

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Chimie

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

TOURI Abdelaziz - FELLAHI Hemza

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie des matériaux

Thème :

Effet de la température sur les Tubes Polyéthylène haute densité PEHD

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

BERRICHE Lakhdar	MCB	UAMOB	Président
HALEM Zohra	MCA	UAMOB	Encadreur
BOUDAA Amrane	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous souhaitons remercier chaleureusement Madame HALEM Zohra, notre encadreur, pour sa supervision, son soutien indéfectible, et ses précieux conseils tout au long de ce travail. Ses encouragements et ses orientations ont été essentiels pour mener à bien ce projet.

Nous remercions également l'ensemble des Professeurs du département de Chimie de l'université Akli Mohand OULHADJ de Bouira, pour la qualité de leur enseignement et leur disponibilité. Leur expertise a enrichi nos connaissances et a largement contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à monsieur AYOUNI Abdel Illah, responsable du laboratoire de contrôle de la société Tubex, pour son soutien et pour avoir permis la réalisation de cette étude au sein de son établissement. Son aide précieuse dans la collecte des données et son partage d'expertise ont été inestimables.

Nous remercions également nos collègues pour leur soutien moral, leurs encouragements et leurs conseils avisés tout au long de cette aventure académique. Leur présence à nos côtés a été un véritable moteur.

Un grand merci à nos familles pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible. Leur compréhension et leurs encouragements nous ont permis de surmonter les moments difficiles et de persévérer jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Votre aide et votre soutien ont été précieux et nous vous en sommes profondément reconnaissants.

M. TOURI Abdelaziz - M. FELLAHI Hemza

Liste des figures

Figure 1: Triangle möbius	4
Figure 2: Polymérisation d'éthylène	5
Figure 3: Polymérisation du PEHD.....	9
Figure 4: Du pétrole aux polymères	10
Figure 5: Moulage par injection	21
Figure 6: Extrudeuse	28
Figure 7: Moulage par soufflage	30
Figure 8: PEHD avec additifs contre les UV.....	36
Figure 9: Coloration PEHD	40
Figure 10: Les étapes du soudage bout à bout	65
Figure 11: Diagrammes : pression/temps + température/temps	66
Figure 12: Différentes inscriptions sur les tubes	70
Figure 13: Bac à eau	79
Figure 14: Générateur de Pression	79
Figure 15 : Eprouvette	80
Figure 16 : Embout type 'A'	81
Figure 17: Dimension des Tubes Diamètre et Epaisseur	81
Figure 18: Temps de Rupture des éprouvettes 1	92
Figure 19: Temps de Rupture des éprouvettes 2	92
Figure 20: Temps de Rupture des éprouvettes 3	93
Figure 21: Temps Moyen de Rupture des éprouvettes.....	93
Figure 22: Estimation de Longévité (Années) fonction de Température (°C).....	95

Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison entre les méthodes de fabrication des Pehd	35
Tableau 2 : caractéristiques mécaniques.	82
Tableau 3: Temps de rupture à 20°C	91
Tableau 4: Temps de rupture à différentes Températures °C	91
Tableau 5: Estimation de Longévité (Années) /Température (°C)	94

SOMMAIRE

..... تلخيص :	01
Summary.....	02
Introduction générale	03
CHAPITRE I : Étude bibliographique - Généralités sur les polymères	04
I-1 Définition du PEHD	05
I-2 Définition des polymères	05
I-3 Polyéthylène (PE)	06
I-4 Méthodes de Fabrication des Monomères	07
I-4-a. Craquage Thermique	07
I-4-b. Réaction de Polycondensation	08
I-4-c. Oxydation	08
I-4-d. Réaction d'Estérification	08
I-4-e. Fermentation	08
I-4-f. Réaction Electrolytique	08
I-5 Objets fabriqués par le PEHD	08
I-6 Recyclage	09
I-6.a. Méthode de recyclage du PEHD	10
I-6.b. Avantage du Recyclage du PEHD	10
I-6.c. Défis du Recyclage du PEHD	10
I-7 Méthodes et Techniques de Fabrication d'Objets en PEHD	11
I-7.a. Moulage par Injection	11
I-7.b. Extrusion	11
I-7.c. Soufflage	12
I-7.d. Rotomoulage (Moulage par Rotation)	13
I-7.e. Thermoformage	13
I-7-f. Comparaison entre les méthodes de fabrication du Pehd	13
I-8 Additifs et adjuvant pour le PEHD	14
I-8.a. Antioxydants	14

I-8.b. Stabilisants UV	14
I-8.c. Agents Antistatiques	15
I-8.d. Agents de Glissement	15
I-8.e. Pigments et Colorants	15
I-8.f. Ignifugeants	16
I-8.g. Agents Nucléants	16
I-9 Propriétés du PEHD	16
1-9.a Dureté	16
1-9.b Flexibilité/Mollesse	16
I-9.c Résistance aux UV	17
I-9.d Conductivité Thermique	17
I-9.e Conductivité Électrique	17
I-9.f Résistance Chimique	17
I-9.g Résistance aux Températures	17
I-9.h Densité	18
I-9.i Autres propriétés du PEHD	18
I-10 Vieillissement accéléré	18
I-10.a. Exposition UV	19
I-10-b. Vieillissement thermique	19
I-10.c. Oxydation	19
I-10.d. Vieillissement hydrolytique	19
I-10.e. Stress mécanique	19
I-11 Soudage des Tuyaux en PEHD	19
I-11.a. Soudage bout à bout	20
I-11.b. Électrosoudage	21
I-12 Couleur et indications des tubes en PEHD	22
I-12.a. Indication sur les tubes	22
I-12.b. Couleur des tubes	23

Chapitre II Partie pratique

II-1 Aperçu sur l'entreprise Tubex	25
--	----

II-1.a. Les Produits de Tubex	25
II-1.b. Laboratoire Tubex	26
II-1.c. Quelques expériences faites par le laboratoire de Tubex	26
II-1.d. Organigramme contrôle qualité de réception des matières premières	27
II-1.e. Organigramme de contrôle qualité des produits finis	28
II-2 Besoins de l'expérience	29
II-2.a. Appareils utilisés pour l'expérience	29
II-2.b. Équipements Nécessaires	30
II-2.b.1. Équipement relié au testeur de pression hydrostatique	30
II-2.b.2 Eprouvettes	31
II-2.b.3. Embout de type de type A	32
II-2.c. Formules utilisées dans notre expérience	32
II-2.d. Normes qui régissent les caractéristiques des tuyaux en PEhd	34
II-2.e. Méthode de Travail	35
II-3 Description de la Partie Pratique	35
II-4 Expérience 1	37
I	37
I-4.a. Exigences normatives pour l'expérience de l'expérience 1	
II-4.b. Calcul de la pression P dans nos expériences	38
II-5 Expérience 2	39
II-5.a. Exigences Normative de l'expérience 2	39

CHAPITRE III : Résultats - Discussion - Conclusion générale

III-1 Résultat	41
III-1.a. Résultats expérience 1	41
III-1.a.1. Temps de rupture des éprouvettes (Heures)	41
III-1.b. Résultats de l'expérience 2	41
III-1.b.1. Tableau des résultats des temps de rupture des éprouvettes	41
III-1.a.2. Graphes, Temps de Rupture des éprouvettes en fonction de la température	42
III-1.b.3. Estimation de la durée de vie des Tuyaux en PEHD en Fonction de la Température	44
III-1.b.4. Durée de vie optimum	44

III-1.b.5. Tableau de l'estimation de la Longévité des tuyaux en PEHD en fonction de la température	44
III-1.b.6. Graphe : Estimation de Longévité (Années) fonction de Température (°C)	45
III-2 Discussion	46
III-3 Conclusion générale	47

Liste des abréviations

PEBD : Polyéthylène basse densité

HDPE : High-Density Polyéthylène

PEHD (PE-HD, PEhd) : Polyéthylène haute densité

PEMD : Polyéthylène moyenne densité

PE : Polyéthylène

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PVC : Polychlorure de vinyle

PET : Poly téréphtalate d'éthylène

PC : Polycarbonate

PTFE : Poly tétrafluoroéthylène

IRTF : spectroscopie Infra Rouge à transformée de Fourier.

IR : spectroscopie infrarouge.

UV : Ultra/Violet.

V: Visible

E: Module d'Young (MPa)

UHMPE : Le polyéthylène de masse molaire très élevée

De la découverte à nos jours

Les étapes importantes de l'histoire des polymères :

- En **1838** A. Payen découvre la formule de composé cellulose ($C_6H_{10}O_5$) n extrait du bois.
- En **1844** C. Goodyear a fait l'expérience de la vulcanisation du caoutchouc naturel.
- En **1846** C. SCHONBEIN fabrique le premier polymère artificiel -nitrocellulose- par l'ajout de sulfonitrique sur la cellulose.
- En **1866** M. Berthelot réussit a chauffé le styrolène sous une $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant quelques heures, qui a donné un polymère résineux.
- En **1866** M. Berthelot réussit a chauffé le styrolène sous une $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant quelques heures, qui a donné un polymère résineux.
- En **1883** H. de CHARDONNET découvre La soie artificielle par le filage de la nitrocellulose.
- En **1907** A. HOFMANN fabrique les premiers caoutchoucs synthétiques en utilisant le diène synthétique –polymérisation.
- En **1910** L. BAEKELAND réalise les Bakélites polymères phénol-formol premier polymère synthétique à l'aide de premier procédé industriel.
- En **1919** H. STAUDINGER connue sous le nom père de la science macromoléculaire il a eu le prix NOBEL **en 1953**, il a réalisé l'opération de polymérisation sur les monomères éthylénique.
- En **1925** Th. SVEDBERG mesure la masse molaire des macromoléculaire par l'Ultracentrifugation.
- En **1928** K. Meyer et H. Mark reliant la structure chimique à la structure cristallographique des Polymères.
- En **1933** E. FAWCETT et R. GIBSON (I.C.I.) découvre la polymérisation radicalaire de l'éthylène sous haut pression.
- En **1938** W. CAROTHERS (Du Pont de Nemours) et son équipe réalisent les nylons polyamides synthétiques.
- En **1942** P. FLORY et M. HUGGINS proposent la première théorie sur le comportement des solutions macromoléculaire. NOBEL 1974.
- En **1943** O. BAYER. Fabrique les premiers polyuréthanes.

- En **1947** T. Alfrey et C. Price proposent la théorie de la copolymérisation en chaîne.
- En **1953** F. CRICK et J. WATSON Prix Nobel de médecine 1962 proposent la structure en double hélice de l'ADN.
- En **1953** K. ZIEGLER fait la polymérisation de l'éthylène sous basse pression.
- En **1954** G. NATTA découvre le polypropène isotactique. Prix Nobel 1963.
- En **1955** M. WILLIAMS, R. LANDEL et J. FERRY établissent une formule reliant : temps de relaxations des chaînes & l'écart de température de transition vitreuse équation WLF.
- En **1956** M. SZWARC découvre la polymérisation vivante.
- En **1957** A. KELLER réalise les premiers monocristaux macromoléculaires.
- En **1959** J. MOORE établie la chromatographie d'exclusion stérique.
- En **1960** Découverte des élastomères thermoplastiques avec les morphologies correspondantes.
- En **1970- 1980** P-G. de GENNES Prix Nobel 1974 introduit la notion de reptation des chaînes polymères à l'état fondu.
- En **1974** Développement des polyamides aromatiques par la firme Du Pont de Nemours.
- En **1980** W. KAMINSKY et H. SINN utilisent la combinaison aluminoxanes/métallo cènes, pour la polymérisation des oléfines.
- En **1982** T. OTSU introduit la notion de contrôle de la polymérisation radicalaire.
- En **1986** Les premiers Dendromètres sont synthétisés par D. TOMALIA.
- En **1994** M. SAWAMOTO et K MATYJASZEWSKI réalise la polymérisation radicalaire contrôlée par transfert d'atome.
- En **2000** H. SHIRAKAWA, A.J. HEEGER et A.G. Mc DIARMID obtiennent le Prix Nobel de Chimie pour leurs travaux sur les polymères conducteurs intrinsèques.
- En **2005** Y. CHAUVIN, R. GRUBBS et R. SCHROCK, obtiennent Prix Nobel de Chimie pour leurs travaux sur la réaction de métathèse et son application aux polymères.

