



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la



Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.

Faculté du 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 :

Etude expérimentale de la dégradation des conduites d'eau potable en PEHD

Réalisé par :

M^{elle} Hallal Taous

Dirigé par :

Mme T. Aberkane

Co-encadré par:

Mr. Z. Foughalia

Année 2023/2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement ma promotrice, madame T. ABERKANE, pour son encadrement, ses précieux conseils, et sa disponibilité tout au long de ce travail. Son expertise et ses encouragements m'ont été d'une aide inestimable.

Je remercie toute l'équipe du hall de technologie d'oued- Aissi pour leurs suivis et leurs conseils, avec une mention particulière pour Monsieur SADOUDI.

Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants et professeurs de l'université MOULOUD MAMMERI, pour les connaissances et les compétences qu'ils m'ont transmises durant ces années d'études.

Mes remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille et à mes proches pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur compréhension durant cette période de travail intense.

Merci à tous.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes chers parents, **Malika et Said**, pour leur amour, leur soutien infaillible et leurs sacrifices. Leur confiance en moi et leurs encouragements ont été ma source de motivation tout au long de mes études.*

Je dédie également ce projet à mes amis, pour leur soutien moral, leur amitié sincère, et les moments de partage qui ont enrichi mon parcours.

*À mes chers **Imane, Dalia, Adlane et Khaled**, pour vos encouragements constants et votre soutien indéfectible.*

*Mon frère **Sofiane** et mes deux sœurs **Soraya** et **Kahina** Merci d'avoir été à mes côtés tout au long de cette aventure.*

Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenu, de près ou de loin, je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude.

Taous.

Table des Matières

Introduction Générale

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES POLYMERES ET LE PEHD EN PARTICULIER	2
I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Définition	4
I.4 Structure d'un polymère	5
I.4.1 La structure chimique.....	5
I.4.2 Structure physique	6
I.5 Classification des polymères	6
I.5.1 La composition	6
I.5.2 L'origine.....	7
I.5.3 Comportement thermique.....	7
I.5.4 La morphologie.....	8
I.5.5 La Structure	9
I.6 Les propriétés de polymères	9
I.6.1 Mécaniques	10
I.6.2 Physiques	10
I.6.3 Thermique	10
I.7 La polymérisation d'un polymère	11
I.7.1 Polymérisation en chaine.....	11
I.7.2 Polycondensation (polymérisation en étapes)	11
I.8 Masse molaire et degré de polymérisation	12
I.9 Généralité sur le polyéthylène	12
I.9.1 Présentation	12
I.9.2 Structure et morphologie de polyéthylène.....	13
I.9.3 Propriétés générales du polyéthylène.....	14
I.9.4 La plasticité d'un polyéthylène...4	16

Table des Matières

I.9.5	Comportement thermique d'un polyéthylène.....	17
I.9.6	Les différents types d'un polyéthylène	18
I.10	Le polyéthylène à haute densité.....	19
I.10.1	Présentation.....	19
I.10.2	Les propriétés du PEHD.....	19
I.10.3	Avantages et inconvénients	20
Chapitre II : Vieillessement chimique et thermique du PEHD.....		20
II.1	INTRODUCTION.....	21
II.2	Définition.....	21
II.3	Mécanisme de vieillessement du PEHD.....	21
II.4	Mode de vieillessement.....	22
II.4.1	Vieillessement naturel.....	22
II.4.2	Vieillessement artificiel	23
II.5	Types de vieillessement	23
II.5.1	Vieillessement physique	23
II.5.2	vieillessement chimique.....	26
II.5.3	Vieillessement thermique.....	29
II.6	Vieillessement de polyéthylène au contact du chlore.....	30
II.6.1	La désinfection au chlore.....	30
II.6.2	L'impact des désinfectants sur les réseaux d'eau potable	31
II.6.3	L'oxydation du polyéthylène au contact du chlore	31
Chapitre III : Matériau d'étude et procédures expérimentales		33
III.1	Introduction.....	34
III.2	Matériau d'étude	34
III.3	Préparation des éprouvettes	35
III.4	Caractérisations mécaniques.....	38

Table des Matières

III.4.1	Essai de traction	38
III.4.2	Essai de l'infrarouge.....	40
III.4.3	Le spectromètre infrarouge	41
III.4.4	Vieillissement thermique	42
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....		42
IV.1	Introduction.....	43
IV.2	Caractérisation du comportement mécanique du PEHD à l'état vierge	43
IV.2.1	Résultats du spectromètre Infrarouge a l'état vierge.....	45
IV.3	Comportement mécanique de PEHD vieilli sous chlore	46
IV.4	Résultats de la spectroscopie Infrarouge pour les échantillons vieillis sous chlore	49
IV.5	Vieillissement thermique du PEHD	51
v . CONCLUSION GENERALE		53

Table des Matières

Table des Matières

Liste de figures

Figure I-1:Présentation schématique d'un homopolymère	6
Figure I-2 : Présentation schématique d'un copolymère.....	7
Figure I-3:Structure d'un polymère amorphe.....	8
Figure I-4: Structure d'un polymère cristallin.....	9
Figure I-5:Structure moléculaire d'un polyéthylène	13
Figure I-6: Représentation multi échelle de la morphologie microstructurale des polymères semi-cristallins	13
Figure I-7:Comparaison des courbe à l'intérieure aux milieux et l'extérieure des couche d'un tube en PEHD (a : à l'extérieur, b : au milieu, c : à l'intérieur)	15
Figure I-8:l'évolution de quelques propriétés physiques de différents matériaux en fonction de la température	16
Figure I-9:Les différents types de polyéthylène	18
Figure II-1: schématisation de la pénétration de solvant dans un polymère	24
Figure II-2:types de migration possibles au sein du matériau	25
Figure II-3: Effet plastifiant des molécules sur un polymère	26
Figure II-4:Processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaire	28
Figure II-5:Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel	28
Figure II-6: Schématisation de l'évolution des fissures avec l'aide du processus de dégradation	33
Figure III-1: Plaque en PEHD.....	34
Figure III-2: Les dimensions d'éprouvette.....	35
Figure III-3:Découpe une plaque en (PEHD) à l'aide d'une scie mécanique	36
Figure III-4:Usinage d'une pièce en (PEHD) à l'aide d'une fraiseuse	36
Figure III-5: Opération de tournage avec lubrification active sur un tour mécanique.....	37
Figure III-6: Les éprouvettes en PEHD	37
Figure III-7: Epreuves en PEHD immergées dans le chlore Les éprouvettes en PEHD.	37
Figure III-8:Machine de traction (Zwick roell z005)	38
Figure III-9: Montage sur la machine de traction.....	39
Figure III-10:Domaines d'absorption correspondant à divers types de liaisons chimiques	40
Figure III-11: Appareil infrarouge (ATR)	41
Figure III-12: Disposition des éprouvettes à l'intérieure de l'étuve	42
Figure III-13: Etuve de vieillissement thermique	42

Liste de figures

Figure IV-1: Identification des différents régimes de comportement mécanique sur la courbe contrainte-déformation.....	43
Figure IV-2: Courbe contrainte-déformation des éprouvettes à l'état de livraisons.....	45
Figure IV-3:spectre d'absorption infrarouge du PEHD vierge	46
Figure IV-4:Courbes de traction pour différents temps d'immersion.....	46
Figure IV-5:Evolution de la contrainte au seuil d'écoulement du PEHD.....	47
Figure IV-6:Evolution de la contrainte à la rupture du PEHD.....	48
Figure IV-7: Evolution de l'allongement à la rupture du PEHD.....	48
Figure IV-8:Spectre infrarouge du PEHD vieilli sous chlore pendant 60 jours.....	49
Figure IV-9:Spectre infrarouge du PEHD vieilli sous chlore pendant 110 jours.....	50
Figure IV-10:Comparaison des trois spectres infrarouges.....	50
Figure IV-11: Influence de la température à 6 H de maintien au four.....	51
Figure IV-12:Influence de la température à 24 H de maintien au four.....	51
Figure IV-13:Influence du temps de maintien à la température 90°C.....	52
Figure IV-14:Influence du temps de maintien à la température 60°C.....	52
Figure IV-15:Dégradation combinée thermique et chimique sous chlore	53

Liste des Tableaux

Tableau I-1: Quelques polymères avec leurs domaines d'utilisation.....	5
Tableau I-2: Les principales propriétés de différents types de polyéthylène.....	18
Tableau I-3 : Propriétés électrique de PEHD.....	20
Tableau I-4: Avantages et inconvénients de PEHD.....	20

Introduction Générale

Le polyéthylène haute densité (PEHD) occupe une place de choix parmi les polymères utilisés dans divers secteurs industriels, en raison de sa polyvalence, de sa résistance mécanique et chimique, ainsi que de son faible coût de production. Il est employé dans des applications variées, allant des emballages aux infrastructures, en passant par les systèmes de canalisations pour le transport des fluides. Grâce à sa structure semi-cristalline et sa résistance aux conditions environnementales, le PEHD est souvent perçu comme un matériau durable et fiable. Cependant, malgré ces avantages, le PEHD est sujet à des processus de dégradation lorsqu'il est exposé à certains agents chimiques ou physiques, tels que les rayons ultraviolets, la température, l'oxygène, ou des produits chimiques réactifs comme le chlore.

Dans les systèmes de distribution d'eau potable où les conduites en PEHD sont largement utilisées. La dégradation du PEHD sous l'effet du chlore peut entraîner une modification de ses propriétés physiques et chimiques, affectant ainsi sa durée de vie, son intégrité structurelle.

Il est clairement établi que le dioxyde de chlore présent dans l'eau distribuée dégrade le polyéthylène. En effet, cette altération chimique engendre une fragilisation mécanique, puis une fissuration du tube entraînant sa ruine. Ce phénomène est accentué par la température, la pression et leurs variations dans le réseau.

L'étude de la dégradation du PEHD en présence de chlore revêt donc une importance cruciale, non seulement pour prolonger la durée de vie des matériaux polymères dans les environnements chlorés, mais aussi pour assurer la sécurité et la qualité des infrastructures.

Comprendre les mécanismes de cette dégradation permet d'adapter les matériaux aux conditions d'utilisation spécifiques et d'optimiser les processus de fabrication et de stabilisation. Cela contribue également à l'amélioration des performances du PEHD dans des environnements agressifs, notamment les risques de défaillances prématurées et les coûts de maintenance.

Le but de ce projet est de comprendre en profondeur les mécanismes par lesquels le chlore provoque la dégradation du PEHD, d'identifier les paramètres les plus influents dans ce processus et d'évaluer les conséquences de cette dégradation sur les propriétés mécaniques et physiques du polymère.

Notre travail est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre traite des généralités sur les polymères, en mettant l'accent sur le polyéthylène haute densité (PEHD).

Le deuxième chapitre explore le vieillissement thermique et chimique du PEHD, en incluant spécifiquement l'effet du chlore sur les canalisations en PEHD.

Dans le troisième chapitre, nous détaillons le matériau étudié ainsi que les études et procédures expérimentales.

Quant au **quatrième chapitre**, il est consacré aux résultats expérimentaux obtenus, suivis de leur analyse.

Enfin, on termine par **une conclusion générale**.

**CHAPITRE I : GENERALITES
SUR LES POLYMERES ET LE
PEHD EN PARTICULIER.**

I.1 Introduction

Les polymères, en tant que matériaux, sont connus depuis des décennies et ont été utilisés par l'homme pour répondre aux besoins de la vie quotidienne. Les polymères naturels, comme le bois et le cuir ont été parmi les premiers matériaux employés.

Au fil des années, les domaines d'utilisation des matériaux polymères se sont diversifiés, touchant de nombreux secteurs tels que le domaine médical, l'équipement pharmaceutique, l'industrie alimentaire, et même la fabrication d'appareils électroménagers. Leur excellente capacité de dissolution et leurs propriétés uniques en font des matériaux particulièrement adaptés aux applications électroniques. Ces polymères jouent un rôle crucial dans la conception de composants électroniques, grâce à leur flexibilité, leur légèreté et leur capacité à résister à divers environnements chimiques.

En raison de leur flexibilité et de leur résistance, les polymères tels que le polyéthylène sont utilisés pour la fabrication de tubes servant au transport de fluides (eau et gaz [1]).

L'objectif de ce chapitre est de fournir une explication approfondie sur les polymères et en particulier le polyéthylène haute densité (PEHD), en détaillant leurs structures, leurs différentes classifications, ainsi les divers domaines dans lesquels ils sont utilisés.

I.1 Historique

Le mot polymère désigne une catégorie de matériaux composés d'une chaîne macromoléculaire. Il a été utilisé pour la première fois par le chimiste Jöns Jacob Berzelius en 1832.

Ensuite, trois ans plus tard le chimiste français Henri Victor Regnault, lors de ses préparations et recherches, en préparant du chlorure de vinyle en utilisant de dichlore Cl_2 et de l'éthylène, a observé la formation d'une poudre blanche à structure non cristalline qui se transformait.

Dans les années 1860, un concours a été lancé dans le but de trouver une substance pour remplacer l'ivoire des boules de billard, et John Wesley Hyatt et son frère faisaient partie des chercheurs qui y ont participé. Après des années d'expérimentations, ils ont inventé une matière plastique en mélangeant de la nitrocellulose et du camphre.

En 1907, le premier polymère entièrement synthétisé a été réalisé par Leo Baekelan

Hermann Staudinger nommé le père de la chimie macromoléculaire, a développé la théorie des polymères. Cette innovation a conduit à une utilisation vaste des polymères dans différents domaines.

En 1977, les professeurs Mac Diarmid Heeger et Shirakawa ont fait une découverte ; ils ont montré qu'il est possible de moduler la conductivité électrique du polyacétylène, permettant ainsi au polymère de passer de l'état isolant à l'état conducteur.

Aujourd'hui, le polymère remplace divers matériaux dans de nombreuses applications.

I.2 Définition

Le terme "polymère" tire son origine du grec, où il se compose de deux parties : "polus" signifie "plusieurs" et "meros" signifie "partie" en français. Chimiquement, un polymère est un ensemble de macromolécules, qui peuvent être organiques ou inorganique.

Un polymère est une grande molécule formée par l'assemblage d'unités fondamentales appelées monomère. Le mot monomère en grec se divise en deux mots, monos : un(e) seul(e) et meros : partie. Ainsi le monomère est l'élément de base, composé lui-même de plusieurs molécules simples, reliée entre elles par des liaisons covalentes. La formule de polymère est symbolisée par celle de l'unité répétitive. Lorsque deux monomères ou plus réagissent entre eux, ils forment un polymère [2].

On indique le degré de polymérisation d'un polymère par l'indice $\langle n \rangle$, qui représente également le nombre de monomères constituant chaque chaîne de polymère. Plus cet indice est élevée, plus la chaîne de polymère est longue et complexe. Lorsque l'indice est inférieur à une dizaine, on parle d'oligomères.

Chaque polymère a des propriétés qui dépendent toujours de la structure et de la nature des monomères, ainsi que de la masse moléculaire et des types de liaisons entre les macromolécules.

