



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.**  
Faculté de génie de la construction  
**Département de génie mécanique**

**Mémoire de fin d'études**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**

**Master en Génie Mécanique**  
**Option : Construction Mécanique**

## **Thème**

**Vieillessement thermique et chimique**  
**des conduites d'eau potable en PEHD**

**Réalisé par :**

*Mr :AIT BELKACEM SALIM*

*Mr: KACI MARZOUK*

**Dirigé par :**

*Mme T. ABERKANE*

**Co-encadré par :**

*Mr. Z .FOUGHALIA*

*Année 2023/2024*

# REMERCIEMENTS

*Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre profonde gratitude envers  
Dieu, qui nous a accordé  
le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener ce travail à  
bien.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à nos promoteurs, Madame T.  
Aberkane et  
Mr Z.Foughalia, pour leurs orientations précieuses et leurs disponibilité  
constante tout  
au long de notre travail.*

*Nous tenons également à remercier toute l'équipe du hall de technologie  
d'Oued-Aissi pour  
leur suivi et leurs conseils avisés.*

*Nous exprimons également notre reconnaissance aux membres du jury  
pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Enfin, nous remercions nos familles, nos amis, ainsi que toutes les  
personnes qui, de près  
ou de loin, nous ont apporté leur soutien et leur aide pour la réalisation de  
ce projet.*

# *DEDICACES*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents, dont aucun mot ne saurait exprimer l'immensité de mes sentiments pour leur patience infinie, leurs encouragements silencieux et leur soutien constant. Ce travail est un témoignage de mon profond respect et de ma reconnaissance pour leurs grands sacrifices.*

*Mes frères bien-aimés (MAHREZ et AMINE) et ma sœur (NARIMANE), pour leur soutien inconditionnel que je salue avec une profonde gratitude.*

*Mes précieux amis (SAMIR, MOUMOUH, OUSSAMA, RABAH, AKLI et TAHAR), sans qui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.*

*Ma très chère amie DYHIA , qui a toujours été une source de motivation et de volonté pour mener à bien ce projet.*

*Mon binôme MARZOUK, avec qui j'ai partagé ce travail et toutes les étapes qui l'ont accompagné.*

*Enfin, à tous les enseignants et professeurs qui m'ont instruit depuis mes premiers pas à l'école jusqu'à ce jour.*

**AIT BELKACEM.S**

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents, dont aucun mot ne saurait exprimer l'immensité de mes sentiments pour leur patience infinie, leurs encouragements silencieux et leur soutien constant. Ce travail est un témoignage de mon profond respect et de ma reconnaissance pour leurs grands sacrifices.*

*Mes précieux amis, sans qui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.*

*Mon binôme SALIM, avec qui j'ai partagé ce travail et toutes les étapes qui l'ont accompagné.*

*Enfin, à tous les enseignants et professeurs qui m'ont instruit depuis mes premiers pas à l'école jusqu'à ce jour.*

**KACI.M**

## Liste des figures

Figure I-1:schéma représentatif du motif du polyéthylène. ....	3
Figure I-2:Schématisation d'une chaîne linéaire.....	5
Figure I-3:Schématisation d'un polymère ramifié. ....	5
Figure I-4:Schématisation d'un polymère réticulé.....	6
Figure I-5 :élastomère.....	7
Figure I-6 :polymère thermodurcissable.....	7
Figure I-7:polymère thermoplastique.....	8
FigureI-8: Polymères amorphes.....	8
FigureI-9 :Polymères semi-cristallins.....	9
Figure I-10 : schéma représentatif du motif du polyéthylène.....	12
Figure I-11: Schéma du processus de production des tubes polyéthylènes.....	16
Figure II-1:Schématisation des processus de vieillissement physique avec transfert de masse. .....	20
Figure II-2:Effet plastifiant des molécules d'eau sur un polymère. ....	21
Figure II-3:Promotion d'une molécule à l'état excité par l'absorption d'un photon. ....	25
Figure II-4:schématization de l'hydrolyse .....	26
Figure III-1:Tube de PEHD .....	34
Figure III-2: Une scie électrique .....	35
Figure III-3:fraiseuse .....	36
Figure III-4:forme des éprouvettes.....	36
Figure III-5:L'usinage avec le tour.....	37
Figure III-6:Dimensions d'éprouvettes.....	38
Figure III-7:éprouvettes en PEHD.....	38
Figure III-8:éprouvettes en PEHD dans un bain de chlore .....	39
Figure III-9:Etuve de types MEMMERT .....	41
Figure III-10:Machine de traction. ....	42
Figure III-11: Identification des différents régimes de comportement.....	43
Figure III-12:Machine de traction ZWICK/Z010 .....	45
Figure IV-1:Courbe contrainte-déformation des éprouvettes à l'état de livraison.....	46
Figure IV-2:Courbes de traction pour différents temps d'immersion .....	47
Figure IV-3:Evolution de la contrainte au seuil d'écoulement du PEHD .....	48

Figure IV-4:Evolution de la contrainte à la rupture du PEHD.....	48
Figure IV-5:Evolution de l'allongement à la rupture du PEHD .....	49
Figure IV-6:Influence de la température à 6 H de maintien au four .....	50
Figure IV-7: Influence de la température à 24 H de maintien au four .....	50
Figure IV-8:Influence du temps de maintien à la température 60°C.....	51
Figure IV-9:Influence du temps de maintien à la température 90°C.....	51
Figure IV-10:Dégradation combinée thermique et chimique sous chlore .....	52

## Liste des tableaux

Tableau I-1:Propriétés mécaniques des polyéthylènes à haute densité [8].....	13
Tableau I-2:Propriétés physique du PEHD [10] .....	13
Tableau I-3:Propriétés thermiques du polyéthylène à haute densité [10].....	14
Tableau I-4:Propriétés électriques du polyéthylène à haute densité [9]. .....	15
Tableau III-1:le nombre d'éprouvettes utilisées.....	39
Tableau III-2:le nombre d'éprouvettes utilisées sous chlore .....	40

# Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale .....	1
Chapitre I : Généralités sur les polymères et le PEHD en particulier	
I.1 Introduction :.....	3
I.2 Définition : .....	3
I.3 L'origine des polymères : .....	4
I.3.1 Les polymères naturels : .....	4
I.3.2 Les polymères artificiels (dérivés des polymères naturels) : .....	4
I.3.3 Les polymères synthétiques : .....	4
I.4 Structure des polymères (macromolécules) : .....	5
I.4.1 Polymères linéaires : .....	5
I.4.2 Polymères ramifiés : .....	5
I.4.3 Polymères réticulés (tridimensionnels) : .....	6
I.5 Classification des polymères : .....	6
I.5.1 les élastomères : .....	6
I.5.2 Les thermodurcissables : .....	7
I.5.3 Les thermoplastiques .....	7
I.5.4 Les polymères amorphes .....	8
I.5.5 Les polymères semi-cristallins.....	8
I.6 Procédés de fabrication des polymères.....	9
I.6.1 Polymérisation .....	9
I.6.2 Polycondensation .....	10
I.6.3 Polyaddition .....	10
I.7 Les propriétés des polymères .....	10
I.7.1 Propriétés chimiques .....	10
I.7.2 Propriétés physiques .....	10
I.7.3 Propriétés mécaniques .....	11
I.8 Généralités sur le PEHD .....	11
I.8.1 Introduction.....	11
I.9 Définition .....	11
I.10 Types de Polyéthylène.....	12
I.11 Polyéthylène à haute densité.....	12
I.12 Propriétés des polyéthylènes à haute densité .....	13

I.12.1	Les propriétés mécaniques.....	13
I.12.2	Les propriétés physiques .....	13
I.12.3	Les propriétés chimiques .....	14
I.12.4	Les propriétés thermiques.....	14
I.12.5	Les propriétés électriques .....	14
I.13	Mode d'obtention des polyéthylènes à haute densité .....	15
<b>Chapitre II Vieillessement thermique et chimique</b>		
II.1	Introduction.....	17
II.2	Principe du vieillissement des polymères.....	17
II.3	Vieillessement du PE .....	17
II.4	Types de vieillissement .....	17
II.4.1	Vieillessement physique.....	18
II.4.2	Vieillessement chimique .....	21
II.4.3	Vieillessement thermique des polymères.....	27
II.5	Mécanismes de dégradation du PE en contact avec le chlore.....	32
<b>chapitre III Matériaux d'étude et procédures expérimentales</b>		
III.1	Matériau d'étude .....	34
III.2	Préparation des éprouvettes .....	35
III.3	Vieillessement thermique de PEHD .....	40
III.4	L'essai de traction .....	41
<b>Chapitre IV Résultats expérimentaux et interprétation</b>		
IV.1	Caractérisation du comportement mécanique du PEHD à l'état vierge .....	46
IV.2	Comportement mécanique du PEHD vieilli sous chlore .....	47
IV.3	Vieillessement thermique du PEHD.....	49
Conclusion.....		53

# **Introduction Générale**

## *Introduction Générale*

---

L'utilisation des polymères dans les infrastructures de distribution d'eau potable s'est largement étendue au cours des dernières décennies, avec une place prépondérante occupée par le polyéthylène haute densité (PEHD). Ce matériau est privilégié pour la fabrication des conduites en raison de ses propriétés mécaniques, chimiques et économiques avantageuses. Il offre une bonne résistance à la corrosion, une grande flexibilité, ainsi qu'une longue durée de vie, en faisant un choix optimal pour les réseaux de distribution d'eau potable. Cependant, malgré ses nombreux avantages, le PEHD n'est pas à l'abri de phénomènes de vieillissement qui, à terme, peuvent compromettre sa performance, voire sa sécurité.

Le vieillissement des conduites en PEHD résulte principalement de deux types de dégradations : le vieillissement thermique et le vieillissement chimique. Le vieillissement thermique se produit lorsque les conduites sont exposées à des températures élevées au cours de leur utilisation ou lors d'épisodes de conditions extrêmes. Cette exposition prolongée à la chaleur provoque des modifications dans la structure chimique du polymère, telles que la rupture des chaînes moléculaires, l'oxydation ou la formation de microfissures, réduisant ainsi les performances mécaniques du matériau. Avec le temps, ces altérations peuvent conduire à une diminution de la résistance aux chocs et aux pressions, ce qui est particulièrement problématique dans des systèmes soumis à des variations de température.

Le vieillissement chimique, quant à lui, est principalement lié à la présence de produits chimiques dans l'eau potable, tels que le chlore. Ce dernier est couramment utilisé comme agent désinfectant pour garantir la qualité microbiologique de l'eau distribuée. Les effets combinés du chlore et de la température, souvent présents de manière simultanée dans les réseaux de distribution d'eau, peuvent ainsi réduire de manière significative la durée de vie des conduites.

Cette étude vise à étudier les mécanismes de dégradation des conduites en PEHD sous l'effet du chlore et de la température, en analysant leur impact sur la structure du polymère et en modélisant les processus de vieillissement.

Notre travail se structure en quatre chapitres :

**Le premier chapitre** traite des généralités sur les polymères, avec un focus particulier sur le polyéthylène haute densité (PEHD).

## *Introduction Générale*

---

**Le deuxième chapitre** est dédié au vieillissement thermique et chimique du PEHD en présence de chlore.

**Le troisième chapitre** présente le matériau étudié et les procédures expérimentales mises en œuvre.

Enfin, **le quatrième chapitre** est consacré aux résultats expérimentaux et à leur interprétation.

Nous concluons par une synthèse générale et des perspectives possibles pour des recherches futures.

**Chapitre I :**  
**Généralités sur les polymères**  
**et le PEHD en particulier**

## I.1 Introduction :

Les polymères ont émergé dans les années 1940, en raison de la nécessité de fabriquer divers matériaux pendant la guerre. Depuis lors, la science des polymères s'est développée de manière significative, offrant d'immenses possibilités créatives aux chimistes. Il est désormais possible de concevoir et de fabriquer sur mesure de nouvelles substances polymériques en caractérisant leur masse moléculaire et leur structure.

## I.2 Définition :

D'un point de vue structurel, les polymères sont des chaînes composées de motifs répétitifs appelés monomères. Ces monomères sont reliés entre eux par des liaisons covalentes. Il existe différents types de polymères ayant des structures variées, ce qui leur confère des propriétés distinctes [1]. Les polymères peuvent être d'origine naturelle ou synthétique (issus de gaz ou de pétrole) et se classent généralement en trois grandes familles :

1. Les thermoplastiques
2. Les thermodurcissables
3. Les élastomères

Un monomère est une molécule simple qui peut réagir avec d'autres monomères pour former un polymère. Il est principalement composé de carbone et d'hydrogène. Par exemple, l'éthylène est un monomère constitué de  $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ .

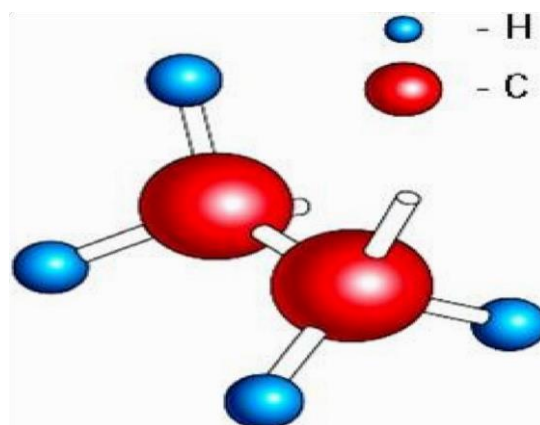


Figure I-1:schéma représentatif du motif du polyéthylène.

### **I.3 L'origine des polymères :**

#### **I.3.1 Les polymères naturels :**

Les polymères naturels sont des composés qui se trouvent dans la nature et qui sont produits par des organismes vivants. Ils peuvent être dérivés des plantes, des animaux ou même des minéraux. Ces polymères jouent un rôle essentiel dans les mécanismes vitaux des organismes et ont une importance économique significative. Par exemple, la cellulose, présente dans les parois cellulaires des plantes, est un polymère naturel largement utilisé dans l'industrie papetière et textile. [2] Exemples :

- Les polysaccharides (cellulose, amidon).
- Les protéines (la laine, la soie...), Le caoutchouc naturel.

#### **I.3.2 Les polymères artificiels (dérivés des polymères naturels) :**

Les polymères artificiels, quant à eux, sont obtenus par des modifications chimiques apportées aux polymères naturels. Ces modifications permettent de transformer certaines propriétés des polymères d'origine. Par exemple, la modification chimique de la cellulose peut donner naissance à des dérivés tels que la rayonne ou la viscose, qui sont utilisés dans l'industrie textile. [2] Exemples :

- les esters cellulosiques, (nitrocellulose, acétate de cellulose...etc.).
- Ebonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre).