تلخيص:

دراستنا بعنوان: "تأثير درجة الحرارة على أنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE"، تركز على تأثير درجة حرارة الماء المنقول على المقاومة الميكانيكية لأنابيب HDPE، وكذلك على تقدير عمرها الافتراضي.

تُستخدم أنابيب HDPE في مجموعة متنوعة من التطبيقات نظرًا لمقاومتها للتآكل ومتانتها، خفة وزنها، مرونتها، مقاومة الصدمات، سطحها الداخلي الأملس، فهي غير سامة وقابلة لإعادة التدوير ولها تكلفة إنتاج منخفضة.

وهي تستخدم عادة لنقل وتوزيع السوائل، مثل مياه الشرب ونقل المواد الكيميائية، وكذلك لنقل السوائل القابلة للضغط مثل الغاز الطبيعي.

لنقل المياه عند درجة حرارة 20 درجة مئوية، يقدر العمر الافتراضي لأنابيب HDPE بـ 50 عامًا، أما عند درجات حرارة المياه التي تزيد عن 20 درجة مئوية، فإن الخواص الميكانيكية لهذه الأنابيب تتغير، ويقل عمرها الافتراضي.

وسنرى في هذه الدراسة تأثير ارتفاع درجات حرارة المياه المنقولة على المقاومة الميكانيكية لأنابيب HDPE، وكذلك تقدير العمر الافتراضي لهذه الأنابيب.

Summary:

Our study entitled: "Effect of temperature on HDPE high density polyethylene tubes", focuses on the effect of the temperature of the water transported on the mechanical resistance of HDPE pipes, as well as on the estimation of their lifetime.

HDPE pipes are used for a variety of applications due to their corrosion resistance and durability, lightweight, flexibility, impact resistance, smooth interior surface, they are non-toxic, recyclable and have a low cost of production.

They are commonly employed for the transport and distribution of fluids, such as drinking water and chemicals, as well as for the transport of compressible fluids such as natural gas.

For transporting water at 20 degrees Celsius (68° F), the lifespan of HDPE pipes is estimated to be 50 years, but for water temperatures exceeding 20 degrees Celsius (68° F), the mechanical properties of these pipes change, and the lifespan of the pipes decreases.

In this study, we will examine the effect of high water temperatures on the mechanical resistance of HDPE pipes, as well as estimate the lifespan of these pipes.

Introduction générale

Introduction générale :

Les canalisations en PEhd sont destinées pour les infrastructures, elles sont liées aux réseaux d'adduction d'eau potable, la distribution de gaz combustible, le gainage de protection des réseaux de télécommunication, gainage de protection des réseaux électriques, ainsi que d'autres applications. [1-4]

Dans notre travail, nous allons nous focaliser sur les tubes en PEhd destinées à l'adduction d'eau potable.

Les tubes en PEhd sont désignés par le diamètre nominal (DN) et la pression nominale (PN).

Exemple : 63 PN 10 veut indiquer que c'est un tube de diamètre nominal 63 mm, qui doit supporter une pression de service maximale de 10 Bar, à une température de l'eau de 20°C maximale pendant 50 ans.

Mais en pratique, la température de l'eau transportée est parfois supérieure à 20°C, elle varie d'une région à une autre ainsi d'une saison à l'autre. En Algérie, si la température de l'eau transportée ne dépasse pas les 30°C dans les zones du nord, elle dépasse largement cette valeur dans certaines zones du sud dont les villes sont alimentées par les eaux albiennes refroidis, température qui dépasse quelques fois en été les 45°C. À Hammam Debagh et Hammam Meskhoutine à Guelma on enregistre des températures de l'eau à 97°C [5].

De ce fait, nous avons mené cette étude pour voir l'effet des températures élevés au-delà de 20°C sur la résistance mécanique des tubes en PEhd.

Notre mémoire contient trois (03) chapitres :

Nous commencerons par présenter une étude bibliographique ainsi que des définitions, des propriétés et des utilisations du PEhd dans le premier chapitre.

Le deuxième chapitre sera consacré à la partie expérimentale, à la présentation des méthodes, ainsi que le matériel utilisé dans nos expériences.

Les résultats et les discussions sont présentés dans le troisième chapitre.

A la fin du mémoire nous présentons une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Étude bibliographique -

Généralités sur les polymères

I-1 Définition du PEHD :

Le polyéthylène haute densité (PEHD), également connu sous le nom de HDPE (High-Density Polyéthylène), est un polymère thermoplastique fabriqué à partir du monomère d'éthylène. C'est l'un des types de polyéthylène les plus courants et les plus utilisés dans diverses applications industrielles et domestiques en raison de ses propriétés exceptionnelles [17-19].



Figure 1: Polymérisation du PEHD

Les PEHD peuvent être produits par **Polymérisation coordinative** de type **catalyse de Ziegler-Natta**, ou **Catalyse** avec un **métallocène** [20-22].

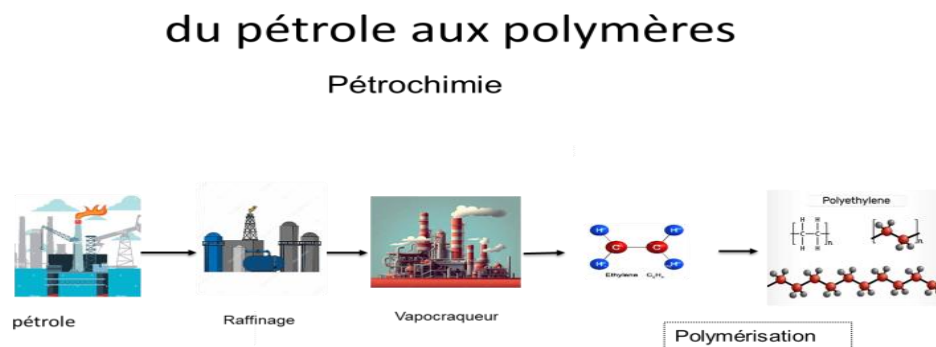


Figure 2: du pétrole aux polymères

I-2 Définition des polymères :

Les polymères sont des macromolécules composées de répétitions de petites unités appelées monomères, liées entre elles par des liaisons covalentes. Ils peuvent être naturels, comme le caoutchouc et la cellulose, ou synthétiques, comme le polyéthylène et le polystyrène.

En raison de leur structure répétitive, les polymères possèdent des propriétés uniques telles que la flexibilité, la résistance, et la durabilité, ce qui les rend essentiels dans une multitude d'applications industrielles et quotidiennes, allant des matériaux de construction aux emballages, en passant par les textiles et les dispositifs médicaux.

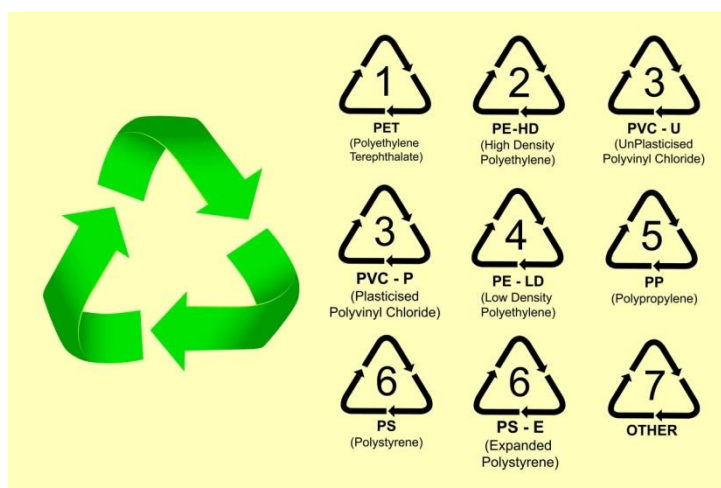


Figure 3: Triangle möbius

I-3 Polyéthylène (PE) :

Il désigne les **polymères d'éthylène** [12]. Simples et peu chers à fabriquer, les PE constituent la **matière plastique** la plus commune, il représente environ un tiers de l'ensemble des plastiques produits et la moitié des **emballages** [12-14].

Le PE qui appartient à la famille des **polyoléfines** de formule générale $-(CH_2-CRR_1)_n-$, pour le Polyéthylène, $R=R_1=H$, donc de formule : $-(C_2H_4)_n-$ [11-12].

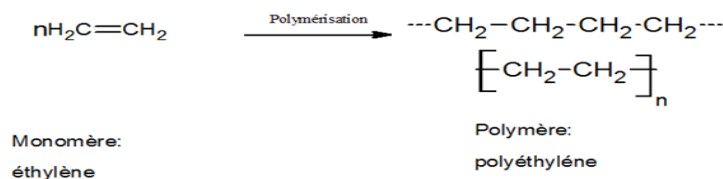


Figure 4: Polymérisation d'éthylène

On distingue plusieurs familles de **polyéthylène** (PE) :

- ❖ **PEHD** : Polyéthylène haute densité, avec une masse volumique de $0,941\text{--}0,965\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, il est l'un des PE les plus utilisés, on va développer ce type de polymère tout au long de notre étude [14-15].
- ❖ **PEMD** : Le polyéthylène moyenne densité est un type de polyéthylène ayant une masse volumique comprise entre $0,926$ et $0,940\text{ g/cm}^3$. Cette masse volumique est intermédiaire entre celle du polyéthylène basse densité et celle du polyéthylène haute densité [14].
- ❖ **PEBD** : Le polyéthylène basse densité est un polyéthylène qui a été inventé en 1933 par les ingénieurs anglais E.W. Fawcett et R.O. Gibson de la firme ICI. Ce polymère thermoplastique de grande consommation est obtenu par polymérisation radicalaire de l'éthylène en opérant sous très haute pression à environ $200\text{ }^\circ\text{C}$ [14-15].
- ❖ **(UHMPE)** : Le polyéthylène de masse molaire très élevée est un polyéthylène haute densité (PE-HD), caractérisé par une excellente tenue à l'abrasion et avec une masse molaire de l'ordre de $3,0.10^6\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ [14].

I-4 Méthodes de Fabrication des Monomères :

La fabrication des monomères, qui sont les unités de base pour la synthèse des polymères, implique divers processus chimiques. Ces procédés peuvent être classés en fonction du type de monomère à produire. On cite des méthodes courantes de fabrication de certains monomères majeurs [16].

Craquage Thermique :

Le craquage thermique consiste à chauffer des hydrocarbures lourds (comme le naphta) à des températures élevées pour produire des fractions plus légères, dont l'éthylène. Ce monomère est ensuite utilisé pour fabriquer du polyéthylène, exemple : Éthylène.

CHAPITRE I: Étude bibliographique - Généralités sur les polymères

Réaction de Polycondensation :

Le caprolactame est fabriqué par la réaction entre l'hexaméthylène diamine et le cyclohexanone oxime, suivie de la cyclisation par chauffage. Ce monomère est utilisé pour produire du nylon 6.