Dans les polymères linéaires, comme le polyéthylène, les macromolécules sont indépendantes et se relient entre elles sans liaisons chimiques. La cohésion de ces polymères est assurée par des interactions physiques, telles que les liaisons de Van der Waals, qui diminuent lorsque la température augmente.

En revanche, dans les polymères réticulés, les macromolécules sont maintenues entre elles par des liaisons chimiques covalentes de manière permanente. Ces liaisons se forment généralement par chauffage en présence d'un catalyseur ou par irradiation [1].

Tableau I-1: Quelques polymères avec leurs domaines d'utilisation.

Polymères	Domaines d'utilisation	Exemple
Polystyrène	Emballages alimentaire Industrie de bâtiment	Gobelets en polystyrène. Les panneaux de revêtement
Téflon	Revêtement antiadhésifs joints étanchéités, câbles ...	Casseroles avec revêtement antiadhésifs en téflon
Polypropylène	Pièces automobile, textile	Tapis en polypropylène
Polycarbonate	Domaine médical Vitre de sécurité	Lentille de lunette

I.3 Structure d'un polymère

Les matériaux polymères sont largement utilisés dans différents domaines en raison de leurs diverses propriétés et leur structure spécifique, qui dépend de la nature des atomes qui les composent.

I.3.1 La structure chimique

La structure chimique d'une macromolécule est déterminée par plusieurs facteurs :

- le type d'atome et sa disposition : la manière dont les atomes sont arrangé le long de la chaîne polymère ;
- le type et la longueur des ramifications ;
- la masse molaire et l'arrangement spatial.

Les macromolécules sont composées d'une chaîne principale appelée squelette, formée par la répétition de monomères, sur laquelle se fixent des substituants (groupes d'atomes). Les substituants ont une structure différente de celle de la chaîne principale, certains peuvent renforcer la structure et la rendre plus rigide et stable, tandis que d'autres peuvent l'affaiblir en perturbant la régularité du squelette.

Les atomes dans une macromolécule sont liés par différentes liaisons, telles que les liaisons covalentes ou ioniques, ainsi que par des liaisons physiques, telles que les liaisons secondaires. On trouve également les liaisons physiques de type Van der Waals, qui assurent le maintien de la structure des polymères en fournissant une cohésion supplémentaire entre les

chaînes macromoléculaires. Cependant, ces liaisons sont très faibles comparées aux liaisons chimiques [2].

I.3.2 Structure physique

La structure physique d'un polymère décrit l'architecture des atomes et la façon dont ils s'organisent au sein de la macromolécule. Ces macromolécules peuvent adopter plusieurs formes en se repliant ou en effectuant des rotations autour de leurs liaisons, dans le but de minimiser l'énergie nécessaire pour leur structuration.

On distingue deux structures principales dans un polymère : d'une part, l'état amorphe, où les chaînes sont désordonnées, et d'autre part, l'état cristallin, où les chaînes sont organisées de manière régulière. Un mélange de ces deux états donne une structure semi-cristalline [2].

I.4 Classification des polymères

Les polymères sont classés selon différents paramètres ;

I.4.1 La composition

Les homopolymères : Ils sont constitués de longues chaînes composées de la répétition d'un motif de base appelé monomère. Leurs propriétés, qu'elles soient mécaniques, optiques ou de barrière, dépendent de la nature et de la structure chimique de ce monomère, ainsi que de la longueur de ces chaînes [3].

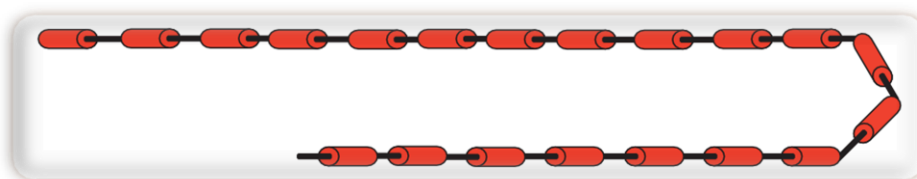


Figure I-1: Présentation schématique d'un homopolymère [4].

Les copolymères : On distingue trois types de copolymères : le copolymère statistique, le copolymère séquencé et le copolymère alterné. Ils sont constitués de motifs différents qui se répètent de manière spécifique [5].

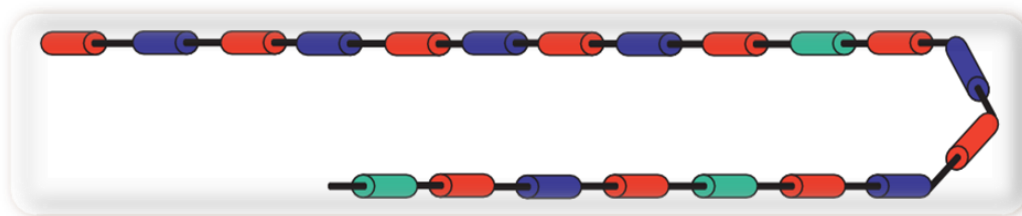


Figure I-2 : Présentation schématique d'un copolymère [4].

I.4.2 L'origine

Polymères naturels : On les trouve partout autour de nous dans notre vie quotidienne. La plus importante famille est celle de polysaccharides qui sont des glucides complexes, Constitue d'un grand nombre de sucre simple reliés entre eux par des liaisons glycosidiques. On trouve aussi les polypeptides ou les protéines comme dans la laines, la sois, les chevaux et les angles, etc.

Ces polymères se présentent également dans des résines végétales comme la colophane, ainsi que la résine animale telle que la colle d'os et la peau de poisson, etc.

Polymères synthétiques : Ce Sont des polymères créés par l'êtrehumaine à partir de modifications chimiques des polymères naturels, par plusieurs méthodes comme la polymérisation spécifique.

Ces polymères synthétiques ce trouve dans diverse applications industrielle comme le polyamide (PA) utilise dans la fabrication de textiles et de différentes pièces mécaniques. Il y a aussi le polyuréthane, utilisé dans la fabrication de mousses isolantes et de peintures.

Polymères artificiels : Ce sont des macromolécules créées par des réactions chimiques contrôlées, adaptées à plusieurs applications industrielles, comme les secteurs d'automobile et de l'emballage.

I.4.3 Comportement thermique

Les élastomères : Également appelés polymère élastique car ils sont caractérisés par leur limite d'élasticité et une déformation à la rupture très élevée. Cette propriété leur permet de retrouver leur forme initiale après avoir été étirés ou bien déformés.

Il excite deux types d'élastomères : les élastomères saturés et les élastomères insaturés. Quelques exemples : le caoutchouc naturel, utilisé dans la fabrication de tubes et la silicone utiliser dans le secteur médical, notamment dans la fabrication des prothèses et d'implantes mammaires.

Les thermodurcissables : Ce sont des polymères avec véritables liaisons chimiques, formant une seule macromolécule qui durcit lorsqu'on les chauffe, sans fondre. Ils présentent plusieurs caractéristiques comme une grande stabilité thermique, une rigidité accrue et une excellente résistance. En raison de leurs propriétés mécaniques remarquable, ils sont largement utilisés dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans le secteur l'aérospatial, tels que pour les avions militaires et les hélicoptères.

On les trouve également dans l'industrie chimique, pour la fabrication de réservoirs de stockage et des tuyaux.

Les thermoplastiques : Un polymère thermoplastique est un ensemble de macromolécules capable de passer d'une phase solide à une phase liquide, sous l'effet de la température, avec la possibilité de revenir à son état initial après chaque changements, en modifions seulement les conditions. Cette transition permet de conserver ces fameux caractères, qui sont très nombreux, leur plasticité permet de les chauffer, les mouler dans des formes souhaitées puis les refroidir et les démouler pour obtenir des pièces aux formes variées, leur ductilité qui nous permet de les utiliser dans la fabrication de films et de fibres. de plus, leur résistance chimique, qui varie en fonction du type de polymère.

Les thermoplastiques sont utilisés dans plusieurs domaines comme l'emballage alimentaire (par exemple les bouteilles d'eau et l'emballage les produits laitiers). Ils servent également à la fabrication de câbles et des panneaux isolants.

I.4.4 La morphologie

Amorphe : Comme le polycarbonate et le polystyrène, ces polymères présentent une structure désordonnée à l'échelle atomique ou moléculaire, ce qui empêche la formation de régions cristallines et leur confère une apparence homogène et transparente. Les polymères amorphes possèdent des propriétés mécaniques particulières : ils sont plus flexibles, plus souples et moins rigides que les polymères cristallins, avec une température de transition vitreuse plus basse. De plus, ils peuvent offrir une excellente résistance aux chocs [4].



Figure I-3: Structure d'un polymère amorphe [4].

Cristallin : Ces polymères possèdent une structure régulière qui leur confère une organisation tridimensionnelle ordonnée, comme c'est le cas pour le polyoxyméthylène et du polypropylène. Ils se distinguent par des caractéristiques telles qu'une rigidité accrue et une grande stabilité thermique. En raison de ces propriétés, ils sont utilisés dans divers secteurs, tout comme d'autres polymères.



Figure I-4: Structure d'un polymère cristallin [4].

I.4.5 La Structure

Linéaire Les polymères linéaires sont constitués de chaînes macromoléculaires composées d'un grand nombre mais limité d'unités monomères. Une macromolécule linéaire peut être représentée par une ligne continue, divisée en sections, chaque section représentant une unité monomère [6].

Ramifié : Ce sont des polymères dont les chaînes sont constituées de monomères ramifiés, qui sont attachés à la chaîne principale, comme le polyéthylène basse densité (PEBD).

Réticulé : Il existe dans la nature certains polymères réticulés, tels que le caoutchouc naturel, produit par certaines plantes, ainsi que la cellulose. La structure de ces polymères se caractérise par des chaînes individuelles interconnectées par des liaisons covalentes, formées lors de la polymérisation des monomères.

I.5 Les propriétés de polymères

Les polymères présentent une variété de propriétés qui déterminent leur utilisation, notamment des propriétés physiques, thermiques et mécaniques. Dans les sections suivantes, nous explorons ces principales caractéristiques des polymères.

I.5.1 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.5.2 Physiques

Les propriétés physiques d'un polymère influencent son comportement. Parmi ces propriétés, la masse volumique indique la masse du matériau par unité de volume. Les polymères peuvent être classés en deux catégories : les polymères techniques et les polymères à usage structurel.

Les polymères techniques sont utilisés dans divers domaines, tels que l'automobile et l'électronique, en raison de leurs propriétés spécifiques. Ils résistent aux contraintes mécaniques et offrent une bonne stabilité thermique. Cependant, leur isolation thermique est moyenne, sauf lorsqu'ils forment des mousses [7].

I.5.3 Thermique

Les polymères passent de l'état solide à l'état liquide lorsqu'ils atteignent une température précise, propre à chaque polymère. Cette température est appelée la température de fusion. Il existe également la température de transition vitreuse. Ces deux températures sont fondamentales dans l'étude des matériaux polymères, car elles définissent des seuils où aucune force de cohésion significative, autre que l'enchevêtrement des chaînes moléculaires, n'existe.

Ces températures, ainsi que d'autres, peuvent être classées de la manière suivante :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.

I.6 La polymérisation d'un polymère

Les polymères sont synthétisés à partir de petites unités répétitives appelées monomères, qui ont une très faible masse moléculaire. Leur création repose sur deux grands procédés : la polycondensation et la polymérisation [8].

I.6.1 Polymérisation en chaîne

La polymérisation en chaîne est un processus chimique au cours duquel un monomère (M) est ajouté à un centre actif présent sur la chaîne en cours d'extension. Si l'on désigne une chaîne (M*) comprenant un nombre successif de monomères avec un centre actif, cette réaction peut être schématisée comme suit :



M : un monomère non activé ;

n : est le nombre initial de monomère dans la chaîne polymère avant la réaction.

Le symbole de (*) indique un électron non apparié et son emplacement sur la chaîne moléculaire. Cet électron peut former une nouvelle liaison, entraînant ainsi une augmentation de la taille de la chaîne.

La polymérisation en chaîne se déroule en trois étapes : l'initiation (ou amorçage), la propagation et enfin la terminaison.

Ce type de polymérisation peut être classé en deux groupes selon la nature du centre actif :

- la polymérisation radicalaire ;
- la polymérisation ionique.

I.6.2 Polycondensation (polymérisation en étapes)

Pour obtenir des polymères on utilise un mécanisme fondamental appelé polycondensation. Cette réaction chimique implique des monomères possédant des groupes fonctionnels. Elle conduit à la formation de longues chaînes moléculaires, appelées polycondensats.

Les monomères se lient entre eux en éliminant de petites molécules, tel que l'eau. Ce processus est appelé condensation et implique les groupes fonctionnels présents à la fois sur les molécules de monomères et sur les molécules de polymères en formation.

I.7 Masse molaire et degré de polymérisation

Les polymères se caractérisent par leur masse moléculaire (M) et leur degré de polymérisation (DP).

Le degré de polymérisation (DP) est le nombre d'unités monomères identiques liées ensemble pour former une chaîne macromoléculaire.

Il se calcule comme suit :

$$DP = \frac{M_n}{M_m} \quad (2)$$

M_n : La masse moléculaire moyenne du polymère.

M_m : La masse moléculaire du monomère.

La masse moléculaire d'un polymère est liée à son degré de polymérisation : plus les chaînes de polymère contiennent d'unités monomères, plus leur masse moléculaire augmente. Elle peut être calculée de deux façons :

- M_w : Masse moléculaire moyenne de toutes les macromolécules présentes dans le matériau.
- M_n : Masse moléculaire la plus courante dans le mélange.
- N_i : Nombre de chaînes polymériques.

$$M_n = \frac{\sum M_i M_i}{\sum N_i} \quad (3)$$

$$M_w = \frac{\sum N_i M_i^2}{\sum N_i M_i} \quad (4)$$

Lorsque $M_n = M_w$ signifie que toutes les chaînes moléculaires du matériau ont la même masse moléculaire et le même nombre d'unités répétées, c'est-à-dire le même degré de polymérisation [8].

I.8 Généralité sur le polyéthylène

I.8.1 Présentation

Le polyéthylène a été découvert par les chercheurs Reginald Gibson et Eric William en 1933. Le terme "polyéthylène" est utilisé pour désigner les polyoléfines issues de la

Polymérisation de l'éthylène. Il s'agit de l'un des polymères les plus utilisés dans divers domaines, en raison de son faible coût de production et de ses excellentes caractéristiques [2].

I.8.2 Structure et morphologie de polyéthylène

La structure d'un polymère semi-cristallin se manifeste à différentes échelles, comme la montre la figure ci-dessous.

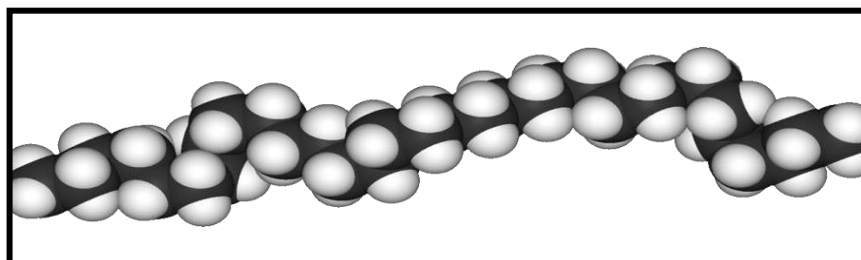


Figure I-5: Structure moléculaire d'un polyéthylène [9].