#### **I.3.3 Les polymères synthétiques :**

Les polymères synthétiques sont entièrement fabriqués en laboratoire ou en industrie à partir de molécules monomères qui n'existent pas dans la nature. Les polymères synthétiques offrent une grande variété de propriétés et sont largement utilisés dans de nombreux domaines, tels que l'emballage, l'électronique, l'automobile et l'industrie médicale. Des exemples courants de polymères synthétiques comprennent le polyéthylène, le polystyrène et le polypropylène. [2].



### **I.4.3 Polymères réticulés (tridimensionnels) :**

Certaines molécules peuvent se lier entre elles, elles se nomment alors réticulées. Il s'agit d'un pontage entre les chaînes.

Le plus souvent, ces liaisons sont tridimensionnelles c'est-à-dire qu'elles se développent dans les trois directions de l'espace, donnant une structure en volume (parfois bidimensionnelles, ne se développant que dans un plan). Exemple : le caoutchouc.

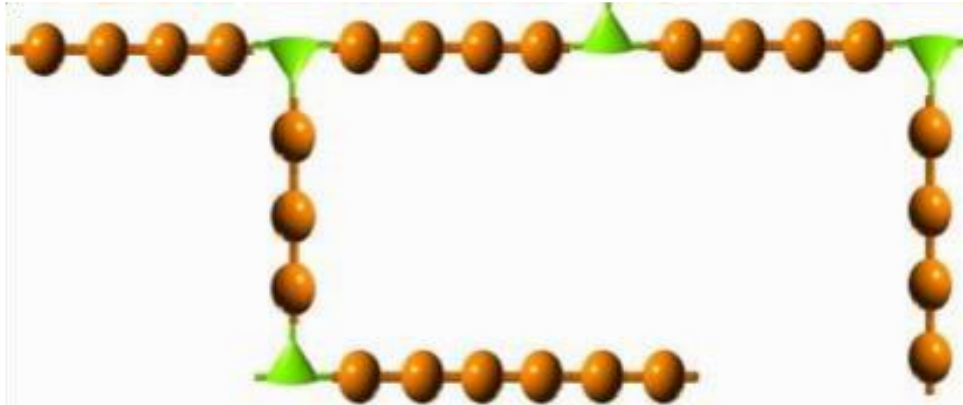


Figure I-4: Schématisation d'un polymère réticulé.

## **I.5 Classification des polymères :**

Les polymères sont divisés en trois classes :

- les élastomères
- les thermodurcissables.
- les thermoplastiques (qui peuvent être partiellement cristallisés).

### **I.5.1 les élastomères :**

Un élastomère est un polymère constitué de chaînes longues et flexibles qui possède l'impressionnante faculté de pouvoir supporter de très grandes déformations. Il se caractérise aussi par le quasi recouvrement de ses propriétés initiales quand la sollicitation cesse. La recouvrement est rendue possible par la vulcanisation qui est un processus de création de liaisons chimiques entre les chaînes macromoléculaires, celles-ci formant alors un réseau tridimensionnel stable. [3]

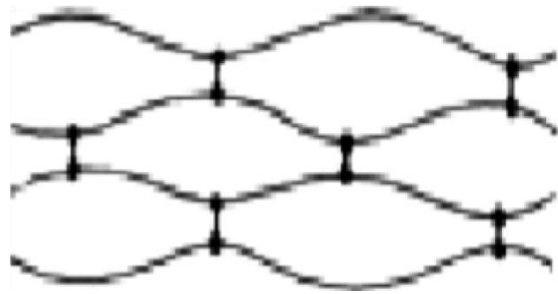


Figure I-5 :élastomère

### **I.5.2 Les thermodurcissables :**

Les résines thermodurcissables sont des matières plastiques qui, au cours de leur mise en œuvre subissent une transformation irréversible : d'un état généralement liquide ou pâteux, elles passent, par un traitement approprié (action de chaleur, ou d'un agent chimique durcisseur) à un état solide permanent .

Ce traitement s'appelle polymérisation ou réticulation (durcissement). [4] Exemple : résines phénol/formol ; bakélite, galalithe...



Figure I-6 ::polymère thermodurcissable.

### **I.5.3 Les thermoplastiques**

Dérivés des polymères linéaires ou légèrement ramifiés se ramollissent lorsqu'on les chauffe au-dessus d'une certaine température, mais qui redeviennent solide en dessous. Cette matière conserve de façon réversible sa thermo plasticité initiale. Exemple : PE, PVC, PP, PC, PMMA [5]

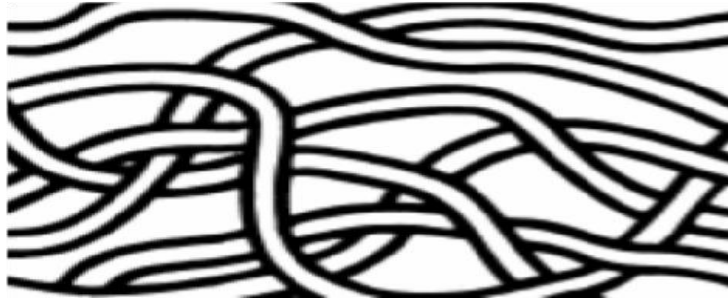


Figure I-7 : polymère thermoplastique.

### **I.5.4 Les polymères amorphes**

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituent ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est en théorie équivalente à un liquide sans ordre moléculaire à orientations macromoléculaires préférentielles

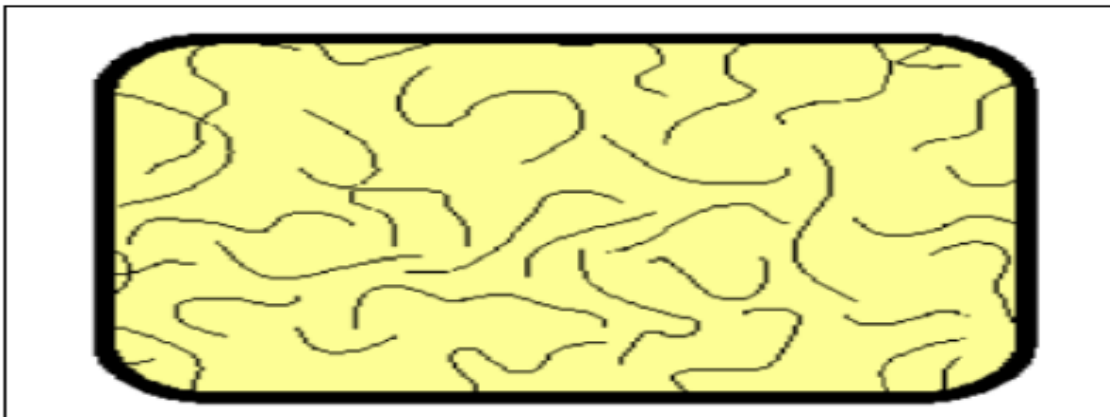


Figure I-8: Polymères amorphes [5]

### **I.5.5 Les polymères semi-cristallins**

Ils sont constitués de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe, et en conséquence la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes [5]

**Exemple :** La matière plastique des gobelets jetables est plus résistante à la déchirure dans la direction circonférentielle que dans la direction des génératrices, ce qui manifeste une anisotropie des propriétés mécaniques.



FigureI-9: Polymères semi-cristallins [1].

## **I.6 Procédés de fabrication des polymères**

Dans le domaine de la chimie des matières plastiques, les producteurs utilisent des monomères comme matériau de base pour fabriquer des polymères, tandis que les transformateurs exploiteront ces polymères pour créer des produits finis. La transformation du monomère en polymère peut se réaliser de différentes manières, notamment par polymérisation, polycondensation ou polyaddition. Ces processus revêtent une grande importance dans la fabrication de divers types de plastiques. [6]

### **I.6.1 Polymérisation**

La polymérisation consiste en la transformation de molécules de base identiques, réalisée rapidement et sans résidu. Ce processus se produit sous pression et température, initié par des radicaux ou des ions, ou encore par rayonnement, utilisant des catalyseurs adaptés ou une combinaison de ces facteurs. Le résultat est la formation d'un polymère se présentant sous la forme d'une longue chaîne dans laquelle le motif structural de la molécule de base se répète de nombreuses fois. En cas d'utilisation de monomères différents, cela conduirait à la formation d'un copolymère. [7].

### **I.6.2 Polycondensation**

La polycondensation est un processus qui débute par une réaction sans amorçage entre différentes molécules de base. Cette réaction est plus lente que les processus de polymérisation précédents et produit généralement un résidu, tel que de l'eau. Le produit résultant est un polycondensat qui se présente sous la forme d'un réseau linéaire ou tridimensionnel. Dans ce réseau, le motif structurel de la molécule est répété seulement quelques centaines de fois, ce qui donne une macromolécule de taille plus réduite par rapport à celle obtenue par polymérisation. [8]

### **I.6.3 Polyaddition**

La polyaddition est un processus de réaction amorcé dans lequel les molécules monomères sont ajoutées successivement à une molécule initiatrice, sans générer de résidu. Au cours de cette réaction, les monomères s'ajoutent les uns aux autres pour former une macromolécule de taille plus importante que celle des monomères individuels. Cela résulte en une structure polymérique où les motifs structurels des monomères sont répétés de manière séquentielle. Ainsi, la polyaddition permet de former une macromolécule plus grande grâce à l'addition cumulative de monomères sur une molécule initiatrice. [8]

## **I.7 Les propriétés des polymères**

### **I.7.1 Propriétés chimiques**

Les propriétés chimiques d'un polymère dépendent principalement de sa composition chimique et de sa capacité à interagir avec des agents extérieurs. Les réactions chimiques peuvent altérer les liaisons chimiques du matériau, soit par l'action de produits chimiques, soit par des attaques chimiques à haute température, comme lors d'un incendie. Certains solvants utilisés peuvent également agir comme agents d'attaque chimique, pouvant dégrader les liaisons chimiques des polymères, surtout à des températures élevées.

### **I.7.2 Propriétés physiques**

Lorsqu'on considère l'utilisation des polymères, on distingue généralement deux types : les polymères techniques et les polymères à usage structural.

-Les polymères techniques sont souvent produits en petites quantités pour leurs propriétés optiques, électroniques, physico-chimiques, pharmaceutiques, etc.

-Les polymères à usage structural sont formulés pour adapter leurs propriétés mécaniques à une utilisation spécifique, en mettant l'accent sur la rigidité et l'amortissement. Par exemple, dans le cas des polymères transparents, des propriétés optiques élevées et une résistance accrue à la fragilité sont recherchées simultanément.

### **I.7.3 Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques des polymères décrivent leur comportement face aux sollicitations mécaniques telles que la pression, l'étirement, la torsion, le frottement, les chocs et les effets de la pesanteur. Ces propriétés déterminent si la structure et la forme du polymère restent stables dans le temps, même lorsqu'il est soumis à des contraintes. Certains polymères sont appréciés pour leur stabilité dimensionnelle, tandis que d'autres, comme les élastomères, sont recherchés pour leur élasticité et leur capacité d'absorption des chocs. Les polymères sont omniprésents dans tous les aspects de notre vie quotidienne.

## **I.8 Généralités sur le PEHD**

### **I.8.1 Introduction**

La première réussite dans l'obtention d'un polyéthylène solide par polymérisation directe de l'éthylène sous haute pression date de 1963. Jusqu'à présent, la majorité de la production industrielle de polyéthylène utilise encore ce procédé. Ultérieurement, de nouveaux procédés ont été découverts, permettant la polymérisation sous basse pression en utilisant des catalyseurs d'un type nouveau

En 2008, la quantité produite de plastiques synthétiques a été de 245 millions de tonnes. Le polyéthylène à lui seul représente un quart de cette production en raison de son faible coût de fabrication et de ses bonnes propriétés physiques et mécaniques. De plus ce polymère permet une mise en forme généralement aisée telle que l'extrusion ou l'injection. Il possède également d'excellentes propriétés d'isolation électrique et de résistance aux chocs et présente une grande inertie chimique et biologique (contact alimentaire).[7]

## **I.9 Définition**

Le polyéthylène, également appelé polythène, est l'un des polymères les plus simples et les moins coûteux. Il s'agit d'un plastique inerte, se présentant sous forme de granulés. Son nom provient de sa formation par polymérisation des monomères d'éthylène gazeux. Lors de sa combustion, le polyéthylène ne produit pas de produits toxiques [7].

Le polyéthylène est essentiellement un hydrocarbure, composé de chaînes d'atomes de carbone saturés par des atomes d'hydrogène. Le procédé de pression primitive donne du polyéthylène à chaînes ramifiées, tandis que le procédé basse pression produit du polyéthylène à structure essentiellement linéaire, avec peu de ramifications. Le degré de ramification influence la compacité des molécules. Les chaînes ramifiées conduisent à une capacité différente de celles qui sont non ramifiées. Par conséquent, le polyéthylène ramifié a une densité faible ou moyenne, tandis que le polyéthylène linéaire présente une densité élevée. Le terme "polyéthylène" est utilisé de manière générique pour décrire les polyoléfines obtenues par la polymérisation de l'éthylène. Ce sont les polymères les plus couramment utilisés, notamment dans la fabrication de sacs en plastique, de bouteilles d'emballage et de certains jouets.

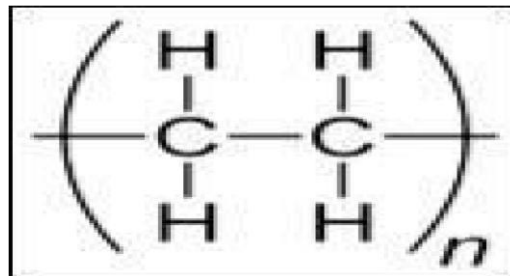


Figure I-10 : schéma représentatif du motif du polyéthylène.

### **I.10 Types de Polyéthylène**

Il existe de nombreux types de polyéthylène et principalement trois grandes familles qui définissent en fonction de leur masse volumique :

- Polyéthylène basse densité ou PEBD.
- Polyéthylène haute densité ou PEHD.
- Polyéthylène moyenne densité ou PEMD.

### **I.11 Polyéthylène à haute densité**

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un thermoplastique de couleur blanche, plus rigide et moins translucide que le polyéthylène basse densité (PEBD). Sa structure moléculaire est principalement linéaire, avec peu de ramifications, ce qui lui confère sa rigidité.