Oxydation :

L'acide acrylique est produit par l'oxydation du propylène en présence d'un catalyseur. Cette méthode est utilisée pour fabriquer des polymères acryliques utilisés dans les peintures et les adhésifs, exemple : Acide acrylique.

Réaction d'Estérification :

L'acide téréphtalique est fabriqué par oxydation du paraxylène. Il est ensuite utilisé dans la réaction d'estérification avec l'éthylène glycol pour produire le polyéthylène téréphtalate (PET), un matériau couramment utilisé dans les bouteilles et les fibres textiles, Exemple : Acide téréphtalique.

Fermentation :

L'acide lactique est produit par fermentation de sucres par des bactéries spécifiques. Il est utilisé pour fabriquer le polylactide (PLA), un plastique biodégradable, Exemple : Acide lactique.

.Réaction Electrolytique :

Le chlorure de vinyle est fabriqué par électrolyse du chlorure de sodium pour produire du chlore, qui est ensuite réagi avec l'éthylène pour obtenir du chlorure de vinyle, le monomère pour le PVC, Exemple : Chlorure de vinyle.

Ces méthodes illustrent la diversité des procédés chimiques utilisés pour synthétiser les monomères nécessaires à la production de divers matériaux polymères.

I-5 Objets fabriqués par le PEHD :

Les objets fabriqués en polyéthylène haute densité (PEHD) sont très variés en raison de ses propriétés telles que la résistance chimique, la rigidité, et la durabilité. Voici une liste d'objets couramment fabriqués en PEHD :

- **Tuyaux** : utilisés dans les systèmes de plomberie, les systèmes d'irrigation, et les conduits électriques.
- **Bouteilles en plastique** : utilisées pour les produits ménagers, les produits de nettoyage, les produits de soins personnels, etc.
- **Conteneurs de stockage** : tels que les bidons, les seaux, et les caisses.
- **Jouets** : de nombreux jouets pour enfants sont fabriqués en PEHD en raison de sa sécurité et de sa durabilité.
- **Panneaux de signalisation** : en raison de sa résistance aux intempéries.
- **Film et feuilles plastiques** : utilisés pour le paillage agricole, les emballages, et les bâches.
- **Poubelles** : y compris les bacs à ordures roulants et les poubelles de tri.
- **Mobilier de jardin** : chaises, tables, et autres meubles extérieurs.
- **Pièces automobiles** : comme les réservoirs de carburant et les conduits d'air.
- **Bacs de recyclage** : souvent utilisés dans les programmes de gestion des déchets.

Ces objets bénéficient des propriétés du PEHD, telles que la résistance à l'humidité, aux produits chimiques, et aux chocs, ce qui en fait un matériau polyvalent et durable pour une variété d'applications.

I-6 Recyclage :

Le recyclage du polyéthylène haute densité (PEHD) est essentiel pour la gestion durable des plastiques et la réduction des déchets. Le PEHD est largement utilisé dans





des produits tels que les bouteilles de lait, les bouchons de bouteilles, les conteneurs, et les tuyaux. [28-29].

Le recyclage du polyéthylène haute densité (PEHD), identifié par le code de recyclage 2, est essentiel pour minimiser l'impact environnemental des déchets plastiques.

Méthode de recyclage du PEHD :

- ✓ **Collecte et tri** : Les objets en PEHD, comme les bouteilles de lait et les flacons de détergent, sont collectés et triés par type de plastique.
- ✓ **Nettoyage** : Les objets en PEHD sont nettoyés pour enlever les résidus de produits et les étiquettes, assurant ainsi la qualité du matériau recyclé.
- ✓ **Broyage** : Le PEHD propre est broyé en petits morceaux ou granulés, facilitant le traitement ultérieur.
- ✓ **Fusion et extrusion** : Les granulés de PEHD sont fondus et extrudés pour former de nouveaux produits plastiques, avec parfois l'ajout de pigments ou d'autres additifs.
- ✓ **Fabrication de nouveaux produits** : Le PEHD recyclé est utilisé pour fabriquer des tuyaux, palettes, bancs de parc, et même de nouvelles bouteilles en plastique.

Avantages du Recyclage du PEHD :

Le recyclage du PEHD (polyéthylène haute densité) réduit la pollution plastique, économise les ressources naturelles, diminue les émissions de gaz à effet de serre et soutient l'économie circulaire en transformant les déchets en nouveaux produits utiles et durables.

Défis du Recyclage du PEHD :

- ✓ **Contamination** : Les contaminants dans le flux de déchets peuvent compromettre la qualité du PEHD recyclé.

CHAPITRE I: Étude bibliographique - Généralités sur les polymères

- ✓ **Coût** : Le processus de recyclage peut être coûteux, surtout si le tri et le nettoyage ne sont pas bien effectués.

Le recyclage du PEHD est un élément clé pour promouvoir une économie circulaire et réduire l'empreinte environnementale des plastiques [34-35].

I-7 Méthodes et Techniques de Fabrication d'Objets en PEHD :

La fabrication d'objets en polyéthylène haute densité (PEHD) implique plusieurs méthodes et techniques qui permettent de créer une variété de produits plastiques durables.

Les principales techniques et machines utilisées pour la fabrication des PEHD sont:

Moulage par Injection :

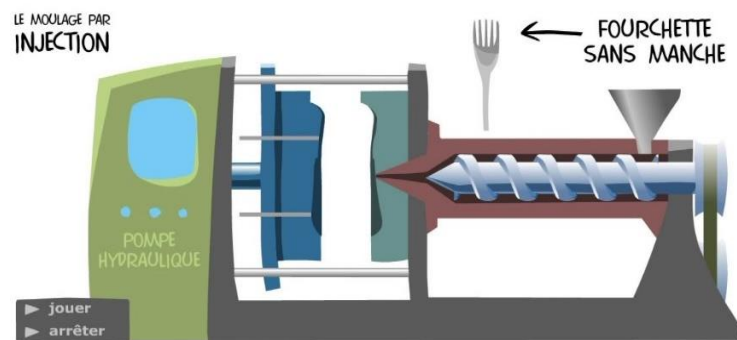


Figure 5: Moulage par injection

Le PEHD est fondu et injecté dans un moule à haute pression. Une fois refroidi, le plastique prend la forme du moule.

Utilisé pour fabriquer des objets complexes et précis tels que des bouchons de bouteilles, des jouets, et des composants techniques [36].

Extrusion :

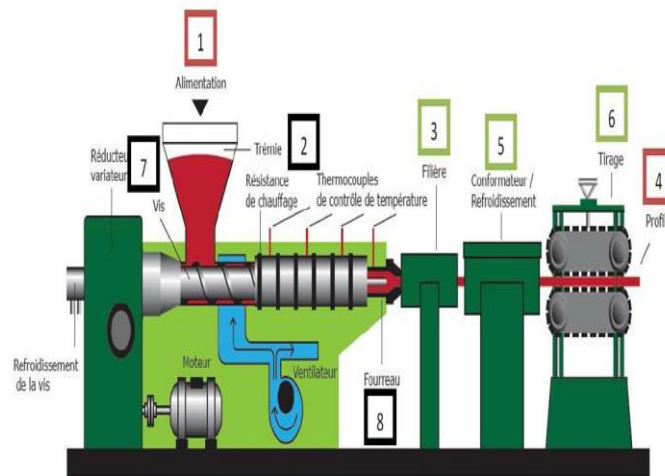


Figure 6: Moulage par injection

Le PEHD fondu est forcé à travers une filière pour créer des formes continues telles que des tubes, des tuyaux, et des profilés.

Employé pour fabriquer des tuyaux, des films plastiques, et des feuilles [38].

Soufflage :

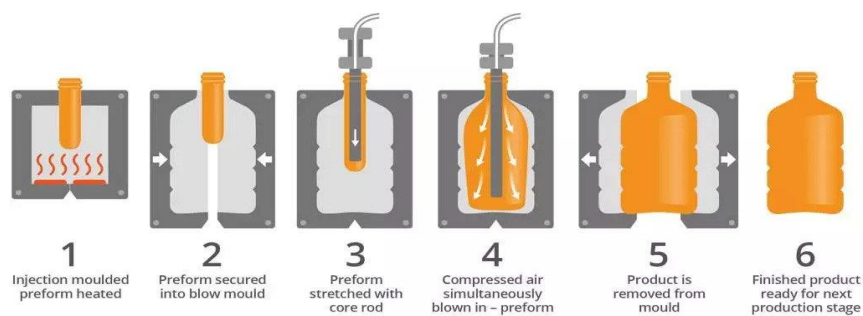


Figure 7: Moulage par soufflage

Le PEHD fondu est extrudé sous forme de tube, puis de l'air est soufflé à l'intérieur pour gonfler le plastique dans un moule.

Utilisé pour fabriquer des bouteilles, des récipients, et des bidons [39-41].

CHAPITRE I: Étude bibliographique - Généralités sur les polymères

Rotomoulage (Moulage par Rotation) :

Le PEHD en poudre est placé dans un moule chauffé qui tourne autour de deux axes perpendiculaires. Le plastique fond et se répartit uniformément sur les parois du moule.

Employé pour fabriquer des objets creux et grands comme des réservoirs, des jouets, et des équipements de loisirs [37].

. Thermoformage :

Une feuille de PEHD est chauffée jusqu'à devenir souple, puis moulée sur une forme à l'aide de vide ou de pression d'air. Utilisé pour créer des emballages, des plateaux, et des composants de produits électroniques [42-43].

Comparaison entre les méthodes de fabrication du Pehd :

Tableau 1: Comparaison entre les méthodes de fabrication des Pehd

Méthode	Avantages	Inconvénients
Moulage par injection	- Haute précision et détails fins	- Coûts de moules élevés
	- Production de masse efficace	- Limitée par la taille de la presse
Rotomoulage	- Idéal pour les pièces creuses et grandes	- Temps de cycle long
	- Coûts de moules plus faibles	- Moins précis pour les détails fins
Extrusion	- Production continue et rapide	- Limité aux formes longitudinales
	- Idéal pour les profilés longs et les tubes	- Moins de complexité géométrique
Moulage par soufflage	- Idéal pour les objets creux et légers	- Coûts de moules élevés
	- Bonne uniformité de paroi	- Moins adapté aux formes complexes
Thermoformage	- Adapté pour les grandes pièces fines	- Limité à l'épaisseur des feuilles

CHAPITRE I: Étude bibliographique - Généralités sur les polymères

Méthode	Avantages	Inconvénients
	- Moins coûteux pour les petites séries	- Détails fins plus difficiles à obtenir

Chaque technique de fabrication du PEHD est adaptée à des applications spécifiques, en fonction des exigences de la pièce finale, du volume de production et des coûts associés. Le choix de la méthode dépendra de ces facteurs ainsi que des propriétés mécaniques et chimiques requises pour le produit fini.

I-8 Additifs et adjuvant pour le PEHD :

Les additifs sont des substances ajoutées au polyéthylène haute densité (PEHD) pour améliorer ses propriétés et performances en fonction des applications spécifiques. Voici un aperçu des principaux additifs utilisés dans le PEHD :

I-8.a Antioxydants :

Ils protègent le PEHD de la dégradation oxydative qui peut se produire lors de la transformation et de l'utilisation finale, les phénols et les amines sont couramment utilisés.

Ils Prolongent la durée de vie du produit en empêchant la perte de propriétés mécaniques et physiques.