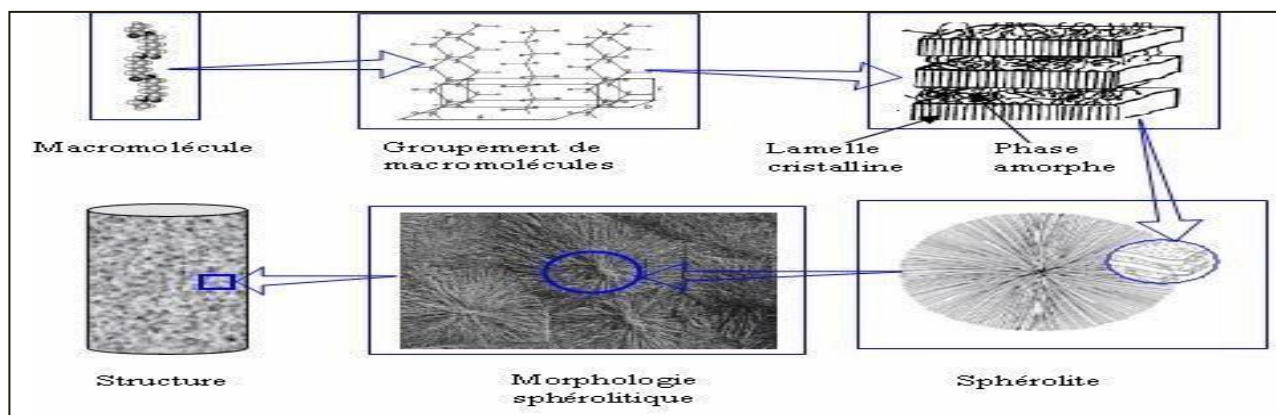


Figure I-6: Représentation multi échelle de la morphologie microstructurale des polymères semi-cristallins [15].

Des lamelles cristallines d'une épaisseur d'environ 10 nm se forment par l'arrangement parallèle des chaînes macromoléculaires, respectant une certaine périodicité. L'épaisseur et la rigidité des lamelles varient en fonction des conditions de cristallisation et de la rigidité des chaînes.

Les lamelles sont reliées entre elles par des morceaux de chaînes macromoléculaires provenant d'autres lamelles, appelées chaînes de liaison. Lorsque les chaînes macromoléculaires sont mal repliées, elles forment des repliements, qui se situent généralement à la périphérie des lamelles. Les chaînes liées, les extrémités de chaîne et les

impuretés ne peuvent pas cristalliser, ce qui donne lieu à une phase amorphe appelée phase amorphe semi-cristallisée.

Lors de la cristallisation, les lamelles cristallines s'organisent pour former des sphéroïdes, qui peuvent avoir une forme sphérique ou en éventail. Leur taille varie du micromètre au millimètre de diamètre, selon les conditions de refroidissement. Les sphéroïdes sont des structures cristallines qui se forment pendant le refroidissement. Ils sont composés d'un ensemble de cristallites radiaux encastrées dans une matrice amorphe. Les cristallites se croisent à partir de leur centre en trois dimensions pour former une structure sphérique, qui est maintenue jusqu'à ce qu'elle se lie à un autre sphéroïde [15].

I.8.3 Propriétés générales du polyéthylène

➤ La viscoélasticité

La viscosité est l'une des principales propriétés du polyéthylène. Si l'on considère une relation linéaire de la viscosité, cela signifie que le matériau présente un comportement viscoélastique, combinant à la fois des caractéristiques élastiques (solides) et visqueuses (liquides), qui coexistent simultanément. Cela signifie également que, durant la déformation d'un matériau viscoélastique, la relation entre contrainte et déformation reste constante [11].

La viscoélasticité linéaire est un phénomène complexe qui caractérise le comportement à la fois élastique et dissipatif d'un matériau, même en cas de petites déformations. Une compréhension approfondie des mécanismes d'un polymère à l'échelle moléculaire permet de mieux appréhender le phénomène de dissipation dans ces matériaux et de déterminer l'impact des divers facteurs qui doivent être respectés et pris en compte lors de l'analyse de la viscoélasticité [12].

➤ La limite élastique

Les polymères se comportent différemment en fonction de leur limite élastique. Certains, comme les polymères fragiles, ne présentent pas de limite élastique et se rompent sans en atteindre une. Ils se déforment de manière viscoélastique jusqu'à un certain point sous l'effet des contraintes. En revanche, les élastomères présentent une grande élasticité, pouvant subir de fortes déformations sans se rompre [11].

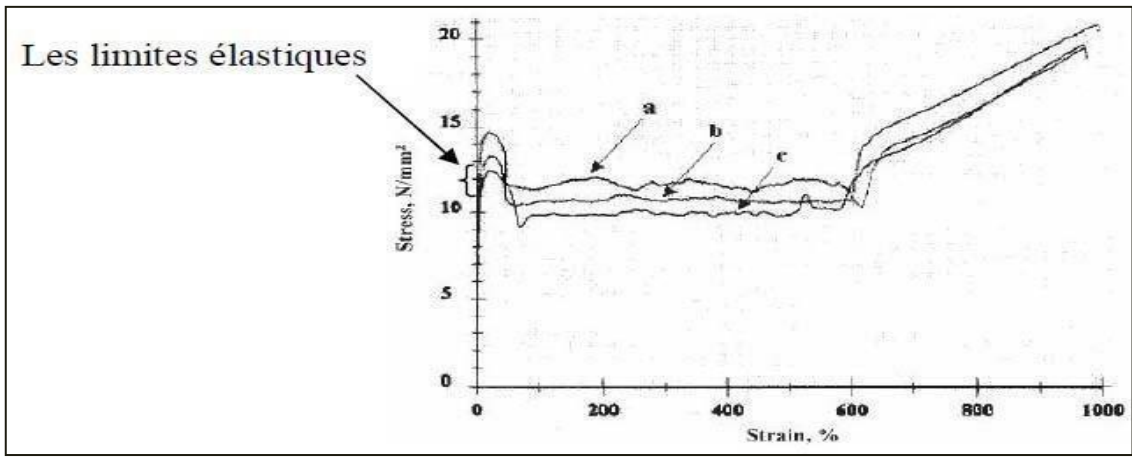


Figure I-7: Comparaison des courbes à l'intérieure aux milieux et l'extérieure des couche d'un tube en PEHD (a : à l'extérieur, b : au milieu, c : à l'intérieur).

La courbe ci-dessous illustre le comportement mécanique des polymères semi-cristallins. On observe que la limite élastique de ces polymères varie en fonction des régions cristallines et amorphes. Les couches internes (les plus cristallines) présentent une résistance accrue par rapport aux couches externes (plus amorphe).

➤ Propriétés physique

Les graphes dans la figure ci-dessous illustre l'évolution de diverses propriétés physiques des matériaux amorphes, cristallins et semi-cristallins en fonction de la température.

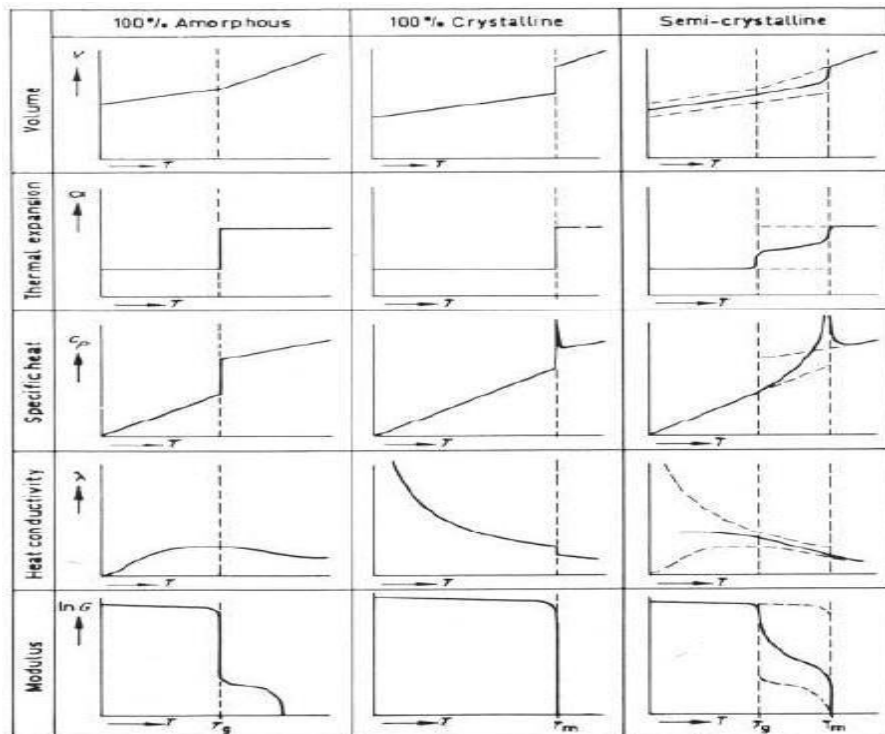


Figure I-8: l'évolution de quelques propriétés physiques de différents matériaux en fonction de la température [14].

I.8.4 La plasticité d'un polyéthylène

Différentes études ont été réalisées sur la plasticité des polymères semi-cristallins, elles ont révélé que la déformation plastique de ces matériaux, dans l'intervalle de température compris entre la transition vitreuse et la fusion cristalline, est généralement inhomogène aux échelles micro et macroscopique. Cette inhomogénéité est due au fait que la déformation affecte à la fois les phases amorphe et cristalline.

Le processus de cette déformation s'effectue en plusieurs étapes, décrites ci-après :

Déformation de la phase amorphe : La première étape consiste en la déformation de la phase amorphe du matériau. Les chaînes polymères dans cette région sont moins organisées et plus flexibles, ce qui les rend plus aptes à se déformer sous l'effet d'une contrainte appliquée. Cette déformation préliminaire permet de redistribuer les charges et de transférer les contraintes mécaniques vers les parties cristallines du matériau.

Fibrillation : Sous l'effet des contraintes accrues, un phénomène de fibrillation se produit dans la structure du matériau. Cela correspond à la formation de fines structures fibrillaires au sein du polymère, principalement dans les zones cristallines, renforçant ainsi la résistance globale du matériau.

Formation de cavités : Avec la déformation continue, des cavités ou micro-vides commencent à se former. Ces cavités apparaissent généralement dans les zones amorphes et cristallines du matériau, là où les contraintes sont les plus concentrées.

Expansion de la zone plastique : L'étape suivante est l'expansion de la zone plastique autour des cavités nouvellement formées. Cette expansion entraîne une redistribution des contraintes et permet une meilleure absorption de l'énergie mécanique dans le matériau.

Augmentation de la consommation d'énergie : À mesure que la zone plastique s'étend, la consommation d'énergie pour continuer à déformer le matériau augmente. Les cavités et les fibrilles continuent de se former et de s'étendre, augmentant ainsi la dissipation de l'énergie sous forme de chaleur et de travail mécanique dans le matériau.

Rupture ou endommagement final : Si les contraintes sont maintenues ou augmentées, le matériau finit par atteindre un point critique où la propagation des cavités et la fibrillation ne peuvent plus absorber suffisamment d'énergie. Cela conduit à la rupture finale ou à une défaillance structurelle [13].

I.8.5 comportement thermique d'un polyéthylène

Le polyéthylène passe d'une phase amorphe à une phase cristalline en fonction de la température. Par conséquent, il possède deux températures caractéristiques importantes :

- **Température de transition vitreuse (Tg) :** La température de transition vitreuse marque la limite entre l'état caoutchouteux et l'état vitreux du polymère. En dessous de cette température, le polymère devient plus rigide et fragile, tandis qu'au-dessus de la Tg, il devient plus flexible et présente des propriétés caoutchouteuses.
- **Température de fusion (Tm) :** Au-delà de la température de fusion, ces polymères passent à l'état liquide, permettant à leurs chaînes macromoléculaires de se déplacer librement les unes par rapport aux autres.

I.9.6 Les différents types d'un polyéthylène

Le polyéthylène existe sous différentes formes, classées en fonction de leur densité, laquelle dépend de la longueur et la ramification de chaînes moléculaires. Les principales formes sont [10]:

- Polyéthylène haute densité (PEHD) ;
- Polyéthylène basse densité (PEBD) ;
- Polyéthylène basse densité linéaire (PEBDL).

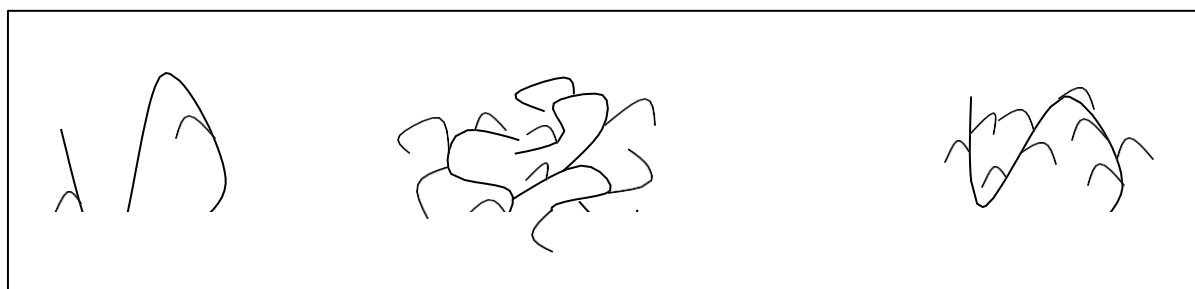


Figure I-9: Les différents types de polyéthylène [10].

Tableau I-2: Les principales propriétés de différents types de polyéthylène.

Propriétés	Unités	PEBD	PEBDL	PEHD
Masse volumique	$g.cm^3$	0.915 à 0.935	0.93 à 0.945	0.945 à 0.970
Cristallinité	%	<40	40 à 60	60 à 80
Température de fusion	°C	105 à 115	—	118 à 146

Températures de transition vitreuse	°C	-133 à -103	—	-120
Contrainte à la rupture	MPa	8 à 15	18 à 28	26 à 40
Allongement à la rupture	%	150 à 1000	200 à 1200	20 à 1000

I.10 Le polyéthylène à haute densité

I.8.6 Présentation

Le Polyéthylène à haute densité (PEHD) est un polymère synthétisé sous faible pression par grâce au procédé Ziegler-Natta. Il se caractérise par une structure linéaire régulière. Cependant, il peut contenir de courtes ramifications issues de la synthèse, représentant environ 1 % de carbone restant attaché à la chaîne principale [15].

I.8.7 Les propriétés du PEHD

➤ Propriétés mécaniques

Le PEHD est un polymère semi-cristallin qui présente des propriétés très spécifiques qui varient en fonction de sa densité, cette dernière influençant l'augmentation de la rigidité et de la dureté. La rigidité du PEHD est mesurée à l'aide du module d'élasticité, également appelé module de Young, qui est généralement d'environ 1600 MPa. La dureté du PEHD est évaluée à l'aide de l'échelle de dureté Shore-D, où elle varie généralement autour de 60. Sa température de transition vitreuse (T_g) étant faible, le PEHD résiste bien aux basses températures ($< 0^\circ\text{C}$), aux chocs et à l'abrasion.