## I.12 Propriétés des polyéthylènes à haute densité

### I.12.1 Les propriétés mécaniques

A 23°C les polyéthylènes à haute densité sont au-dessus de leur température de transition vitreuse ( $T_v = -100^\circ\text{C}$ ), leur phase amorphe est caoutchoutique, et ceci est sensible au niveau des propriétés mécaniques.

. On résume les différentes caractéristiques de ce matériau dans le tableau.[8].

Tableau I-1 :Propriétés mécaniques des polyéthylènes à haute densité [8]

Propriétés	unités	PEHD
Masse volumique	$\text{g/cm}^3$	$\geq 0,955$
Indice de fluidité (190°C)	$\text{g/10min}$	0,3-18
Contrainte au seuil d'écoulement (traction)	MPa	25-30
Résistance à la rupture	MPa	30-35
Allongement rupture	%	500-1100
Module d'élasticité en traction	MPa	800-1100

### I.12.2 Les propriétés physiques

Les polyéthylènes à haute densité sont opaques en forte épaisseur et transparents en films. L'augmentation de la cristallinité se traduit par une diminution de la stabilité et de la diffusivité (donc de la perméabilité) des diffusants car leur transport ne peut s'effectuer dans la phase amorphe [10] .

Tableau I-2:Propriétés physique du PEHD [10]

Transmission lumineuse	Masse volumique $\text{g/cm}^3$	Absorption d'eau %	Taux de cristallinité %
Mauvaise	0,95	0,01	70 à 80

### I.12.3 Les propriétés chimiques

Les polyéthylènes à haute densité possèdent une grande stabilité chimique, à des températures inférieures à 60°C, ils sont pratiquement insolubles, ils ne sont attaqués ni par les acides (sauf oxydants), ni par les bases, ni par les solutions de sel. Ils sont insolubles dans l'eau, mais ils sont sensibles à l'état naturel à l'action des ultraviolets en présence d'oxygène; pour cela, ils sont chargés de poudres de carbone, 2 à 3% ou de stabilisantes lumières. Ils sont sensibles au feu et à la fissuration sous contrainte en présence de savon, alcool...etc. [8]

### I.13 Les propriétés thermiques

En absence de contraintes, le polyéthylène à haute densité peut supporter une température de 110°C à 120°C (stérilisation par exemple), mais cette température décroît avec la charge  $\leq 100^\circ\text{C}$  ; augmente avec le taux de réticulation. Le passage de la température de transition vitreuse est d'autant moins sensible que le polyéthylène à haute densité est plus cristallin. [10].

Tableau I-3: Propriétés thermiques du polyéthylène à haute densité [10]

Coefficient de dilatation $10^{-5} / ^\circ\text{C}$	Conductivité $10^{-4} \text{ cal/s.cm}$	Chaleur Spécifique $\text{Cal/g. } ^\circ\text{C}$	Fléchissement Sous charge 0,186h	Chaud Continu $^\circ\text{C}$	Comportement Au froid
11 à 13	11 à 12	0,55	42 à 54	120°C	bon

#### I.13.1 Les propriétés électriques

Les polyéthylènes à haute densité sont d'excellents isolants électriques pour des conditions varie d'ambiance, ceci explique leur tendance à être électrostatiques. Ils ont une résistivité très élevée et une rigidité électrique élevée. Le faible facteur de perte diélectrique interdira le soudage haute fréquence. [9].

Tableau I-4: Propriétés électriques du polyéthylène à haute densité [9].

Résistivité $\Omega \cdot \text{Cm}$	Rigidité diélectrique KV/mm	Constante Diélectrique $10^{16}$ HZ	Facteur de perte $10^{16}$ HZ	Résistivité à l'arc
$10^8$	18 à 24	2,3	3 à 5	190

#### **I.14 Mode d'obtention des polyéthylènes à haute densité**

La matière première utilisée pour les tubes en polyéthylène est généralement constituée de granulés noirs, mais également colorés pour indiquer l'application spécifique du tube, par exemple, le bleu pour l'eau potable et le jaune pour le gaz naturel. Ces granulés sont aspirés et stockés dans une trémie. [9]

Le processus de fabrication des tubes en polyéthylène implique l'extrusion. Les granulés sont chauffés à 230°C dans une extrudeuse équipée d'un système de résistance et de vis. Ils sont transformés en une pâte qui est poussée à travers un outillage de forme. Une filière est utilisée pour donner au tube le diamètre et l'épaisseur souhaités, tandis qu'une co-extrudeuse ajoute des liserés de couleur bleue pour les tubes destinés au transport de l'eau potable.

Le tube extrudé passe ensuite par un calibreur et un bac de refroidissement pour être refroidi. Après refroidissement, le tube est marqué et coupé à la longueur désirée à l'aide d'une scie. Une tireuse assure le déplacement du tube le long de la chaîne de production, tandis qu'un enrouleur est utilisé pour les petits diamètres afin d'enrouler les tubes en couronne. [8].

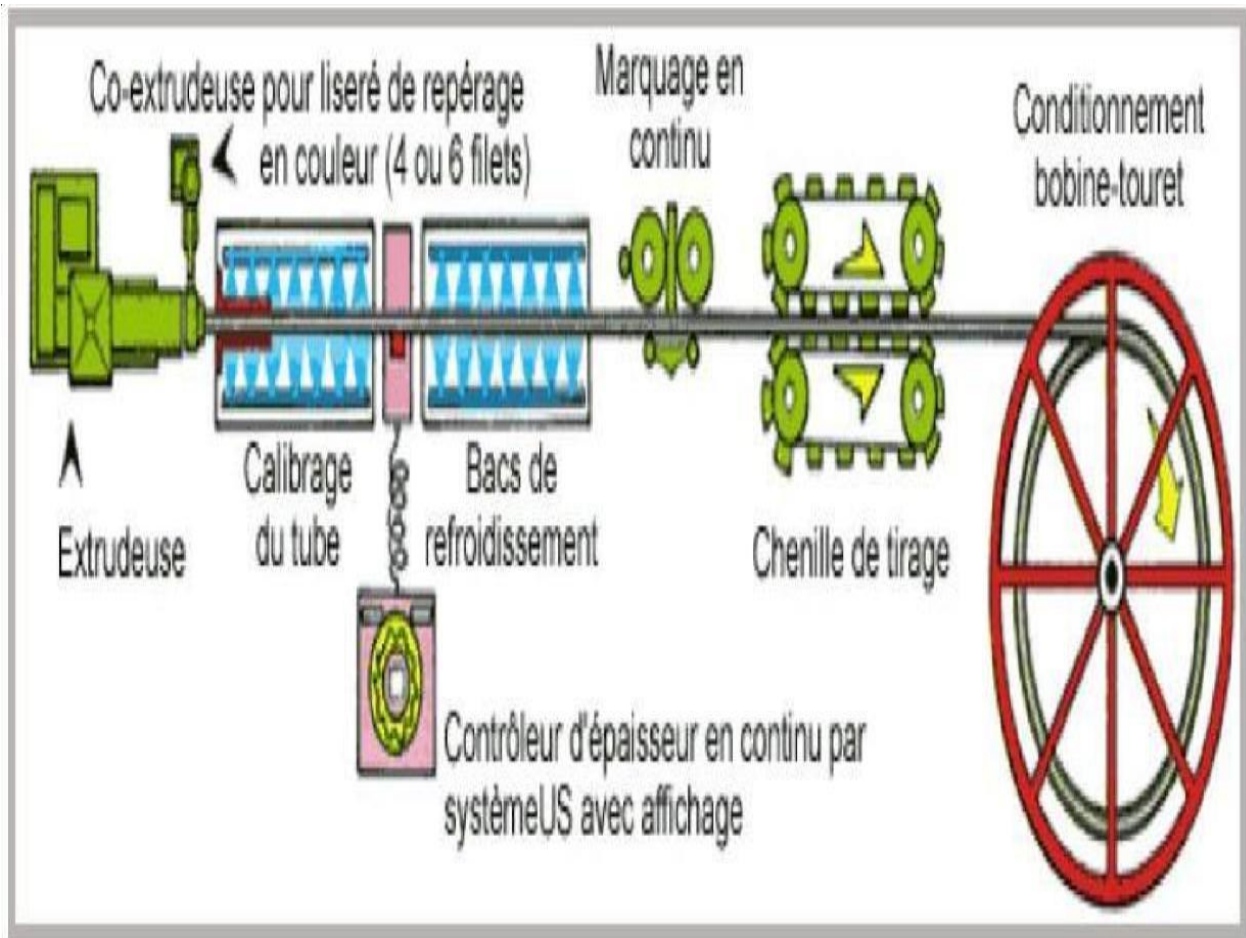


Figure I-11: Schéma du processus de production des tubes polyéthylènes [9].

# **Vieillissement chimique et thermique PEHD**

## **II.1 Introduction**

Les polymères sont des matériaux extrêmement polyvalents, présents dans de nombreux aspects de notre vie quotidienne. Leurs caractéristiques intrinsèques leur confèrent la capacité de se présenter sous diverses formes et d'être utilisés dans une multitude d'applications. Néanmoins, leur dérivabilité plus ou moins importante lors de leur mise en forme et/ou pendant leur cycle de vie est un facteur important à considérer [11].

## **II.2 Principe du vieillissement des polymères**

Le vieillissement des polymères correspond à une transformation progressive et irréversible d'une ou de plusieurs propriétés du matériau à partir d'un point de référence, généralement situé à la fin du cycle de fabrication [12]. Ce processus se manifeste par une détérioration des propriétés fonctionnelles, souvent caractérisée par une diminution des propriétés initiales (comme le poids moléculaire, la structure moléculaire et la résistance à la traction) et/ou une fragmentation[13,14]. La dégradation, influencée par les conditions environnementales, se déroule en une ou plusieurs étapes et peut résulter de modifications de la structure des macromolécules responsables de la cohésion mécanique, de la composition ou de la morphologie du polymère.

## **II.3 Vieillessement du PE**

Le vieillissement des thermoplastiques, comme le polyéthylène (PE), se traduit par une dégradation souvent irréversible de leurs propriétés physiques, chimiques ou mécaniques. Cette dégradation introduit la notion de « durée de vie » du matériau, définie comme le temps nécessaire pour qu'une propriété atteigne un seuil critique en dessous duquel le matériau ne répond plus aux attentes. Les mécanismes de dégradation des polymères se divisent en deux grandes catégories : les vieillissements physiques et chimiques [15].

## **II.4 Types de vieillissement**

Les processus de dégradation des polymères peuvent être divisés en deux principales catégories :

- Le vieillissement physique et le vieillissement chimique.

### **II.4.1 Vieillessement physique**

Le vieillissement physique désigne tout phénomène de vieillissement qui ne comporte pas de modification chimique des macromolécules ou des additifs. Il existe deux types de vieillissement physique : ceux avec transfert de masse et ceux sans transfert de masse.

Dans les vieillissements physiques avec transfert de masse, le matériau absorbe ou libère de la matière, comme dans le cas de la pénétration de solvants ou de la migration d'adjuvants. En revanche, les vieillissements physiques sans transfert de masse ne présentent pas de tels échanges. Cela inclut notamment les vieillissements dus à des contraintes mécaniques et les phénomènes de relaxation. Le vieillissement physique provoqué par une sollicitation mécanique sera traité ultérieurement [16].

#### **II.4.1.1 Vieillessement physique Avec transfert de masse**

Le vieillissement physique des matériaux peut s'accompagner de transferts de masse, qui se traduisent par deux types de phénomènes principaux :

1. Migration de composés externes vers le matériau : Le matériau absorbe des molécules présentes dans son environnement, telles que des gaz ou des liquides. Ce phénomène, appelé absorption de solvants, peut modifier les propriétés physiques et mécaniques du matériau.
2. Migration de composants internes hors du matériau : Des petites molécules initialement présentes dans le matériau, comme des additifs, s'échappent par évaporation, diffusion ou migration. Ce phénomène, appelé perte d'adjuvants, peut fragiliser la structure du matériau et altérer ses propriétés.

#### **➤ Vieillessement par absorption de solvants**

La présence de substances de faible masse moléculaire (vapeurs ou liquides) dans l'environnement d'un polymère peut entraîner une pénétration de ces substances dans la structure du matériau, un phénomène appelé vieillissement par absorption de solvants. Ce phénomène est particulièrement problématique pour les matériaux non totalement hydrophobes, car l'eau, le solvant le plus répandu, peut facilement s'infiltrer dans ces matériaux [17].

- **Diffusion du solvant** : Les molécules du solvant se déplacent à travers le polymère par un processus appelé diffusion. Ce processus est influencé par la différence de

concentration en solvant entre l'intérieur et l'extérieur du polymère, ainsi que par la perméabilité du matériau.

- **Gonflement du polymère :** Au fur et à mesure que le solvant s'infiltré dans le polymère, la structure du matériau se dilate, ce qui peut entraîner un changement de volume et de forme. Ce gonflement peut affecter les propriétés physiques et mécaniques du polymère, telles que sa résistance, sa dureté et sa flexibilité.
- **Dégradation du polymère :** Dans certains cas, l'absorption de solvants peut entraîner une dégradation du polymère. Cela peut se produire par clivage des chaînes polymères ou par d'autres réactions chimiques. La dégradation du polymère peut entraîner une perte de résistance, une fragilisation du matériau et une diminution de sa durée de vi
- **Impact du vieillissement par absorption de solvants**

Le vieillissement par absorption de solvants peut avoir un impact négatif important sur les performances et la durabilité des matériaux polymères. Il peut entraîner :

- Une diminution des propriétés physiques et mécaniques
- Une fragilisation du matériau
- Une perte de performance
- Une réduction de la durée de vie

Prévention du vieillissement par absorption de solvants :

Il existe plusieurs stratégies pour prévenir le vieillissement par absorption de solvants, notamment :

- Choisir des matériaux polymères moins perméables aux solvants
- Protéger les matériaux polymères d'une exposition prolongée aux solvants
- Utiliser des revêtements ou des barrières pour empêcher la pénétration des solvants
- Modifier la formulation du polymère pour le rendre plus résistant à l'absorption de solvants.