I-8.b Stabilisants UV :

Ils Protègent le PEHD des effets nocifs des rayons ultraviolets du soleil, Les absorbeurs UV et les stabilisants HALS (Hindered Amine Light Stabilizers) sont populaires.

Ils réduisent le jaunissement, la perte de résistance et les fissures, améliorant ainsi la durabilité en extérieur.

I-8.c Agents Antistatiques :

Ils réduisent l'accumulation de charges électrostatiques à la surface du PEHD. Les agents antistatiques peuvent être des amines, des esters phosphoriques ou des polysiloxanes.

CHAPITRE I: Étude bibliographique - Généralités sur les polymères

Ils améliorent la sécurité et la fonctionnalité dans des applications sensibles aux charges électrostatiques, telles que l'emballage électronique.

I-8.d Agents de Glissement :

Ils réduisent le coefficient de friction entre les surfaces en PEHD et d'autres matériaux. Les amides d'acides gras sont couramment utilisés.

Ils Facilitent la manipulation, l'emballage et le démoulage des produits finis.

I-8.e Pigments et Colorants [46-48] :



Figure 8: Coloration PEHD

Ils apportent des couleurs et des effets visuels au PEHD. Les pigments organiques et inorganiques sont utilisés selon les exigences de la couleur et de la durabilité.

Ils Permettent la personnalisation esthétique des produits sans compromettre les propriétés mécaniques.

I-8.f Ignifugeants :

Ils réduisent l'inflammabilité du PEHD et améliorent la résistance au feu. Les composés halogénés et les retardateurs de flamme sans halogène sont couramment utilisés.

Ils Accroissent la sécurité dans les applications nécessitant une résistance au feu, telles que les équipements électriques et les composants automobiles.

I-8.g Agents Nucléants :

Ils Améliorent la cristallisation du PEHD lors du refroidissement. Les nucléants inorganiques et organiques sont utilisés.

Ils accélèrent les cycles de production et améliorent les propriétés mécaniques et la clarté des produits finis.

I-9 Propriétés du PEHD :

Les propriétés du polyéthylène haute densité (PEHD) décrivent les caractéristiques physiques, mécaniques, thermiques et chimiques du matériau, qui déterminent ses performances et ses applications.

Voici quelques-unes des principales propriétés du PEHD [49-50]:

1-9.a Dureté :

Mesure de la résistance du matériau à la déformation permanente. Le PEHD a une dureté Shore D généralement comprise entre 60 et 70, indiquant qu'il est assez rigide et résistant à l'usure [51]

1-9.b Flexibilité/Mollesse :

Bien que rigide, le PEHD possède une certaine flexibilité, lui permettant de résister aux fissures sous contrainte. Cette propriété le rend adapté pour des applications telles que les films plastiques et les tuyaux [54].

. I-9.c Résistance aux UV :

Capacité à résister à la dégradation par les rayons ultraviolets du soleil. Le PEHD est souvent stabilisé avec des additifs pour améliorer sa résistance aux UV, ce qui prolonge sa durée de vie en extérieur.

CHAPITRE I: Étude bibliographique - Généralités sur les polymères

I-9.d Conductivité Thermique :

Capacité du matériau à conduire la chaleur. Le PEHD a une faible conductivité thermique (environ $0,45 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), ce qui en fait un bon isolant thermique [55].

I-9.e Conductivité Électrique :

Capacité du matériau à conduire l'électricité. Le PEHD est un isolant électrique efficace, avec une très faible conductivité électrique, ce qui le rend utile pour les gaines de câbles et les composants électriques.

I-9.f Résistance Chimique :

Capacité à résister à la dégradation par des substances chimiques. Le PEHD est résistant à une large gamme de produits chimiques, y compris les acides, les bases et les solvants, ce qui le rend idéal pour les conteneurs de produits chimiques et les tuyaux.

I-9.g Résistance aux Températures :

Capacité à maintenir ses propriétés mécaniques et physiques à différentes températures. Le PEHD peut résister à des températures basses sans devenir fragile et est utilisé dans des applications de congélation et de stockage à froid.

On donne ici quelques Température en ce qui concerne les PEHD [23-25] :

- Il fond vers $120\text{-}140^{\circ}\text{C}$.
- Il devient cassant vers $- 25^{\circ}\text{C}$.
- Température de fusion : $85\text{-}140^{\circ}\text{C}$
- Température de transition vitreuse : $- 110^{\circ}\text{C}$
- Extrusion $160\text{-}180^{\circ}\text{C}$
- Extrusion-soufflage : 200°C
- Injection $150\text{-}300^{\circ}\text{C}$ pour les PE Haute densité
- Frittage 250°C (Pour revêtir l'intérieur ou l'extérieur de tuyaux)
- Soudage Température ambiante
- Température maximale d'emploi : 105°C
- Température de fragilisation : -50°C

I-9.h Densité :

Masse par unité de volume. La densité du PEHD est généralement comprise entre 0,93 et 0,97 g/cm³, ce qui le rend léger tout en étant solide.

I-9.i Autres propriétés du PEHD:

- Compatible avec les micro-ondes.
- Bonne résistance aux produits chimiques, notamment : acides, alcools aliphatiques, aldéhydes, hydrocarbures aliphatiques et aromatiques.
- N° CAS : 9002-88-4
- N° ECHA : 100.121.698
- Propriétés physiques :
 - Masse volumique : 0,941–0,965 g·cm⁻³
 - Conductivité thermique : 0,46–0,51 W·m⁻¹·K⁻¹
 - Propriétés électroniques : Constante diélectrique : 2,3 (60 Hz) - 2,3 (1 MHz).
 - Propriétés optiques : Indice de réfraction : 1,54
 - Transparence : Translucide.

Ces propriétés expliquent pourquoi le PEHD est largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles et commerciales, allant des emballages et des conteneurs aux tuyaux, aux pièces automobiles et aux équipements médicaux.

I-10 Vieillissement accéléré :

Le vieillissement accéléré du polyéthylène haute densité (PEHD) est une méthode utilisée pour simuler les effets à long terme des conditions environnementales sur le matériau en un laps de temps réduit. Cette technique permet d'évaluer la durabilité et la résistance du PEHD lorsqu'il est exposé à des facteurs tels que la chaleur, les rayons ultraviolets (UV), l'humidité, et les agents chimiques. Voici un aperçu détaillé des méthodes de vieillissement accéléré du PEHD, des procédures typiques, et des tests associés [57-59].

CHAPITRE I: Étude bibliographique - Généralités sur les polymères

I-10.a Exposition UV :

On utilise les Chambres UV, simulateurs de lumière solaire (Xenon Arc), avec des lumières UV intense, température élevée, cycles d'humidité.

I-10.b Vieillissement thermique :

On utilise un four à air chaud, les conditions sont : Températures élevées (70°C, 100°C, etc.), durée variable (heures à semaines).

I-10.c Oxydation :

On fait une exposition atmosphère riche en oxygène, avec comme condition une pression d'oxygène augmentée, et températures élevées.

I-10.d Vieillissement hydrolytique :

La méthode est l'immersion dans l'eau chaude, comme conditions on a des températures de l'eau élevée (60°C, 80°C) et durée prolongée.

I-10.e Stress mécanique :

On applique des contraintes mécaniques sous conditions de vieillissement, les conditions sont des cycles de charge et de décharge, et température et humidité contrôlées.

I-11 Soudage des Tuyaux en PEHD:

Le soudage du polyéthylène haute densité (PEHD) en général, et les tuyaux en particulier, implique diverses techniques, dont le soudage par extrusion, par miroir et à l'air chaud. Dans le soudage par extrusion, un fil de PEHD est fondu et déposé entre les pièces à assembler. Le soudage par miroir utilise une plaque chauffante pour fondre les surfaces à joindre, qui sont ensuite pressées ensemble. Le soudage à l'air chaud chauffe les surfaces et une baguette de soudure en PEHD avec un jet d'air chaud pour créer la jointure. Chacune de ces méthodes nécessite une préparation minutieuse des surfaces, un contrôle précis de la température et une application de pression adéquate pour assurer une fusion solide et durable des pièces.

I-11.a Soudage bout à bout :

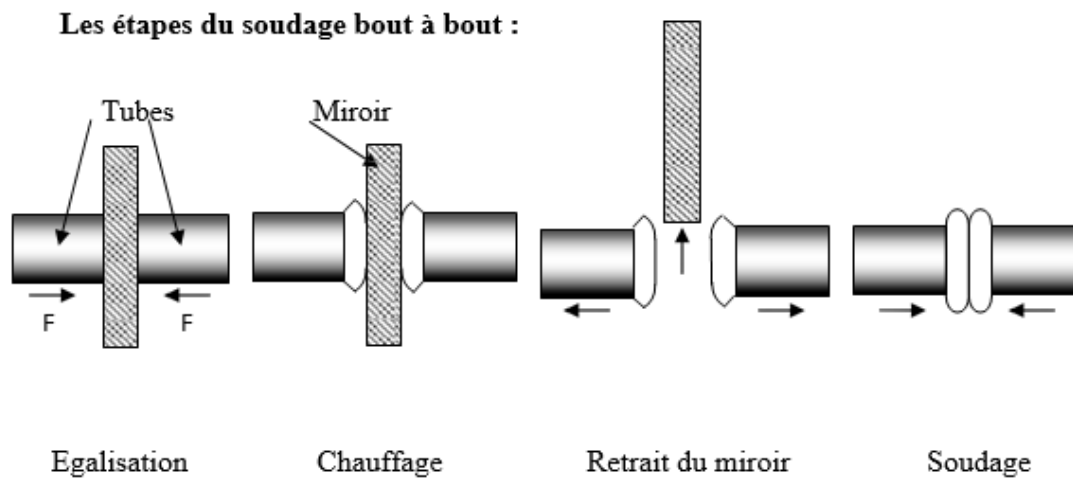


Figure 9: Les étapes du soudage bout à bout [60]

Le soudage bout à bout du polyéthylène haute densité (PEHD) est une méthode couramment utilisée pour assembler des tuyaux et des pièces en PEHD. Ce procédé consiste à chauffer les extrémités des pièces à souder à l'aide d'une plaque chauffante (miroir) jusqu'à ce qu'elles deviennent molles et visqueuses. Une fois les extrémités suffisamment chauffées, la plaque chauffante est retirée, et les pièces sont pressées l'une contre l'autre pour fusionner. La pression est maintenue jusqu'à ce que la jointure refroidisse et durcisse, créant une connexion solide et homogène. Ce type de soudage est particulièrement apprécié pour sa simplicité, sa fiabilité et sa capacité à produire des joints robustes adaptés aux applications industrielles et de plomberie [61].

