	1,95	7,8	250	12,3	15,77
23	1,75	7	250	10,2	14,57
24	1,85	7,4	250	10,8	14,59
<b>Moyenne</b>			<b>256,25</b>		<b>14,72</b>
<b>RESTE %</b>			<b>70,49</b>		<b>79,96</b>
<b>PERTE %</b>			<b>29,51</b>		<b>20,04</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 70°C

TEMPS D'IMMERSION : 672 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	250	11,8	15,53
2	1,8	7,2	225	11,3	15,69
3	1,9	7,6	225	11,8	15,53
4	1,95	7,8	225	11,7	15,00
5	1,8	7,2	225	11	15,28
6	2,05	8,2	225	12,3	15,00
7	1,9	7,6	250	11,8	15,53
8	1,9	7,6	250	11,2	14,74
9	1,8	7,2	225	10,9	15,14
10	1,85	7,4	250	11,4	15,41
11	1,85	7,4	250	11,1	15,00
12	1,9	7,6	225	10,6	13,95
13	1,8	7	225	12,4	17,71
14	2	7,2	275	11,2	15,56
15	1,8	8	225	11,8	14,75
16	1,95	7,2	225	10,8	15,00
17	1,8	7,8	225	10,6	13,59
18	1,75	7	225	11,9	17,00
19	1,9	7,2	250	11,6	16,11
20	1,85	7	250	12,4	17,71
21	2	7,6	250	11,1	14,61
22	1,85	7,4	250	11,8	15,95
23	1,9	7,6	250	10,9	14,34
24	1,8	7,2	200	11,6	16,11
<b>Moyenne</b>			<b>236,46</b>		<b>15,43</b>
<b>RESTE %</b>			<b>65,04</b>		<b>81,69</b>
<b>PERTE %</b>			<b>34,96</b>		<b>18,31</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 70°C

TEMPS D'IMMERSION : 1448 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,85	7,4	225	11,9	16,08
2	2	8	200	12,5	15,63
3	1,8	7,2	225	11,7	16,25
4	1,85	7,4	200	11,8	15,95
5	1,75	7	200	11,2	16,00
6	1,85	7,4	225	11,5	15,54
7	1,85	7,4	200	11,7	15,81
8	1,9	7,6	200	11,9	15,66
9	2	8	175	11,2	14,00
10	1,8	7,2	225	11,6	16,11
11	1,85	7,4	200	11,6	15,68
12	2	8	250	12,9	16,13
13	1,85	7	175	11,9	17,00
14	2	7,4	200	12,8	17,30
15	2	8	150	12,9	16,13
16	1,9	8	250	13,1	16,38
17	2,1	7,6	200	13,7	18,03
18	1,8	7	250	12,5	17,86
19	2	8,4	175	12,3	14,64
20	1,85	7,2	175	11,8	16,39
21	1,95	8	250	13	16,25
22	1,85	7,4	175	12,4	16,76
23	1,95	7,8	200	12,7	16,28
24	1,9	7,6	200	12,4	16,32
<b>Moyenne</b>			<b>205,21</b>		<b>16,17</b>
<b>RESTE %</b>			<b>56,45</b>		<b>87,83</b>
<b>PERTE %</b>			<b>43,55</b>		<b>12,17</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 70°C

TEMPS D'IMMERSION : 2160 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,6	6,4	150	10,8	16,88
2	1,75	7	150	11,5	16,43
3	1,7	6,8	150	11,7	17,21
4	1,7	6,8	125	11,5	16,91
5	1,65	6,6	125	11,2	16,97
6	1,65	6,6	125	12,1	18,33
7	1,65	6,6	100	11,5	17,42
8	1,65	6,6	100	11,1	16,82
9	1,7	6,8	175	13	19,12
10	1,65	6,6	125	11,5	17,42
11	1,7	6,8	125	12,3	18,09
12	1,7	6,8	150	11,4	16,76
13	1,6	7	125	13	18,57
14	1,7	6,4	150	12	18,75
15	1,75	6,8	150	13	19,12
16	1,75	7	175	13,2	18,86
17	1,8	7	175	12,5	17,86
18	1,7	7	175	13,5	19,29
19	1,6	7,2	150	12	16,67
20	1,6	6,8	150	11,5	16,91
21	1,65	6,4	150	11,5	17,97
22	1,65	6,6	175	11,7	17,73
23	1,65	6,6	175	10,8	16,36
24	1,7	6,8	125	11,6	17,06
<b>Moyenne</b>			<b>144,79</b>		<b>17,65</b>
<b>RESTE %</b>			<b>39,83</b>		<b>95,87</b>
<b>PERTE %</b>			<b>60,17</b>		<b>4,13</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C

TEMPS D'IMMERSION : 24 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,8	7,2	275	10,6	14,72
2	1,8	7,2	300	10,8	15,00
3	1,75	7	275	10	14,29
4	1,7	6,8	300	9,9	14,56
5	1,75	7	300	10,4	14,86
6	1,75	7	300	10,2	14,57
7	1,7	6,8	300	9,8	14,41
8	1,75	7	325	10,5	15,00
9	1,8	7,2	300	10,2	14,17
10	1,65	6,6	300	10,4	15,76
11	1,8	7,2	300	10,6	14,72
12	1,7	6,8	275	10,2	15,00
13	1,75	7	300	10,8	15,43
14	1,75	7	325	10,9	15,57
15	1,7	7	300	10,2	14,57
16	1,75	6,8	300	10,2	15,00
17	1,75	7	300	10,6	15,14
18	1,75	7	300	10,2	14,57
19	1,75	7	300	10,4	14,86
20	1,7	7	300	10,2	14,57
21	1,75	7	300	10,6	15,14
22	1,75	7	300	10,6	15,14
23	1,8	7,2	300	10,4	14,44
24	1,75	7	300	10,2	14,57
<b>Moyenne</b>			<b>298,96</b>		<b>14,84</b>
<b>RESTE %</b>			<b>17,76</b>		<b>80,61</b>
<b>PERTE %</b>			<b>82,24</b>		<b>19,39</b>

**CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C**

**TEMPS D'IMMERSION : 24 HEURES**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,7	6,8	225	10,1	14,85
2	1,8	7,2	225	11,2	15,56
3	1,7	6,8	250	10,5	15,44
4	1,75	7	250	10,3	14,71
5	1,7	6,8	225	10,2	15,00
6	1,7	6,8	250	10,5	15,44
7	1,75	7	250	10,6	15,14
8	1,75	7	250	11	15,71
9	1,7	6,8	250	10,5	15,44
10	1,9	7,6	275	12,3	16,18
11	1,8	7,2	225	10,5	14,58
12	1,9	7,6	250	11,5	15,13
13	1,9	7	225	11,6	16,57
14	1,7	7,6	250	9,8	12,89
15	1,7	6,8	250	10,3	15,15
16	1,75	6,8	225	10,6	15,59
17	1,8	7	250	11,4	16,29
18	1,8	7	250	10,8	15,43
19	1,95	7,2	225	11,9	16,53
20	1,8	7,2	250	10,7	14,86
21	1,8	7,8	250	11,1	14,23
22	1,75	7	250	11,3	16,14
23	1,65	6,6	250	10,4	15,76
24	1,7	6,8	250	10,4	15,29
<b>Moyenne</b>			<b>243,75</b>		<b>15,33</b>
<b>RESTE %</b>			<b>67,05</b>		<b>83,27</b>
<b>PERTE %</b>			<b>32,95</b>		<b>19,39</b>

**CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C**

**TEMPS D'IMMERSION : 48 HEURES**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,8	7,2	225	10,9	15,14
2	1,7	6,8	252	11	16,18
3	1,75	7	250	10,9	15,57
4	1,85	7,4	250	11,1	15,00
5	1,75	7	250	10,9	15,57
6	1,7	6,8	250	10,3	15,15
7	1,7	6,8	250	10,7	15,74
8	1,8	7,2	250	11,4	15,83
9	1,75	7	250	10,4	14,86
10	1,8	7,2	250	11,2	15,56
11	1,8	7,2	250	11,1	15,42
12	1,75	7	250	10,6	15,14
13	1,8	7	250	10,7	15,29
14	1,85	7,2	250	11,2	15,56
15	1,85	7,4	250	11	14,86
16	1,8	7,4	225	11	14,86
17	1,7	7,2	225	10,4	14,44
18	1,75	7	250	10,8	15,43
19	1,85	6,8	225	12,1	17,79
20	1,8	7	250	11,2	16,00
21	1,8	7,4	225	10,7	14,46
22	1,7	6,8	225	10,7	15,74
23	1,75	7	250	10,9	15,57
24	1,7	6,8	225	10,6	15,59
<b>Moyenne</b>			<b>242,79</b>		<b>15,45</b>
<b>RESTE %</b>			<b>66,78</b>		<b>83,92</b>
<b>PERTE %</b>			<b>33,22</b>		<b>16,08</b>

**CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C**

**TEMPS D'IMMERSION : 72 HEURES**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	200	11,6	15,26
2	1,85	7,4	200	12,3	16,62
3	1,85	7,4	250	12,3	16,62
4	1,95	7,8	225	13,1	16,79
5	1,95	7,8	200	13,2	16,92
6	1,95	7,8	200	13,1	16,79
7	2,2	8,8	200	14,6	16,59
8	2	8	200	13,3	16,63
9	2	8	250	14	17,50
10	2,15	8,6	200	13,5	15,70
11	2,1	8,4	225	13,7	16,31
12	2,15	8,6	200	14,8	17,21
13	2	7	200	13,9	19,86
14	2,2	8	250	14,4	18,00
15	2,15	8,8	200	14,8	16,82
16	1,9	8,6	200	13,3	15,47
17	2,2	7,6	200	14,2	18,68
18	1,85	7	200	12,5	17,86
19	2	8,8	200	13,3	15,11
20	1,65	7,4	250	9,8	13,24
21	1,9	8	200	12,1	15,13
22	1,7	6,8	225	9,7	14,26
23	2	8	200	14	17,50
24	2,15	8,6	250	14	16,28
<b>Moyenne</b>			<b>213,54</b>		<b>16,55</b>
<b>RESTE %</b>			<b>58,74</b>		<b>89,90</b>
<b>PERTE %</b>			<b>41,26</b>		<b>10,10</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C