Remarque : Une masse molaire plus élevée améliore la résistance des matériaux. De plus, un polyéthylène avec une faible cristallinité absorbe mieux l'énergie des chocs, ce qui lui confère une meilleure résistance aux impacts [19].

➤ Propriétés thermiques

Le PEHD présente une bonne résistance à la chaleur, avec un point de fusion variant entre 120°C et 136°C . Au-delà de cette température, il passe de l'état cristallin (solide) à l'état fondu. Étant un bon conducteur thermique grâce à sa structure, sa conductivité thermique est d'environ $0,33$ à $0,53 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

➤ Propriétés chimiques

Le PEHD présente une structure paraffinique apolaire, qui ne possède pas de charges électriques nettes, ce qui lui confère une résistance aux acides et aux agents chimiques. Sa nature cristalline et sa masse moléculaire élevée le rendent plus stable et réduisent sa réactivité chimique avec d'autres substances (comme les acides inorganiques et les solutions salines). Bien qu'il ne soit pas résistant aux acides nitriques concentrés (oxydants). En raison de sa structure, le PEHD gonfle dans les hydrocarbures aliphatique et aromatique tels que l'heptane et le toluène (absorbant de petites quantités de ces liquides), ce qui le rend principalement adapté à certaines applications industrielles et domestiques. À des températures élevées, le PEHD se dissout partiellement dans certains solvants. L'absorption d'eau par le PE est extrêmement faible, oscillant entre 0,1 % et 0,5 %.

➤ Propriétés électriques

Le polythène est un polymère thermoplastique, il possède d'excellentes propriétés électriques.

1- Isolant électrique : le PEHD possède une rigidité électrique élevée, ce qui empêche le passage de l'électricité et de la chaleur, en faisant ainsi un excellent isolant.

2- faible facteur de perte diélectrique : Il a un faible facteur de perte diélectrique, ce qui signifie qu'il dissipe peu d'énergie sous l'effet d'un champ électrique [1].

Tableau I-3 : Propriétés électrique de PEHD [1].

Résistivité $\Omega.cm$	Rigidité diélectrique KV/mm	Constante diélectrique $a10^6.HZ$	Facteur de perte $10^6.HZ$	Résistivité à l'arc
10^8	18 à 24	2.3	3 à 5	190

I.8.8 Avantages et inconvénients**Tableau I-4: Avantages et inconvénients de PEHD [4].**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Résistance aux chocs- Maniabilité- Haute résistance à l'usure- Isolation électrique	<ul style="list-style-type: none">- Mauvaise tenue à la chaleur- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène- Sensibilité à la fissuration sous contrainte- Collage important

Chapitre II :
Vieillessement chimique et
thermique du PEHD.

II.1 INTRODUCTION

Les canalisations en PEHD jouent un rôle de plus en plus important dans les réseaux de distribution d'eau potable.

Au fil du temps, les thermoplastiques subissent un processus de vieillissement qui conduit généralement à une altération souvent irréversible de leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques. Cette dégradation détermine ce que l'on appelle la durée de vie du matériau, définie comme la période nécessaire pour qu'une propriété atteigne un niveau critique en dessous duquel le matériau ne conserve plus les caractéristiques initialement prévues.

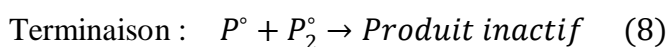
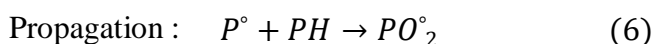
II.1 Définition

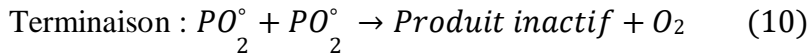
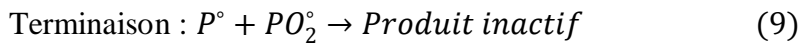
Le vieillissement des polymères fait référence aux modifications ou ajustements lents et irréversibles qui affectent leurs propriétés au fil du temps. Ce processus est directement lié à la durée de vie de matériaux c'est à dire le temps nécessaire pour qu'une propriété atteigne un seuil critique, en dessous duquel les caractéristiques attendues du matériau ne sont plus maintenues, entraînant une instabilité intrinsèque. Ces ajustements peuvent influencer la configuration chimique des macromolécules (vieillessement chimique), la constitution du matériau, l'état physique, tel que le taux de cristallinité et les contraintes internes [18].

Tout matériau subit des changements physicochimiques au fil de temps, à des vitesses plus au moins rapides, selon leurs structures moléculaires, les conditions d'utilisation et de l'environnement extérieur

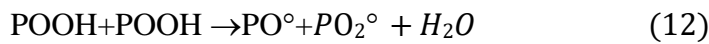
II.2 Mécanisme de vieillissement du PEHD

La compréhension du phénomène de vieillissement des matériaux est obligatoire pour assurer leur durabilité et leurs performances tout au long de leur existence. Pour cela un schéma est établi par les chercheurs depuis l'année 1940, toujours utilisé aujourd'hui, décrit une réaction radicalaire en chaîne en six étapes élémentaires :





Des équipes de recherches se sont intéressées par ce schéma et ont tenté de l'améliorer, il est apparu qu'il était essentiel de prendre en compte la ramification en décomposant les hydroperoxydes de la manière suivante:



Cette découverte a rendu la résolution des équations du schéma précédent plus complexe. On raison du manque de sophistication des outils de calcul de L'époque, les chercheurs ont dû établir des hypothèses pour simplifier le modèle, voici quelques-unes [17] :

- L'état stationnaire.
- Les longues chaînes cinétiques.
- Des relations mathématiques entre les constantes de vitesse de terminaison.

II.3 Mode de vieillissement

II.3.1 Vieillessement naturel

Les caractéristiques des plastiques ont tendance à se dégrader progressivement, souvent de manière irréversible avec le temps. Ce phénomène peut se manifester par un changement de couleur, parfois attribué aux colorants intégrés dans le matériau. Cette dégradation peut également entraîner une fragilisation, susceptible de provoquer des fissures au même la désintégration des objets en poussière.

Dans le domaine des isolants utilisés dans les machines électriques, il est également observé que certains PVC peuvent présenter une instabilité lorsqu'ils sont stockés dans des conditions d'obscurité. Cette instabilité peut se manifester par l'émission de mauvaises odeurs, un phénomène qui s'accélère après une phase initiale d'induction lente, principalement due à la formation de peroxydes.

Les variations climatiques, telles que l'exposition aux rayons solaires, à l'humidité et à la chaleur, peuvent altérer les propriétés mécaniques des matériaux polymères ainsi que leur apparence extérieure. Ces facteurs environnementaux accélèrent le vieillissement des polymères, provoquant des dégradations qui affectent leur résistance mécanique leur flexibilité et leur couleur:

- Réduction de la contrainte à la rupture
- Altération des propriétés mécaniques.
- Changement de la rigidité au fil du temps.
- Changement de couleur ou décoration du matériau.
- Apparition de fissures en surface et de dépôts de particule fines [22].

II.3.2 Vieillessement artificiel

Pour comprendre le processus de vieillissement des polymères, il est essentiel d'observer leur évolution tout au long de leur durée de vie. Cependant, comme cette durée peut s'étendre sur plusieurs décennies, il est nécessaire d'utiliser des méthodes accélérées en laboratoire afin de rendre cette évolution compatible avec nos échelles d'analyse. Pour cela des dispositifs spécifiques ont été développés pour simuler ces conditions de vieillissement. Voici quelques exemples :

- Chambres climatiques : elles permettent de contrôler des paramètres tels que la température, l'humidité et la lumière UV, afin de simuler les conditions de vieillissement climatique.
- Étuves thermiques : utilisées pour accélérer le vieillissement thermique en soumettant les échantillons à des températures élevées sur des périodes prolongées.
- Testeurs de rayons UV : ils reproduisent l'exposition aux rayons ultraviolets, imitant les effets du soleil sur les polymères.
- Appareils de fatigue mécanique : ils simulent les contraintes mécaniques répétées, accélérant ainsi la dégradation structurelle des matériaux [23-24].

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 est un processus de dégradation des polymères, également appelé aussi relaxation structurelle. Il entraîne des modifications significatives sur les

propriétés physiques de la phase amorphe d'un polymère vitreux ou partiellement vitreux [5], sans affecté la structure chimique, il se produit généralement autour de la température vitreuse.

On peut distinguer deux types de vieillissement physique :

II.4.1.1 Vieillessement avec transfert de masse

Par absorption du solvant : La sensibilité d'un adhésif aux solvants tels que l'eau, dépend du les polarités de ces groupements chimiques. En général, les molécules de solvant pénètrent dans le polymère, ce qui cause une augmentation de sa masse globale, ce qu'on appelle aussi le gonflement.

Au début du vieillissement, le volume de solvant absorbé est inférieur à celui de l'eau dans la matrice. Toutefois, ce phénomène est toujours lié et conditionné par la capacité du solvant.

Après l'introduction des molécules de solvant dans les polymères, une plastification se manifeste, entraînant des perturbations qui affaiblissent, voire détruisent, les liaisons secondaires entre les chaînes, responsables de la cohésion des matériaux. En effet, l'eau diminue la cohésion mécanique et augmente la mobilité moléculaire.

La plastification pure est considérée comme un processus réversible. Cependant, en pratique, elle provoque des réorganisations internes qui facilitent la relaxation des contraintes internes. Ce phénomène survient généralement lorsque les matériaux contiennent des chaînes de faible masse moléculaire ou présentent un faible degré de cristallinité.

A noter également que la plastification se manifeste par une modification des propriétés mécaniques du matériau, se traduisant par une diminution de la température de transition vitreuse, marquant ainsi le passage du domaine élastique au domaine viscoélastique [17].

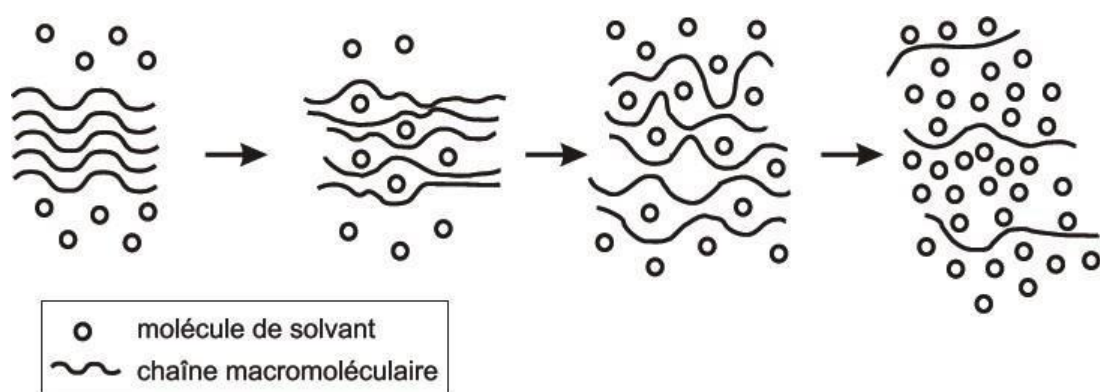


Figure II-1: schématisation de la pénétration de solvant dans un polymère [17].

La disparition d'adjuvant : Les polymères sont des matériaux constitués généralement de substances organiques de faible masse moléculaire. Ces substances peuvent migrer hors

du matériau sous l'influence de la température, à des vitesses variables. La migration des plastifiants peut entraîner des pertes importantes, ce qui peut avoir un impact significatif sur les propriétés du matériau, notamment ses propriétés mécaniques. Dans le cas des plastifiants, on observe une diminution de l'allongement à la rupture. En effet, on ajoute des plastifiants aux polymères dans le but de les rendre plus souples et flexibles. Cependant, cette flexibilité peut entraîner une diminution de l'allongement, c'est-à-dire de la capacité du matériau à se déformer avant de se rompre.

La migration des adjuvants est influencée par plusieurs mécanismes, qui varient en fonction du type d'adjuvant et du matériau dans lequel il est incorporé [17].

On présente dans la figure ci-dessus quelques types de migration possibles au sein du matériau.

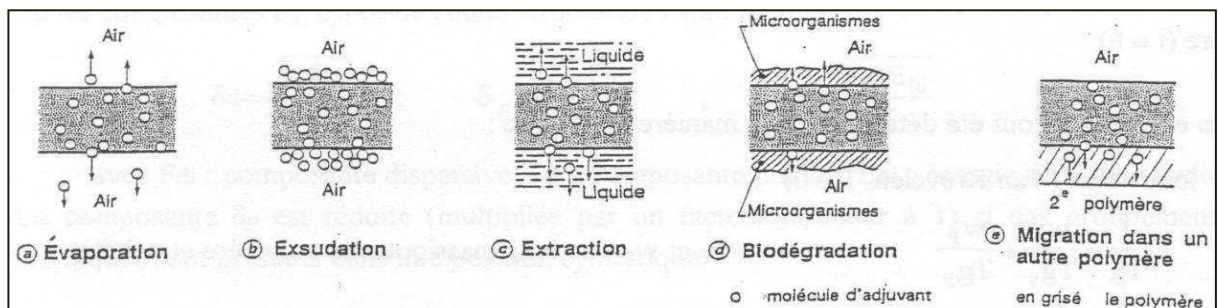


Figure II-2: Types de migration possibles au sein du matériau [17].

II.4.1.2 Vieillessement sans transfert de masse [20]

Par absorption d'eau : la réaction des matériaux polymères avec l'eau a des conséquences importantes sur leurs propriétés. Les effets observés lorsque le matériau absorbe l'eau sont liés à l'hydrophilie du polymère. Afin d'évaluer les propriétés hydrophiles d'un polymère et de comprendre son comportement en présence d'eau, on mesure sa teneur en eau, qui représente la quantité d'eau absorbée par le polymère comparée à sa masse totale, et elle s'exprime généralement en pourcentage massique.

$$W_m = (HR)^\alpha \quad (13)$$

W_m : Teneur en eau du polymère.

K : Constante spécifique au polymère.

HR : Humidité relative.

α : Exposant déterminé expérimentalement.

D'après la théorie de Van krevelen, la capacité d'un groupement chimique à retenir les molécules d'eau ne varie pas en fonction de la structure dans laquelle il se trouve. L'absorption d'eau par un polymère est considérée comme une fonction molaire additive. Pour cela, il propose une relation qui estime la quantité maximale d'eau qu'un polymère peut absorber :

$$W_m = H.1800/M \quad (14)$$

Où :

H : la quantité en mole de molécules d'eau absorbées par un polymère.

M : la masse molaire d'un polymère.