Diagrammes : Pression/temps + Température/temps :

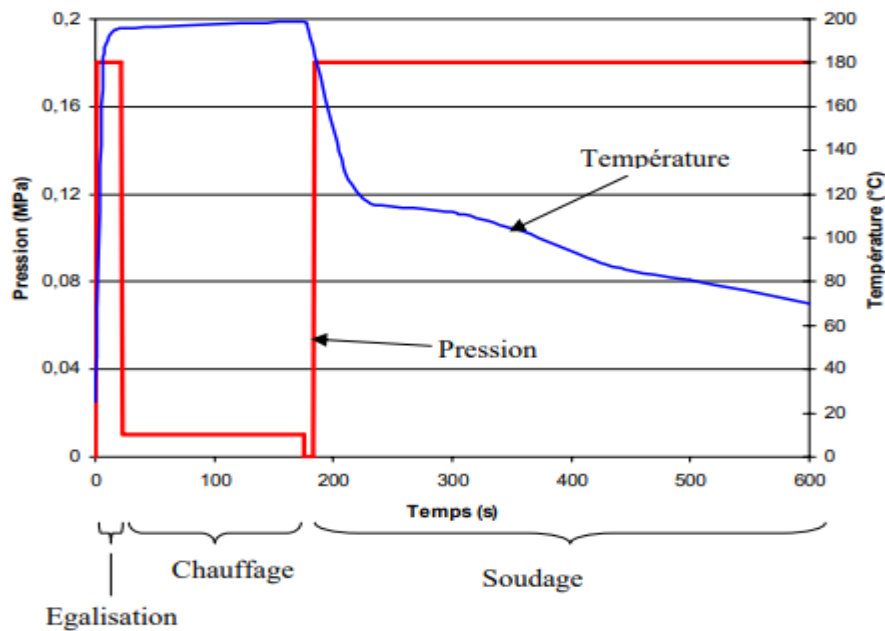


Figure 10: Diagrammes : pression/temps + température/temps [60]

I-11.b Électrosoudage :

L'électrosoudage du polyéthylène haute densité (PEHD) est une méthode courante pour assembler des tuyaux et des raccords, notamment dans les systèmes de distribution de gaz et d'eau. Cette technique utilise des raccords électrofusion contenant des éléments chauffants intégrés. Les surfaces des tuyaux et des raccords sont d'abord nettoyées, puis les tuyaux sont insérés dans les raccords. Une machine à électrofusion applique un courant électrique aux éléments chauffants, ce qui fait fondre le PEHD et permet de fusionner les pièces. Après le soudage, la jointure doit refroidir complètement pour assurer une connexion solide et durable [62-63].

I-12 Couleur et indications des tubes en PEHD :

I-12.a Indication sur les tubes :

Les tubes (Tuyaux) en polyéthylène haute densité (PEHD) sont souvent codés par couleur pour indiquer leur utilisation spécifique [64-66].

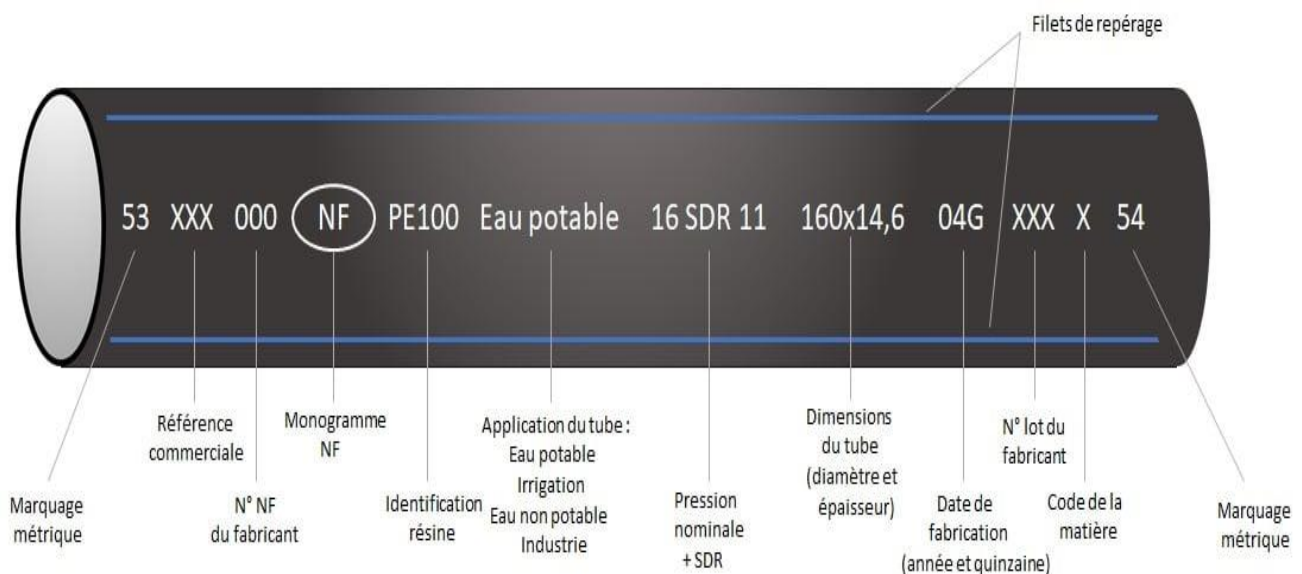


Figure 11: Différentes inscriptions sur les tubes

I-12.b Couleur des tubes :

Le trait de couleur est fait de matière compatible avec le tube en lui-même, les traits, 03 traits ou 04, sont apposées de sorte à ce qu'on puisse voir le trait sous n'importe quel angle s'il est enfoui.

Les couleurs les plus courantes et leurs significations sont :

- **Bleu** : Utilisé pour les conduites d'eau potable
- **Jaune** : Utilisé pour les conduites de gaz. Cette couleur permet de les identifier facilement pour des raisons de sécurité.

CHAPITRE I: Étude bibliographique - Généralités sur les polymères

- **Vert** : Utilisé pour les systèmes d'assainissement et d'évacuation des eaux usées, eaux pluviales
- **Rouge** : Souvent utilisé pour les conduites de protection des câbles électriques.
- **Orange** : Utilisé pour les systèmes de protection des câbles de télécommunication.

Chapitre II :

Partie pratique

II-1 Aperçu sur l'entreprise Tubex [67] :

Notre stage pratique a été effectué à la Sarl Tubex qui est Leader dans le domaine du transport des fluides, c'est une entreprise dynamique, qui active depuis près de 40 ans dans les secteurs de l'hydraulique, du bâtiment et des installations industrielles.

A ce titre, TUBEX est spécialisé dans la production de :

Tubes PVC pour les réseaux d'assainissement et à l'adduction d'eau potable, ainsi que les tubes polyéthylène (PE) haute et basse densité (PEhd, PEbd) pour la distribution de gaz combustible, l'irrigation, gaine de protection et l'adduction d'eau potable et télécommunication.

Avec un personnel très qualifié et une technologie de pointe, TUBEX est une entreprise moderne, capable de répondre aisément aux fluctuations du marché.

Assistance permanente, conseils adaptés à chaque besoin, TUBEX est à l'écoute de sa clientèle, clientèle dont la fidélité constitue sa meilleure référence.

Tubex est certifiée par la norme ISO 9001 version 2015. Il s'applique à l'ensemble des activités de la SARL TUBEX de production et vente de tubes en PVC et PEBD -PEHD pour l'adduction d'eau potable, l'irrigation, l'assainissement, les télécommunications et la distribution de gaz.

II-1.a. Les Produits De Tubex : parmi les produits fabriqués par Tubex, on cite :

- Tubes PVC pour les réseaux d'assainissement et à l'adduction d'eau potable.
- Tubes polyéthylène (PE) basse densité Pebd.
- Tubes polyéthylène (PE) haute densité Pehd.

Les diamètres et les Pressions des tubes fabriqués sont :

Pour les Tubes en PVC : Ø 25 mm au Ø 630 mm, avec des Pression : PN4 – PN6 – PN10 –PN16

Pour les tubes en PEhd : Ø 20 mm au Ø 630 mm, avec des pressions de : Pression : PN6 – PN10 – PN16 – PN20 – PN25

Pour les Tubes en PEbd : Ø 20 mm au Ø 110 mm, les pressions nominales sont de l'ordre de : PN4 – PN6

NB : cette nomenclature des tubes est une nomenclature commerciale.

II-1.b. Laboratoire Tubex :

Tubex possède un laboratoire d'essai en interne, les tests sont effectués en amonts et en aval.

En amont, le laboratoire fait des tests sur la matière première reçue, et vérifie sa conformité avec toutes les exigences des normes, les exigences réglementaires, les exigences des cahiers des charges.

En aval, le laboratoire se charge de tester les tubes après fabrication et vérifier leur fiabilité et leur conformité.

II-1.c. Quelques expériences faites par le laboratoire de Tubex sur les Tubes PEHD :

A- Le contrôle qualité de la matière première :

Les matières premières sont contrôlées à la réception, les principaux essais effectués sont d'ordre physique :

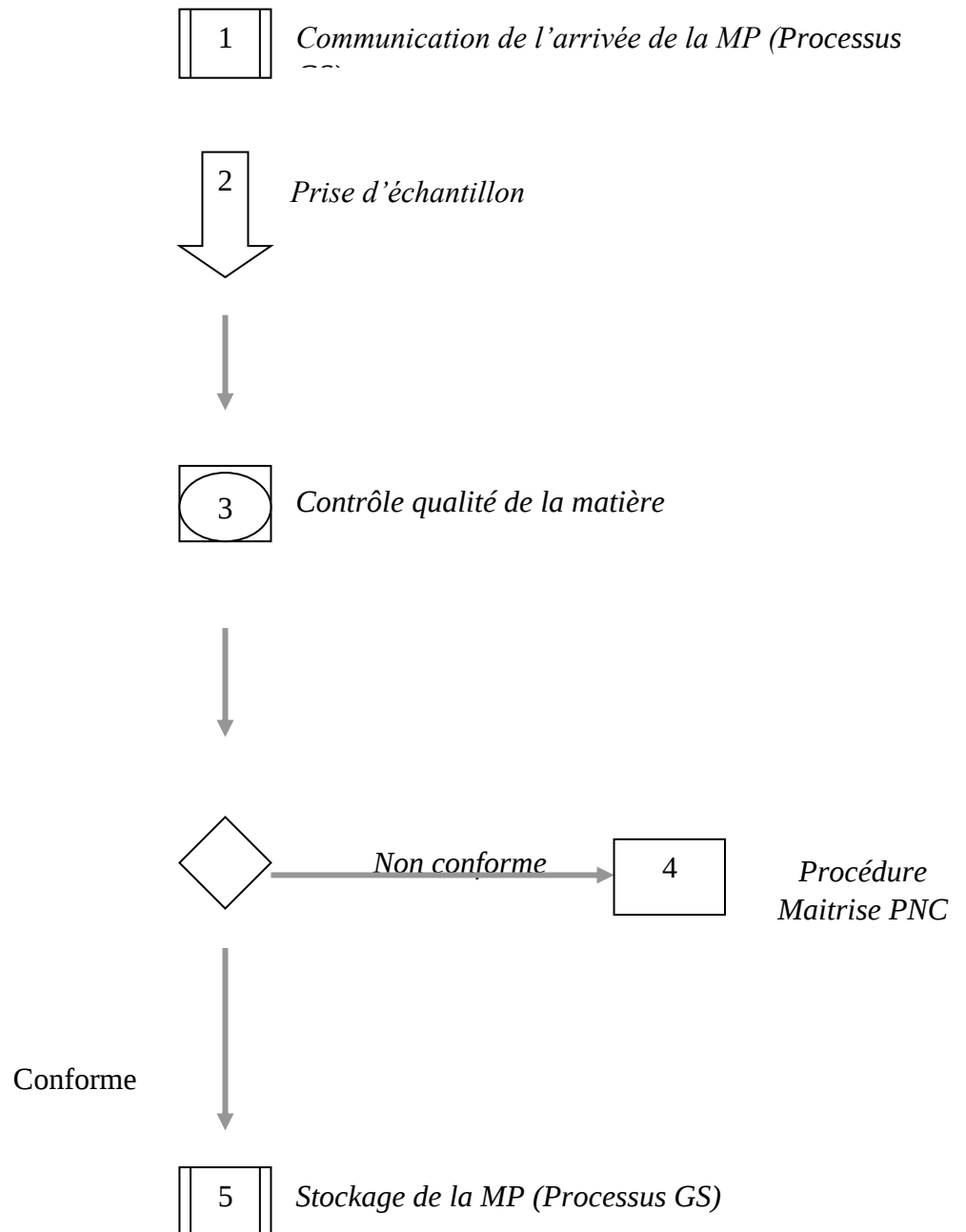
- **La masse volumique** selon ISO 1183
- **Essai de dispersion du noir de carbone** selon ISO 11420, ISO 18553:2002