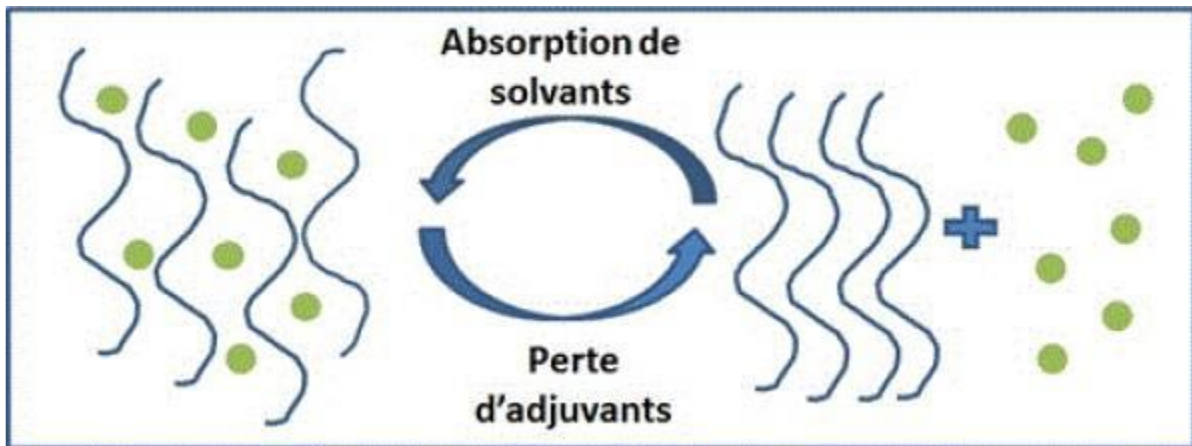


Figure II-1: Schématisation des processus de vieillissement physique avec transfert de masse.

#### II.4.1.2 Vieillessement physique sans transfert de masse

##### ➤ Vieillessement par relaxation de volume et d'enthalpie

Le vieillissement des polymères à l'état vitreux implique des changements dans le volume et l'enthalpie du matériau, qui sont deux manifestations différentes mais interconnectées de la réorganisation du réseau macromoléculaire. Ce phénomène découle de l'instabilité inhérente des matériaux amorphes en dessous de leur température de transition vitreuse.[17]

Dans les polymères semi-cristallins, comme le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), certains segments stéréo réguliers, initialement piégés dans la phase amorphe, commencent à migrer et à s'intégrer progressivement dans les zones cristallines. Cette migration conduit à une réduction de la cristallinité du matériau au fil du temps [18].

##### ➤ Vieillessement physique des polymères par absorption d'eau [31]

Les polymères peuvent subir un vieillissement physique lorsqu'ils sont exposés à un environnement humide. Les effets de l'eau sur les polymères peuvent se manifester de différentes manières, et sont souvent complexes et de long terme :

- **Effets physiques** : L'eau peut diffuser dans le matériau polymère, principalement dans les polymères hydrophiles. Cette diffusion peut provoquer des modifications de la structure macromoléculaire, telles que la plastification, où l'eau agit comme un plastifiant, augmentant la flexibilité et réduisant la rigidité du polymère. Le gonflement

du matériau est une autre conséquence de l'absorption d'eau, qui peut induire des contraintes internes et des déformations.

- **Effets chimiques :** L'hydrolyse est un processus chimique où l'eau réagit avec les liaisons chimiques dans le polymère, entraînant la rupture de ces liaisons et la dégradation des chaînes macromoléculaires. Cela peut réduire la masse moléculaire moyenne du polymère et altérer ses propriétés mécaniques et chimiques. L'hydrolyse est particulièrement significative dans les polymères contenant des groupes fonctionnels sensibles à l'eau, comme les esters ou les amides.

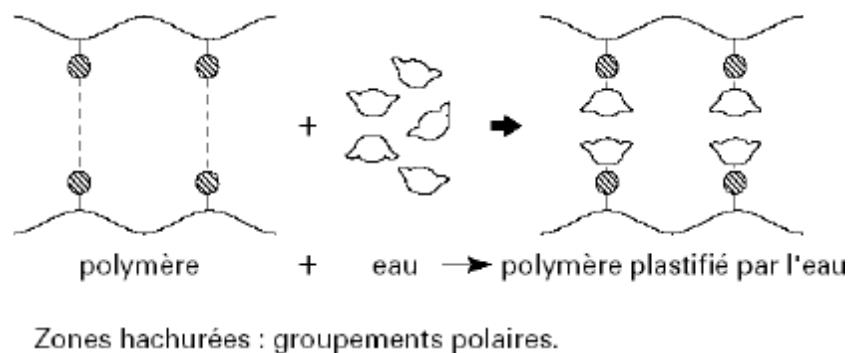


Figure II-2: Effet plastifiant des molécules d'eau sur un polymère.

#### II.4.2 Vieillessement chimique

Le vieillissement chimique d'un polymère se définit par la modification de la structure chimique des macromolécules du polymère sous l'effet de l'environnement. Ce processus résulte de diverses interactions avec des facteurs externes. En pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent au vieillissement physique, et les deux phénomènes peuvent interagir de manière complexe.

Les différents types de vieillissement chimique peuvent être classifiés en fonction des paramètres environnementaux responsables de la dégradation

- **Température (vieillessement thermique) :** La température influence la cinétique des réactions chimiques dégradant les polymères.

- **Rayonnements (vieillessement photochimique et radiochimique) :** Les rayonnements ultraviolets, ionisants ou autres peuvent provoquer des changements chimiques dans les polymères.
- **Agents réactifs (vieillessement chimique en milieu réactif) :** Les polymères peuvent réagir avec divers agents chimiques présents dans leur environnement.
- **-Organismes vivants (vieillessement biochimique) :** Les micro-organismes peuvent provoquer des modifications chimiques dans les polymères.

### **II.4.2.1 Vieillessement thermochimique des polymères**

Le vieillessement thermochimique concerne les modifications chimiques des polymères sous l'effet de la chaleur, que ce soit en atmosphère inerte ou en présence d'air. Ce type de vieillessement est fortement influencé par la température, qui accélère les réactions chimiques. Ce phénomène est pertinent pour les polymères exposés à des conditions de chaleur prolongée, où les chaînes polymériques peuvent se dégrader.

### **II.4.2.2 Vieillessement thermo-oxydant**

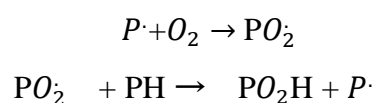
La thermo-oxydation est un processus de dégradation chimique des polymères induit par la chaleur en présence d'oxygène. Ce mécanisme est principalement une réaction en chaîne, amorcée par la chaleur, où l'oxygène joue un rôle crucial.

Le mécanisme de la thermo-oxydation des polymères peut être décrit par un schéma standard en trois étapes [15] :

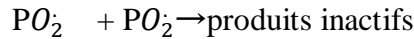
- **Amorçage :** L'amorçage se produit lorsque la chaleur provoque la formation de radicaux libres à partir du polymère ou de ses impuretés :

polymère ou impureté  $\rightarrow P\cdot$  (radicaux) .

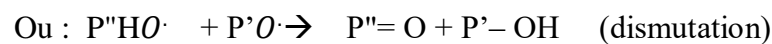
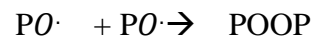
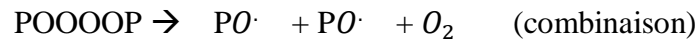
- **Propagation :** Les radicaux libres réagissent avec le polymère (P), formant de nouveaux radicaux et poursuivant ainsi la chaîne de réactions :



**Terminaison :** Les radicaux peuvent réagir entre eux pour former des produits inactifs. Divers mécanismes de terminaison sont possibles, tels que :



Divers mécanismes de terminaison sont possibles :



Les produits typiquement formés par ce processus comprennent des hydro peroxydes (PO<sub>2</sub>H), des peroxydes (PO<sub>2</sub>P), des cétones ou des aldéhydes (P=O) et des alcools (POH) Ces produits de dégradation affectent les propriétés du polymère, souvent réduisant sa résistance mécanique et sa durabilité.[16].

### **II.4.2.3 Vieillessement photo-oxydation [16]**

Le vieillissement par photo-oxydation est un phénomène de dégradation des polymères qui résulte de l'action combinée des rayons ultraviolets (UV) et de l'oxygène. Ce processus appartient à la catégorie des vieillissements chimiques, particulièrement liés aux mécanismes d'oxydation. Contrairement au vieillissement physique, la photo-oxydation induit des modifications chimiques dans les chaînes macromoléculaires des polymères, affectant principalement la surface des échantillons. L'étendue de la dégradation en profondeur dépend de la capacité du matériau à absorber la lumière UV, et cette capacité d'absorption est un facteur déterminant. Par conséquent, la diffusion de l'oxygène à l'intérieur du matériau limite ce processus de dégradation.

L'étape initiale de la photo-dégradation implique l'absorption d'énergie lumineuse dans les gammes UV ou visible. Cette absorption est due à la présence de chromophores dans le matériau, qui peuvent être des impuretés, des défauts structurels, ou des produits d'oxydation antérieurs. Lorsqu'une molécule de polymère absorbe cette énergie lumineuse, elle atteint un état excité en un laps de temps très court. L'énergie potentielle de cet état excité peut être extrêmement élevée, atteignant environ 400 kJ/mol. Cette haute énergie permet à la photo-

oxydation de provoquer des réactions chimiques qui ne se produiraient pas dans des conditions de thermo-oxydation.

Le processus de photo-oxydation commence dès que la radiation lumineuse parvient à exciter les molécules du polymère. L'état excité des molécules initié par l'absorption de lumière permet des réactions chimiques variées et souvent plus rapides comparées à celles induites uniquement par la chaleur et l'oxygène.

Voici une explication détaillée des différentes étapes et mécanismes impliqués dans la photo-oxydation :

1. **Absorption d'énergie lumineuse :** La première étape consiste en l'absorption de photons UV ou visibles par les chromophores présents dans le polymère. Cette absorption élève les molécules à un état excité.
2. **Formation d'états excités :** Les molécules excitées peuvent alors transférer leur énergie à d'autres parties de la chaîne polymérique ou générer des radicaux libres. Ces états excités sont très réactifs et peuvent interagir avec l'oxygène.
3. **Réactions avec l'oxygène :** Les radicaux libres ou les molécules excitées réagissent avec l'oxygène présent dans l'environnement, initiant une série de réactions en chaîne. Ces réactions comprennent l'oxydation des segments polymériques, formant divers produits de dégradation comme les peroxydes, les cétones, et les alcools.
4. **Propagation de la dégradation :** Les produits de dégradation et les radicaux formés peuvent continuer à réagir avec d'autres segments du polymère ou avec l'oxygène, propageant ainsi la dégradation sur toute la surface exposée et parfois pénétrant plus profondément si le matériau permet une diffusion suffisante de l'oxygène.
5. **Formation de produits de dégradation :** Les produits finaux de la photo-oxydation incluent une variété de composés oxydés, tels que les hydro peroxydes, les peroxydes, les cétones, les aldéhydes et les alcools. Ces produits affectent la stabilité mécanique et chimique du polymère.

En conclusion, la photo-oxydation des polymères est un processus complexe influencé par l'absorption d'énergie lumineuse et la diffusion de l'oxygène. Il engendre des modifications chimiques significatives, réduisant la durabilité et l'intégrité des matériaux polymériques, surtout dans les applications exposées à la lumière solaire et à des environnements oxygénés.

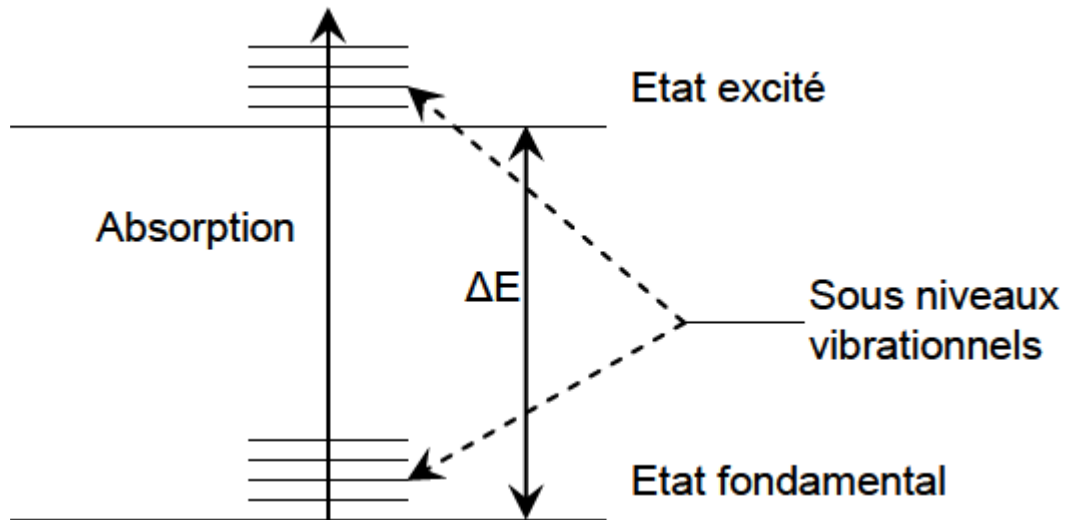


Figure II-3:Promotion d'une molécule à l'état excité par l'absorption d'un photon.

#### II.4.2.4 Vieillessement par hydrolyse

Dans certains cas, un polymère ne se limite pas à absorber des molécules d'eau ; il réagit également avec elles, conduisant à des modifications chimiques significatives. L'un des exemples les plus courants et importants de ce phénomène est la scission aléatoire des chaînes macromoléculaires. Cette scission entraîne une diminution de la masse moléculaire du polymère et une perte de ses propriétés mécaniques, ce qui rend ce processus crucial pour le vieillissement des matériaux polymères.[16]

L'hydrolyse, le processus par lequel les polymères réagissent avec l'eau, peut être représentée schématiquement de la manière suivante :

- **Schéma de l'hydrolyse**

- 1. Absorption de l'eau :** Les molécules d'eau pénètrent dans le polymère par diffusion.
- 2. Réaction chimique :** Les molécules d'eau réagissent avec les liaisons chimiques du polymère, provoquant la rupture des chaînes macromoléculaires.

**3. Formation de produits de dégradation :** Les produits de cette réaction sont des fragments de polymère de plus petite taille, souvent accompagnés de groupes fonctionnels tels que des acides ou des alcools.