TEMPS D'IMMERSION : 120 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,95	7,8	150	14,2	18,21
2	2	8	175	14,2	17,75
3	1,85	7,4	150	13,3	17,97
4	2,2	8,8	175	16	18,18
5	2,3	9,2	175	16,3	17,72
6	2,05	8,2	150	14,6	17,80
7	1,95	7,8	170	14	17,95
8	2,1	8,4	150	15,2	18,10
9	2	8	175	14,6	18,25
10	1,9	7,6	150	14,1	18,55
11	2,1	8,4	150	15,8	18,81
12	2,15	8,6	175	14,7	17,09
13	2	7	150	14,6	20,86
14	2,2	8	175	15,2	19,00
15	1,85	8,8	150	13,5	15,34
16	2	7,4	150	13,6	18,38
17	2	8	175	14,4	18,00
18	2	7	150	14,2	20,29
19	2,2	8	150	15,6	19,50
20	2	8	150	14	17,50
21	2,2	8,8	150	14,9	16,93
22	1,85	7,4	125	12,8	17,30
23	2,2	8,8	150	17,2	19,55
24	2,15	8,6	150	12,6	14,65
Moyenne			157,08		18,07
RESTE %			43,21		98,15
PERTE %			56,79		1,85

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C

TEMPS D'IMMERSION : 168 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	150	13	17,11
2	1,85	7,4	125	13,2	17,84
3	2	8	150	13,8	17,25
4	2,05	8,2	150	14,6	17,80
5	2,2	8,8	125	14,8	16,82
6	2,1	8,4	150	14,4	17,14
7	2	8	125	13,7	17,13
8	2,15	8,6	125	15,6	18,14
9	2,2	8,8	125	14,4	16,36
10	1,95	7,8	125	13,9	17,82
11	1,9	7,6	100	12,9	16,97
12	2	8	125	15	18,75
13	1,9	7	125	12,6	18,00
14	2,05	7,6	150	14,3	18,82
15	2,15	8,2	150	14,9	18,17
16	2,2	8,6	150	15,3	17,79
17	1,9	8,8	150	13,2	15,00
18	1,95	7	125	13,6	19,43
19	2	7,6	150	14,2	18,68
20	2,15	7,8	150	14,9	19,10
21	2,2	8	175	15,2	19,00
22	2,1	8,4	125	13,6	16,19
23	1,95	7,8	125	13	16,67
24	2,2	8,8	125	15,4	17,50
Moyenne			136,46		17,65
RESTE %			37,54		95,87
PERTE %			62,46		4,13

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C

TEMPS D'IMMERSION : 336 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	75	14	18,42
2	1,8	7,2	50	13,4	18,61
3	1,8	7,2	75	13,5	18,75
4	2,15	8,6	100	13,5	15,70
5	2,1	8,4	75	15,4	18,33
6	2	8	125	15,3	19,13
7	2,1	8,4	75	15,7	18,69
8	2,2	8,8	100	16,2	18,41
9	1,75	7	50	13,5	19,29
10	2	8	100	14,9	18,63
11	1,85	7,4	100	14,1	19,05
12	1,85	7,4	100	14,7	19,86
13	1,95	7	50	15	21,43
14	2	7,8	125	15,3	19,62
15	2	8	100	15,5	19,38
16	2,2	8	150	16,3	20,38
17	2	8,8	100	15,7	17,84
18	1,95	7	75	14,3	20,43
19	2,15	8	150	16,2	20,25
20	2,2	7,8	75	16	20,51
21	1,9	8,6	100	14,1	16,40
22	2,1	8,4	100	16,3	19,40
23	2,15	8,6	125	15,8	18,37
24	2,3	9,2	75	17,1	18,59
Moyenne			93,75		18,98
RESTE %			25,79		103,10
PERTE %			74,21		

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C

TEMPS D'IMMERSION : 504 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,85	7,4	100	13,4	18,11
2	2,1	8,4	100	16,1	19,17
3	1,85	7,4	75	13,9	18,78
4	1,95	7,8	100	15,6	20,00
5	2,2	8,8	50	16,6	18,86
6	1,8	7,2	75	14,2	19,72
7	1,9	7,6	100	15,6	20,53
8	2,05	8,2	100	16,5	20,12
9	2,15	8,6	125	16,6	19,30
10	2,1	8,4	150	16,7	19,88
11	2,1	8,4	150	16,5	19,64
12	1,95	7,8	100	15	19,23
13	2,1	7	50	16,6	23,71
14	1,85	8,4	100	14,9	17,74
15	1,85	7,4	100	14,7	19,86
16	1,9	7,4	75	15,4	20,81
17	2	7,6	125	16,1	21,18
18	1,8	7	125	16,5	23,57
19	2,15	8	100	13,9	17,38
20	2,25	7,2	75	15,2	21,11
21	1,9	8,6	100	16,1	18,72
22	2,15	8,6	100	15,6	18,14
23	2	8	125	16,6	20,75
24	2,2	8,8	75	16,4	18,64
<b>Moyenne</b>			<b>98,96</b>		<b>19,79</b>
<b>RESTE %</b>			<b>27,22</b>		<b>107,50</b>
<b>PERTE %</b>			<b>72,78</b>		<b>-</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 85°C

TEMPS D'IMMERSION : 1080 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,7	6,8	0	13,8	20,29
2	1,85	7,4	0	15,3	20,68
3	1,65	6,6	0	14,9	22,58
4	1,8	7,2	50	14,4	20,00
5	1,75	7	0	15,6	22,29
6	1,75	7	50	16,2	23,14
7	1,7	6,8	0	15	22,06
8	1,75	7	0	13,8	19,71
9	1,85	7,4	25	17,6	23,78
10	1,85	7,4	0	16	21,62
11	1,75	7	25	10,4	14,86
12	1,85	7,4	0	16,8	22,70
13	1,9	7	0	15,4	22,00
14	1,75	7,6	0	14,6	19,21
15	1,8	7	10	11,4	16,29
16	1,75	7,2	25	14,4	20,00
17	1,75	7	25	16,4	23,43
18	1,65	7	0	14,2	20,29
19	1,6	7	25	15,2	21,71
20	1,75	6,6	25	16	24,24
21	1,75	6,4	25	16,8	26,25
22	1,8	7,2	25	14,6	20,28
23	1,55	6,2	0	11,5	18,55
24	1,6	6,4	25	14,5	22,66
<b>Moyenne</b>			<b>13,96</b>		<b>21,19</b>
<b>RESTE %</b>			<b>3,84</b>		<b>115,10</b>
<b>PERTE %</b>			<b>96,16</b>		<b>-</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 105°C

TEMPS D'IMMERSION : 6 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,7	6,8	225	9,9	14,56
2	1,7	6,8	225	10,9	16,03
3	1,7	6,8	250	10,6	15,59
4	1,6	6,4	225	10,8	16,88
5	1,7	6,8	225	10,2	15,00
6	1,7	6,8	250	11,6	17,06
7	1,8	7,2	250	11	15,28
8	1,7	6,8	225	9,9	14,56
9	1,7	6,8	225	10,7	15,74
10	1,8	7,2	225	10,6	14,72
11	1,7	6,8	225	10,7	15,74
12	1,6	6,4	225	10,3	16,09
13	1,7	6,8	225	10,6	15,59
14	1,6	6,4	225	10,3	16,09
15	1,7	6,8	250	11,3	16,62
16	1,7	6,8	225	10,3	15,15
17	1,6	6,4	225	10,4	16,25
18	1,6	6,4	225	10,1	15,78
19	1,6	6,4	200	10	15,63
20	1,8	7,2	250	11,4	15,83
21	1,6	6,4	250	10,3	16,09
22	1,7	6,8	250	10,6	15,59
23	1,7	6,8	200	10,4	15,29
24	1,7	6,8	200	10,4	15,29
<b>Moyenne</b>			<b>229,17</b>		<b>15,68</b>
<b>RESTE %</b>			<b>63,04</b>		<b>85,17</b>
<b>PERTE %</b>			<b>36,96</b>		<b>14,83</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 105°C

TEMPS D'IMMERSION : 24 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,6	6,4	200	11,1	17,34
2	1,7	6,8	200	11,5	16,91
3	1,6	6,4	225	11,4	17,81
4	1,7	6,8	175	10,4	15,29
5	1,6	6,4	200	10,2	15,94
6	1,6	6,4	185	10,6	16,56
7	1,8	7,2	200	10,9	15,14
8	1,7	6,8	200	11,6	17,06
9	1,6	6,4	175	10,3	16,09
10	1,6	6,4	150	11,6	18,13
11	1,6	6,4	125	9,5	14,84
12	1,7	6,8	200	11,8	17,35
13	1,7	6,8	175	11	16,18
14	1,7	6,8	200	11,8	17,35
15	1,7	6,8	125	9,5	13,97
16	1,7	6,8	200	11	16,18
17	1,6	6,4	175	10,4	16,25
18	1,7	6,8	200	11,8	17,35
19	1,7	6,8	125	11,2	16,47
20	1,7	6,8	225	12,2	17,94
21	1,7	6,8	225	12,6	18,53
22	1,8	7,2	200	12,6	17,50
23	1,8	7,2	225	12,3	17,08
24	1,6	6,4	175	10,8	15,29
<b>Moyenne</b>			<b>186,88</b>		<b>16,61</b>
<b>RESTE %</b>			<b>51,41</b>		<b>90,22</b>
<b>PERTE %</b>			<b>48,59</b>		<b>9,78</b>

**CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 105°C**

**TEMPS D'IMMERSION : 48 HEURES**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,7	6,8	150	10,6	15,59
2	1,7	6,8	200	10,6	15,59
3	1,8	7,2	200	12	16,67
4	1,7	6,8	150	11,5	16,91
5	1,7	6,8	175	11,5	16,91
6	1,7	6,8	150	11,1	16,32
7	1,7	6,8	200	11,7	17,21
8	1,6	6,4	150	10,7	16,72
9	1,6	6,4	200	11,4	17,8
10	1,6	6,4	200	11,2	17,50
11	1,6	6,4	150	11	17,19
12	1,6	6,4	200	11,1	17,34
13	1,7	6,8	150	11,6	17,06
14	1,6	6,4	200	11,2	17,50
15	1,7	6,8	175	11,3	16,62
16	1,7	6,8	175	11,3	16,62
17	1,7	6,8	175	11,4	16,76
18	1,8	7,2	175	12,1	16,81
19	1,7	6,8	150	11,1	16,32
20	1,8	7,2	150	10,9	15,14
21	1,7	6,8	150	11,3	16,62
22	1,8	7,2	175	11,4	15,83
23	1,7	6,8	150	11	16,18
24	1,7	6,8	175	11	16,18
<b>Moyenne</b>			<b>171,88</b>		<b>15,97</b>
<b>RESTE %</b>			<b>47,28</b>		<b>86,65</b>
<b>PERTE %</b>			<b>52,72</b>		<b>13,35</b>

**CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 105°C**

**TEMPS D'IMMERSION : 72 HEURES**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,7	6,8	200	10,9	16,03
2	1,6	6,4	175	10,6	16,56
3	1,8	7,2	150	10,6	14,72
4	1,7	6,8	150	10,7	15,74
5	1,7	6,8	150	10,7	15,74
6	1,8	7,2	200	11,7	16,25
7	1,7	6,8	175	12	17,65
8	1,7	6,8	175	11	16,18
9	1,7	6,8	175	11	16,18
10	1,7	6,8	175	10,4	15,29
11	1,6	6,4	175	11,4	17,81
12	1,6	6,4	200	10,8	16,88
13	1,7	6,8	175	10,1	14,85
14	1,7	6,8	150	10,8	15,88
15	1,6	6,4	175	10,6	16,56
16	1,7	6,8	150	11	16,18
17	1,7	6,8	175	10,6	15,59
18	1,7	6,8	175	11	16,18
19	1,7	6,8	175	11	16,18
20	1,7	6,8	150	10,8	15,88
21	1,6	6,4	100	11,1	17,34
22	1,7	6,8	175	10,8	15,88
23	1,7	6,8	200	10,8	15,88
24	1,7	6,8	175	10,6	15,29
<b>Moyenne</b>			<b>169,79</b>		<b>16,11</b>
<b>RESTE %</b>			<b>46,70</b>		<b>87,51</b>
<b>PERTE %</b>			<b>53,3</b>		<b>12,49</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 105°C

TEMPS D'IMMERSION : 168 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,8	7,2	50	13,5	18,75
2	1,7	6,8	125	12,7	18,68
3	1,6	6,4	75	11,3	17,66
4	1,9	7,6	100	13,1	17,24
5	1,7	6,8	75	12,6	18,53
6	1,8	7,2	100	12,9	17,92
7	1,6	6,4	75	11,6	18,13
8	1,6	6,4	75	13,6	21,25
9	1,7	6,8	75	12,8	18,82
10	1,7	6,8	50	11,4	16,76
11	1,6	6,4	100	12	18,75
12	1,8	7,2	100	13,8	19,17
13	1,8	7,2	75	13,2	18,33
14	1,8	7,2	100	13	18,06
15	1,7	6,8	125	13,2	19,41
16	1,7	6,8	75	13,1	19,26
17	1,6	6,4	50	11,8	18,44
18	1,8	7,2	100	12,4	17,22
19	1,7	6,8	25	11	16,18
20	1,8	7,2	75	13	18,06
21	1,8	7,2	125	13	18,06
22	1,6	6,4	50	12	18,75
23	1,7	6,8	125	12,1	17,79
24	1,7	6,8	75	12,5	18,38
<b>Moyenne</b>			<b>83,33</b>		<b>18,32</b>
<b>RESTE %</b>			<b>22,92</b>		<b>99,40</b>
<b>PERTE %</b>			<b>77,08</b>		<b>0,60</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 105°C

TEMPS D'IMMERSION : 336 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	25	20	26,32
2	1,9	7,6	25	19,5	25,66
3	2,1	8,4	0	16,3	19,40
4	1,9	7,6	25	17,6	23,16
5	1,9	7,6	50	18	23,68
6	1,9	7,6	25	19,2	25,26
7	2	8	50	20,8	26,00
8	1,9	7,6	25	19,6	25,79
9	2	8	50	14	17,50
10	1,9	7,6	25	18	23,68
11	2	8	50	20,72	25,90
12	1,9	7,6	50	20	26,32
13	1,85	7,4	25	18,96	25,62
14	1,85	7,4	25	18,96	25,62
15	2	8	25	19,52	24,40
16	1,95	7,8	25	21,44	27,49
17	2	8	25	18,64	23,30
18	1,85	7,4	50	16	21,62
19	1,6	6,4	25	21,44	33,50
20	1,85	7,4	25	21,04	28,43
21	1,6	6,4	15	18	28,13
22	1,8	7,2	25	20,5	28,47
23	2,15	8,6	50	20,08	23,35
24	2	8	25	20,8	26,00
<b>Moyenne</b>			<b>30,83</b>		<b>25,19</b>
<b>RESTE %</b>			<b>8,48</b>		<b>136,68</b>
<b>PERTE %</b>			<b>91,52</b>		

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 125°C

TEMPS D'IMMERSION : 4 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	225	13	17,11
2	1,8	7,2	200	11,8	16,39
3	2	8	225	13,4	16,75
4	2	8	200	13,4	16,75
5	1,9	7,6	225	13,4	17,63
6	1,9	7,6	200	12,6	16,58
7	2	8	225	13,3	16,63
8	2,1	8,4	250	14,2	16,90
9	1,9	7,6	200	12,6	16,58
10	2	8	225	13	16,25
11	2	8	250	13,4	16,75
12	2	8	250	13,2	16,50
13	1,9	7,6	250	12,6	16,58
14	2	8	250	13,8	17,25
15	2,1	8,4	200	14	16,67
16	2	8	250	13,9	17,38
17	1,9	7,6	250	12,8	16,84
18	1,8	7,2	250	11,9	16,53
19	2,1	8,4	225	13,8	16,43
20	2	8	225	13,4	16,75
21	1,9	7,6	250	12,9	16,97
22	1,85	7,4	225	12,7	17,16
23	2	8	225	13,4	16,75
24	2	8	200	13,2	16,50
<b>Moyenne</b>			<b>228,13</b>		<b>16,78</b>
<b>RESTE %</b>			<b>62,75</b>		<b>91,15</b>
<b>PERTE %</b>			<b>37,25</b>		<b>8,85</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 125°C

TEMPS D'IMMERSION : 24 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	200	13,8	18,16
2	1,75	7	200	12,4	17,71
3	1,85	7,4	200	12,6	17,03
4	1,85	7,4	225	13	17,57
5	1,8	7,2	225	12,8	17,78
6	1,8	7,2	225	13	18,06
7	1,85	7,4	225	13,4	18,11
8	1,8	7,2	175	12,4	17,22
9	1,85	7,4	225	13,3	17,97
10	1,8	7,2	225	12,8	17,78
11	1,8	7,2	225	13	18,06
12	1,8	7,2	200	12,8	17,78
13	1,8	7,2	225	12,4	17,22
14	1,8	7,2	175	11,6	16,11
15	1,8	7,2	200	12,5	17,36
16	1,85	7,4	200	12,8	17,30
17	1,9	7,6	200	12,9	16,97
18	1,9	7,6	200	13,2	17,37
19	1,8	7,2	150	12,2	16,94
20	1,8	7,2	225	13,1	18,19
21	1,85	7,4	225	12,4	16,76
22	1,85	7,4	200	12,8	17,30
23	1,75	7	220	13,4	19,14
24	1,9	7,6	220	13,1	17,24
<b>Moyenne</b>			<b>207,92</b>		<b>17,55</b>
<b>RESTE %</b>			<b>57,19</b>		<b>95,69</b>
<b>PERTE %</b>			<b>42,81</b>		<b>4,31</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 125°C

TEMPS D'IMMERSION : 30 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,8	7,2	175	13,8	19,17
2	1,75	7	200	12,9	18,43
3	1,8	7,2	175	14,1	19,58
4	1,75	7	175	12,9	18,43
5	1,8	7,2	175	13,5	18,75
6	1,75	7	200	12,9	18,43
7	1,7	6,8	200	12,4	18,24
8	1,6	6,4	200	12,6	19,69
9	1,85	7,4	200	13,7	18,51
10	1,8	7,2	250	13,7	19,03
11	1,75	7	200	13,9	19,86
12	1,8	7,2	200	13,8	19,17
13	1,8	7,2	200	12,6	17,50
14	1,7	6,8	200	14	20,59
15	1,8	7,2	175	13,3	18,47
16	1,8	7,2	175	13,1	18,19
17	1,8	7,2	200	13,4	18,61
18	1,8	7,2	200	13,2	18,33
19	1,9	7,6	175	15	19,74
20	1,8	7,2	200	12,8	17,78
21	1,9	7,6	200	14,5	19,08
22	1,75	7	200	13	18,57
23	1,75	7	200	12,9	18,43
24	1,8	7,2	175	13,4	18,61
<b>Moyenne</b>			<b>193,75</b>		<b>18,80</b>
<b>RESTE %</b>			<b>53,30</b>		<b>102,12</b>
<b>PERTE %</b>			<b>46,7</b>		<b>-2,12</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 125°C

TEMPS D'IMMERSION : 48 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,9	7,6	175	13,8	18,16
2	1,75	7	200	12,4	17,71
3	1,85	7,4	200	12,6	17,03
4	1,85	7,4	200	13	17,57
5	1,8	7,2	200	12,8	17,78
6	1,8	7,2	200	13	18,06
7	1,85	7,4	200	13,4	18,11
8	1,8	7,2	175	12,4	17,22
9	1,85	7,4	200	13,3	17,97
10	1,8	7,2	175	12,8	17,78
11	1,8	7,2	175	13	18,06
12	1,8	7,2	175	12,8	17,78
13	1,8	7,2	200	12,4	17,22
14	1,8	7,2	175	11,6	16,11
15	1,8	7,2	175	12,5	17,36
16	1,85	7,4	200	12,8	17,30
17	1,9	7,6	200	12,9	16,97
18	1,9	7,6	200	13,2	17,37
19	1,8	7,2	175	12,2	16,94
20	1,8	7,2	200	13,1	18,19
21	1,85	7,4	200	12,4	16,76
22	1,85	7,4	200	12,8	17,30
23	1,75	7	175	13,4	19,14
24	1,9	7,6	200	13,1	17,24
Moyenne			190,63		17,55
RESTE %			52,44		95,33
PERTE %			47,56		4,67

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 125°C

TEMPS D'IMMERSION : 120 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,95	7,8	50	13,3	17,05
2	1,9	7,6	25	15	19,74
3	2	8	25	16,8	21,00
4	1,95	7,8	50	16,4	21,03
5	2,05	8,2	50	17,4	21,22
6	2	8	50	17,1	21,38
7	1,9	7,6	50	15,7	20,66
8	1,85	7,4	25	14,8	20,00
9	1,95	7,8	0	11,8	15,13
10	1,9	7,6	25	15,7	20,66
11	1,8	7,2	50	16	22,22
12	2	8	50	17	21,25
13	1,7	6,8	25	13,4	19,71
14	1,95	7,8	125	17,1	21,92
15	1,85	7,4	75	14,8	20,00
16	2	8	50	17,8	22,25
17	2,1	8,4	50	18,4	21,90
18	1,9	7,6	25	14,3	18,82
19	2	8	25	15,4	19,25
20	1,95	7,8	25	14,8	18,97
21	1,95	7,8	50	16	20,51
22	1,9	7,6	50	16,2	21,32
23	1,9	7,6	25	11	14,47
24	1,9	7,6	50	15,9	20,92
<b>Moyenne</b>			<b>42,71</b>		<b>20,06</b>
<b>RESTE %</b>			<b>11,75</b>		<b>108,84</b>
<b>PERTE %</b>			<b>88,25</b>		