B- Contrôle qualité sur les tubes (produit fini) :

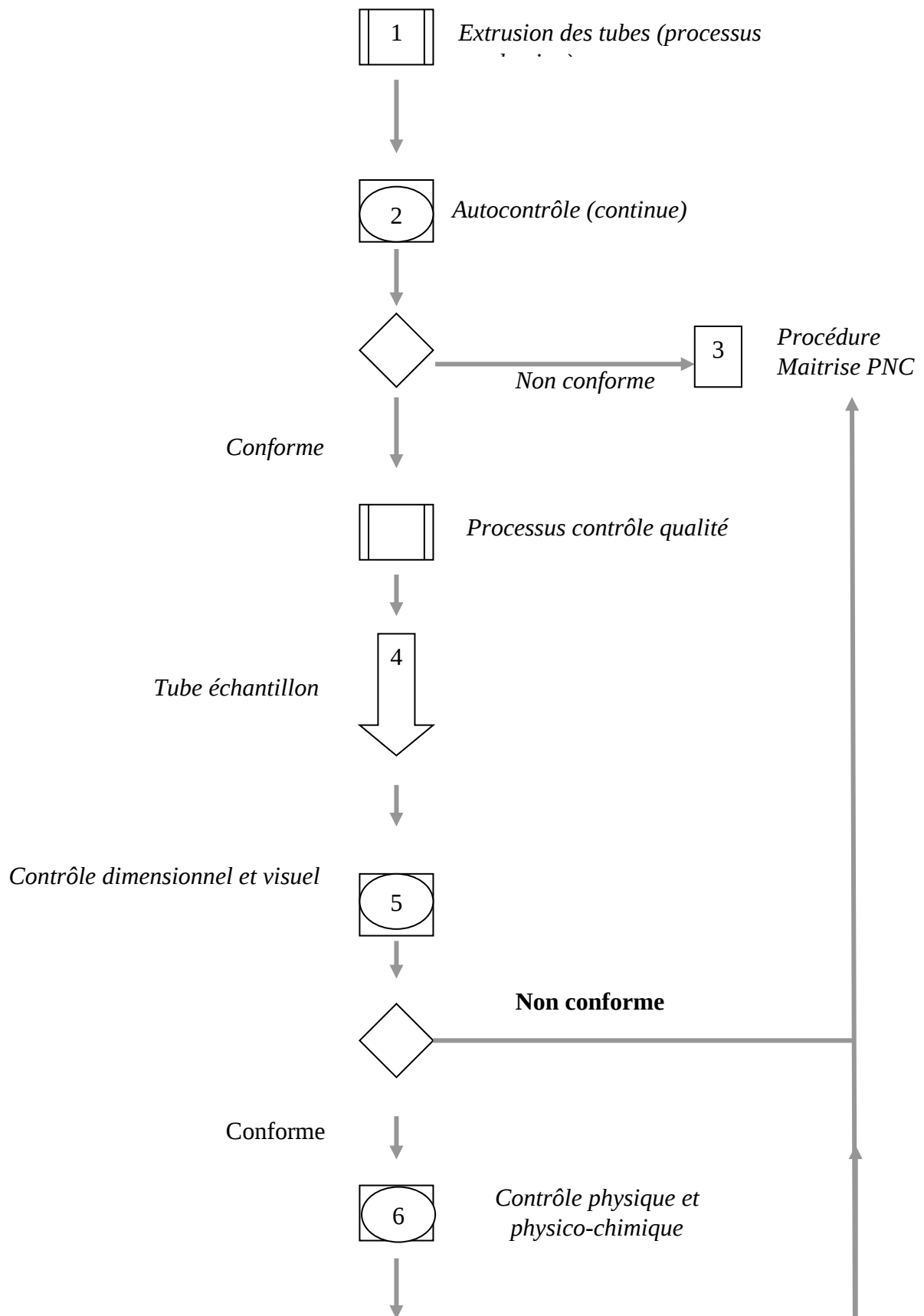
Des contrôles qualités sur les tubes produits fini sont effectués régulièrement pour contrôler la qualité et la fiabilité des produits finis.

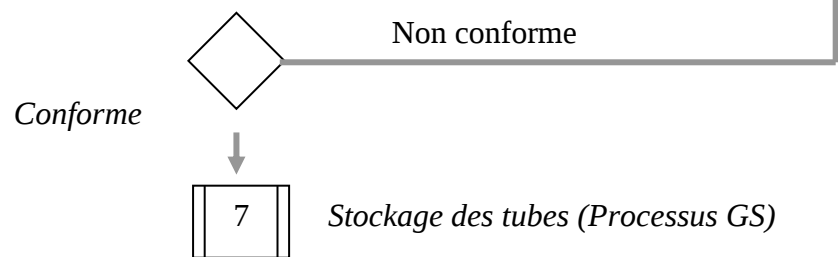
- **Essai de résistance hydrostatique** selon la norme NF EN921
- **La stabilité à l'oxydation (TIO)**, selon la norme NF EN 728
- **Essai de traction selon ISO6259** pour déterminer le seuil d'allongement à la rupture et le seuil de la résistance à la rupture.

- II-1-d. Organigramme contrôle qualité de réception des matières premières - Tubex



II-1.e. Organigramme de contrôle qualité des produits finis - Tubex





II-2 Besoins de l'expérience :

Pour le bon déroulement de nos expériences, nous avons besoins d'un certain nombre d'appareillage, et besoin d'utiliser certaines formules certaines normes.

II-2.a. Appareils utilisés pour l'expérience :

Pour les besoin de l'expérience, nous avons besoin d'un **Testeur de pression hydrostatique** [69].

Un testeur de pression hydrostatique est un dispositif utilisé pour vérifier l'intégrité et la résistance des systèmes soumis à des pressions élevées, tels que les tuyaux, les réservoirs et les chaudières. Cet outil fonctionne en remplissant l'objet testé avec un liquide, généralement de l'eau, puis en appliquant une pression bien au-delà de son niveau opérationnel normal. Le test vise à identifier les fuites, les points faibles ou les défaillances potentielles qui pourraient compromettre la sécurité et l'efficacité du système en usage. Les résultats permettent de s'assurer que les équipements peuvent supporter les conditions de travail requises sans risque de rupture ou de fuite.

Cela permet de vérifier l'intégrité de l'objet et de détecter des fuites éventuelles dans des conditions optimales, et consiste à immerger complètement le système à tester dans un réservoir d'eau, puis à le remplir également d'eau et à augmenter progressivement la pression interne. Cette méthode permet de détecter facilement les fuites par observation directe des bulles d'air ou des courants d'eau qui pourraient s'échapper de l'objet testé.

II-2.b. Équipements Nécessaires :

II-2.b.1. Équipement relié au testeur de pression hydrostatique :

- **Réservoir d'Eau :**

Un grand réservoir ou une cuve suffisamment grande pour immerger complètement l'objet à tester.

- **Testeur (Générateur) de Pression Hydrostatique :**
- **Pompe à Haute Pression :** Pompe manuelle, électrique ou à moteur pneumatique pour générer la pression nécessaire.
- **Manomètre :** Instrument pour mesurer la pression interne de l'objet en cours de test.
- **Raccords et Tubulures :** Tuyaux et connecteurs pour assurer une connexion étanche entre le testeur et l'objet à tester.
- **Vannes de Sécurité :** Pour contrôler et relâcher la pression en cas de besoin.
- **Enregistreur :** Pour enregistrer tous les paramètres de l'expérience, tel que la Pression et le Temps.

Le testeur de Pression Hydrostatique "Eau dans Eau", fonctionne selon les étapes suivantes :

- **Préparation :** Vérification de l'intégrité de tous les composants du système à tester, et nettoyez l'intérieur et l'extérieur du système pour enlever toute saleté et contaminants.
- **Remplissage du Système :** Remplissage du système à tester avec de l'eau pour éliminer tout air à l'intérieur.
- **Immersion :** Immersion complète de l'objet à tester dans le réservoir d'eau.
- **Connexion du Testeur :** Connection du testeur de pression hydrostatique au système à tester à l'aide des raccords appropriés.
- **Augmentation de la Pression :** Utilisation de la pompe pour augmenter progressivement la pression interne du système jusqu'à atteindre la pression de test prédéfinie.
- **Maintien de la Pression :** Maintenir de la pression pendant la période spécifiée pour observer les fuites éventuelles et observation de l'eau autour de l'objet immergé pour détecter les bulles ou les courants d'eau qui indiqueraient des fuites.

- **Inspection** : Vérification visuellement des joints et soudures et les raccords pour détecter toute fuite.
- **Décompression et Déconnexion** : Relâchement lente de la pression à l'aide des vannes de sécurité, déconnection du testeur et vidange du liquide.



Figure 13 : Bac à eau

Photos prise par : TOURI A. et Fellahi H.



Figure 14 : Générateur de Pression

II-2.b.2. Eprouvettes [68] :

L'éprouvette est constituée d'un tube de PEHD, fermée hermétiquement par des embouts de part et d'autre, Selon la norme iso 1167-2 la longueur libre du tube entre les embouts doit être au moins 03 fois le diamètre extérieur nominal du tube, avec un minimum de 250 mm.

D'après la norme Iso 1167-4, les tubes doivent être découpés de façon à ce que :

- Leurs extrémités soient perpendiculaires à leur axe.
- Dépourvus de rainurage, de cavités ou d'impuretés.
- Propres, exempts de graisse et secs.

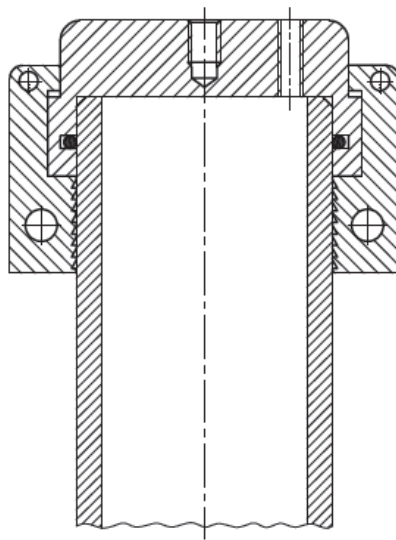


Figure 15 : Eprouvette Prise par M. TOURI A. et Fellahi H.

II-2.b.3. Embout de type de type A :

Ils doivent, à l'aide d'un système ou d'une procédure approprié, permettre d'obturer et d'assurer le raccordement au dispositif de mise en pression et permettre de purger l'air avant l'essai.

Reliés de manière rigide à l'éprouvette mais sans liaison entre eux, et par conséquent, transmettant l'effet de fond à l'éprouvette, comme le montre, à titre d'exemple, la Figure ci après :



a) Type A



Figure 16 : Embout type ‘A’ Prise par M. TOURI Abdelaziz et Fellahi Hemza

II-2.c. Formules utilisées dans notre expérience :

- **Durée de vie optimum** : La durée de vie optimum est calculée comme suit :

Durée de vie optimum (X) = (Y Heures/100 Heures) x 50 ans.