Les effets de l'hydrolyse se combinent avec ceux de l'interaction physique entre le polymère et l'eau, amplifiant ainsi la dégradation du matériau. Voici les principales caractéristiques des phénomènes d'hydrolyse :

- **Lenteur à température ambiante :** À température ambiante, les réactions d'hydrolyse sont généralement très lentes. La vitesse intrinsèque de la réaction chimique est faible, et le processus est souvent contrôlé par la lente diffusion de l'eau dans le matériau. Par conséquent, les effets de l'hydrolyse apparaissent sur une période prolongée, souvent sur plusieurs mois ou années.
- **Réaction activée thermiquement :** L'hydrolyse est une réaction qui s'accélère considérablement à des températures élevées. Aux températures utilisées pour le traitement des polymères, l'hydrolyse peut devenir très rapide. C'est pourquoi il est crucial de sécher soigneusement les poudres et granulés de polymère avant leur mise en œuvre pour éviter une dégradation prématurée.
- **Catalyse par divers agents chimiques :** L'hydrolyse peut être catalysée par divers agents chimiques, tels que les ions H<sup>+</sup> (acides) ou les métaux de transition. La présence de ces catalyseurs peut augmenter considérablement la vitesse de la réaction. Par conséquent, la composition chimique de l'environnement dans lequel se trouve le polymère joue un rôle essentiel dans son vieillissement par hydrolyse.

L'hydrolyse peut être schématisée comme suit :



Figure II-4:schématization de l'hydrolyse

### **II.4.3 Vieillessement thermique des polymères**

Le vieillissement thermique des polymères peut résulter de phénomènes physiques ou chimiques :

1. Phénomènes physiques :

- -Dégazage : Libération de gaz internes au polymère.
- Migration de plastifiants : Déplacement de plastifiants à travers le polymère.
- Évolution de la morphologie : Changements dans la structure physique du polymère.

2. Phénomènes chimiques :

- Oxydation : Interaction avec l'oxygène atmosphérique, affectant la structure chimique du polymère et/ou ses additifs. Les incompatibilités d'adjuvants peuvent également jouer un rôle [18,19]

#### **II.4.3.1 Vieillessement physique lié au vieillissement thermique**

Le vieillissement thermique est souvent accompagné de changements physiques dans le polymère, tels que [20]:

- 1. Modification de la configuration spatiale macromoléculaire** : Les chaînes polymériques peuvent adopter de nouvelles configurations spatiales.
- 2. Pénétration de solvants et migration d'adjuvants** : Des solvants peuvent pénétrer le polymère, et les adjuvants peuvent migrer à l'intérieur du matériau.
- 3. Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif** : Des contraintes mécaniques en présence de tensioactifs peuvent provoquer des fissurations.

#### **➤ Modification de la morphologie**

Le vieillissement physique interne des polymères résulte de causes intrinsèques au matériau, telles que la mobilité moléculaire. Après la mise en œuvre, le matériau se trouve souvent dans un état thermodynamiquement instable et évolue lentement vers un état plus stable. Ce processus est accéléré par des températures élevées et retardé par des conditions thermiques favorables en fin de mise en œuvre [20].

**1. Augmentation de la compacité :** Le réseau macromoléculaire devient plus compact, réduisant le volume libre disponible pour les mouvements des segments de macromolécules.

**2. Effets physiques mesurables :**

- Augmentation de la masse volumique.
- Diminution du coefficient de dilatation.
- Réduction du facteur de pertes diélectriques. [20].

➤ **Chocs thermiques :**

Lorsque des variations brusques de température surviennent dans un matériau organique, un gradient de température se développe à travers l'épaisseur du matériau. Cela entraîne une dilatation différentielle entre les zones superficielles et internes, pouvant provoquer des ruptures mécaniques [21] .

➤ **Phénomènes de transport :**

Les phénomènes de transfert de masse dans les polymères sont principalement régis par les notions de solubilité, de diffusion et de plastification. La solubilité des petites molécules dans le polymère dépend du nombre de sites sur les macromolécules capables d'interagir avec ces molécules, ces interactions étant essentiellement déterminées par la polarité électrique des groupes en présence. Ainsi, les polymères peu polaires montrent peu ou pas d'affinité avec la plupart des solvants . Selon la direction du transfert de masse, on peut observer soit une pénétration de solvants dans le matériau, soit une perte d'adjuvants vers l'environnement [22].

➤ **Pénétration de solvants :**

Lorsqu'un polymère entre en contact avec une espèce de faible masse moléculaire (comme une vapeur ou un liquide) ayant une solubilité non nulle dans le polymère, cette espèce peut pénétrer le matériau. L'eau est le solvant le plus courant et peut poser des problèmes significatifs car les matériaux polymères ne sont pas totalement hydrophobes [23] . La pénétration du solvant suit généralement une loi de diffusion qui peut varier en fonction du cas étudié. Deux scénarios principaux se présentent :

- 1. Sans modification structurelle :** La concentration de solvant atteint une limite de saturation qui dépend de la pression partielle du solvant dans l'atmosphère environnante.
- 2. Avec modification structurelle:** Le solvant induit une modification de la structure ou de la morphologie du polymère, telle qu'une fissuration due à un gonflement différentiel, entraînant une variation continue de la concentration en solvant.

**Les facteurs influençant la pénétration du solvant incluent**

- La structure chimique du motif structural élémentaire, déterminant l'affinité du polymère pour le solvant.
- La morphologie du polymère, où les zones cristallines agissent comme des barrières à la pénétration du solvant.
- Le taux de réticulation, avec une pénétration plus facile dans les polymères faiblement réticulés, conduisant à une plastification et à une modification des propriétés mécaniques du matériau. Par exemple, 1% d'eau peut diminuer la température de transition vitreuse de 10 à 20°C, provoquant un ramollissement du polymère.

**➤ Perte d'adjuvants :**

Les polymères contiennent souvent des substances organiques de faible masse moléculaire. Sous l'effet de la température, ces substances peuvent migrer hors du matériau. La perte de plastifiants par migration peut concerner des quantités significatives, affectant les propriétés mécaniques du matériau comme l'allongement à la rupture et la température de transition vitreuse. La perte de stabilisants réduit également la stabilité chimique du matériau. Les principaux mécanismes de migration incluent :

- 1. L'évaporation :** Les molécules de plastifiant à la surface du polymère peuvent s'évaporer dans l'atmosphère, créant un gradient de concentration qui entraîne la diffusion du plastifiant de l'intérieur vers la surface. Ce processus est plus rapide pour les molécules de faible masse molaire et est influencé par l'épaisseur du matériau, la température, et la structure du plastifiant .

2. **L'extraction:** Lorsqu'un polymère est en contact avec un milieu liquide, la stabilité de l'adjuvant dans le liquide devient critique. Ce phénomène est particulièrement important lors du choix des matériaux pour des applications spécifiques.

### **II.4.3.2 Vieillessement chimique lié au vieillissement thermique**

Le vieillissement chimique désigne tout processus impliquant une modification chimique du polymère sous l'influence de l'environnement. Ce type de vieillissement se superpose souvent au vieillissement physique, et les deux processus peuvent interagir de manière complexe. Les mécanismes chimiques de dégradation des polymères varient en fonction de la nature des matériaux, mais certaines formes de détérioration sont communes, comme l'oxydation, la photo-oxydation, et l'hydrolyse.[23]

#### ➤ **Oxydation**

L'oxydation est un processus majeur dans la dégradation des polymères, où l'oxygène attaque les chaînes hydrocarbonées, entraînant des ruptures et des ramifications indésirables. Ce phénomène, qui se produit lentement, engendre la formation de produits acides augmentant la conductivité et réduisant la résistance à la rupture. L'oxydation se manifeste par une réaction en chaîne activée par des radicaux libres, résultant en l'accumulation de groupes fonctionnels tels que les hydroxyles et les carbonyles. La susceptibilité à l'oxydation dépend de la solubilité de l'oxygène dans le polymère et de la présence d'antioxydants, tandis que la dégradation thermo-oxydante est caractérisée par des ruptures de chaînes et la formation de groupes polaires, affectant la viscosité et la mobilité des charges.

#### ➤ **Réticulation**

La réticulation est un processus qui implique la formation de ponts covalents entre des segments de chaînes polymères adjacentes. Cette formation de liaisons réduit la flexibilité du matériau et sa capacité à s'étirer, ce qui peut le rendre plus fragile et cassant. Pour les polymères linéaires ayant un degré de réticulation modéré, le processus de réticulation conduit à la formation de chaînes plus ramifiées et à une augmentation de la masse moléculaire par rapport aux chaînes initiales. Cela entraîne une diminution partielle de la solubilité du polymère, notamment lorsque le taux de réticulation est élevé.[22]

Dans le cas des polymères tridimensionnels, la réticulation se manifeste par une augmentation de la densité des nœuds de réseau, ce qui se traduit par une diminution de la masse moléculaire

moyenne entre les nœuds. Cette augmentation de la densité du réseau entraîne une diminution du taux de gonflement du polymère, une élévation de la température de transition vitreuse ( $T_v$ ), ainsi qu'une augmentation du module d'élasticité. Bien que les propriétés physiques du matériau soient généralement peu affectées par la réticulation, la solubilité du polymère tend à diminuer de manière significative. Sur le plan mécanique, la réticulation conduit à une amélioration du module d'élasticité, de la contrainte à la rupture et de la température de ramollissement du matériau.

Dans le cas des polymères initialement linéaires, une réticulation modérée peut également provoquer une augmentation de l'allongement à la rupture. Cependant, lors du vieillissement des polymères, la réticulation est souvent accompagnée de coupures de chaînes. En effet, de nombreux polymères tridimensionnels peuvent subir à la fois des coupures de chaînes et une réticulation lors du vieillissement thermique, ce qui modifie leurs propriétés en fonction de l'importance relative de chaque processus. La caractérisation du processus de réticulation dans les polymères tridimensionnels est généralement réalisée en mesurant le taux de réticulation ou les propriétés physiques associées, telles que la température de transition vitreuse ( $T_v$ ). [24]

### ➤ **Dépolymérisation**

La dépolymérisation est un processus spécifique de coupure de chaînes polymères, où la rupture d'une liaison dans la chaîne crée un site actif. Ce site actif, en perturbant la liaison du monomère adjacent, entraîne une élimination séquentielle des unités monomères de la chaîne. Ce phénomène de dépolymérisation est facilité lorsque l'énergie de liaison entre les monomères est relativement faible, rendant la chaîne plus susceptible à se décomposer. Ce processus joue un rôle variable selon les types de dégradation des polymères, influençant ainsi la stabilité et la durabilité des matériaux polymères. [23]

### ➤ **Coupure de chaînes statistiques**

Les coupures de chaînes statistiques se produisent à des sites aléatoires au sein du réseau macromoléculaire. Ces coupures peuvent être causées par divers mécanismes chimiques, comme l'hydrolyse. Il est couramment admis que la dégradation d'un polymère débute toujours par une rupture de liaison, aussi appelée scission primaire. Cette rupture se produit lorsque la macromolécule reçoit un apport d'énergie (qu'elle soit chimique, mécanique, photochimique, radiochimique ou thermique) suffisant pour briser une liaison, c'est-à-dire lorsque l'énergie apportée dépasse l'énergie de liaison.

Le mécanisme de coupure de chaînes statistiques dans les polymères est étroitement lié à la stabilité thermique du matériau. En effet, il existe une corrélation entre l'énergie de dissociation des liaisons et la stabilité thermique des polymères, la stabilité globale étant largement déterminée par la liaison la plus faible. Ainsi, l'énergie de cette liaison critique influence directement la stabilité du polymère.

Du point de vue structural, ces coupures entraînent une réduction de la masse moléculaire moyenne dans les polymères linéaires et une diminution du degré de réticulation dans les polymères tridimensionnels. Ces modifications structurelles ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques du matériau, les affaiblissant de manière notable. [24]

## **II.5 Mécanismes de dégradation du PE en contact avec le chlore**

L'oxydation du polyéthylène (PE) se produit principalement dans sa phase amorphe. Lorsqu'il est présent dans l'eau, le chlore peut pénétrer dans le matériau, favorisant l'épuisement des antioxydants. Cela conduit à plusieurs effets :[25]

- S.M. Mitroka et al. (2013) soulignent que la formation de groupes carbonyles est la première étape observable dans la dégradation des tuyaux en PEHD en présence d'une solution d'eau chlorée. Ce groupe fonctionnel résulte directement de l'oxydation du polyéthylène, plutôt que de la décomposition d'un antioxydant. L'oxygène associé à ce carbonyle provient de l'auto-oxydation du polymère, avec un possible échange nucléophile d'oxygène avec l'environnement aqueux.
- Des coupures peuvent se produire le long des chaînes polymériques, réduisant leur masse moléculaire (les chaînes deviennent plus courtes) et générant de petites molécules volatiles, surtout si ces coupures se situent près des extrémités des chaînes. Ce phénomène peut également entraîner des ramifications ou une réticulation du polymère.
- Les groupes latéraux de la chaîne polymérique subissent des modifications, notamment :
  - La formation de doubles liaisons, qui peuvent réagir avec des radicaux, contribuant ainsi à la réticulation.
  - La génération de produits d'oxydation, tels que des acides carboxyliques, cétones, aldéhydes, esters, et lactones.

- De chaque côté d'une fissure principale, des zones de matériau cassant se forment, marquées par de petites fissures, suggérant une dégradation avancée du polymère. Cela indique que la fissure principale s'est développée à un moment donné dans une zone de matériau moins dégradé, où des espèces oxydantes agressives ont attaqué le matériau adjacent à la paroi de la fissure. Ce mécanisme de croissance des fissures, que l'on peut qualifier de propagation assistée par dégradation, constitue une cause probable de fractures précoces, même dans des tuyaux à paroi épaisse, malgré le fait que la dégradation du polymère soit principalement limitée à la surface.

# **Matériau d'étude et procédures expérimentale**

Ce chapitre s'ouvre sur une introduction au matériau objet d'étude, suivie d'une présentation détaillée de la machine utilisée et du dispositif expérimental employés pour conduire les tests de vieillissement et de traction.

### **III.1 Matériau d'étude**

Le matériau utilisé est le polyéthylène haute densité (PEHD), largement employé dans les applications d'ingénierie comme les conduites et les appareils soumis à pression. Il s'agit d'un thermoplastique semi-cristallin. Le PEHD étudié a été initialement fabriqué sous forme de granules et importé par la société STPM CHIALI, basée à Sidi Bel Abbès, en Algérie.