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 150°C

TEMPS D'IMMERSION : 2 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	2,1	8,4	225	13,5	16,07
2	1,8	7,2	225	12,5	17,36
3	2	8	250	12,2	15,25
4	1,8	7,2	225	11,2	15,56
5	1,9	7,6	200	12,1	15,92
6	1,8	7,2	225	11,4	15,83
7	2,2	8,8	225	14,2	16,14
8	2,2	8,8	200	13,8	15,68
9	1,8	7,2	175	10,8	15,00
10	1,9	7,6	250	12	15,79
11	1,8	7,2	175	12,8	17,78
12	1,9	7,6	200	13,2	17,37
13	2,15	8,6	175	13,8	16,05
14	1,8	7,2	225	12	16,67
15	1,9	7,6	225	12,6	16,58
16	1,9	7,6	250	12,2	16,05
17	1,8	7,2	225	11,8	16,39
18	1,8	7,2	225	12	16,67
19	2	8	225	12,6	15,75
20	2,1	8,4	175	12,6	15,00
21	1,9	7,6	175	12,2	16,05
22	1,8	7,2	200	12,1	16,81
23	1,8	7,2	225	12,2	16,94
24	1,8	7,2	250	12,6	17,50
<b>Moyenne</b>			<b>214,58</b>		<b>16,26</b>
<b>RESTE %</b>			<b>59,03</b>		<b>88,32</b>
<b>PERTE %</b>			<b>40,97</b>		<b>11,68</b>

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 150°C

TEMPS D'IMMERSION : 6 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	1,8	7,2	200	13,4	18,61
2	1,8	7,2	150	12	16,67
3	1,7	6,8	200	13,1	19,26
4	1,8	7,2	150	12,6	17,50
5	1,7	6,8	200	13,6	20,00
6	1,8	7,2	175	12,5	17,36
7	1,7	6,8	175	12,6	18,53
8	1,8	7,2	175	12,7	17,64
9	1,8	7,2	175	11,7	16,25
10	1,8	7,2	175	13,8	19,17
11	1,9	7,6	175	13,3	17,50
12	1,8	7,2	100	12,2	16,94
13	1,8	7,2	150	12,6	17,50
14	1,8	7,2	125	13,2	18,33
15	1,8	7,2	175	12,6	17,50
16	1,7	6,8	150	12,6	18,53
17	1,7	6,8	175	11,9	17,50
18	1,8	7,2	100	12,2	16,94
19	1,7	6,8	175	12,8	18,82
20	1,7	6,8	175	12,8	18,82
21	1,7	6,8	150	13	19,12
22	1,7	6,8	150	12,2	17,94
23	1,8	7,2	175	12,8	17,78
24	1,7	6,8	150	12,8	18,82
<b>Moyenne</b>			<b>162,50</b>		<b>18,04</b>
<b>RESTE %</b>			<b>44,70</b>		<b>97,99</b>
<b>PERTE %</b>			<b>55,3</b>		<b>2,01</b>

**CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 150°C**

**TEMPS D'IMMERSION : 24 HEURES**

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	2	8	125	16,2	1,65
2	2	8	100	15,8	19,75
3	1,9	7,6	150	15,7	20,66
4	2	8	125	15,7	19,63
5	2	8	200	17	21,25
6	2,1	8,4	150	16,4	19,52
7	1,9	7,6	75	15	19,74
8	2	8	175	16,2	20,25
9	2	8	100	15,4	19,25
10	1,9	7,6	100	15	19,74
11	2	8	125	15,8	19,75
12	2	8	125	15,2	19,00
13	1,9	7,6	150	14,7	19,34
14	1,9	7,6	100	15,2	20,00
15	1,9	7,6	75	14,4	18,95
16	2	8	150	16	20,00
17	2,1	8,4	125	16,4	19,52
18	1,9	7,6	100	15	19,74
19	2,2	8,8	150	17	19,32
20	2	8	150	15,3	19,13
21	2,1	8,4	175	16,5	19,64
22	1,85	7,4	150	14,4	19,46
23	1,9	7,6	150	15	19,74
24	2	8	125	15,6	19,50
<b>Moyenne</b>			<b>131,25</b>		<b>18,94</b>
<b>RESTE %</b>			<b>36,10</b>		<b>102,88</b>
<b>PERTE %</b>			<b>63,9</b>		

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU PVC APRES IMMERSION DANS L'HUILE A 150°C

TEMPS D'IMMERSION : 28 HEURES

Eprouvette	Dimension*4,00 (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Charge(kgf)	Résistance à la rupture MPa
1	2	8	5	16	20,00
2	2	8	5	16,6	20,75
3	1,9	7,6	5	17,5	23,03
4	1,9	7,6	5	14,6	19,21
5	2	8	5	16,8	21,00
6	1,9	7,6	25	23	30,26
7	1,8	7,2	5	17,4	24,17
8	1,8	7,2	5	16,3	22,64
9	2	8	25	14,4	18,00
10	2	8	5	16	20,00
11	1,8	7,2	5	14,8	20,56
12	2	8	5	14,8	18,50
13	1,8	7,2	25	14,7	20,42
14	1,9	7,6	5	15,4	20,26
15	1,9	7,6	5	15,8	20,79
16	1,9	7,6	5	16	21,05
17	2	8	5	13,2	16,50
18	1,8	7,2	25	15,3	21,25
19	1,8	7,2	5	16,2	22,50
20	1,9	7,6	5	15,8	20,79
21	1,9	7,6	5	16	21,05
22	1,9	7,6	5	16,6	21,84
23	1,9	7,6	5	15,5	20,39
24	1,8	7,2	5	15,2	21,11
Moyenne			8,33		21,09
RESTE %			2,29		114,56
PERTE %			97,71		

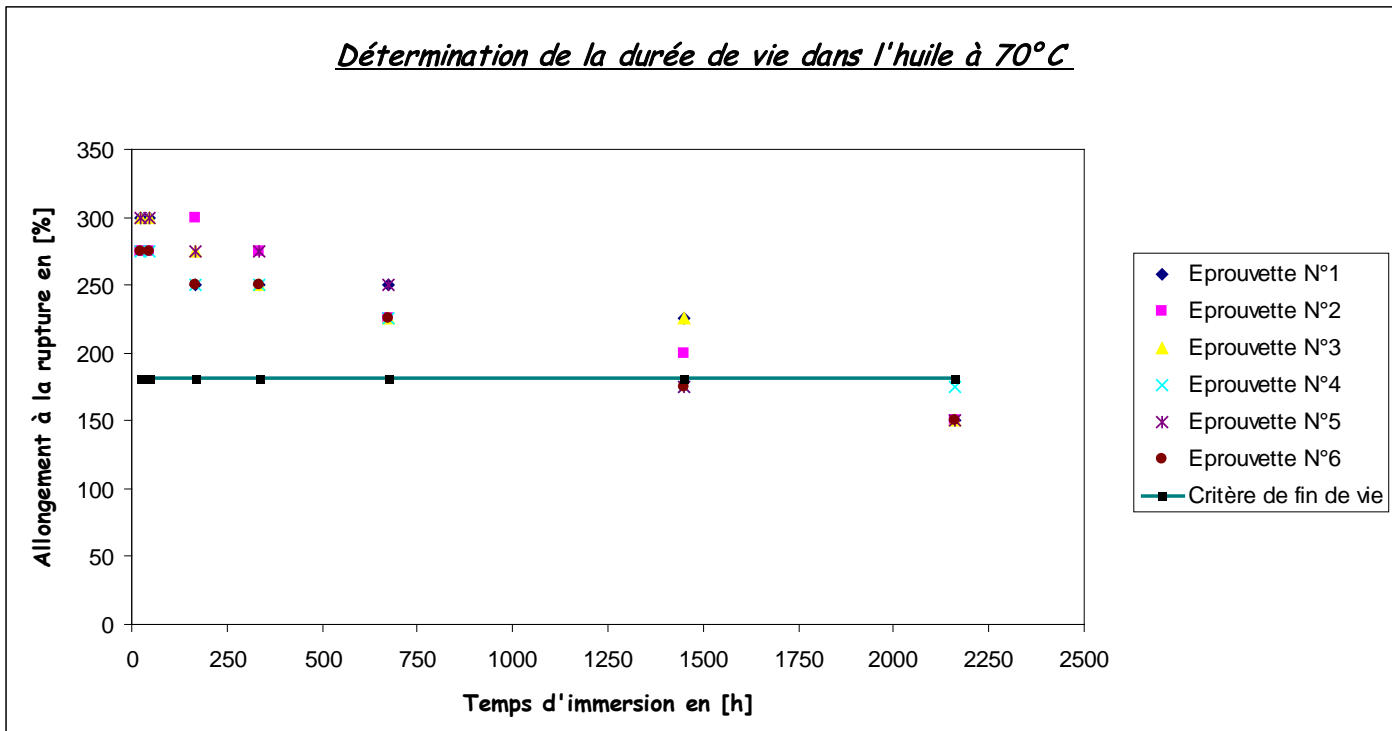
En exécutant le programme informatique pour le cas du PVC immergé dans l'huile en fonction du temps et pour des températures de vieillissement allant de 70°C à 150°C, nous avons obtenu la durée de vie de notre câble électrique. De la même façon on obtient la durée de vie de notre câble électrique pour les différents produits chimiques aux différentes températures de vieillissement.

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau suivant.