La condition des 100 heures pour une extrapolation de 50 ans est une condition nécessaire, mais pas suffisante selon les normes.

- **Pression P** : La formule dont on a besoin est la formule pour trouver la pression P. La pression à laquelle doit se faire l'expérience est donnée par norme :

$$P = 10 \cdot \sigma \cdot \frac{2e_{min}}{d_{em} - e_{min}}$$

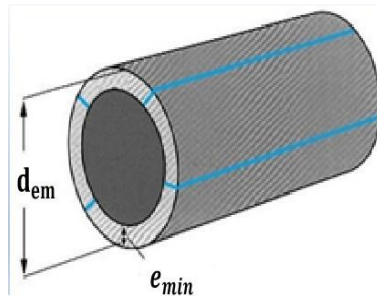


Figure 17 : Dimension des Tubes Diamètre et Epaisseur

Ou :

σ : est la contrainte de la paroi induite par la pression appliquée, en mégapascals.

d_{em} : est le diamètre extérieur moyen de l'éprouvette, en millimètres.

e_{min} : est l'épaisseur de paroi minimale dans la longueur libre de l'éprouvette, en millimètres.

On doit calculer 08 épaisseurs de la paroi à des endroits différents et faire la moyenne pour le calcul de (e_{min}).

NB : le facteur 10 de l'équation, provient du rapport entre les mégapascal et les bar.

1 bar = 10^5 Pa = 0,1 MPa ; 1 Mpa = 1 N/mm².

On travail avec le tube PE100, la norme nous dans ce cas : $\sigma=12,0$ Mpa

Caractéristiques	Exigences	Paramètres d'essai		Méthode d'essai
		Paramètres	Valeur	

Tableau des caractéristiques mécaniques des tuyaux [69-71] :

Résistance hydrostatique à 20 °C	Aucune rupture d'éprouvette pendant toute la durée de l'essai	Embouts	Type A ^{a)}	EN ISO 1167-1 Et EN ISO 1167-2
		Durée du conditionnement	Doit être confirmée à l'EN ISO 1167-1	
		Nombre d'éprouvettes ^{b)}	3	
		Type d'essai	Eau dans l'eau	
		Température d'essai	20 °C	
		Durée d'essai	100 h	
		Contrainte (de paroi) Circonférentielle pour :		
		PE40	7,0 MPa	
		PE80	10,0 MPa	
		PE100	12,0 Mpa	

Tableau 2 : caractéristiques mécaniques.

II-2.d. Normes qui régissent les caractéristiques des tuyaux en PEhd :

Dans notre travail, on va prendre comme référence les normes qui définissent et qui régissent les caractéristiques des PEhd.

Les normes (NA) font référence aux normes algériennes de l'Institut Algérien de Normalisation (IANOR).

Les normes (ISO) font références aux normes de l'Organisation Internationale de Normalisation, dont l'Algérie fait partie.

À noter qu'il y a une Harmonisation entre toutes ces normes.

- Norme Algérienne : **NA 7700-2-2015**
- Norme Algérienne : **NA 7713 V 2016**
- Norme Européenne : **EN 12201-2+A1-2013**

- Norme Iso : **Iso 1159-1 V 2015**
- Norme Iso : **Iso 1159-3 V 2015**
- Norme Iso : **Iso1167-1**
- Norme Iso : **Iso1167-2**
- Norme Iso : **Iso1167-3**
- Norme Iso : **Iso1167-4**

II-2.e. Méthode de Travail :

On va se baser dans notre expérience sur le **vieillissement accéléré des matériaux**, c'est-à-dire qu'on va faire subir à notre échantillon pendant la durée de notre test, les contraintes qu'il aurait subit pendant sa durée de vie qui est estimée à 50 ans, et ce dans le but de connaître le comportement de l'échantillon vis-à-vis de la résistance à la Température et à la Pression.

Comme dans notre étude on se base sur le comportement des PEhd en fonction de la Température, on va travailler à Pression P =constante, à Température T =constante, et on va calculer le temps nécessaire pour la rupture de notre échantillon (éprouvette).

Bien entendu, ces valeurs de Températures et Pression sont définies dans les normes précédemment citées.

II-3 Description de la Partie Pratique :**Détermination de la résistance à la pression interne des tubes en PEhd :**

Echantillon : on met une éprouvette dans un testeur de pression hydrostatique, dans notre cas on prend comme échantillon, un tube en **PEhd 63PN10**, on remplit l'éprouvette avec de l'eau sous une pression, l'éprouvette reste sous pression constante toute la durée de l'expérience.

On met notre éprouvette dans un bain d'eau à Température constante, (expérience de l'eau dans l'eau)

La pression est notée par le générateur de pression du début de l'expérience jusqu'à rupture de l'éprouvette.

On note le temps à la rupture de l'éprouvette, c'est-à-dire un tube qui a les caractéristiques suivantes :

Diamètre Nominal : 63 mm

Pression Nominale : 10 Bar, c'est-à-dire qu'il doit résister à une Pression de l'eau transportée à une pression maximale de 10 bar.

Durée de vie estimée : 50 ans

Température de l'eau : 20 °C (maximum)

Notre échantillon doit donc résister à une pression maximale de l'eau transportée de 10 bar, à une température de 20°C, pendant 50 ans.

II-4 Expérience 1 :

On doit ici optimisation de la durée de vie d'un tube PEhd à une température de fonctionnement de 20°C.

Dans ce 1^{er} cas, on fait une expérience à Température constante **T=20°C**, et pression constante **P= 15,9 bar**, l'échantillon doit être **resté stable** pendant une durée minimale de **100 Heures**, c'est-à-dire qu'il ne faut pas qu'il y ait de rupture ou d'éclatement pendant 100 Heures.

C'est donc un test de vieillissement accéléré, on va prendre P=15,9 bar au lieu de P=10 bar.

II-4.a. Exigences normatives pour l'expérience 1:

On prend une portion de tuyau de 63PN10, dans notre expérience de qualité PE100, on ferme de part et d'autre avec des embouts de type 'A' de sorte à avoir une **éprouvette hermétiquement fermé**.

On met notre éprouvette dans un Testeur **de Pression Hydrostatique**.

Selon la norme, l'essai doit se faire selon les exigences de la norme suivantes :

- Echantillon : Tube 63PN10
- Diamètre Nominale (d_{em}) : 63,0 mm
- Epaisseur de la paroi du tube (e_{min}) : 3,915 mm
- Matière première : PE100
- Embouts : Type 'A'
- Pression d'essai : P = 15,9 bar
- Température d'essai : 20°C
- Nombre d'éprouvettes : 03
- Type d'essai : 'Eau dans l'eau'
- Durée d'essai : 100 Heures
- Exigence : **Aucune rupture** d'éprouvette pendant les **100 premières heures** de l'essai [69-70].

II-4.b. Calcul de la pression dans nos expériences P :

La pression d'essai a été calculée à partir de la norme : ISO 9080:2012, (on trouve la même formule dans les normes : NA 7700-2-2015 et EN 12201-2+A1-2013)

Dans la pratique, on a trouvé l'épaisseur du tube $e_{\min} = 3,915 \text{ mm}$, c'est la moyenne de 08 mesures prises sur différents 08 cotés, le minimum exigé est $e_{\min} = 3,8 \text{ mm}$.

On a déjà $d_{em} = 63,0 \text{ mm}$ (diamètre moyen du tube)

De l'équation : $P = 10 \cdot \sigma \cdot \frac{2e_{\min}}{d_{em} - e_{\min}}$, ($\sigma = 12.0 \text{ Mpa}$)

On trouve : $P = 15,88 \text{ bar}$, dans notre expérience, on a arrondi à **$P = 15,9 \text{ bar}$**

II-5 Expérience 2 :

On doit ici Etudier l'influence de la température de fonctionnement de plus de 20°C sur la durée de vie du tube :

Dans la première expérience, nous avons trouvé que notre tube est conforme l'utilisation à $T=20^{\circ}\text{C}$ toujours selon les exigences.

Dans cette 2ème expérience, nous allons étudier l'influence de température de l'eau transportée dans la canalisation en PEhd, sur la résistance mécanique du tube.

Toujours à Pression constante ($P = 15,9$ bar) dans l'éprouvette, et à Température Constante on fait un test de 'l'eau-dans-l'eau' jusqu'à rupture des éprouvettes.

On refait la même expérience pour des Températures allant de 15°C à 55°C par paliers de 05°C .

On note que le Température de 15°C fait partie de notre série de test, bien qu'elle soit inférieure à 20°C , elle nous donne une orientation dans l'extrapolation de nos graphes plus bas.

II-5.a. Exigences Normative de l'expérience 2:

On note cette expérience 2, le temps nécessaire pour la rupture de l'échantillon pour chaque cas.

- Echantillon : Tube 63PN10
- Diamètre Nominale (d_{em}) : 63,0 mm
- Epaisseur de la paroi du tube (e_{min}) : 3,915 mm
- Matière première : PE100
- Embouts : Type 'A'
- Pression d'essai : $P = 15,9$ bar
- Température 1^{er} essai : 20°C
- Températures des autres essais : $T_1=15^{\circ}\text{C}$, $T_2=20^{\circ}\text{C}$, $T_3=25^{\circ}\text{C}$, $T_4=30^{\circ}\text{C}$, $T_5=35^{\circ}\text{C}$, $T_6=40^{\circ}\text{C}$, $T_7=45^{\circ}\text{C}$, $T_8=50^{\circ}\text{C}$, $T_9=55^{\circ}\text{C}$ (Température de 15°C à 55°C par paliers de 05°C)
- Nombre d'éprouvettes : 03
- Type d'essai : 'Eau dans l'eau'
- Durée de l'essai : Jusqu'à rupture des éprouvettes.
- Exigence : **Jusqu'à Rupture** des éprouvettes.

-

CHAPITRE III :

Résultats - Discussion - Conclusion générale

CHAPITRE III : Résultats - Discussion - Conclusion générale

I-13 Résultat :

Résultats expérience 1 :

I-13.a.1 Temps de rupture des éprouvettes (Heures) :

Température (°C)	Temps de Rupture (Heures)			
	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Moyenne
20	130	129	128	129

Tableau 2: Temps de rupture à 20°C

✓ Il n'y a pas eu de rupture des éprouvettes après 100 Heures du début de l'expérience.

✓ Le résultat est donc concluant est conforme à l'exigence des normes [69-70].

. Résultats de l'expérience 2 :

I-13.a.2 Tableau des résultats des temps de rupture des éprouvettes :

Température (°C)	Temps de Rupture (Heures)			
	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Moyenne
15	145	150	144	146
20	130	129	128	129
25	120	119	124	121
30	113	112	112	112
35	101	103	107	104
40	91	95	94	93
45	62	65	60	62
50	42	46	42	43
55	33	35	36	35

Tableau 3: Tableau des résultats des temps de rupture des éprouvettes

I-13.a.3 Graphes, Temps de Rupture des éprouvettes en fonction de la température:

D'après les résultats obtenus, on fait les graphes temps de rupture en fonction de la température pour les 03 expériences, on fait un autre graphe pour la moyenne des résultats obtenus.