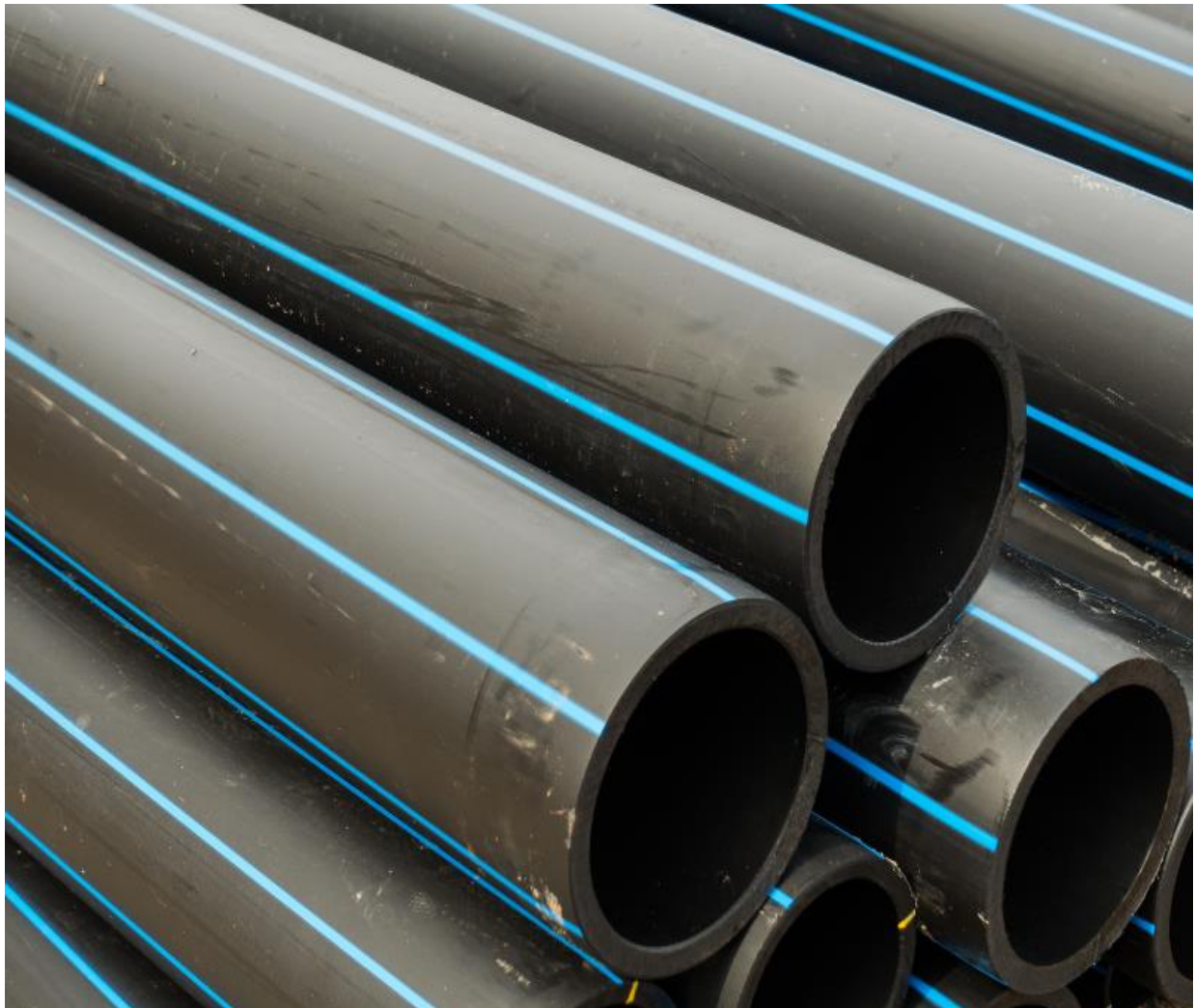


Figure III-1:Tube de PEHD

### **III.2 Préparation des éprouvettes**

Nous avons effectué la découpe d'échantillons en PEHD en utilisant une scie électrique dans le Hall Technologie de Oued-Aissi, comme illustré dans la figure suivante :



Figure III-2: Une scie électrique

Par la suite, nous avons dimensionné ces échantillons à l'aide d'une fraiseuse de diamètre 63 mm, toujours dans le même hall technologique, pour obtenir des éprouvettes de dimensions spécifiques : longueur de 75 mm, largeur de 10 mm L'éprouvette est représentée dans la figure suivante :



Figure III-3:fraiseuse



Figure III-4:Morceaux en PEHD

Ensuite, nous avons découpé les éprouvettes à une épaisseur de 2 mm à l'aide du tour, comme illustré dans la figure suivante :

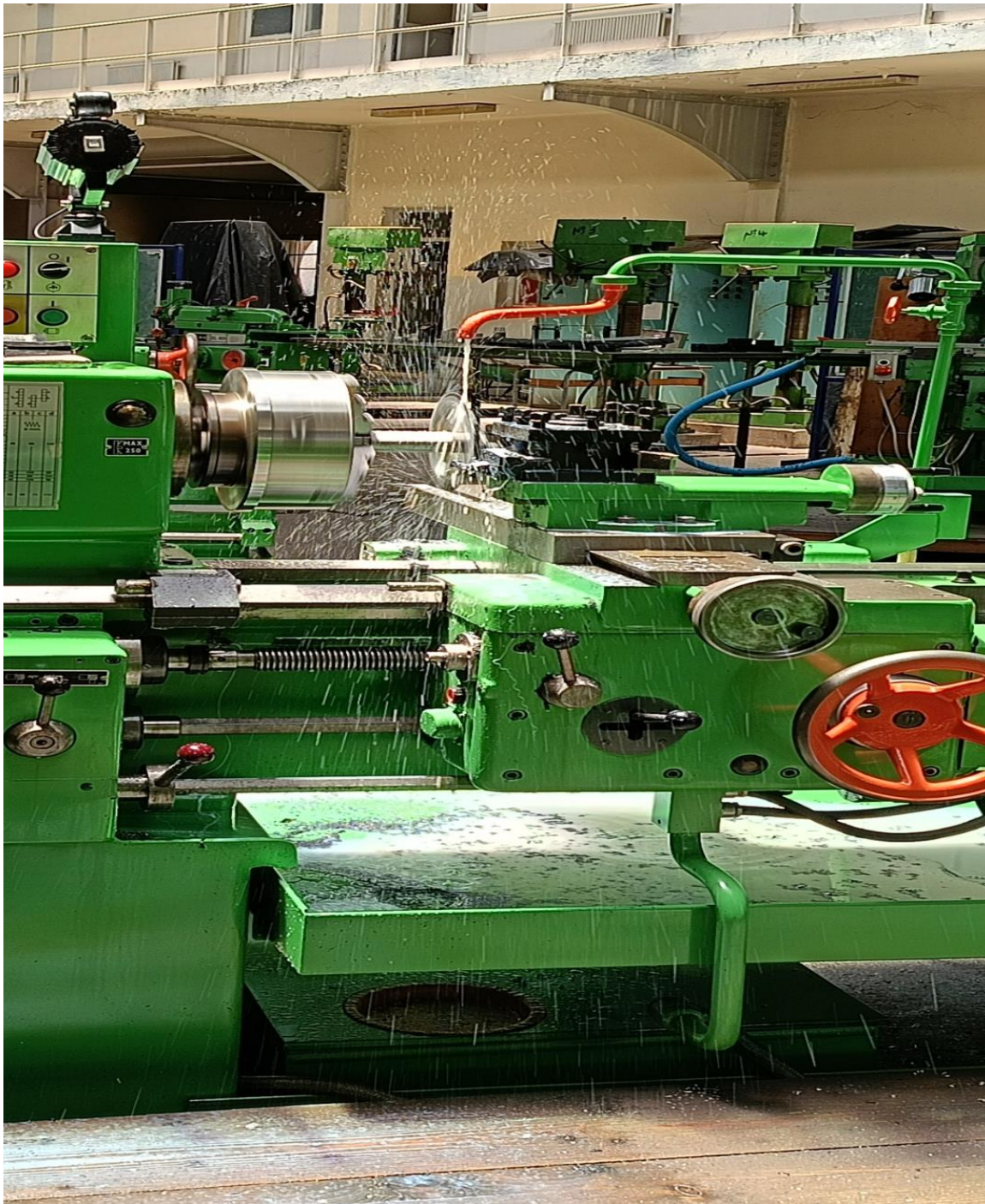


Figure III-5:L'usinage avec le tour

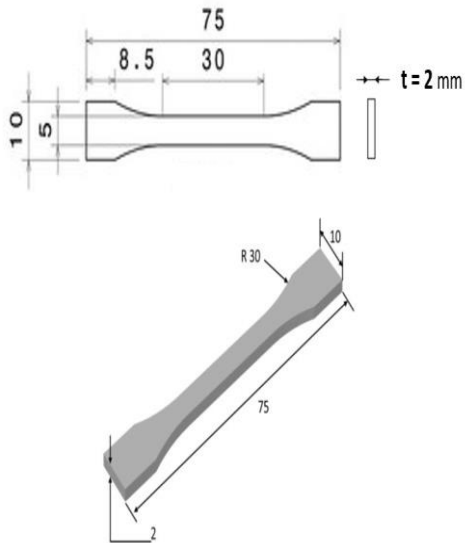


Figure III- 6: Dimensions d'éprouvette



Figure III-7:éprouvettes en PEHD

### Norme des éprouvettes

L'éprouvette représentée correspond à une géométrie standard utilisée pour des tests de traction. Il semble que ses dimensions soient conformes aux éprouvettes de type 5B, telles que décrites dans la norme ISO 527-2. Cette norme spécifie les méthodes d'essai de traction pour les plastiques et définit les géométries d'éprouvettes en fonction de l'épaisseur et des dimensions du matériau.

L'éprouvette de type 5B, avec une épaisseur de 2 mm, est couramment utilisée pour tester des matériaux comme les polymères, y compris le PEHD. Les dimensions clés qui sont en accord avec la norme incluent :

Longueur totale : 75 mm

Largeur aux extrémités : 10 mm

Largeur dans la partie médiane : 5 mm

Rayon des courbes : 30 mm

Épaisseur : 2 mm

Une fois les éprouvettes finies, nous les avons mis dans un bocal pour des essais dans du chlore de degrés, 47° densité de 1.211 g /L



Figure III-8: éprouvettes en PEHD dans un bain de chlore

Le tableau ci-dessous résume les nombres d'éprouvettes utilisées

Tableau III-1: le nombre d'éprouvettes utilisées.

Nombre d'éprouvettes	Vierges	Traitées
42	12	32

Tableau III-2:le nombre d'éprouvettes utilisées sous chlore

Traitement	Nombre de Jours			
	11	21	60	110
Nombre D'éprouvettes Sous chlore	8	8	8	8

### III.3 Vieillissement thermique de PEHD

Les essais de vieillissement thermique du PEHD ont été réalisés dans une étuve de type MEMMERT au laboratoire SDM du département GM à l'UMMTO. Cette étuve, permet de réaliser des traitements thermiques à température régulée, avec une température maximale pouvant atteindre 500°C. Elle est équipée de résistances électriques et d'un système de ventilation garantissant une distribution homogène de la chaleur.

Les conditions du traitement étaient les suivantes :

1. La vitesse de chauffage était d'environ 2°C par minute.
2. Les échantillons ont été conservés à des températures de 60°C et 90°C pendant deux durées périodes différentes : 24 heures et 6 heures.
3. Un refroidissement à l'air a été réalisé après chaque traitement.



Figure III-9: Etuve de types MEMMERT

### **III.4 L'essai de traction**

L'essai de traction est un test essentiel qui permet d'évaluer le comportement élastique d'un matériau et de mesurer sa résistance à la rupture sous une contrainte uni axiale. Il permet de déterminer des propriétés clés telles que le module de Young (E), ou module d'élasticité longitudinale, la limite d'élasticité, la résistance à la traction, et l'allongement à la rupture.

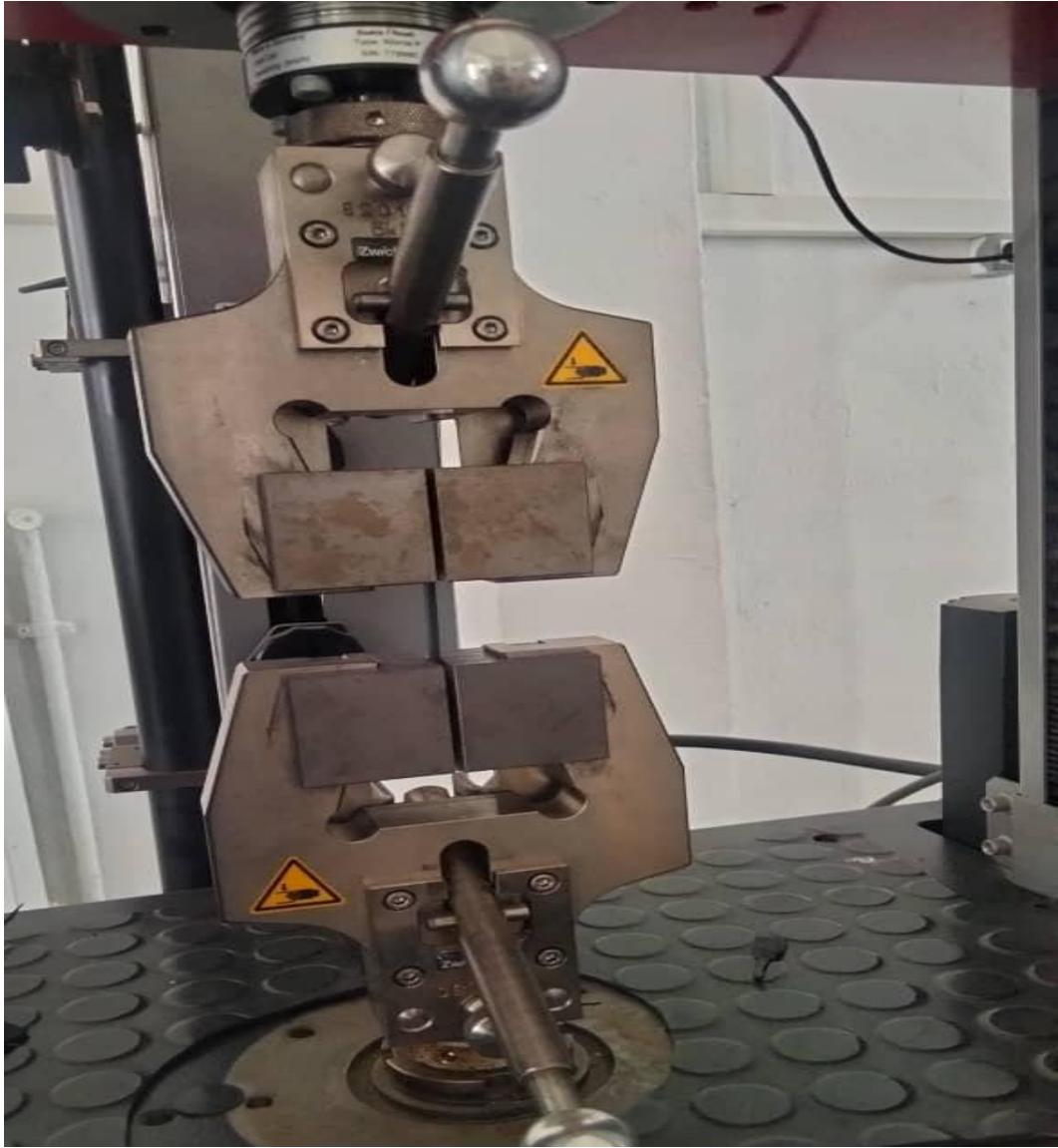


Figure III-10:Machine de traction.