**Durées de vie du câble :**

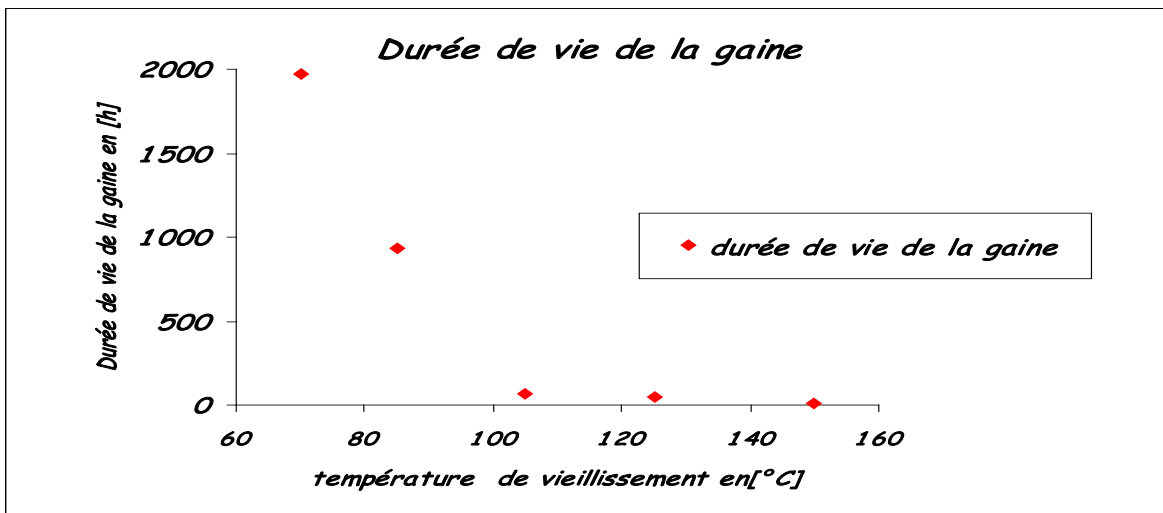
<b>Agent chimique</b>	<b>Température °C</b>	<b>Durée de vie en heures</b>
<b>Huile TISKA220</b>	<b>70</b>	<b>1970</b>
	<b>85</b>	<b>930</b>
	<b>105</b>	<b>63</b>
	<b>125</b>	<b>43</b>
	<b>150</b>	<b>13</b>
<b>Pétrole</b>	<b>Ambiante</b>	<b>4120</b>
<b>Gasoil</b>	<b>Ambiante</b>	<b>11980</b>
<b>Essence</b>	<b>Ambiante</b>	<b>13700</b>
<b>Acide sulfurique à 75 %</b>	<b>Ambiante</b>	<b>12800</b>
<b>Soude caustique à 1%</b>	<b>Ambiante</b>	<b>12000</b>
<b>Soude caustique à 40 %</b>	<b>Ambiante</b>	<b>12700</b>

LA durée de vie du câble électrique peut être également déterminée par la méthode graphique en exploitant les valeurs de nos essais portés sur les tableaux précédents. Prenant le cas de l'huile, nous avons constaté que les résultats obtenus sont proches de ceux obtenus par la méthode numérique néanmoins la méthode graphique présente un petit problème de précision et du temps.



**Détermination du graphe représentant l'endurance thermique :**

Il est très intéressant de déterminer le graphe représentant la variation de la durée de vie du câble électrique en fonction du temps d'immersion pour mieux suivre son comportement ainsi que la variation de ses caractéristiques.



**La durée de vie du câble en fonction de la température de vieillissement**

**Remarque :**

100 heures de vieillissement accéléré représentent une durée de vie d'une année dans les conditions normales du service d'un câble électrique à savoir la température et le contact avec les différents produits chimiques.

conclusion

## **CONCLUSION**

Dans cette étude nous présentons les résultats concernant le vieillissement thermique et chimique du PVC sur un mélange désigné au gainage des câbles électriques. Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques et physiques du polychlorure de vinyle en fonction du temps de vieillissement à différentes températures d'exposition à la chaleur et en fonction des produits chimiques (huile minérale, acide, base).

Nos essais ont été effectués conformément aux normes en vigueur.

L'analyse des travaux publiés sur le sujet permet de dire que dans la littérature, il existe peu de théories sur le vieillissement des polymères. Toutes les théories existantes découlant de la loi d'Arrhénius.

Pendant tous les essais, nous avons pu constater que plus la température est élevée et plus les propriétés du polymère se dégradent rapidement, ce qui est en accord avec la théorie d'Arrhénius,  $V = K \exp(-E/RT)$ .

Les résultats des essais mécaniques et physiques obtenus montrent que le câble conserve pratiquement toutes ses propriétés et ses performances jusqu'à 70°C, tandis que la dégradation a été atteinte en un temps très court après immersion de l'éprouvette dans l'huile à 125° et 150°C. La dégradation est relativement lente à 85° et 105°C.

L'étude de vieillissement thermique et chimique du polychlorure de vinyle, nous a permis de constater un changement de couleur dû principalement à la migration du plastifiant, un rétrécissement et une perte de masse considérable aux températures 105, 125 et 150°C.

L'étude de la perte de masse à 105,125 et 150°C est une confirmation de la dégradation du polymère à ces températures. Le vieillissement apparaît comme une évolution irréversible de certaines propriétés des matériaux dans un sens qui en moyenne est défavorable à leur service. Le cas le mieux connu est évidemment celui où le matériau travaille dans une ambiance définie (en contact avec les agents chimiques) ou exposé à la chaleur.

Le vieillissement peut se manifester par un changement d'aspect, fissuration ou par une variation des caractéristiques du matériau.

L'action de différents agents corrosifs à 20, 70, 85, 105, 125 et 150°C pendant plusieurs heures sur le PVC contenant des adjuvants a été suivie par les variations de la résistance à la rupture, l'allongement à la rupture, la perte de masse et le changement des propriétés

dimensionnelles. Les hydrocarbures aliphatiques (pétrole, essence, gasoil) provoquent seulement un jaunissement du matériau et une faible perte de masse (migration du plastifiant). L'acide sulfurique à une concentration élevée provoque une faible corrosion par contre l'agent le plus actif est l'huile minérale à des températures élevées.

D'après ces résultats, la durée de vie du PVC décroît en fonction de la température, ce qui confirme la validité de la loi d'Arrhénius.

Nos essais de vieillissement ont permis d'estimer, à partir de l'évolution de l'allongement à la rupture en fonction du temps, les durées de vie de notre câble. A 70°C la durée de vie de la gaine est très grande et le câble garde toutes ses propriétés, ce qui nous permet de fixer la température de service à 70°C.

Ce travail pourrait être approfondi en ajoutant des additifs appropriés avec des concentrations différentes afin d'améliorer les caractéristiques du notre câble et augmenter sa durée de vie. Une étude électrotechnique sur l'influence du vieillissement thermique et chimique sur les propriétés électriques de la gaine peut également être réalisée pour compléter notre travail.

## Bibliographie

- [1]: Maurice Reyne, le renouveau des plastiques, édition Hermès ; Paris, 1990.
- [2]: Documents du syndicat des producteurs de matières plastiques ; Paris la défense, 1998.
- [3]: A. Chabloz, Technologie des matériaux, 1980.
- [4]: Documents du syndicat des producteurs de matières plastiques ; Paris la défense, 1998. ; Starnes, Jr., W. H. Polym. Mater. Sci. Eng. 1988, 58, 220.
- [5]: Documents du GIE infoplast, 1998.
- [6]: Nouveau dictionnaire des matières plastiques, Muller, H. Plastics Additives Handbook, 3rd ed.; Oxford University: New York, 1990; Chapter 2.
- [7]: J.Bost, les matières plastiques tome I, chimie et applications ; technique et documentation, Paris 1985.
- [8]: Host Alit, matières plastiques, rapport Hoechst Host Alit, 1972.
- [9]: Techniques de l'ingénieur, plastiques et plasturgie, 1983.
- [10]: P.Virriez, Techniques de l'ingénieur, plastiques et plasturgie, 1992.
- [11]: Rapport Alfcovyl, chlorure de vinyle, 1969.
- [12]: M.Reyne, l'utilisation industrielle des plastiques ; Paris 1982.
- [13]: Rapport Kuhl mann ; produits organiques ; 1964.
- [14]: CA. Maudin et coll, Techniques de l'ingénieur, 1987.
- [15]: Plastiques et élastomères de synthèse, 1966. .
- [16]: 3. Braun, D.; Bezdadea, E. Encyclopedia of PVC, 2nd ed.; Nass, L. I.; Heiberger, C. A., Eds.; Marcel Dekker: New York, NY, 1986; Vol. 1, Chapter 8.
- [17]: George Matthews, vinyl and allied polymers ; 1972.
- [18]: 5. Decker, C. Degradation and Stabilisation of PVC; Owen, E. D., Ed.; Elsevier Applied Science: New York, NY, 1984; Chapter 3.
- [19]: Minsker, K. S.; Kolesov, S. V.; Zaikov, G. E. Degradation and Stabilization of Vinyl Chloride-Based Polymers; Pergamon: New York, NY, 1988.
- [20]: L. Garette, techniques de l'ingénieur ; 1993.
- [21]: Regnault ; H ; V. Annls chim. Phys. 1838.
- [22]: Mac lauren and sons, History of polyvinyl chloride ; 1982.
- [23]: Rapport sur Internet ; 1999.
- [24]: Gee and Rideal, trans. Faraday soc ; 1936.
- [25]: Flory. P. J. An chem. So ; 1937.

- [26] : Talamini and Vidotto ;, . Millán, J.; Martínez, G.; Jimeno, M. L.; Tiemblo, P.; Mijangos, C.; Gómez-Elvira, J. M. Makromol. Chem., Macromol. Symp. chemical ind 1991, 48/49, 403.
- [27] : Préparation de polychlorure de vinyle ; 1990. 50. Starnes, Jr., W. H. Polym. Prepr. (Am. Chem. Soc., Div. Polym. Chem.) 1994, 35(1), 425.
- [28] : J. A. Brydson ; Plastics materials ; 1982.
- [29] : Câbles électriques et appareillages, rapport tréficable Pirelli, 1985.
- [30] : Plastiques et élastomères de synthèse, 1966.
- [31] : P.Robert, matériaux de l'électrotechnique, 1979.
- [32] : B. Fallou, caractéristiques des isolants solides ; Starnes, Jr., W. H. Polym. Mater. Sci. Eng. 1988..
- [33] : Atochem, techno-nathan, Le PVC et ses applications ; 1991.
- [34] : R.Lefaux, «les matières plastiques dans l'industrie alimentaire »publications techniques associées, 1972.
- [35] : Deborah.A. Cory-Slechta, Joel.G. Handbook of neurotoxicology, New york, 1995.
- [36] : Document from US CPSC, environ corporation, Health Canada (Internet).
- [37] : E.Leclerc, «matières plastiques et toxicité », édition Cebedoc, 1971.
- [38] : P. Dubois et J. Henniker, The ageing of plastics ; London ; 1960.
- [39] : H. Stager, le vieillissement des matières plastiques ; 1959.
- [40] : F. H. Muller, modifications physiques permanentes des super polymères et leur contrôle ; 1959. ; . Sedlar, J. Third International Conference on Advances in the Stabilization and Controlled Degradation of Polymers, Lucerne; 1981.
- [41] : A. Sippel, le vieillissement naturel et artificiel des hauts polymères fibreux ; 1972.
- [42] : P. Dubois, Masson et cie éditeurs, les plastiques modernes ; Paris ; 1963.
- [43] : Ho. Wirth. Andreas, pure and applied chem ; Elsevier Applied Science: London, 1981; Vol. 4, p 16.
- [44] : Techniques de l'ingénieur, plastiques et plasturgie, 1983.
- [45] : BA Caoglu, R Fisch, polymer degradation and stability, 1994.
- [46] : Ivan B, Klen T, degradatin and stabilisation of polymers, London 1989.
- [47] : J. Verou, comportement à long terme, techniques de l'ingénieur ; 1980.
- [48] : P. Belloc, B. Fallou, étude de vieillissement thermique des matériaux utilisés dans la construction électrique ; 1970.