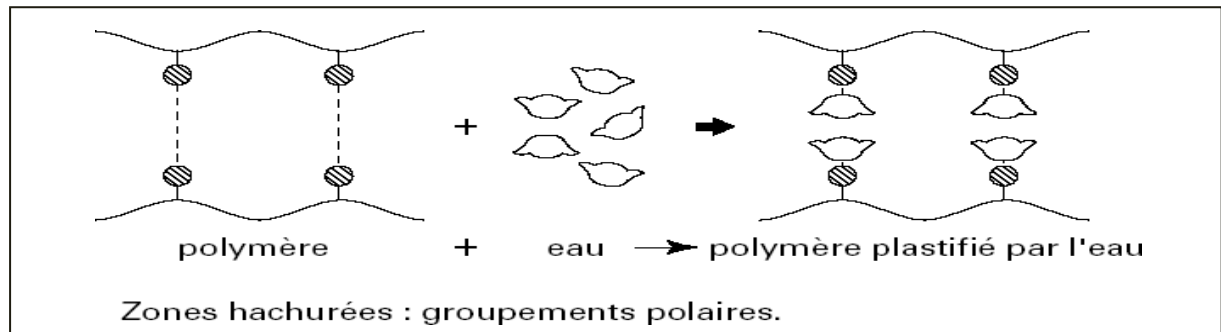


Figure II-3: Effet plastifiant des molécules sur un polymère.

II.4.2 vieillissement chimique

Le vieillissement chimique est généralement provoqué par des réactions chimiques qui se produisent progressivement entre les composants du matériau sous l'influence de leur environnement, causant des modifications sur la structure moléculaire et influencent sur la stabilité et les propriétés du matériau [17].

Le phénomène de vieillissement chimique est classé selon la cause externe qui le provoque :

II.4.2.1 Le vieillissement thermochimique

Il désigne tout processus chimique se produisant dans une atmosphère interne ou dans l'air, qui dépend principalement d'un paramètre externe : la température.

Cas particulier : lorsque la température augmente, cela provoque une accélération des réactions chimiques, donc on parle de pyrolyse [20].

II.4.2.2 Le vieillissement photochimique

L'étape fondamentale de processus de photochimique consiste à l'absorption d'énergie associée aux ondes électromagnétiques, appelées photon.

Ce dernier est considéré comme le point départ pour déclencher les réactions chimiques. Cela conduit l'espèce absorbante A vers un niveau électronique qui contient plus d'énergie $[A]^*$, c'est ainsi que les molécules peuvent avoir une réactivité qu'elles ne possédaient pas à l'état initial.



Où :

$h\nu$: est l'énergie du photon.

Quand la longueur d'onde dépasse les 300 nm, certains polymères n'absorbent pas dans l'ultraviolet [21].

II.4.2.3 Le vieillissement radiochimique

Est un processus de dégradation dont le matériau polymère subit des changements chimiques sous l'interaction avec des rayonnements lumineux tels que les rayons (X, α , γ et β ...)

L'interaction entre le polymère et le rayonnement commence toujours par la rupture homolytique d'une liaison latérale, ce qui forme un radical appelé : macro-radiale primaire [21].

Quand les polymères s'exposent à des rayonnements ionisants, des liaisons chimiques qui se forment, ainsi des radicaux. Ces derniers se réagissant entre eux, induisant des changements structuraux dans le matériau.

II.4.2.4 Les Processus communs entre le différent type de vieillissement chimique.

Tous les différents types de vieillissement chimique cités, ont un processus communs entre eux :

– Les coupures statistiques des chaînes [20]

La manière dont la coupure se produit dépend de l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons chimiques présentes dans la structure, permettant aussi de former deux chaînes polymères distinctes à partir d'une seule entité.

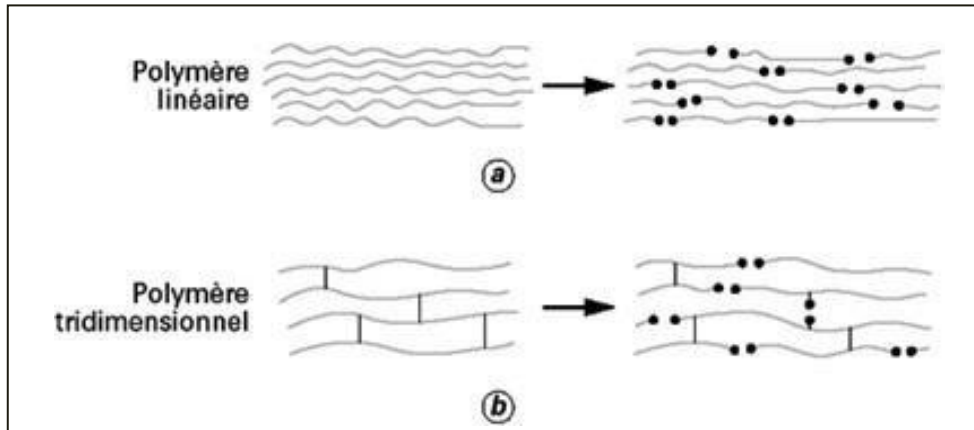


Figure II-4:Processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaire.

Certains polymères, comme le poly méthacrylate de méthyle (PMMA), le polypropylène (PP) et le polyoxyméthylène(POM), sont principalement sujets au processus de coupure de chaînes.

Contrairement aux autres polymères tridimensionnels, comme le polyéthylène (PE) et le polychlorure de vinyle (PVC), peuvent subir des coupures de chaîne et une réticulation à la fois.

La réticulation est la réaction inverse de la coupure de chaînes. Elle se caractérise par l’augmentation de la masse moléculaire résultant de la fusion de deux chaînes polymères distincts pour former une seule chaîne d’une taille importante.

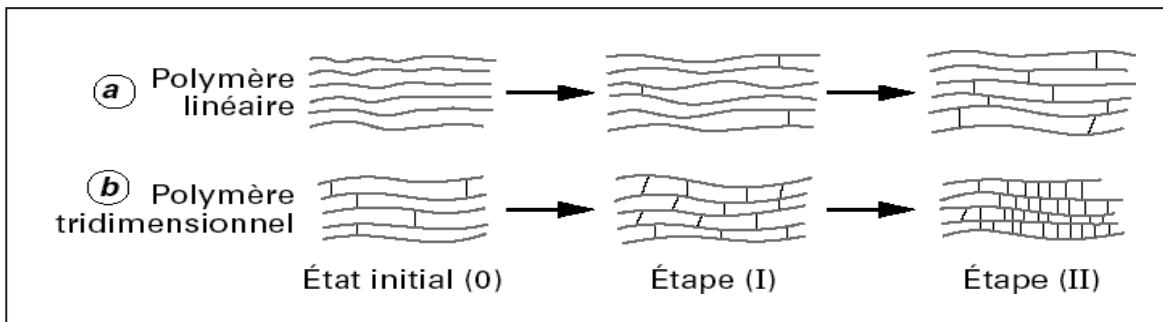


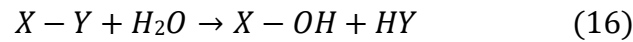
Figure II-5:Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel.

– Vieillessement par hydrolyse

C’est une réaction chimique produite lors de l’exposition de certains polymères à l’humidité, à l’eau ou à des conditions environnementales humides, dans laquelle les liaisons covalentes de ces polymères se rompent par l’eau ou des ions hydroxyde de OH^- .

Cette réaction entraîne la rupture des chaînes polymérique, qui conduire à une fragilisation à long terme du matériau et un changement de masse moléculaire.

La diminution de la masse moléculaire peut affecter les températures de transition vitreuse et de fusion du matériau.



Où :

$X - OH$: Est le produit formé lorsque le composite "X-Y" réagit avec l'eau. Il s'agit d'un alcool.

HY : est également un produit de la réaction. Sa nature spécifique dépend du composite initial HY [17].

Voici les étapes de l'hydrolyse des polymères :

- Absorption de l'eau : Les molécules d'eau pénètrent dans le polymère par un processus de diffusion, qui dépend de la structure du polymère et de la température ambiante. Les molécules d'eau se déplacent à travers les espaces entre les chaînes polymériques.
- Réaction chimique : Une fois pénétrées dans le polymère, les molécules d'eau réagissent avec ses liaisons chimiques. Cette réaction entraîne souvent la rupture des liaisons telles que les esters, amides, ou d'autres types de liaison.

II.4.3 Vieillessement thermique

Le vieillissement thermique est le processus par lequel les propriétés d'un polymère se détériorent en raison de l'exposition à des températures élevées. La plupart des polymères organiques connaissent une dégradation au-delà de 200 °C, tandis que les polymères thermoplastiques courants présentent une dégradation à des températures relativement basses. La dégradation d'un polymère thermodurcissable nécessite généralement une quantité d'énergie plus importante, par exemple, lors d'une pyrolyse [12].

Ce phénomène se manifeste par des changements dans la structure chimique et physique du matériau, tels que :

- **Rupture des liaisons chimiques** : Les températures élevées peuvent entraîner la rupture des liaisons chimiques au sein du polymère, modifiant ainsi sa structure et ses propriétés.

- **Oxydation** : L'exposition prolongée à la chaleur peut favoriser l'oxydation du polymère, conduisant à une dégradation supplémentaire des chaînes moléculaires.
- **Modification des propriétés mécaniques** : Le vieillissement thermique peut altérer la résistance, la flexibilité et la dureté du polymère, affectant ainsi sa performance.
- **Formation de produits de dégradation** : La dégradation thermique peut produire des fragments chimiques qui peuvent modifier les propriétés du polymère.

II.5 Vieillessement de polyéthylène au contact du chlore

Le vieillissement joue un rôle très important sur le comportement mécanique des polyéthylènes et surtout sur ses différentes propriétés.

Lors de la désinfection de l'eau par chloration, le chlore se transforme en acide hypochloreux, qui a pour effet de casser et de désorganiser les chaînes polymériques. En tant qu'agent oxydant puissant, le chlore peut dégrader les liaisons carbone-carbone des polymères, provoquant leur décomposition. Il est largement admis que l'oxygène singlet intervient comme intermédiaire réactif, capable d'oxyder les oléfines.

II.5.1 La désinfection au chlore

Le chlore a longtemps été l'un des premiers agents utilisés pour la désinfection de l'eau potable. Cependant, au cours des vingt dernières années, le dioxyde de chlore a également été introduit comme désinfectant dans certains réseaux de distribution d'eau potable, offrant une alternative pour certains systèmes.

Le chlore peut être employé sous trois formes distinctes :

- En tant que gaz chloré (Cl_2) stocké sous pression sous forme liquide, généralement contenu dans des bouteilles ou des réservoirs.
- Sous forme d'hypochlorite de sodium, également connu sous le nom d'eau de Javel ($NaOCl$), présent sous forme liquide.
- Sous forme d'hypochlorite de calcium ($Ca(ClO)_2 \cdot 2H_2O$), présente sous forme solide.

Dans tous les cas, le contact du désinfectant avec l'eau à traiter produit l'agent de désinfection actif, c'est-à-dire l'acide hypochloreux ($HClO$) [25].

II.5.2 L'impact des désinfectants sur les réseaux d'eau potable

Le chlore, étant très réactif, interagit avec divers matériaux, y compris le polyéthylène. Lorsqu'il est utilisé comme agent désinfectant dans l'eau, il peut entraîner des effets indésirables. Plus précisément, le dioxyde de chlore présent dans l'eau distribuée peut provoquer la dégradation des agents antioxydants incorporés dans le polyéthylène.

Les oxydants puissants présents dans l'eau traitée au chlore peuvent entraîner la dégradation des polymères en contact avec ces milieux par un processus d'oxydation. Lors de la désinfection de l'eau avec du chlore, l'acide hypochloreux se forme et a la capacité de rompre et de fragmenter les chaînes polymériques. En tant qu'agent oxydant puissant, le chlore peut efficacement dégrader les liaisons carbone-carbone des chaînes polymères, entraînant leur désintégration.

Selon plusieurs études, la détérioration des tuyaux en polyéthylène se produit généralement après l'épuisement des agents antioxydants. Cette diminution peut être inégale en raison de la migration naturelle des agents antioxydants depuis le polymère vers l'eau, ainsi que de leur consommation concomitante par le chlore.

II.5.2 L'oxydation du polyéthylène au contact du chlore

L'eau chlorée, souvent utilisée pour la détection de l'eau potable, peut effectivement avoir des effets dégradants sur les canalisations en polyéthylène haute densité qui la transportent. Lorsque l'eau chlorée circule à travers ces tuyaux, des réactions chimiques peuvent se produire à la surface du matériau, compromettant ainsi son intégrité structurale, entraînant la formation de radicaux libres, qui sont des espèces chimiques hautement réactives qui ont un électron non apparié. Ils se forment lorsque les liaisons du PE sont rompues par l'action du chlore. Ces radicaux libres peuvent ensuite réagir avec d'autres molécules de PE, provoquant des ruptures de chaînes et des modifications de la structure du polymère.

Dans la zone de dégradation, les liaisons inter-lamellaires des molécules se rompent, favorisant ainsi une augmentation de la stratification de la chaîne et une variation de la distribution de la masse molaire. Cette variation inclut une fragmentation des grandes chaînes polymères, entraînant une plus grande étendue du contenu cristallin et une distribution de masse molaire élargie.

Des microfissures se forment progressivement, initialement invisible, des fissures peuvent progressivement se rejoindre et se propager à travers la paroi du tuyau au fil du temps. Si la pression de l'eau dépasse la résistance mécanique du tuyau, ces microfissures peuvent causer

des fuites ou même un éclatement mécanique dramatique. Ces incidents peuvent engendrer des conséquences graves, allant de perturbations mineures à des inondations majeures.

L'étude sur l'oxydation des polymères ne s'arrête pas, En 2013, S.M. Mitroka et ses collègues ont observé que la première étape détectable dans la dégradation des tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD) dans une solution d'eau chlorée est la formation de groupements carbonyle. Ce groupement fonctionnel résulte directement de l'oxydation du polyéthylène et non de la décomposition d'un antioxydant. De plus, l'oxygène présent dans le carbonyle est généré par l'auto-oxydation du polymère, bien qu'il soit également possible qu'il y ait un échange nucléophile d'oxygène avec l'environnement aqueux.

La dégradation du polymère peut impliquer des ruptures le long de la chaîne, réduisant ainsi sa masse moléculaire, ce qui se traduit par des chaînes plus courtes. Ce processus peut générer des petites molécules volatiles, surtout si les ruptures se produisent près des extrémités des chaînes. De plus, la dégradation peut parfois conduire à des ramifications ou même à une réticulation du polymère.

Une altération des groupes latéraux de la chaîne polymère peut se produire, notamment :

- Les doubles liaisons peuvent réagir avec les radicaux, ce qui peut favoriser la réticulation du polymère.
- Des produits d'oxydation tels que les acides carboxyliques, les cétones, les aldéhydes, les esters, les lactones, etc., peuvent se former en conséquence de réactions d'oxydation

Tout autour d'une fissure principale, on observe des zones de matériau cassant caractérisées par la présence de petites fissures. Il est probable que ces zones correspondent à un polymère fortement dégradé, indiquant que la fissure principale s'est développée initialement dans une zone de matériau intact puis a cessé de progresser à un certain stade. Des agents oxydants très réactifs ont ensuite attaqué le matériau adjacent à la paroi de la fissure. Ce mécanisme de croissance de la fissure peut être qualifié de propagation de fissure assistée par la dégradation, et il est probablement une cause de rupture précoce même à travers un tuyau à paroi épaisse, même si la dégradation du polymère est confinée strictement à sa surface.