La figure III.11 donne un exemple de la courbe contrainte-déformation nominale du PEHD vierge où l'on peut distinguer plusieurs domaines de comportement mécanique avec l'évolution du profil de l'éprouvette étirée à vitesse d'allongement constante

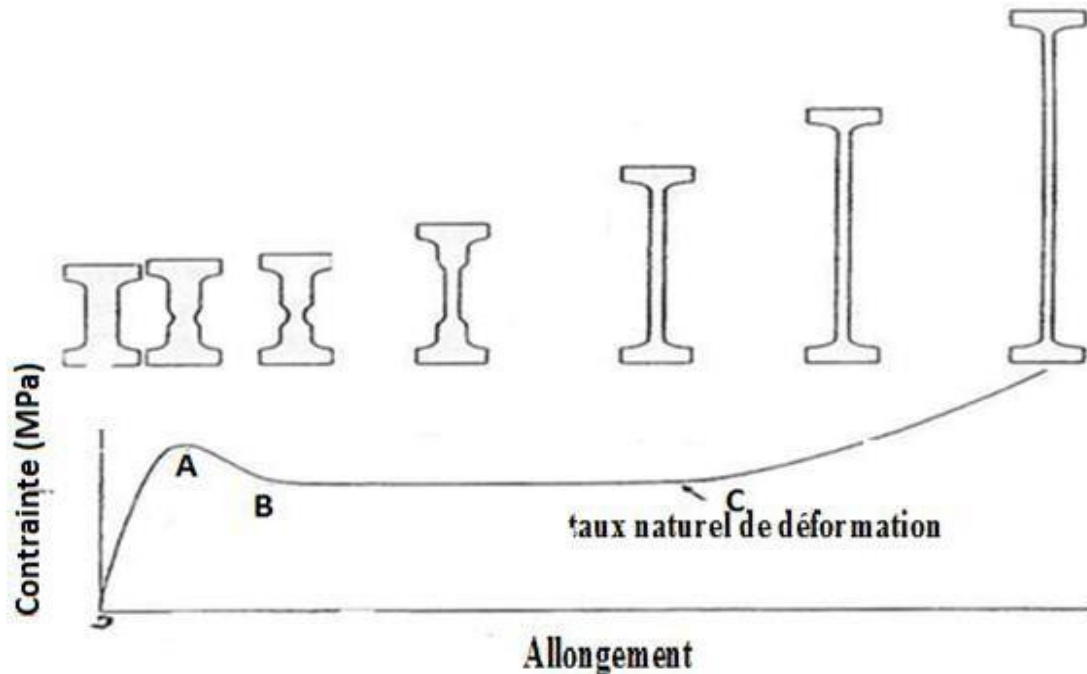


Figure III-11: Identification des différents régimes de comportement

#### Domaine élastique et viscoélastique (zone 0-A)

De 0 à A il s'agit de la déformation élastique réversible du matériau, due à la phase amorphe, du fait que le module de cette phase est beaucoup plus faible que celui de la phase cristalline. La linéarité de la courbe à l'état initial caractérise un domaine parfaitement élastique, suivi d'une certaine non-linéarité juste avant le point A c'est-à-dire dans un régime où la déformation reste complètement réversible mais dans le temps correspondant au domaine viscoélastique. A ce stade, la déformation du polymère ne peut se produire que par étirement des liaisons atomiques. Le matériau reprend instantanément sa forme initiale après la suppression de la charge, pas de déformation résiduelle

#### Domaine plastique (zone A-C)

Au point A débute la striction qui correspond à une déformation hétérogène du matériau qui s'amorce sur un défaut au niveau de l'éprouvette (des défauts structuraux tels que des dislocations, des structures en bloc, les frontières inter cristallines dans le cristal...etc. Le point

A est appelé seuil de plasticité correspondant à la force maximale et représente la limite entre le domaine élastique et plastique.

De A à B la striction se forme jusqu'à stabilisation.

De B à C la striction se propage le long de l'échantillon jusqu'au taux naturel de déformation.

Au-delà de C, la déformation redevient homogène grâce à un durcissement structural lié à l'orientation des chaînes macromoléculaires dans le sens de l'étirage et l'augmentation de la fraction fibrillaire du matériau.

La dernière phase de durcissement représente les chaînes en extension (plus ou moins enchevêtrées) opposant une résistance à la sollicitation. La résistance du réseau s'accroît avec l'augmentation de déformation, provoquant des contraintes de plus en plus élevées. Il s'ensuit finalement la rupture du matériau.

Pour les éprouvettes que nous avons utilisé, à l'état vierge, le PEHD est conservé dans sa forme initiale, telle qu'il est fabriqué, sans aucune modification chimique ou autre, servant ainsi de base de référence précise

### **1. Réalisation de l'essai de traction**

Pour évaluer les propriétés mécaniques du matériau, son comportement et sa réponse sous l'effet d'une sollicitation en traction sont étudiés. Dans le cadre de cet essai, deux (03) éprouvettes ont été choisies pour chaque condition, avec une déformation réalisée à température ambiante et une vitesse de traction de 10 mm/min

## 2. Machine de traction

Les essais de traction uniaxiale sont effectués à l'aide d'une machine de marque ZWICK/Roell Z010, dotée d'une capacité de 10 kN (capteur de force). Elle est contrôlée en temps réel par un ordinateur, permettant ainsi l'acquisition et le traitement rapide des données grâce à un logiciel dédié.



Figure III-12: Machine de traction ZWICK/Z010

# **Résultats expérimentaux et interprétations**

Ce chapitre est consacré à l'analyse et l'étude du comportement mécanique du polyéthylène haute densité (PEHD) à l'état vierge, après dégradation sous chlore et après vieillissement thermique

L'objectif est de comprendre comment ces différentes conditions affectent les propriétés mécaniques du PEHD, et éventuellement montrer l'influence du chlore sur la structure du PEHD.

#### IV.1 Caractérisation du comportement mécanique du PEHD à l'état vierge

Les résultats des essais de traction monotone obtenus sont représentés sur la figure IV.1

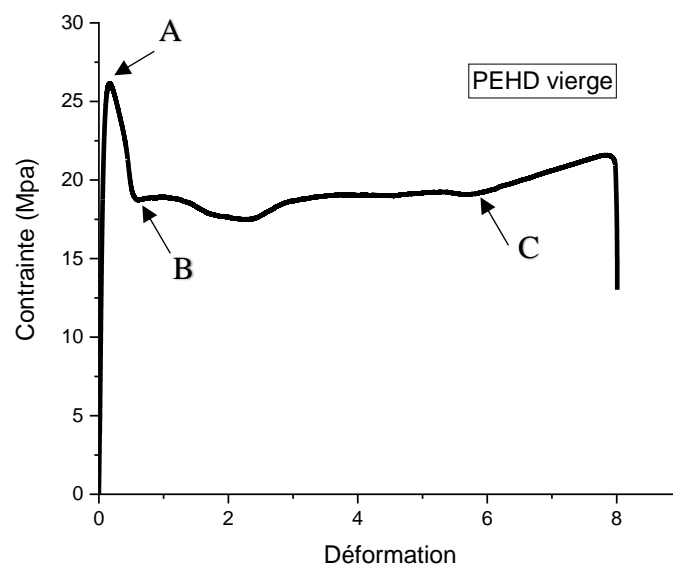


Figure IV-1: Courbe contrainte-déformation des éprouvettes à l'état de livraison

L'examen de la courbe nous permet d'observer les différentes étapes ci-dessous :

- La courbe est initialement linéaire, il s'agit de la déformation élastique réversible du matériau.
- Après débute la striction qui correspond à une déformation hétérogène du matériau. Le phénomène de striction débute à la contrainte maximale.
- La striction se forme jusqu'à stabilisation.
- La striction se propage le long de l'échantillon jusqu'au taux naturel de déformation.
- La déformation redevient homogène grâce à un durcissement structural jusqu'à la rupture.

## IV.2 Comportement mécanique du PEHD vieilli sous chlore

Nos éprouvettes de traction ont été vieilles dans une solution de chlore concentré pour des différents temps d'immersion à savoir : 11 jours, 21 jours, 60 jours et 110 jours.

A chaque fin d'une période, 03 éprouvettes sont retirées de la solution et l'essai de traction est réalisé dans l'heure qui suit pour éviter l'évaporation du chlore.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la courbe ci-dessous

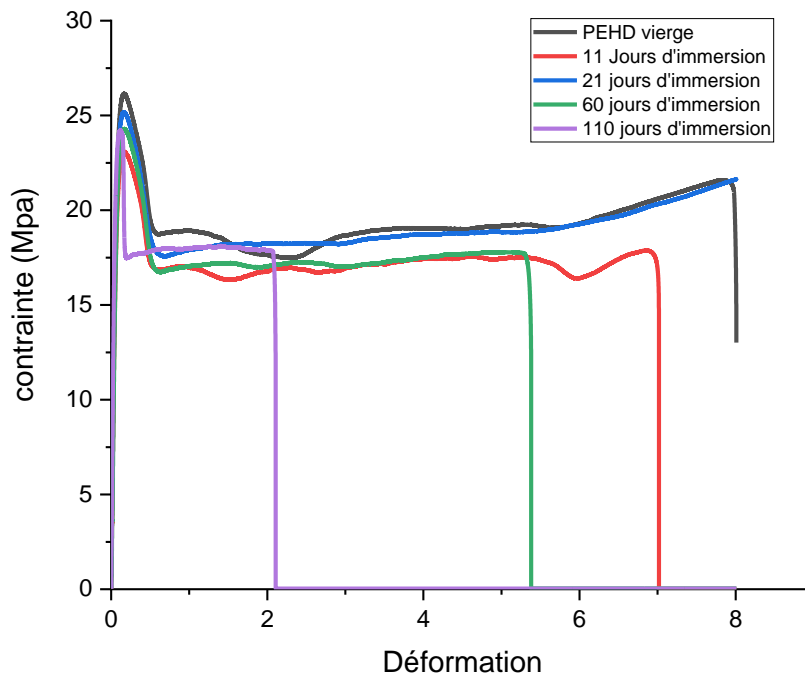


Figure IV-2: Courbes de traction pour différents temps d'immersion

La Figure IV. 2 représente les courbes contrainte-déformation obtenues pour différents temps de vieillissement dans le chlore (11 jours, 21 jours, 60 jours et 110 jours) à température ambiante. Nous constatons une diminution de la contrainte au seuil d'écoulement (seuil de plasticité) avec l'augmentation du temps d'immersion.

On remarque aussi que le plateau plastique diminue avec l'augmentation du temps de vieillissement dans le chlore.

De la même manière avec une diminution du plateau plastique, nous remarquons aussi une diminution de l’allongement à la rupture avec l’augmentation de la durée de vieillissement dans le chlore.

La figure IV.3 récapitule l’évolution de la contrainte au seuil d’écoulement. Elle montre une diminution de la contrainte au seuil en fonction du temps d’immersion.

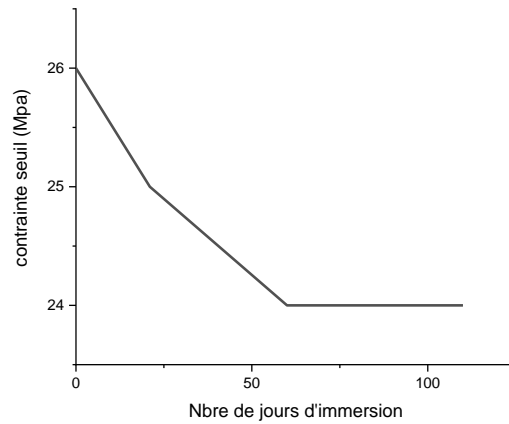


Figure IV-3: Evolution de la contrainte au seuil d’écoulement du PEHD

La contrainte et l’allongement à la rupture, obtenues à différents temps de maintien sous chlore concentré aux températures sont illustrés sur la figure IV.4 et la figure IV.5 respectivement.

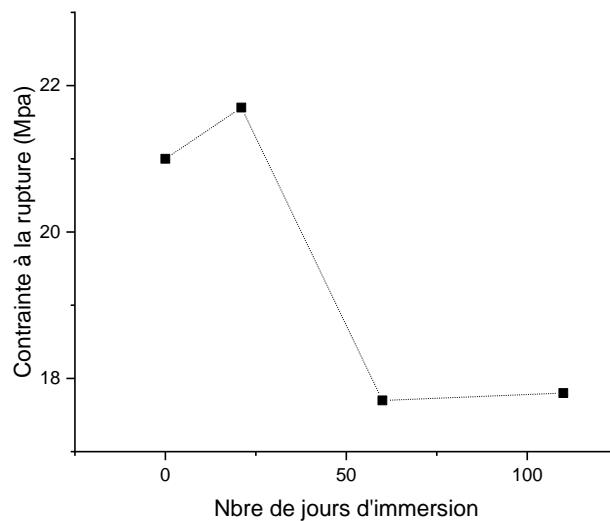


Figure IV-4: Evolution de la contrainte à la rupture du PEHD

On observe une chute brutale de la contrainte à la rupture qui finit par se stabiliser avec l'augmentation du temps de maintien. Par contre l'allongement à la rupture diminue fortement avec le temps de maintien.