- [49] : S. Hirabayashi et al, comportement sous contraintes multiples de matériaux isolants et systèmes d'isolation ; 1984.
- [50] : Norme CEI 881 « Essais mécaniques et physiques du PVC »2000
- [51] : R. A. Von Hippel, les diélectriques et leurs applications ; 1963.
- [52] : Plastifiants et autres produits auxiliaires pour le chlorure de vinyle ; 1963.
- [53] : . Starnes, Jr., W. H.; Schilling, F. C.; Plitz, I. M.; Cais, R. E.; Freed, D. J.; Hartless, R. L.; Bovey, F. A. Macromolecules 1983.
- [54] : L. M. Mayofis, plastics insulating materials, London ; 1963.
- [55] : P. Dubois, Masson et cie éditeurs, les plastiques modernes ; Paris ; 1963.
- [56] : Mc Neill, L. e Coke, polymer degradation, 1990.
- [57] : C. Stevens et al, Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants ; 1982.
- [58] : Deschamps et al, L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles électriques ; L. ; 1983.

# **Annexe**

# **Valeurs moyennes des essais mécaniques & physiques**

**Caractéristiques mécaniques après immersion du PVC dans l'huile à 150°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>2</b>	<b>59</b>	<b>88,3</b>
<b>4</b>	<b>51,6</b>	<b>86,9</b>
<b>6</b>	<b>44,7</b>	<b>98</b>
<b>24</b>	<b>36,1</b>	<b>102,9</b>
<b>28</b>	<b>2,3</b>	<b>114,6</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 125°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>4</b>	<b>62,7</b>	<b>91,1</b>
<b>24</b>	<b>57,2</b>	<b>95,3</b>
<b>30</b>	<b>53,3</b>	<b>102,1</b>
<b>48</b>	<b>52,4</b>	<b>103</b>
<b>72</b>	<b>40,6</b>	<b>107,5</b>
<b>120</b>	<b>11,7</b>	<b>108,8</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 105°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>6</b>	<b>63</b>	<b>85,2</b>
<b>24</b>	<b>51,4</b>	<b>90,2</b>
<b>48</b>	<b>47,3</b>	<b>87,5</b>
<b>72</b>	<b>46,7</b>	<b>86,6</b>
<b>96</b>	<b>46,4</b>	<b>88,2</b>
<b>144</b>	<b>41,2</b>	<b>92,7</b>
<b>168</b>	<b>22,9</b>	<b>99,4</b>
<b>336</b>	<b>8,5</b>	<b>136,7</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 85°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>4</b>	<b>82,2</b>	<b>80,6</b>
<b>24</b>	<b>67</b>	<b>89,9</b>
<b>48</b>	<b>67</b>	<b>83,9</b>
<b>72</b>	<b>58,7</b>	<b>83,4</b>
<b>120</b>	<b>43,2</b>	<b>98,1</b>
<b>168</b>	<b>37,5</b>	<b>95,9</b>
<b>336</b>	<b>25,8</b>	<b>103,1</b>
<b>504</b>	<b>27,2</b>	<b>107,5</b>
<b>1080</b>	<b>3,84</b>	<b>115,1</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'huile à 70°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>24</b>	<b>79,1</b>	<b>82,4</b>
<b>48</b>	<b>77,7</b>	<b>78,4</b>
<b>168</b>	<b>73,9</b>	<b>81,7</b>
<b>336</b>	<b>70,5</b>	<b>80</b>
<b>672</b>	<b>65</b>	<b>81,7</b>
<b>1448</b>	<b>56,4</b>	<b>87,8</b>
<b>2160</b>	<b>39,8</b>	<b>95,9</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans le gasoil**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>4</b>	<b>92,8</b>	<b>90,2</b>
<b>24</b>	<b>78,8</b>	<b>86</b>
<b>48</b>	<b>79,7</b>	<b>85,1</b>
<b>120</b>	<b>75,9</b>	<b>89,2</b>
<b>168</b>	<b>73,1</b>	<b>90,2</b>
<b>336</b>	<b>68,2</b>	<b>102,5</b>
<b>770</b>	<b>61,3</b>	<b>99,9</b>
<b>1056</b>	<b>68,1</b>	<b>88,7</b>
<b>2880</b>	<b>60,46</b>	<b>96,4</b>
<b>4320</b>	<b>79,7</b>	<b>95,9</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans l'essence**

<b>Temps</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>4</b>	<b>92,3</b>	<b>77,8</b>
<b>6</b>	<b>89,4</b>	<b>74,5</b>
<b>24</b>	<b>94</b>	<b>84</b>
<b>30</b>	<b>96,3</b>	<b>84,2</b>
<b>48</b>	<b>97,4</b>	<b>87,7</b>
<b>72</b>	<b>100,6</b>	<b>85,1</b>
<b>96</b>	<b>96</b>	<b>78</b>
<b>168</b>	<b>90</b>	<b>72,6</b>
<b>336</b>	<b>84,8</b>	<b>79,7</b>
<b>2900</b>	<b>76,5</b>	<b>87,2</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans le pétrole brut**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>4</b>	<b>101,4</b>	<b>84,6</b>
<b>24</b>	<b>65,9</b>	<b>92</b>
<b>48</b>	<b>66,5</b>	<b>91,6</b>
<b>72</b>	<b>82</b>	<b>72,3</b>
<b>168</b>	<b>81,2</b>	<b>79,8</b>
<b>216</b>	<b>84,2</b>	<b>76,1</b>
<b>336</b>	<b>77,3</b>	<b>79,9</b>
<b>720</b>	<b>74,2</b>	<b>84,1</b>
<b>1824</b>	<b>66,2</b>	<b>89,3</b>
<b>4320</b>	<b>78,5</b>	<b>94,7</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans NaOH à 40 %**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>24</b>	<b>95,7</b>	<b>87,2</b>
<b>48</b>	<b>94,8</b>	<b>84,7</b>
<b>120</b>	<b>92,3</b>	<b>84,9</b>
<b>168</b>	<b>94</b>	<b>84,4</b>
<b>336</b>	<b>80,5</b>	<b>95,2</b>
<b>1512</b>	<b>76,8</b>	<b>91</b>
<b>4320</b>	<b>45,85</b>	<b>72,7</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans NaOH à 1 %**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>24</b>	<b>95,4</b>	<b>89,7</b>
<b>48</b>	<b>94,3</b>	<b>86,4</b>
<b>168</b>	<b>91,4</b>	<b>87,2</b>
<b>1512</b>	<b>86</b>	<b>94,9</b>
<b>4320</b>	<b>91,1</b>	<b>84</b>

**Caractéristiques mécaniques du PVC après immersion dans  $H_2SO_4$**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Allongement %</b>	<b>R/Rupture %</b>
<b>24</b>	<b>93,7</b>	<b>89</b>
<b>120</b>	<b>92</b>	<b>95,4</b>
<b>168</b>	<b>89,4</b>	<b>92</b>
<b>336</b>	<b>92,5</b>	<b>101,2</b>
<b>456</b>	<b>87,7</b>	<b>95,9</b>
<b>792</b>	<b>91,7</b>	<b>100,4</b>
<b>1464</b>	<b>95,1</b>	<b>108</b>
<b>2880</b>	<b>87,1</b>	<b>85,8</b>

**Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 150°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>-12,6</b>	<b>92,4</b>
<b>48</b>	<b>-17,3</b>	<b>90,2</b>
<b>72</b>	<b>-19,9</b>	<b>88,8</b>

**Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 125°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>-12,8</b>	<b>92,4</b>
<b>48</b>	<b>-17</b>	<b>90</b>
<b>72</b>	<b>-18,7</b>	<b>89,5</b>
<b>130</b>	<b>-21,4</b>	<b>88,4</b>
<b>155</b>	<b>-22,2</b>	<b>88</b>

**Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 105°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>-1,2</b>	<b>97,4</b>
<b>24</b>	<b>-1,2</b>	<b>97,4</b>
<b>24</b>	<b>-1,2</b>	<b>97,4</b>
<b>24</b>	<b>-1,2</b>	<b>97,4</b>
<b>24</b>	<b>-1,2</b>	<b>97,4</b>
<b>24</b>	<b>-1,2</b>	<b>97,4</b>
<b>24</b>	<b>-1,2</b>	<b>97,4</b>

**Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 85°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>48</b>	<b>-11,6</b>	<b>94,6</b>
<b>120</b>	<b>-15,4</b>	<b>92,6</b>
<b>336</b>	<b>-15,8</b>	<b>94,5</b>
<b>720</b>	<b>-16,1</b>	<b>91,9</b>
<b>1248</b>	<b>-16,8</b>	<b>91,7</b>
<b>1968</b>	<b>-18</b>	<b>91,4</b>
<b>4320</b>	<b>-18,1</b>	<b>91,4</b>

**Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'huile à 70°C**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>-0,87</b>	<b>99,2</b>
<b>72</b>	<b>-1,77</b>	<b>99</b>
<b>117</b>	<b>-2,6</b>	<b>98,8</b>
<b>285</b>	<b>-4,2</b>	<b>98</b>
<b>837</b>	<b>-6,4</b>	<b>97</b>
<b>1629</b>	<b>-7,4</b>	<b>96,6</b>
<b>2373</b>	<b>-10,9</b>	<b>94,8</b>
<b>4725</b>	<b>-14</b>	<b>93</b>

Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans  $H_2SO_4$

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>48</b>	<b>-0,025</b>	<b>99,8</b>
<b>336</b>	<b>0,015</b>	<b>99,7</b>
<b>1344</b>	<b>-0,08</b>	<b>100</b>
<b>2808</b>	<b>0,09</b>	<b>99,8</b>
<b>4320</b>	<b>0,13</b>	<b>100,1</b>

**Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans NaOH à 1 %**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>0,075</b>	<b>100</b>
<b>192</b>	<b>0,093</b>	<b>99,9</b>
<b>955</b>	<b>0,12</b>	<b>99,9</b>
<b>1675</b>	<b>0,11</b>	<b>99,8</b>
<b>4550</b>	<b>0,07</b>	<b>99,9</b>

**Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans NaOH à 40 %**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>0</b>	<b>99,9</b>
<b>72</b>	<b>-0,1</b>	<b>100,3</b>
<b>955</b>	<b>-0,3</b>	<b>99,6</b>
<b>1675</b>	<b>-0,35</b>	<b>99,7</b>
<b>4550</b>	<b>-0,5</b>	<b>99,7</b>

**Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans le gasoil**

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>0,16</b>	<b>100,7</b>
<b>96</b>	<b>0,5</b>	<b>100,2</b>
<b>162</b>	<b>0,8</b>	<b>100,3</b>
<b>258</b>	<b>1</b>	<b>99,7</b>
<b>517</b>	<b>1,2</b>	<b>99,8</b>
<b>997</b>	<b>0,4</b>	<b>100,2</b>
<b>1117</b>	<b>0,2</b>	<b>99,6</b>
<b>1285</b>	<b>-0,03</b>	<b>99,5</b>
<b>2005</b>	<b>-1,3</b>	<b>98,9</b>
<b>3265</b>	<b>-2,5</b>	<b>98,8</b>
<b>8425</b>	<b>-3,7</b>	<b>98,4</b>
<b>9145</b>	<b>-4,6</b>	<b>97,8</b>

Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans l'essence

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>3,07</b>	<b>100,4</b>
<b>48</b>	<b>1,96</b>	<b>99,1</b>
<b>96</b>	<b>-1,91</b>	<b>98,6</b>
<b>114</b>	<b>-4,4</b>	<b>98,1</b>
<b>160</b>	<b>-4,4</b>	<b>97,9</b>
<b>280</b>	<b>-4,9</b>	<b>97,6</b>
<b>586</b>	<b>-6,8</b>	<b>96,6</b>
<b>1277</b>	<b>-7,64</b>	<b>96</b>
<b>1949</b>	<b>-8,66</b>	<b>95,47</b>
<b>3077</b>	<b>-8,7</b>	<b>95,5</b>
<b>5040</b>	<b>-14,12</b>	<b>92,78</b>

*Caractéristiques physiques du PVC après immersion dans le pétrole brut*

<b>Temps ( h )</b>	<b>Perte de Masse %</b>	<b>Variation de la Longueur %</b>
<b>24</b>	<b>0,8</b>	<b>99,9</b>
<b>96</b>	<b>1,6</b>	<b>100,6</b>
<b>216</b>	<b>2,4</b>	<b>100,8</b>
<b>379</b>	<b>1,7</b>	<b>100,9</b>
<b>880</b>	<b>3</b>	<b>100,9</b>
<b>2752</b>	<b>1,75</b>	<b>100</b>
<b>3472</b>	<b>1,1</b>	<b>100</b>
<b>5008</b>	<b>1</b>	<b>99,9</b>
<b>7160</b>	<b>0,6</b>	<b>99,9</b>

# **Programme**

# **Informatique**

```

program temps_de_vieillessement_de_cables;
{$m 65520,65520,655360}
uses crt;
const k=5;(* nombre de valeurs de la contrainte *)
      nef=10;(** nombre maximum de series d'essais qui sont fait pour chaque valeur de la
contrainte**)
      nepu=3;(* nombre d'eprouvettes utilis,es si c'est le m^me pour chaque valeur de la contrainte *)
      p=2;(* degre du polyn"me utilise dans l'estimation du temps de vieillissement*)
type  t=array[1..k]of integer;(** tableau du nombre d'eprouvettes correspondant ... chaque valeur de la
contrainte**)
      t1=array[1..k]of extended;(* tableau des valeurs des contraintes ou d'une fonction de la contrainte *)
      t2=array[1..k,1..nepu]of extended; (* tableau des valeurs des temps de vieillissement ou fonctions
de ce temps
dans chaque eprouvette *)
      tab=array[0..p,0..p+1]of extended;(* tableau des valeurs pour calculer les coefficients du
polyn"me d'extrapolation**)
      tab2=array[0..p]of extended;(** tableau des coefficients du polyn"me d'extrapolation**)
      tab3=array[1..nef]of extended;(** tableau pour les valeurs des temps et des propriet,s
physiques *)
      tab4=array[1..nepu,1..nef]of extended;(* tableau des propriet,s physiques mesure,s dans
chaque eprouvette et pour
les differentes series
d'essais*)
      tab3p:=^tab3;
      t2p:=^t2;
var n:t;
      nefk=array[1..k]of integer;
      cnt,x,tv:t1;
      y1:t2p;
      x1,y3,x11,y31:tab3p;
      i,nt,i1,j1,i2:integer;
      c,c1,c2:char;
      v,a,b,alpha,khi2,fischer,student,s2l,sx2,xc,yt,xmoy,ymoy,xg,xd,yg,yd:extended;
      vppsc,s,vp:extended;
      a1:tab;
      coefpoly:tab2;
      pphy:^tab4;
label e1,e2,e3,e4;
(***)fonction sign d'un nombre(***)
function sign(x:extended):char;
begin
      if x<0 then sign:='-';
      else sign:='+';
end;
(***)m,thode de JORDAN avec strategie de pivot total implicite(***)
PROCEDURE EQLINEARs(Np:integer;a:tab; var w:tab2);
VAR k,t,j,i:integer;
      lk,ck:array [0..p] of integer ;
      pk:array [0..p] of extended;
      cof:real;
label e,e1,e2;
begin
for k:= 0 to Np DO
begin
      pk[k]:=A[0,0];
      lk[k]:=0;
      ck[k]:=0;
      for i:=0 to Np do
      begin
            for t:=0 to k-1 do
            if i=lk[t] then goto e;
            for j:= 0 to Np DO

```

```

begin
  for t:=0 to k-1 do
    if j=ck[t] then goto e1;
    if abs(A[i,j])>=abs(pk[k]) then begin
      pk[k]:=A[i,j];
      ck[k]:=j;lk[k]:=i;
    end;
  e1: end;
e: end;
  for j:=0 to Np+1 DO
  if pk[k]<>0 then A[lk[k],j]:=A[lk[k],j]/pk[k];
  for i:=0 to Np do
  begin
    if i=lk[k] then goto e2;
    cof:=A[i,ck[k]];
    for j:=0 to Np+1 do
      A[i,j]:=A[i,j]-cof*A[lk[k],j];
  e2: end;
end;
for i:=0 to Np DO
W[ck[i]]:=A[lk[i],Np+1];

end;
(*****methode de Horner pour l'evaluation d'un polynome*****)
function horner(param1:extended;param2:tab2):extended;
var u:extended;
    i:integer;
begin
  u:=param2[p];
  for i:=p downto 1 do u:=param2[i-1]+param1*u;
  horner:=u;
end;

(***cas o — le nombre d',prouvettes est identique
                                                    pour toutes les
valeurs des contraintes*****)
procedure regression_lineaire1(nep:integer;x:t1;y:t2p;var pa,pb,pxmoy,pymoy,psx2:extended);
var y_barre:array[1..k] of extended;
    i,j:integer;
    s,si,sx,sy,x_barre,y_barre:extended;
begin
  sx:=0;sy:=0;
  for i:=1 to k do
  begin
    s:=0;
    for j:=1 to nep do
      s:=s+y^[i,j];
    y_barre[i]:=s/nep;
    sx:=sx+x[i];
    sy:=sy+y_barre[i];
  end;
  x_barre:=sx/k;y_barre:=sy/k;
  s:=0;si:=0;
  for i:=1 to k do
  begin
    s:=s+(x[i]-x_barre)*(y_barre[i]-y_barre);
    si:=si+sqr(x[i]-x_barre);
  end;
  psx2:=nep*si;
  pb:=s/si;
  pa:=y_barre-pb*x_barre;

```

```

        pxmoy:=xbarre;
        pymoy:=ybarre;
end;
(* test de linearit, *)
procedure test_linearite(pns,pk,pfi:extended;y:t2p; var s2p:extended);
var i,j:integer;
    som,c,f,s12,s22,s3,s4,pkhi2,pfisher:extended;
    sde,y_barre,yr:array[1..k]of extended;
begin
    f:=0;s3:=0;
    for i:=1 to k do
    begin
        som:=0;f:=f+n[i]-1;
        for j:=1 to n[i] do
            som:=som+y^[i,j];
            y_barre[i]:=som/n[i]; som:=0;
            for j:=1 to n[i] do
                som:=som+sqr(y^[i,j]-y_barre[i]);
                sde[i]:=som/(n[i]-1);
                s3:=s3+sde[i]*(n[i]-1);
            end;
        end;
        s12:=s3/f;
        s3:=0;s4:=0;
        for i:=1 to k do
        begin
            s3:=s3+(n[i]-1)*ln(sde[i]);
            s4:=s4+1/(n[i]-1);
        end;
        c:=1+(s4-1/f)/(3*(k-1));
        pkhi2:=2.3*(f*ln(s12)-s4)/c;
        if pkhi2 > pk then writeln('il n"ya pas d"egalit, des variances pour le niveau de signification ',pns)
            else writeln('les variances sont ,gale avec une probabilit, de :',1-pns);

        som:=0;
        regression_lineaire1(nepu,x,y,a,b,xmoy,ymoy,sx2);
        for i:=1 to k do
        begin
            yr[i]:=a+b*x[i];
            som:=som+n[i]*sqr(y_barre[i]-yr[i]);
        end;
        s22:=som/(k-2);
        pfisher:=s22/s12;
        if pfisher > pfi then writeln('pour le niveau de signification', pns, 'vos donne,s ne sont pas
rigoureusement linaires')
            else writeln('il ya une probabilit, de: ', 1-pns,' pour que vos
donne,s soient representable par une droite');
        s2p:=(f*s12+(k-2)*s22)/(f+k-2);

    end;
    (*****intervalle de confiance sur la valeur du temps de vieillissement*****)
    procedure confiance_sur_y(px,py,ps2p,psx2,pxmoy,ts:double;var pyg,pyd :extended);
    var i,nb,s:integer;
        sy2:extended;

    begin
        s:=0;
        for i:=1 to k do
            nb:=s+n[i];
            sy2:=ps2p*(1/nb+sqr(px-pxmoy)/psx2);
            pyg:=py-ts*sqr(sy2);
            pyd:=py+ts*sqr(sy2);
        end;
    end;
    (*****intervalle de confiance sur la valeur de la contrainte de vieillissement*****)