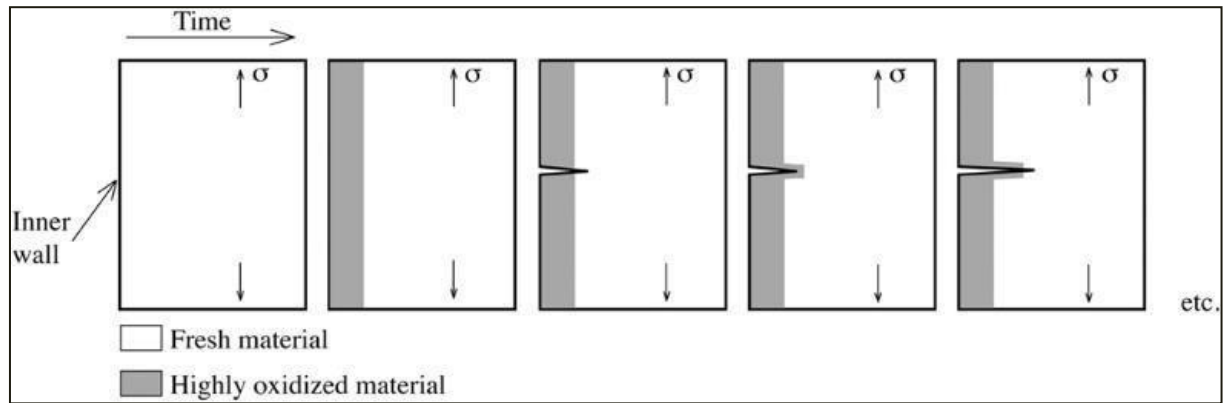


Figure II-6: Schématisation de l'évolution des fissures avec l'aide du processus de dégradation [26].

Chapitre III : Matériau d'étude et procédures expérimentales

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons le matériau étudié, à savoir le polyéthylène à haute densité (PEHD), ainsi que les équipements et dispositifs expérimentaux utilisés pour mener à bien les tests de vieillissement et de traction.

Nous commençons par une présentation du PEHD, en expliquant pourquoi il a été choisi pour cette recherche. Ensuite, nous décrirons en détail les machines utilisées pour les essais, en incluant ses spécifications techniques et son mode de fonctionnement.

Le dispositif expérimental sera ensuite exposé de manière exhaustive. Nous expliquerons les méthodes employées pour simuler le vieillissement du PEHD, en l'exposant à divers facteurs tels que la température, l'humidité et les rayons UV afin de reproduire les effets du vieillissement de manière accélérée. Nous inclurons également les tests de traction, qui permettent de mesurer la résistance mécanique de PEHD après vieillissement.

Les sections suivantes du chapitre fourniront des détails précis sur les protocoles expérimentaux, y compris la préparation des éprouvettes, les conditions de test et les paramètres de mesure. De plus, nous décrirons les techniques d'analyse des données utilisées pour évaluer les changements dans les propriétés du PEHD en fonction du vieillissement.

III.2 Matériau d'étude

Le matériau étudié est un polyéthylène haut densité (PEHD), largement utilisé dans les applications d'ingénierie telles que les conduites et appareils à pression. C'est un matériau thermoplastique semi cristallin. Le PEHD d'étude a été fabriqué dans un temps sous forme de granules, importé par la société STPM CHIALI située à sidi bel abbés (ALGERIE).



Figure III-1: Plaque en PEHD.

III.1 Préparation des éprouvettes

Notre travail se divise en plusieurs phases, la phase initiale consiste réaliser des éprouvettes en PEHD de longueur 75 mm, largeur 10 mm et 2 mm d'épaisseur, selon la norme ISO 527. Pour cela, il faut suivre un processus précis. Ce processus se fait au niveau de hall technologie d'Oued Aissi.

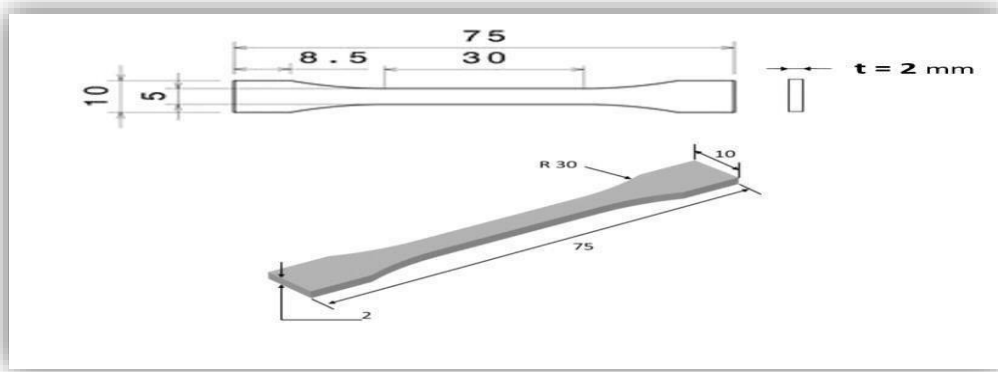


Figure III-2: Les dimensions d'éprouvette.

On commence par découper la plaque de PEHD en petits morceaux de taille approprié l'aide d'une scie. On obtient des morceaux découpés.

On place les morceaux sur une fraiseuse pour les amener aux dimensions précises. On fixe solidement le PEHD sur la table de la fraiseuse et on effectue des passes légères avec une fraise d'un diamètre de 63 mm pour enlever le matériau en excès. On contrôle régulièrement les dimensions à l'aide d'un pied à coulisse et on utilise des lubrifiants pour éviter la surchauffe et la déformation du matériau et l'utile. À la fin de l'opération, on obtient une pièce comme présentée dans la figure.

Pour obtenir une épaisseur de 2 mm, on fixe la pièce dans un mandrin, qui est l'élément rotatif principal du tour. Un disque de coupe est monté sur le porte-outil, qui est fixé au chariot. Le disque de coupe est perpendiculaire à la pièce, prêt à effectuer une opération d'usinage. Un fluide de refroidissement continue de couler, réduisant la chaleur et éliminant les copeaux.



Figure III-3: Découpage une plaque en (PEHD) à l'aide d'une scie mécanique.



Figure III-4: Usinage d'une pièce en (PEHD) à l'aide d'une fraiseuse.

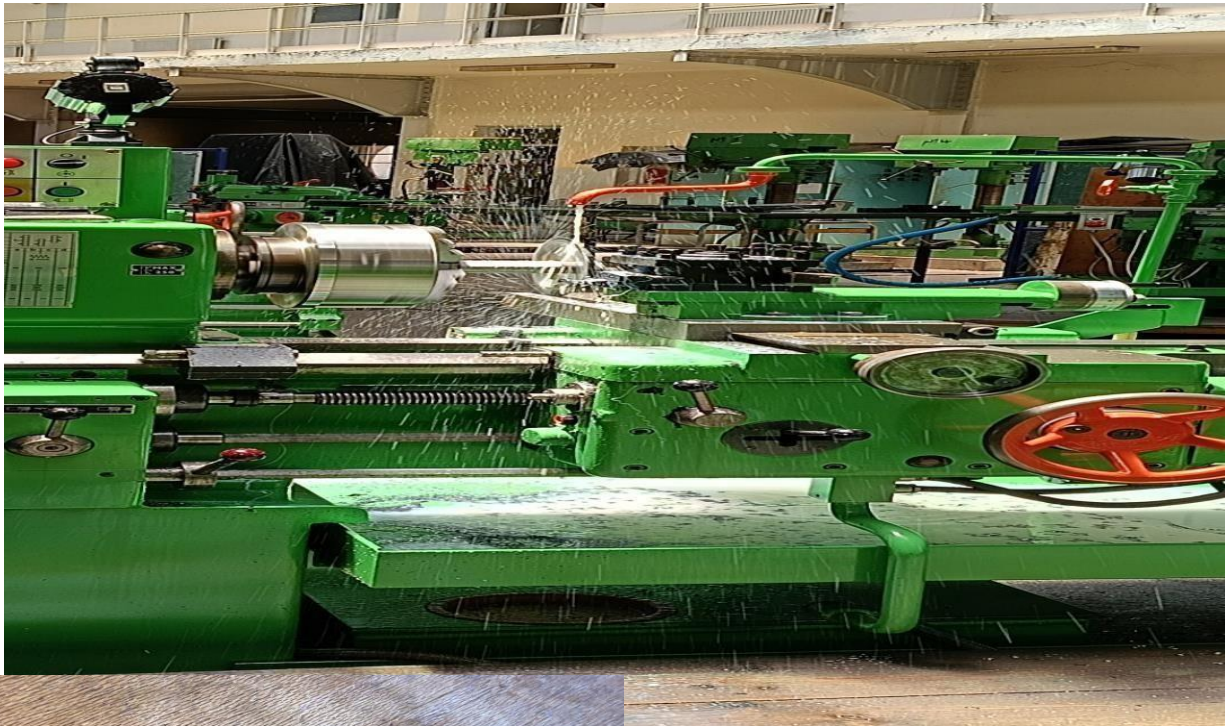


Figure III-6: Les échantillons en PEHD.

lubrification active sur un tour mécanique.

Elles sont placées dans un bocal en verre résistant aux acides, qui contient une solution de chlore à 47°, avec une température de 47°. Elles sont complètement immergées dans la solution pour éviter toute contamination de la solution. On les surveille régulièrement. Il est important de les surveiller régulièrement.



Figure III-7: Échantillons en PEHD immergés dans le chlore.

III.1 Caractérisations mécaniques

III.1.1 Essai de traction

L'essai de traction est une méthode employée pour analyser les caractéristiques mécaniques des matériaux, notamment les polymères tels que le polyéthylène haute densité (PEHD). Cet essai consiste à soumettre un échantillon à une force de traction jusqu'à sa rupture, afin de déterminer plusieurs paramètres clés. En réalisant cet essai avant et après exposition au chlore, il est possible de mesurer l'effet de la dégradation chimique, notamment :

- Fragilisation ;
- Réduction de l'allongement à la rupture ;
- Modification du module d'élasticité.

Ces résultats sont essentiels pour comprendre la durabilité du PEHD dans des environnements chlorés et ajuster sa formulation ou ses traitements pour améliorer.

III.1.1.1 Machine de traction

Une machine à traction est un appareil utilisé pour réaliser des essais de traction sur divers matériaux afin de mesurer leurs propriétés mécaniques. Elle est conçue pour appliquer une force croissante à un échantillon jusqu'à ce qu'il se rompe, permettant ainsi d'analyser comment le matériau se comporte sous une contrainte.



Figure III-8:Machine de traction (ZWICK roell z005).

III.1.1.2 Réalisation de l'essai de traction

Installation d'éprouvette dans la machine d'essai : On monte l'éprouvette entre deux mâchoires ou pinces de la machine de traction, qui maintiennent solidement ses extrémités. Cette fixation doit être suffisamment ferme pour éviter tout glissement pendant l'essai. La machine d'essai est équipée de capteurs qui mesurent la force appliquée et l'allongement de l'échantillon en temps réel.

La machine de traction commence à appliquer une force en tirant progressivement sur l'échantillon à une vitesse constante, préalablement définie par les normes. Pendant que la force est appliquée, la machine mesure l'allongement de l'échantillon et enregistre les données. La courbe contrainte-déformation est tracée à partir des informations recueillies. La contrainte est concentrée en divisant la force appliquée par la surface de la section transversale de l'échantillon, et la déformation correspond au rapport entre l'allongement et la longueur initiale.



L'essai se poursuit jusqu'à ce que l'échantillon se brise sous la traction. Le point de rupture indique la contrainte maximale que le matériau peut supporter, appelée résistance à la traction. L'allongement à la rupture est également noté, indiquant le pourcentage de déformation que l'échantillon a subi avant de se casser. La pente de la courbe dans la phase initiale permet de calculer le module d'élasticité, qui mesure la rigidité du matériau.

Figure III-9: Montage sur la machine de traction.

III.1.2 Caractérisation physico-chimiques d'analyse Infrarouge

L'analyse infrarouge, ou spectroscopie infrarouge (IR), est une technique analytique permettant d'étudier les groupes fonctionnels d'une molécule en mesurant comment ces groupes absorbent la lumière infrarouge. Cette méthode est basée sur l'interaction entre les rayons infrarouges et les vibrations internes

III.1.2.1 Principe de la spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge est une méthode analytique qui exploite l'absorption de la lumière infrarouge pour étudier les molécules d'un échantillon. Lorsqu'un échantillon est exposé à un faisceau de lumière infrarouge, les molécules absorbent des longueurs d'onde spécifiques en fonction des vibrations de leurs liaisons chimiques, telles que l'élongation ou la déformation des liaisons. Cette absorption est mesurée et convertie en un spectre, où les pics correspondent à des longueurs d'onde où l'absorption est maximale. L'analyse de ces pics permet de déterminer les groupes fonctionnels présents dans le matériau et d'obtenir des informations sur sa structure chimique. Cette technique est largement utilisée pour identifier les composés, vérifier la pureté des substances, suivre les réactions chimiques, et assurer la conformité des produits aux normes de qualité. En somme, la spectroscopie infrarouge fournit des données essentielles pour comprendre les caractéristiques moléculaires des matériaux.

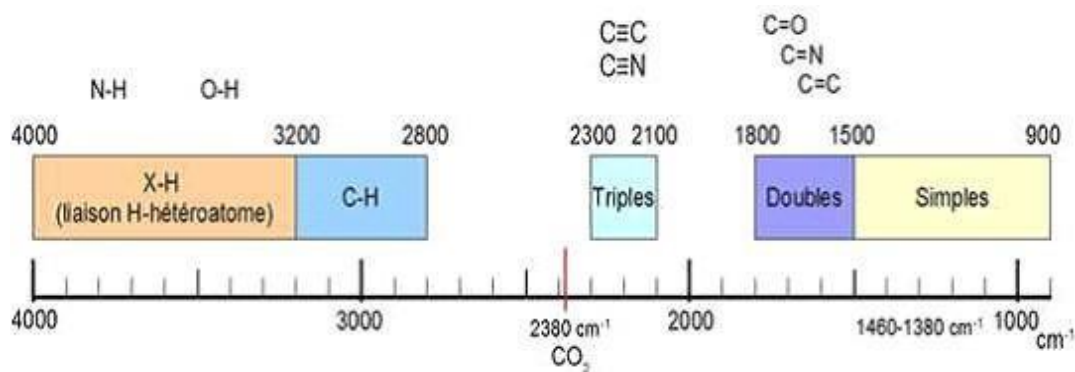


Figure III-10: Domaines d'absorption correspondant à divers types de liaisons chimiques [14].

III.1.3 Le spectromètre infrarouge

Une machine infrarouge, souvent appelée spectromètre infrarouge, est un appareil utilisé pour réaliser des analyses spectroscopiques infrarouges, permettant d'identifier et d'étudier la composition chimique des matériaux. Elle fonctionne en émettant un faisceau de lumière infrarouge à travers un échantillon, puis en mesurant l'absorption de cette lumière à différentes longueurs d'onde. Cela génère un spectre unique pour chaque matériau, permettant d'analyser ses composants et ses liaisons chimiques.



Figure III-11: Appareil infrarouge (ATR).