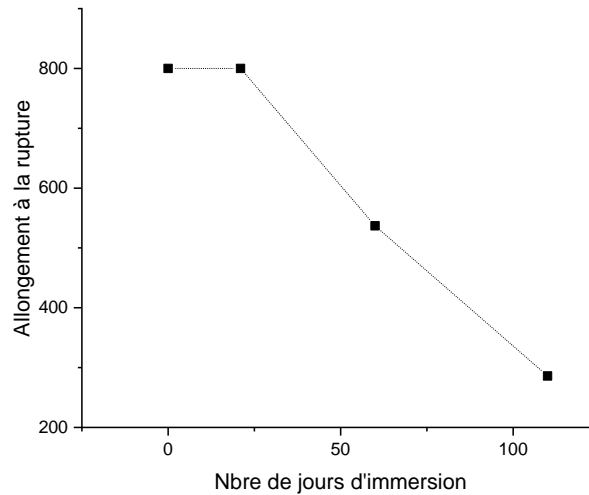


Figure IV-5: Evolution de l'allongement à la rupture du PEHD

La chute importante de l'allongement à la rupture est observée au cours du vieillissement qui peut être traduit par une perte de ductilité du matériau. Cette diminution est directement liée au phénomène d'oxydation qui s'accompagne de coupures de chaînes.

### IV.3 Vieillissement thermique du PEHD

Dans cette partie, nous avons soumis nos éprouvettes de traction à un vieillissement thermique pour mettre en évidence la dégradation thermique. Nous avons choisi des températures de 60°C et 90°C et deux temps de maintien dans l'étuve à savoir 6 heures et 24 heures. Les résultats obtenus sont illustrés par les figures ci-dessous.

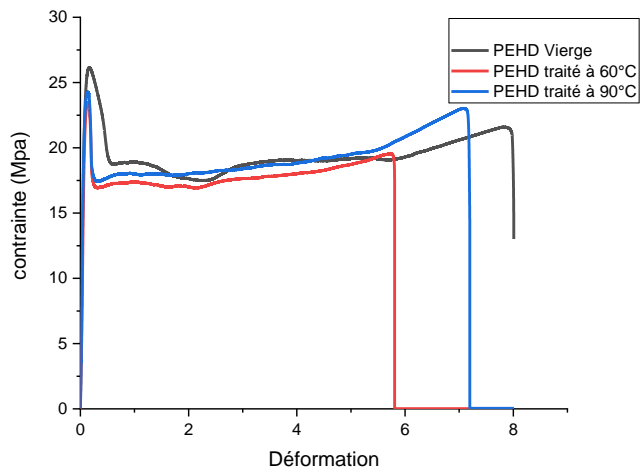


Figure IV6:Influence de la température à 6 H de maintien au four

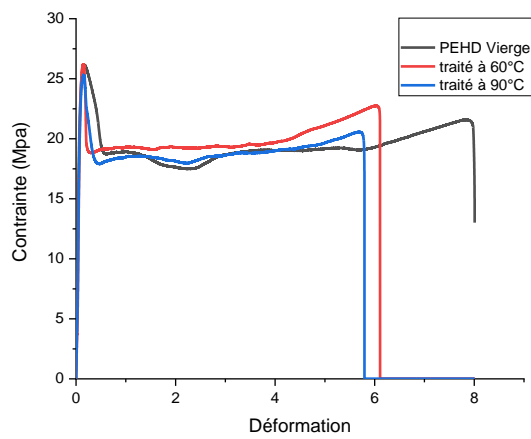


Figure IV-7: Influence de la température à 24 H de maintien au four

L'examen de ces courbes nous permet de confirmer la dégradation thermique du PEHD. Nous constatons que plus la température de maintien est élevée, plus l'allongement à la rupture diminue. La contrainte seuil et la contrainte à la rupture ne varie pas significativement

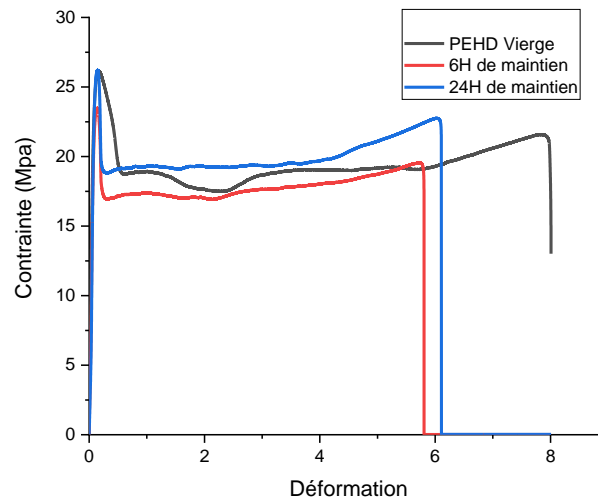


Figure IV-8:Influence du temps de maintien à la température 60°C

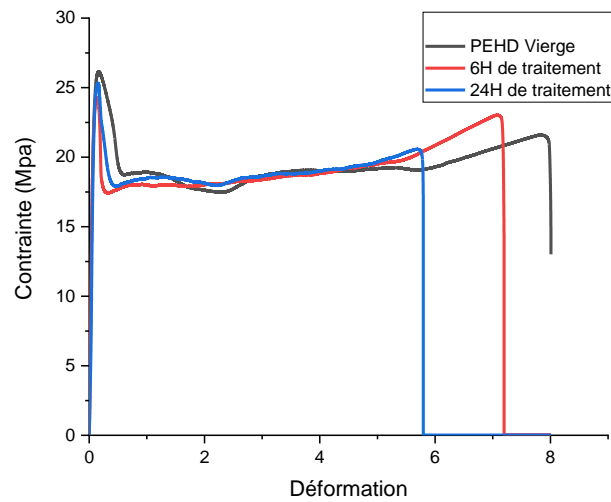


Figure IV-9:Influence du temps de maintien à la température 90°C

Les figures IV.8et IV.9 illustrent l'influence du temps de maintien. On remarque qu'à la température 90°C, la propriété d'allongement à la rupture chute brutalement par contre la contrainte à la rupture ne varie presque pas.

Par contre, dans le vieillissement à 60°C, l'effet du temps de maintien n'est pas mis en évidence pour les deux temps 6H et 24H.

La figure IV.10 regroupe des deux dégradation thermique et chimique dans les conditions extrêmes : échantillons maintenus 110 jours dans du chlore concentré puis traité thermiquement à 90°C pendant 24H au four.

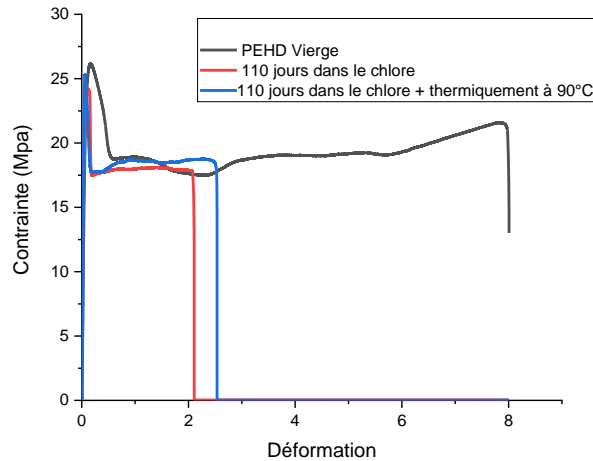


Figure IV-10: Dégradation combinée thermique et chimique sous chlore

La dégradation sous chlore est bien mise en évidence. L'allongement à la rupture et la contrainte seuil diminue mais la contrainte à la rupture n'est pas affectée, mais le vieillissement thermique qui a suivi la dégradation chimique a amélioré légèrement la contrainte seuil et l'allongement à la rupture, cela peut s'expliquer par l'évaporation du chlore dans le four ce qui diminue son effet.

# **Conclusion Générale**

## *Conclusion générale*

---

Le vieillissement et la détérioration de conduites d'eau constituent des menaces envers l'intégrité physique des systèmes de distribution d'eau, causant des effets négatifs sur la capacité de débit, la pression et la qualité de l'eau dans les réseaux d'eau potable. Les perturbations dues à la défaillance de conduites d'eau sont de nos jours très fréquentes.

Notre étude consiste en étude de types de dégradations : la dégradation thermique du PEHD et la dégradation en présence du chlore. Des essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes d'abord à l'état vierge, puis sur des éprouvettes immergées dans du chlore concentré pendant onze jours, vingt et un jours, soixante jours et cent dix jours à température ambiante.

L'effet du vieillissement thermique est mis en évidence en utilisant deux températures 60°C et 90°C avec deux temps de maintien dans le four 6H et 24H

Les résultats collectés nous ont permis de constater que le chlore influe considérablement sur le comportement mécanique du matériau causant une dégradation des ses propriétés mécaniques. Le vieillissement thermique est plus accentué pour la température 90°C et un maintien de 24H.

A partir de la courbe contrainte-déformation du matériau vierge et l'état vieilli, les propriétés élastiques et plastiques, en particulier la contrainte au seuil de plasticité, la contrainte à la rupture et l'allongement à la rupture ont été analysés en fonction de la durée du vieillissement sous chlore

Les différentes valeurs des propriétés mécaniques du matériau tel que la contrainte au seuil, la contrainte à la rupture, diminuent par rapport au temps de vieillissement. Par contre, l'allongement à la rupture diminue brusquement qui se traduit par une perte de ductilité du matériau qui est liée au phénomène d'oxydation qui s'accompagne de coupures de chaînes.

# **Références bibliographiques**

## *Références Bibliographiques*

---

- [1] L.Goala. Etude physico-chimique du procédé de dispersion des poudres libres et agglomérées en milieu liquide. Toulouse France, 2014. Thèse de Doctorat.
  
- [2] Gottfried W. Ehrenstein, Fabienne Montagne matériaux polymères : structure, propriétés et application ; Hermès Science publication, 2000.
  
- [3] Polymérisation; Techniques de l'ingénieur, Traité plastiques et composites; (A3 040).
  
- [4] J.Rietsch, B. Bouette. The compression yield behaviour of polycarbonate over a wide range of strain rates and temperatures, (1 990).
  
- [5] J. Richeton, S. Ahzi, L. Daridon, Y. Rémond, A formulation of the cooperative model for the yield stress of amorphous polymers for a wide range of strain rates and temperatures. Polymer, 46, 6035-6043,(2005).
  
- [6] J. Bots, Matières plastiques II, Technologie-plasturgie, Technique et documentation, Paris, 1982.
  
- [7] Joham Houlleinfo plastique et caractéristique
  
- [8] Michel frontanille, Yves Gnanou, \_chimie et physico chimie des polymères”, 2eme et 3eme cycle école d'ingénieur.
  
- [9] Q.Fu, Y.Men et G. Strobl, “A molar mass induced transition in the yield properties of linear polyethylene, Polymer”, 44(6), 2003
  
- [10] Catalogue du Groupe CHIALI, Siège et Direction Générale : Voie A. Zone Industrielle B.P 160. SIDI BELABES, 22000 Algérie. Caractéristiques de la matière PE, p2.

## *Références Bibliographiques*

---

- [11] Reynald Dossogne ; « polyéthylène haute densité PEHD » technique d'ingénieur, A3315
- [12] Rida Arieby, « caractéristique Mécanique et Modélisation Thermodynamique du comportement anisotrope du PEHD », TH/DOC. Nancy. 2007.
- [13] U.S.A : ASTM E8 : "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials" Norme ISO 6892 : Matériaux métalliques – Essai de traction .
- [14] Mihaela TEACA, caractérisation expérimentale et modélisation de la déformation plastique des tôles métalliques, thèse doctorat université Metz, 2009.
- [15] **Dimitris, Kottas.** Architecture et construction : Le plastique . s.l. : Link, 1996.
- [16] **C.Peru.** Polyéthylène haute densité PEHD , Techniques d'Ingénieur . Paris : s.n., 2008. A.
- [17] Dr. Gilles olive, chimie des matériaux, Ecole industrielle et commerciale de la ville de Namur ; 3eme édition, 07 /01/2005.
- [18] A.terlin, Molecular model of drawing polyethylene and polypropylene, Journal of materials science, 1971b, 6(6), p. 490-508.
- [19] Y. Mecheri, « Influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du PRC utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de magister, ENP, Octobre 1998.
- [20] GHERARDI B., Organisation multi échelle et stabilité colloïdale de suspensions d'argiles organophiles en milieu organique. Thèse chimie-physique : Université d'Orléans, 160, (1998).

## *Références Bibliographiques*

---

- [21] Antoine Congieras « Mise au point d'un milieu solide inerte pour L'étude de la biodégradation des polymères dans le composite ». Thèse, Université de Reims Champagne Ardenne.(2005).P 65.
- [22] L. Douminge, « Etude du comportement du polyéthylène haute densité sous irradiation ultraviolette ou sollicitation mécanique par spectroscopie de fluorescence », these, Université de La Rochelle, (France), 2010.
- [23] J. Verdu, « Effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques », EDP Sciences, Echanges physique- Industrie, N°. 5, pp. 19-23, 2000.
- [24] Dj. BOUGUEDAD, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de EPDM », thèse de Doctorat, UMMTO, 2010
- [25] J.P. Trotignon, «Précis de matières plastiques. Structures, propriétés, mis en oeuvre et normalisation», Edition Nathan, Paris, 1982.
- [26] E. RICHAUD, J. VERDU, « Vieillissement chimique des polymères, Cinétique de dégradation », technique de l'ingénieur, AM 3152, 2011.
- [27] W. L. HAWKINS, W. MATREYK, F. H. WINSLOW, J. Appl. Polym. Sci. 21, 2286, 1981.
- [28] C.E.I 540, « Méthodes d'essais pour les enveloppes isolantes et les gaines des câbles électriques rigides et souples (Mélanges élastomères et thermoplastiques) », Edition 1983.
- [29] P.Paloniemi. (février 1981). Théorie de l'égalisation des processus vieillissement thermique de l'isolation électrique des matériaux dans les tests d'endurance thermique (éd. Trans on. Elect, Vol. EI-16). IEEE.

## *Références Bibliographiques*

---

- [30] Gijnsman, P. et A. Dozeman, Comparison of the UV-degradation chemistry of unstabilized and HALS-stabilized polyethylene and polypropylene. *Polymer Degradation and Stability*, 53(1): 45-50, 1996.
- [31] J.R. WHITE, « Degradation (weatherability) », *Poly. Mat. Encyc.*, CRC Press, 1996.
- [32] P. DUBOIS, « Plastiques modernes », Tom II, Masson et Cie, Paris, 1963.