```

```

procedure confiance_sur_x(px,py,pb,ps2p,psx2,pxmoy,pymoy,ts:double;var pxg,pxd :extended);
var br,s,sr2:extended;
    i:integer;
begin
    s:=0;
    for i:=1 to k do
        s:=s+n[i];
        br:=pb-sqr(ts)*ps2p/(pb*psx2);
        sr2:=ps2p*(br/(s*pb)+sqr(px-pxmoy)/psx2);
        pxg:=pxmoy+(py-pymoy-ts*sqr(sr2))/br;
        pxd:=pxmoy+(py-pymoy+ts*sqr(sr2))/br;
    end;

procedure affectation_fixe(var pnt:integer);
var j:integer;
begin
    for j:=1 to k do
        n[j]:=nepu;
        pnt:=k*nepu;
    end;

(*****)
procedure affectation_temps_vieillessement(p1:char;ip,jp:integer);
var v:extended;
begin
    case p1 of
        '0':v:=coefpoly[0]+coefpoly[1]*(0.5*vppsc);
        '1':v:=exp(coefpoly[0])*exp(coefpoly[1]*0.5*vppsc);
        '2':v:=exp(coefpoly[0])*exp(coefpoly[1]*ln(0.5*vppsc));
        '3':v:=horner(0.5*vppsc,coefpoly);
    end;
    y1^[ip,jp]:=ln(v);
end;

(*****)
procedure affectation_des_temps_et_des_valeurs_mesur,es_de_la_propriet,physique_du
mat,riau(*****)
procedure affectation (np:integer;p1:char;x,y:tab3p; var a:tab);
var l,col,j:integer;
    s:extended;
begin
    case p1 of
        '0','1','2': for l:=0 to np do
            begin
                s:=0;
                for j:=1 to nefk[j1] do if (p1='1') or (p1='2') then s:=s+y^[j]*sqr(y^[j])*exp(l*ln(x^[j]))

            else begin s:=s+y^[j]*exp(l*ln(x^[j])); end;
                a[l,np+1]:=s;
            end
        else for l:=0 to p do
            begin
                s:=0;
                for j:=1 to nefk[j1] do s:=s+y^[j]*exp(l*ln(x^[j]));
                a[l,p+1]:=s;
            end;
    end;
    case p1 of
        '0','1','2':for l:=0 to np do
            for col:=0 to np do
                begin
                    s:=0;
                    for j:=1 to nefk[j1] do if (p1='1') or (p1='2') then
s:=s+exp((l+col)*ln(x^[j]))*sqr(y^[j])

```

```

else begin s:=s+exp((1+col)*ln(x^[j]));end;
      a[l,col]:=s;
end
else for l:=0 to p do
      for col:=0 to p do
begin
      s:=0;
      for j:=1 to nefk[j] do s:=s+exp((1+col)*ln(x^[j]));
      a[l,col]:=s;
end;
end;
end;

end;

(****coefficient de corr,lation****)
function coefcor(p1:char;x,y:tab3p;a,b,c:extended;n:integer):extended;
var s1,s2,s3,s4:extended;
    i:integer;
begin
s1:=0;s2:=0;s3:=0;s4:=0;
for i:=1 to n do
begin
case p1 of
'3': begin s1:=s1+sqr(horner(x^[i],coefpoly));
        s2:=s2+horner(x^[i],coefpoly);
        end;
'2': begin s1:=s1+exp(2*b*ln(x^[i]));
        s2:=s2+exp(b*ln(x^[i]));
        end;
'1': begin s1:=s1+exp(2*b*x^[i]);
        s2:=s2+exp(b*x^[i]);
        end;
'0': begin s1:=s1+sqr(x^[i]);
        s2:=s2+x^[i];
        end;
end;
s3:=s3+sqr(y^[i]);
s4:=s4+y^[i];
end;
if (p1='1') or (p1='2') then coefcor:=a*a*(s1/n-sqr(s2/n))/(s3/n-sqr(s4/n))
else if p1='0' then coefcor:=b*b*(s1/n-sqr(s2/n))/(s3/n-
sqr(s4/n))
else coefcor:=(s1/n-
sqr(s2/n))/(s3/n-sqr(s4/n));
end;
(*****calcul des coefficient du model*****)
procedure calcul(p1:char);
begin
case p1 of
'0': begin affectation(1,p1,x1,y3,a1);
        eqlinears(1,a1,coefpoly);
        end;
'1': begin affectation(1,p1,x1,y31,a1);
        eqlinears(1,a1,coefpoly);
        end;
'2': begin affectation(1,p1,x11,y31,a1);
        eqlinears(1,a1,coefpoly);
        end;
'3': begin affectation(p,p1,x1,y3,a1);
        eqlinears(p,a1,coefpoly);
        end;
end;

```

```

end;

end;
(*****affichage du temps estim, de vieillissement et du coefficient de corr,lation de vos donn,es par le
model choisi ***)
procedure affichage(p1:char;pj:integer);
begin
  clrscr;
  case p1 of
    '3': begin writeln('la valeur du temps de vieillissement dans l"eprouvette n°',pj,' par le modŠle polynomiale
de degr,',p
  ,' est estim, ... : '
  ,horner(0.5*vppsc,coefpoly),'[heures]');
  writeln;
  writeln('le coefficient de corr,lation est:',coefcor(p1,x1,y3,0,0,0,nefk[j1]):3:2);
  writeln;
  writeln('l"quation du modŠle est :
Y=',coefpoly[0],",sign(coefpoly[1]),abs(coefpoly[1]),'*X',sign(coefpoly[2]),
coefpoly[2],'*X^2');
  end;
    '2': begin writeln('la valeur du temps de vieillissement dans l"eprouvette n°',pj,' par le modŠle de puissance
est estim, ... : '
  ,exp(coefpoly[0])*exp(coefpoly[1]*ln(0.5*vppsc),'[heures]');
  writeln;
  writeln('le coefficient de corr,lation
est:',coefcor(p1,x1,y3,exp(coefpoly[0]),coefpoly[1],0,nefk[j1]):3:2);
  writeln;
  writeln('l"quation du modŠle est : Y=',exp(coefpoly[0]),'*exp(',coefpoly[1],'*Ln(X))');
  end;

    '1': begin writeln('la valeur du temps de vieillissement dans l"eprouvette n°',pj,' par le modŠle exponentiel
est estim, ... : '
  ,exp(coefpoly[0])*exp(coefpoly[1]*0.5*vppsc),'[heures]');
  writeln;
  writeln('le coefficient de corr,lation
est:',coefcor(p1,x1,y3,exp(coefpoly[0]),coefpoly[1],0,nefk[j1]):3:2);
  writeln;
  writeln('l"quation du modŠle est : Y=',exp(coefpoly[0]),'*exp(',coefpoly[1],'*X)');
  end;

    '0': begin writeln('la valeur du temps de vieillissement dans l"eprouvette n°',pj,' par le modŠle lin,aire est
estim, ... : '
  ,coefpoly[0]+coefpoly[1]*(0.5*vppsc),'[heures]');
  writeln;
  writeln('le coefficient de corr,lation est:',coefcor(p1,x1,y3,coefpoly[0],coefpoly[1],0,nefk[j1]):3:2);
  writeln;
  writeln('l"quation du modŠle est : Y=',coefpoly[0],",sign(coefpoly[1]),abs(coefpoly[1]),'*X');
  end;

  end;
end;
(***test de la validit, du model choisi***)
procedure test(p1:char);
var f:extended;
begin
  clrscr;
  write('donnez la valeur du centile de la loi de fischer ... [' ,nef-p,',',p+1,'] degres de libert, correspondant',
  ' ... un risque de 0.05 ?');
  readln(fischer);
  case p1 of
    '0': f:=(nef-
1)/2*coefcor(p1,x1,y3,coefpoly[0],coefpoly[1],0,nef)/(1+coefcor(p1,x1,y3,coefpoly[0],coefpoly[1],0,nef));
    '1': f:=(nef-1)/2*coefcor(p1,x1,y3,exp(coefpoly[0]),coefpoly[1],0,nef)

```



```

        x1^[i2]:=pphy^[i,i2];
        x11^[i2]:=ln(x1^[i2]);
    end;
e4:calcul(c1);
    affichage(c1,i); readln;
    (*test(c1);*)

    affectation_temps_vieillessement(c1,j1,i);clrscr;
    writeln('essayez un des autres mod$les [O ou N]?');c2:=readkey;clrscr;
    if c2='o'then begin writeln('Choix du model de regression pour le calcul
du temps de vieillissement'
    ,
    ,
    ,
    [0:lineaire, 1:exponentiel, 2:de puissance, 3:polynome
de degr, deux ou plus]);
    c1:=readkey;
    goto e4;
    end
end;
end;

for i:=1 to k do
begin
    x[i]:=1/cnt[i];
    gotoxy(5,5);
    delline;
end;

affectation_fixe(nt);
    clrscr;
    write('donner le niveau de signification?');readln(alpha);
    delline;
    gotoxy(5,5);
    write('donnez la valeur de la fonction khi2 ... ',k-1,
    ' degr,s de libert,s pour la probabilit, p= ',1-alpha:4:2,' ');
    readln(khi2);delline;delline;gotoxy(5,5);
    write('donnez la valeur de la fonction de fisher ... ( ',k-2,',',nt-k,
    ') degr,s de libert,s correspondante au niveau ',alpha:4:2,' ');
    readln(fischer);clrscr;gotoxy(5,6);
    write('donnez la valeur de la fonction de student ... ',nt-2,
    ' degr,s de libert, pour la probabilit,:',1-alpha:4:2,' ');
    readln(student);
    delline;delline;delline;gotoxy(5,5);
    test_linearite(alpha,khi2,fischer,y1,s2l);
    dispose(y1);
    clrscr;
    gotoxy(5,5);
    (*****)
    write('donnez une valeur pour la contrainte [øC]?');readln(v);
    xc:=1/(v+273.15);
    yt:=a+b*xc;
    confiance_sur_y(xc,yt,s2l,sx2,xmoy,student,yg,yd);
    clrscr;
    gotoxy(5,5);
    write('Vous avez un temps de vieillissement approximatif de: ',exp(yt),'[heures]');readln;
    clrscr;
    writeln(exp(yg),'< temps de vieillissement <',exp(yd),' avec une probabilit, de:',1-
alpha:5:2);readln;
    writeln;
    clrscr;
    (*****)
    write('Donnez une valeur pour le temps de vieillissement[heures]?');readln(v);
    yt:=ln(v);

```

```
xc:=(yt-a)/b;
confiance_sur_x(xc,yt,b,s2l,sx2,xmoy,ymoy,student,xg,xd);
clrscr;
gotoxy(5,5);
write('Vous devez appliquer une contrainte de vieillissement approximative de:',1/xc,' [øk]'); readln;
clrscr;
write(1/xd,'< contrainte de vieillissement <',1/xg,' avec une probabilit, de:',1-alpha:5:2);
readln;
(*****)
dispose(x1);
dispose(x11);
dispose(y3);
dispose(y31);
dispose(pphy);
clrscr;
gotoxy(5,5);
write('voulez vous continuer? [press O or N ]');c:=readkey;
if c='o' then goto e1
      else goto e3;

e3:end.
```