III.1.3.1 L'impact de l'essai infrarouge

L'utilisation d'un spectromètre infrarouge est essentielle pour analyser les changements chimiques survenant dans le polyéthylène haut densité (PEHD) lorsqu'il est exposé au chlore. En effet, le chlore peut provoquer l'oxydation du matériau, entraînant la modification ou la rupture des liaisons chimiques existantes et la formation de nouveaux groupes fonctionnels. En effectuant une analyse infrarouge, il est possible de détecter ces transformations. L'échantillon de PEHD est exposé à un faisceau infrarouge, et le spectromètre mesure l'absorption à différentes longueurs d'onde, révélant ainsi les nouvelles liaisons formées ou les liaisons dégradées. Par exemple, l'apparition de groupes carbonyles ou hydroxyles dans le spectre infrarouge indiquerait que le PEHD a subi une oxydation. En comparant les spectres avant et après l'exposition au chlore, on peut évaluer la progression de la dégradation chimique. Cette méthode est donc cruciale pour suivre les altérations structurelles du PEHD et adapter sa formulation en conséquence.

III.1.4 Vieillissement thermique

III.1.4.1 Méthode de vieillissement thermique

Pour réaliser un vieillissement thermique, nous avons utilisé une étuve de type MEMMERT. L'étuve est une enceinte chauffante fonctionnant, dans la majorité des cas, sous atmosphère contrôlée et permettant d'effectuer des traitements thermiques à température régulée. La température maximum est de l'ordre de 500°C, au-delà on parlera plutôt de four. Les étuves sont généralement équipées de chauffages électriques. Elles sont pourvues d'un système de ventilation afin de rendre la température la plus homogène possible.

Dans notre cas, nous avons déposé les échantillons dans l'étuve, au moment de leur prélèvement on évite une diminution de température de maintien (Fig.III.12). Les caractéristiques du traitement sont les suivantes :

- 1) La vitesse de chauffage est de l'ordre de 2 °C/mn
- 2) Le maintien des différents échantillons pendant de différentes durées (6h, 24h,) et à différentes températures 60°C et 90 °C
- 3) Un refroidissement à l'air.

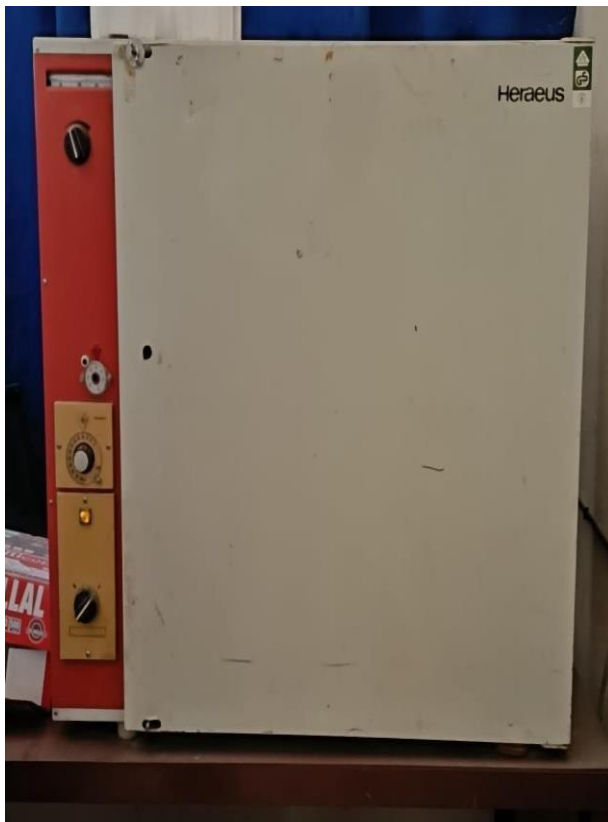


Figure III-13: Etuve de vieillissement thermique.

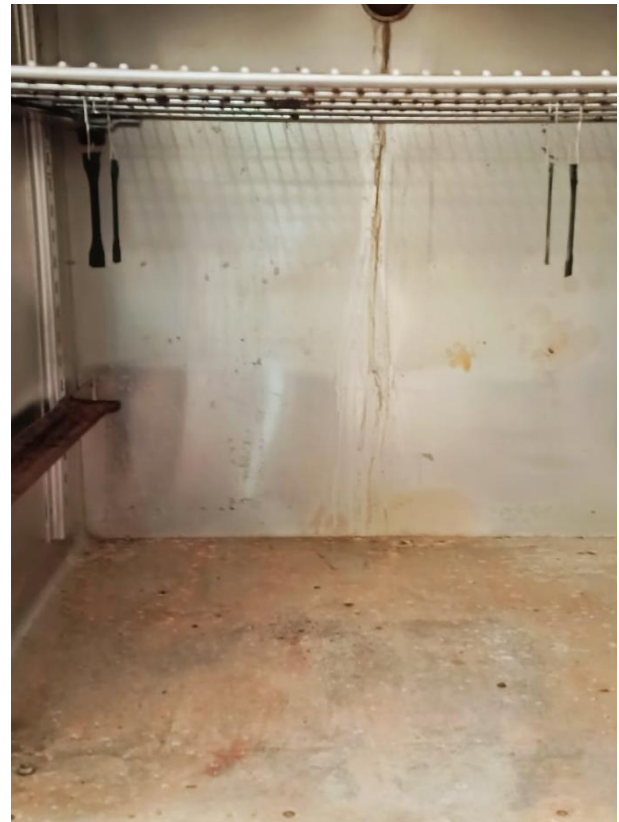


Figure III-12: Disposition des éprouvettes à l'intérieur de l'étuve.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Introduction

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.2 Caractérisation du comportement mécanique du PEHD à l'état vierge

La figure IV.1 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 de déplacement constante (100 mm).

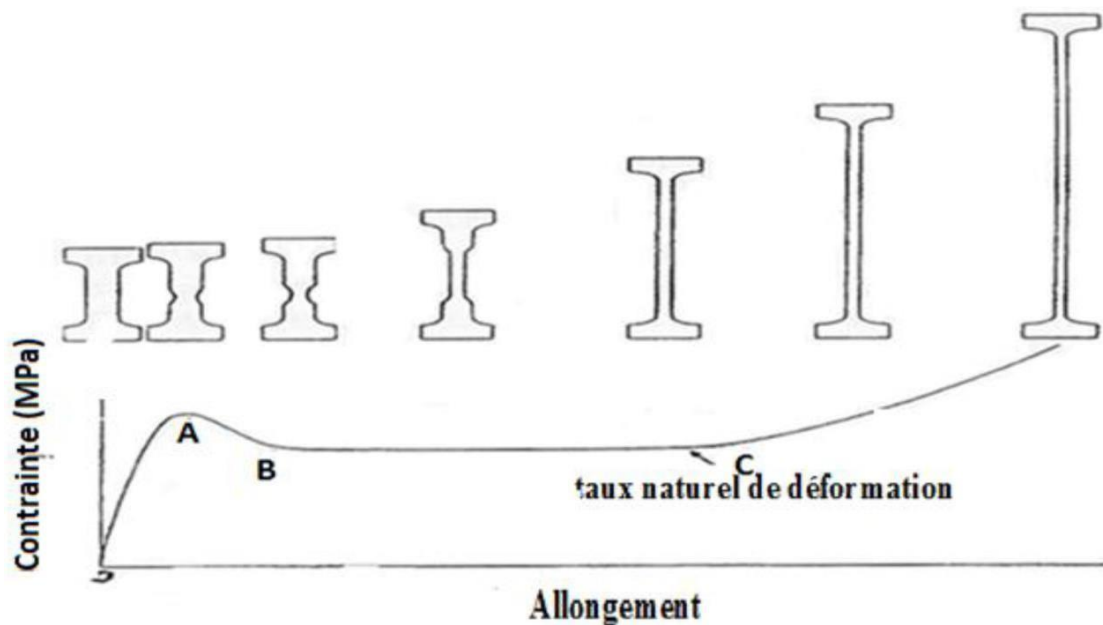


Figure IV-1: Identification des différents régimes de comportement mécanique sur la courbe contrainte-déformation.

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 correspond 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 début de 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 inters 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 les strictions 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 durcie 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 utilisées, 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.

Les résultats d'essai de traction monotone obtenus sont représentés sur la figure IV.2

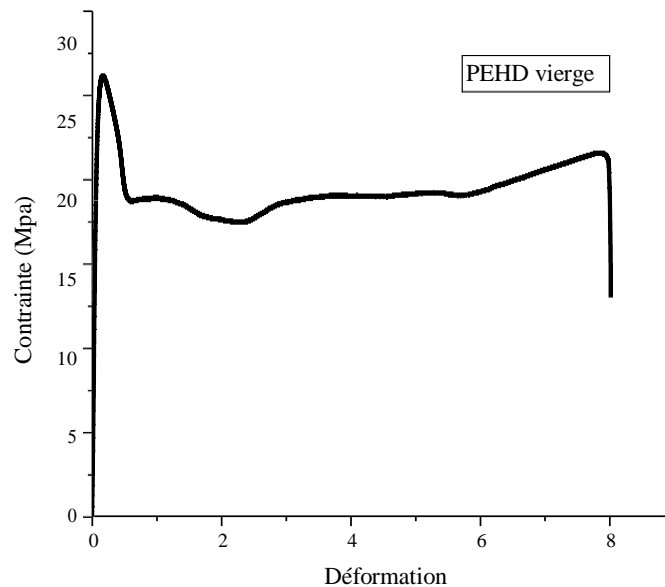


Figure IV-2: Courbe contrainte-déformation des éprouvettes à l'état vierge.

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.2.1 Résultats de la spectroscopie Infrarouge à l'état vierge

La figure IV.3 représente le spectre d'absorption infrarouge pour le PEHD vierge. Les bandes caractéristiques du PEHD sont observés au voisinage de 1550 cm^{-1} , 2850 cm^{-1} attribué à la liaison $C-C$, $C-H$ respectivement.

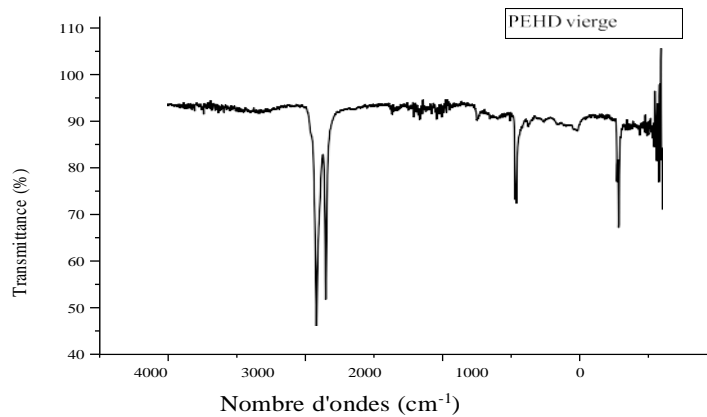


Figure IV-3: spectre d'absorption infrarouge du PEHD vierge.

IV.4 Comportement mécanique du PEHD vieilli sous chlore

Les 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.

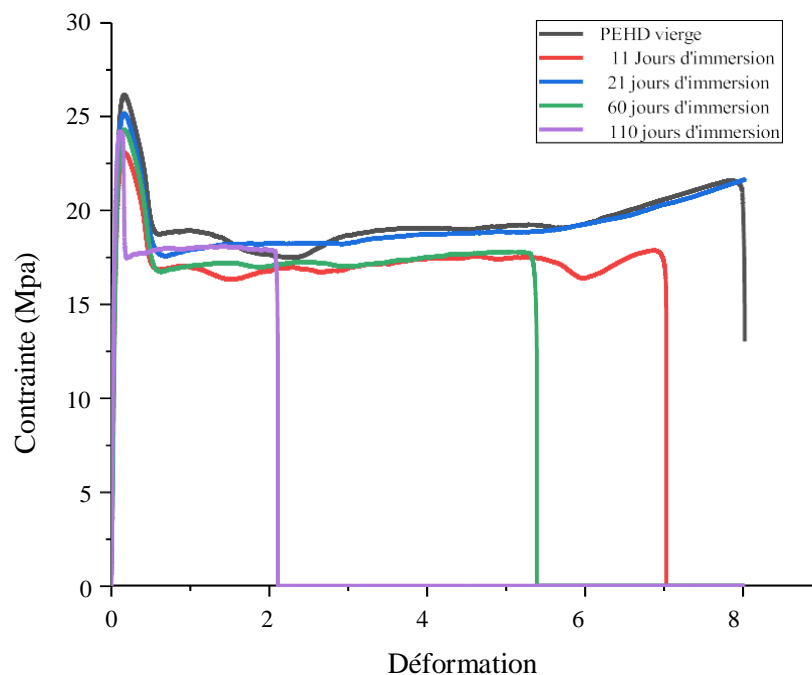


Figure IV-4: Courbes de traction pour différents temps d'immersion.

La Figure IV.4 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.5 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.

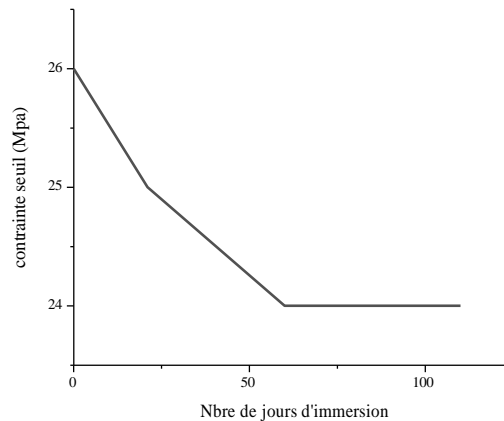


Figure IV-5: Evolution de la contrainte au seuil d'écoulement du PEHD.

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.6 et la figure IV.7 respectivement.

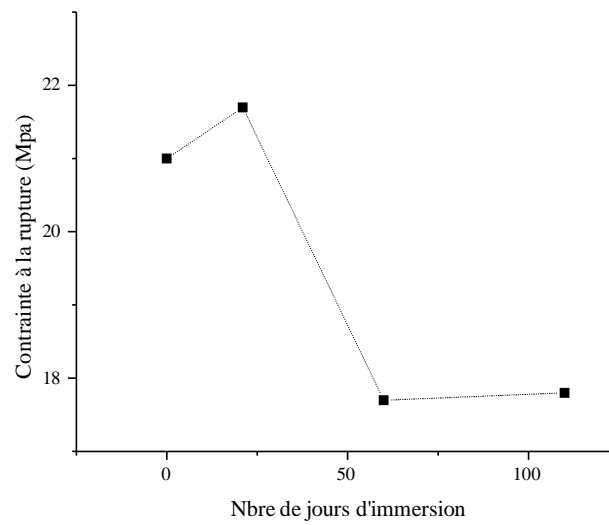


Figure IV-6: Evolution de la contrainte à la rupture du PEHD.

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.

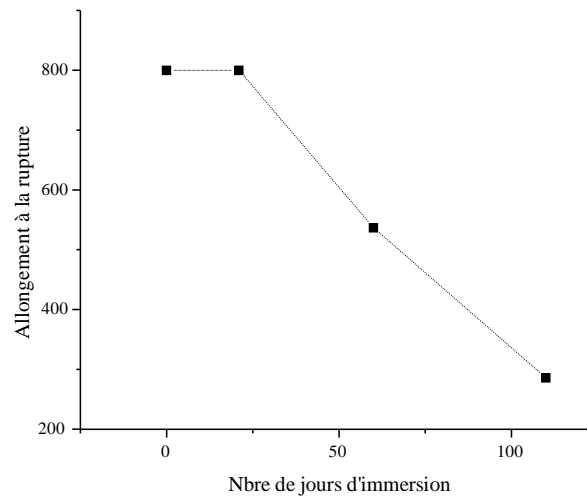


Figure IV-7: Evolution de l'allongement à la rupture du PEHD.

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.5 Résultats de la spectroscopie Infrarouge pour les échantillons vieillis sous chlore

Les figures IV.8 et IV.9 représentent les spectres d'absorption infrarouge pour les échantillons vieillis dans le chlore pendant 60 jours et 110 jours respectivement

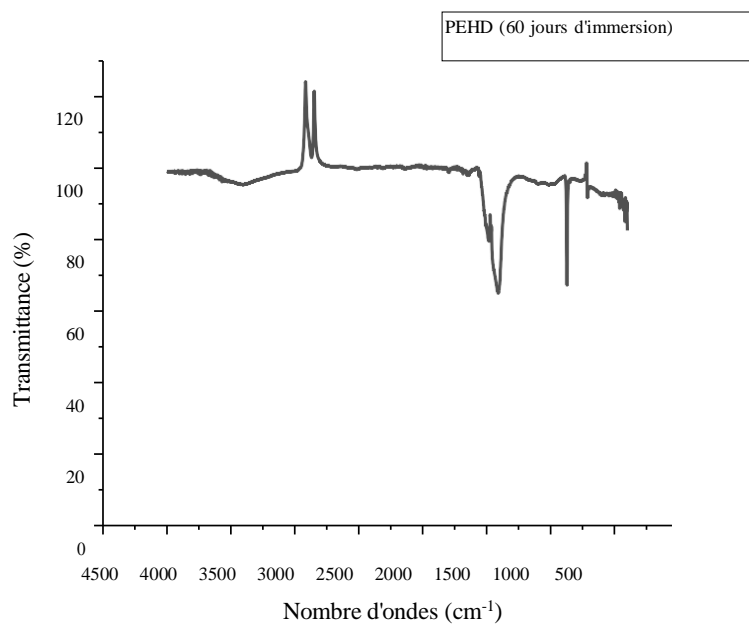


Figure IV-8: Spectre infrarouge du PEHD vieilli sous chlore pendant 60 jours.

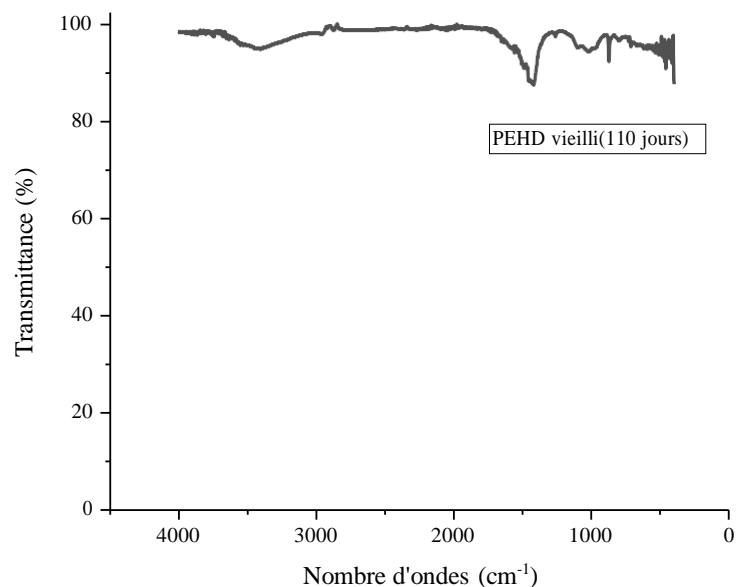


Figure IV-9: Spectre infrarouge du PEHD vieilli sous chlore pendant 110 jours.

La superposition des trois spectres est illustrée par la figure IV.10

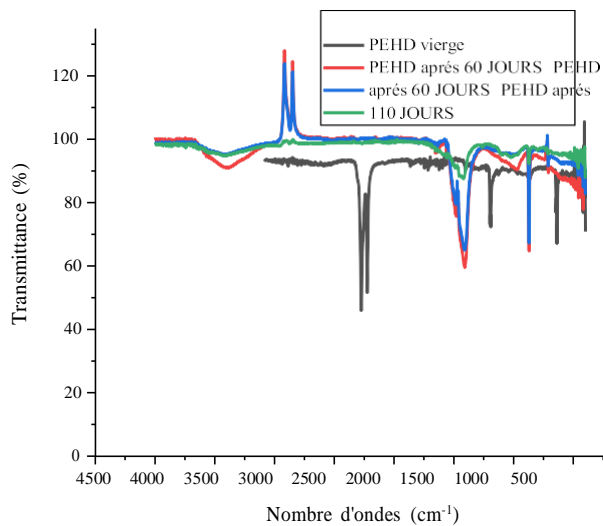


Figure IV-10: Comparaison des trois spectres infrarouges.

L'exposition du PEHD au chlore entraîne des modifications du spectre IR dans la région attribuée aux hydroxyles formés des acides et des alcools (3700 –3200 cm-1)

L'absorbance des hydroxyles résulterait de la contribution de plusieurs espèces telles que les hydroperoxydes.

IV. 6 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 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.

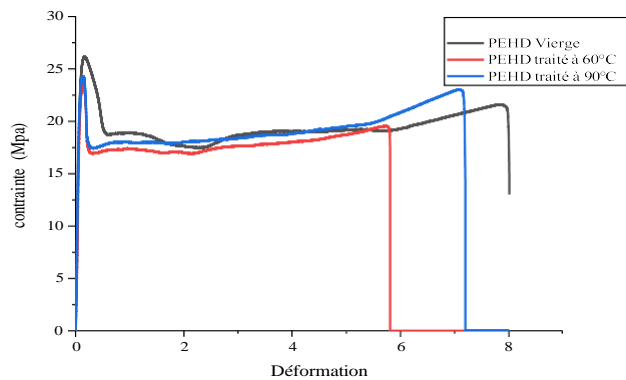


Figure IV-11: Influence de la température à 6 H de maintien au four.

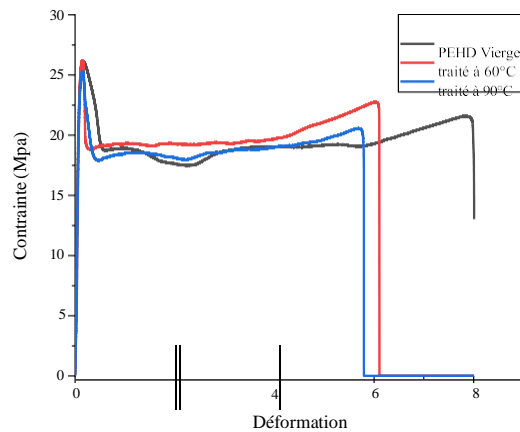


Figure IV-12: Influence de la température à 24 H de maintien au four.

L'examen de ces courbes nous permet de confirmer la dégradation thermique du PEHD.

Nous constatons que plus la température de maintien n'est élevée, plus l'allongement à la rupture ne diminue. La contrainte seuil et la contrainte à la rupture de varie pas significativement

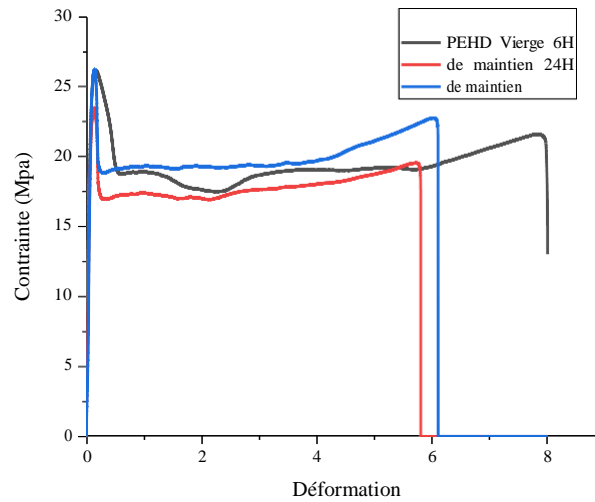


Figure IV-14:Influence du temps de maintien à la température 60°C.

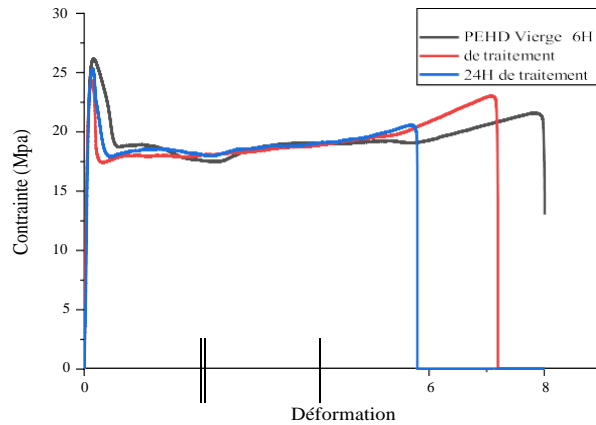


Figure IV-13:Influence du temps de maintien à la température 90°C

Les figures IV.13 et IV.14 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.15 regroupe des deux dégradations 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.

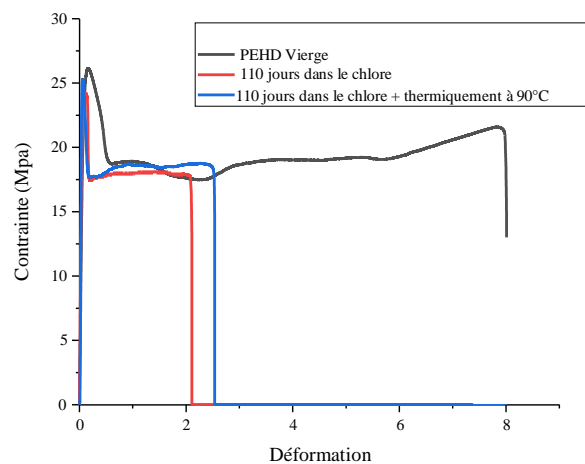


Figure IV-15: Dégradation combinée thermique et chimique sous chlore.

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 diminuera son effet.

CONCLUSION GENERALE

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 fréquents.

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

[1] : SAADI, Djamel et OUABBOU, Atmane. Etude Du Comportement Du PEHD En Traction-Torsion. 2017. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[2] : ZINET, Matthieu. Modélisation de la cristallisation des polymères dans les procédés de plasturgie: quantification des effets thermiques et rhéologiques. 2010. Thèse de doctorat. INSA de Lyon.

[3] : CHAFFRAIX, Vincent. Étude de l'extrusion du polyéthylène téréphtalate et de ses mélanges non-compatibilités avec le polyéthylène haute densité. 2002. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

[4] : S. Jouenne. Thèse de Doctorat ; option chimie et physicochimie des polymères. Université Pierre et Marie Curie, 2005.

[5] : BEKHTAOUI, Samir et AIT SAADI, Massinissa. Valorisation des déchets thermoplastique: Régénération via une ligne d'extrusion mono vis. 2021. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[6] SAADI, Djamel et OUABBOU, Atmane. Etude Du Comportement Du PEHD En Traction-Torsion. 2017. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[6] : LAMIA, Chelli. Effet du champ électrique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement. 2016. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri.

[7] : OUASSINI, Mr BENSALIM Mohamed. Étude Des Polymères Par Dynamiques Moléculaire. p. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2015.

[8] : KADRI NABILA, CHOUABIA Meryem. Elaboration et caractérisation d'une matrice de PEHD/SiO₂. 2020.

[9] : Le polyéthylène. [Citation : 02 avril 2024.]<http://fr.wikipedia.org/wiki/Polyéthylène>.

[10] : BOUCHARAF, YAHIA. Prédiction des propriétés thermiques des Films PEBD vieillis avec SVM. 2019. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret.

Références bibliographiques

- [11] : MESSAOUDI, Yanis et MESSAOUDI, Faouzi. Elaboration et caractérisation de matériaux abas d'une matrice polyéthylène. Université de Bejaïa, 2020.
- [12] : KEDDAR, Sarah. Vieillissement thermique du polyéthylène haut densité: Comportement mécanique et structurale. 2014. Thèse de doctorat.
- [13] : FERHOUM, Rabah. Etude expérimentale et modélisation numérique du comportement du PEHD à l'état vierge et après vieillissement thermique. 2012. Université Mouloud Mammeri.
- [14] : MOREAU, Aurélien. Identification de propriétés viscoélastiques de matériaux polymères par mesures de champs de réponses en fréquence de structures. 2007. INSA de Rouen.
- [15] : HACHOUR, Kamel. Contribution à L'élaboration d'un critère de plasticité pour le PEHD. 2014. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [16] : BENKACIMI, Dalila. Etude du comportement mécanique du PPH après du vieillissement. 2016. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [17] : MANSOUR, Dalila. Influence du vieillissement thermique accéléré sur la morphologie microstructure et le comportement mécanique du PEHD. 2012. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [18] : AOUBI. Hadjer. Effet du brunissage sur les propriétés mécaniques d'un PEHD2050concentré à 2.5% de noir de carbone. 2018-2019. UNIVERSITE BADJI MOKHTARANNABA.
- [19] : EL AIDANI, Rachid. Effet du vieillissement sur les propriétés de la membrane humidifuge en E-PTFE/NOMEX usitée dans les vêtements de production contre les incendies.
- [20] : BOUTI, Mohamed. Contribution à l'étude du vieillissement naturel des sacs en polypropylène oxo-biodégradable. École Nationale Polytechnique, 2015.

Références bibliographiques

[21] : LADACI, NAOURI. Effet du Vieillissement et Analyse des Mécanismes du Comportement Mécanique et Tribologique d'un PEHD. 2015. Thèse de doctorat.

[22] : BOSSU, B., DUBOIS, P., et LECORDIER, M. Contribution au problème de la corrosion et du vieillissement des plastiques. Pure and Applied Chemistry, 1966, vol. 12, no 1-4, p. 603-642.

[23] : YAKOUBI, Moussa et NAIT SLIMANI, Djaffer. Influence de la dégradation par ultra-violet sur le comportement mécanique du PEHD. 2022. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[24] : DEVILLIERS, Clémence. Dégradation chimique du PE et influence sur le comportement, l'endommagement et la rupture en fluage: application à la durabilité des canalisations sous pression. 2011. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

[25] : HASSINEN, J. LUNDBÄCK, Marie, IFWARSON, M. et al. Deterioration of polyethylene pipes exposed to chlorinated water. Polymère dégradation and stabilité, 2004, vol. 84, no 2, p. 261-267.

[26]: IMESSAOUDENE, Boudjemaa et NECHAB, Saida. Élaboration de mélanges polymériques et étude de leur vieillissement. 2014. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.