CHAPITRE III : Résultats - Discussion - Conclusion générale

Figure : Temps de Rupture des éprouvettes en fonction de la température

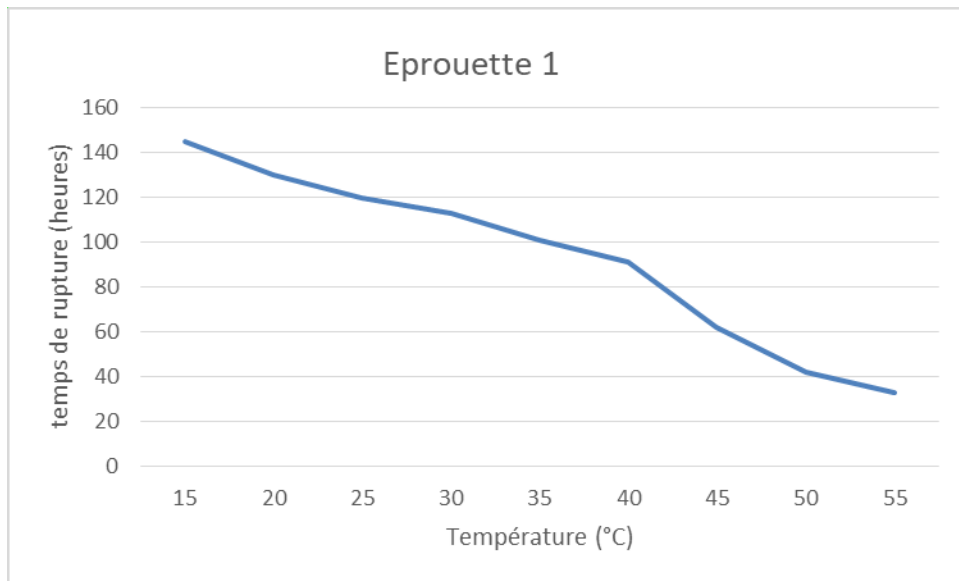


Figure 12 : Temps de Rupture des éprouvettes 1

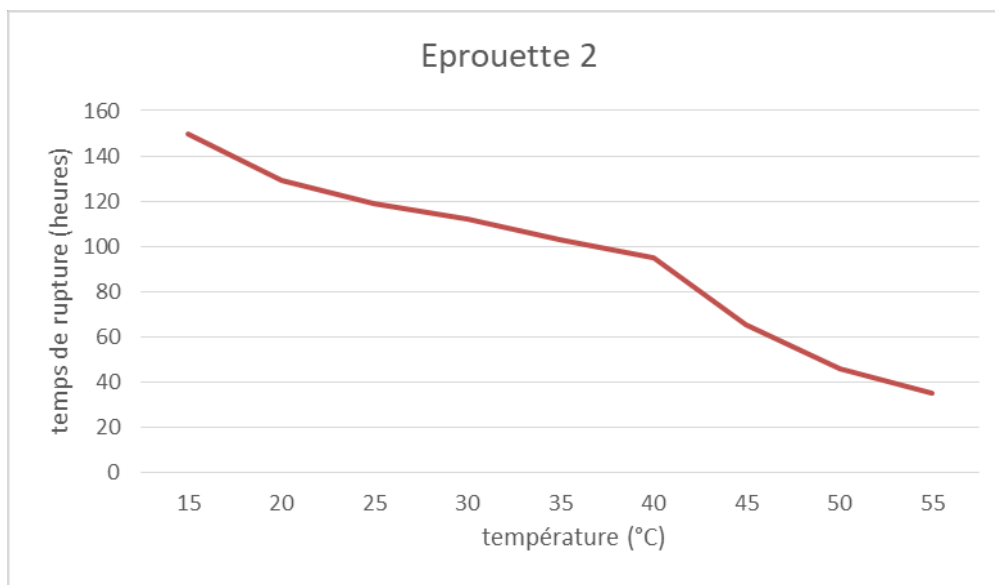


Figure 13: Temps de Rupture des éprouvettes 2

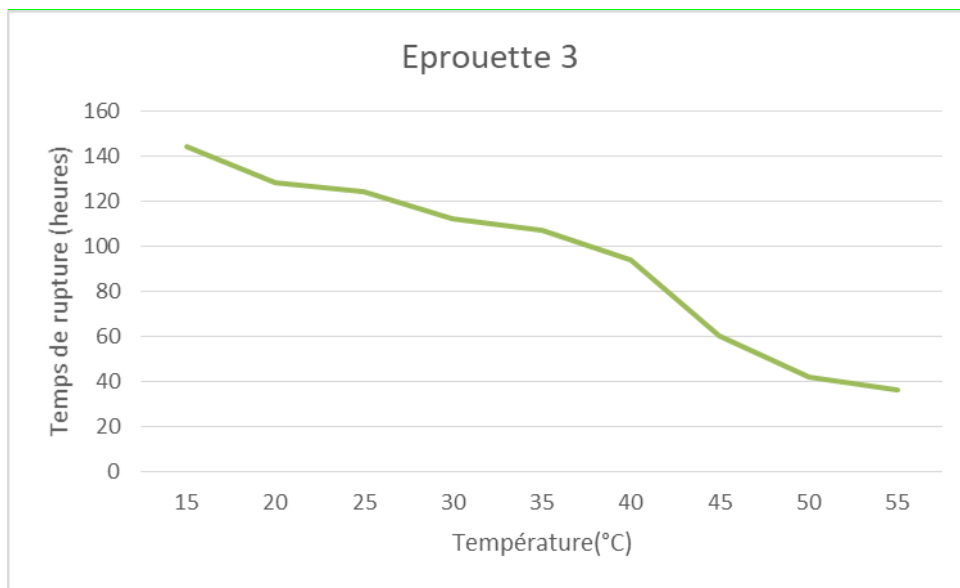


Figure 14: Temps de Rupture des éprouvettes

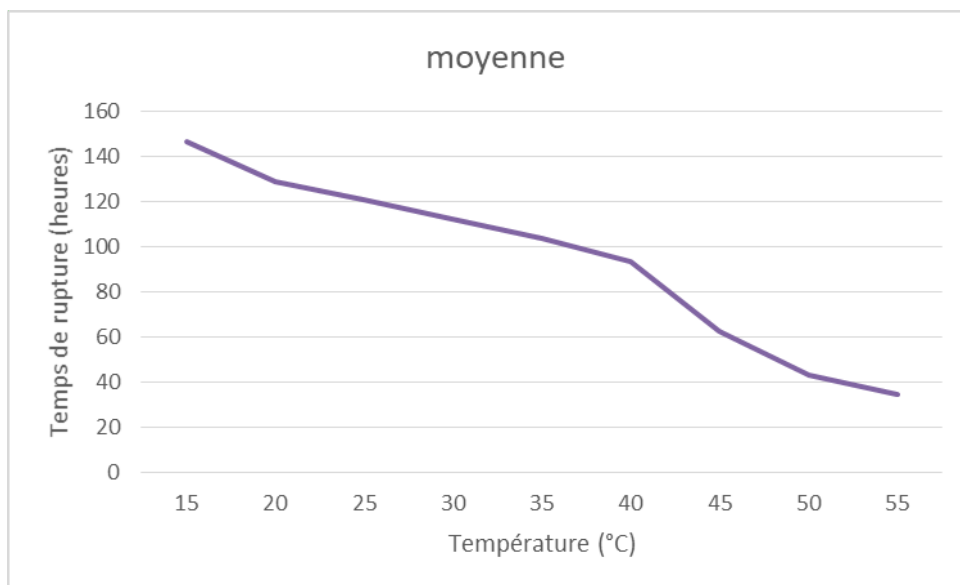


Figure 15: Temps Moyen de Rupture des éprouvettes

CHAPITRE III : Résultats - Discussion - Conclusion générale

I-13.a.4 Estimation de la durée de vie des Tuyaux en PEHD en Fonction de la Température :

De la moyenne des résultats trouvés pour la rupture de chaque échantillon, on calcule la durée de vie optimum pour chaque cas :

I-13.a.5 Durée de vie optimum :

La durée de vie optimum est calculée comme suit :

$$\text{Durée de vie optimum} = (X \text{ Heures}/100 \text{ Heures}) \times 50 \text{ ans} = Y \text{ ans.}$$

Avec :

X : le nombre d'heures pour la rupture des éprouvettes.

Y : la Longévité estimée de l'échantillon en nombre d'années.

Ce qui nous donne le tableau suivant :

I-13.a.6 Tableau de l'estimation de la Longévité des tuyaux en PEHD en fonction de la température :

Température (°C)	Estimation de Longévité (Années)
15	73
20	64,5
25	60,5
30	56
35	52
40	46,5
45	31
50	21,5
55	17,5

Tableau 4: Estimation de Longévité (Années) /Température (°C)

I-13.a.7 .Figure : Estimation de Longévité (Années) fonction de Température (°C) :

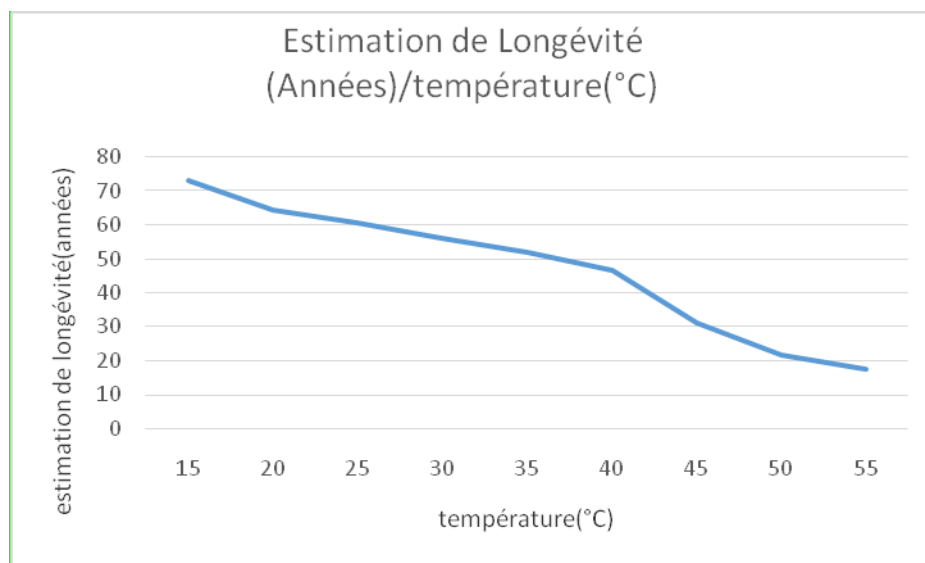


Figure 16 : Estimation de Longévité (Années) fonction de Température (°C).

II-2 Discussion :

On observe d'après les résultats obtenus, que :

Le temps de rupture en fonction de la température diminue, et suit une **ligne droite** entre les valeurs de la **température 15°C et 40°C**.

Entre **40°C et 55°C**, le **temps de rupture chute de façon considérable** ce qui signifie une **forte diminution de la résistance mécanique** des tubes.

À moins de 40°C, tous les échantillons résistent 100 heures et plus.

La température de 40°C sépare 02 zones :

1ère Zone : moins de 40°C, où la **diminution** est sous **forme rectiligne**.

2ème Zone : Supérieure à 40°C, qui montre une **zone imprévisible de non confiance**.

La **température de 50°C**, est la **température critique de non utilisation des tubes en PEhd**.

Conclusion générale

III-3 Conclusion générale :

À partir des résultats obtenus, on constate que pour les tuyaux en PEHD , et qui sont soumis à une pression interne pour le transport ou l'adduction de l'eau avec une température de 15°C à 40°C, la durée de vie peut-être estimée à plus de 50 ans comme cela est décrit dans les différentes normes [69-70].

Plus la température de l'eau transportée augmente, plus la durée de vie des tuyaux en PEHD diminue.

Au-delà de 40°C, l'estimation de la durée de vie diminue de façon considérable.

Pour les installations de tuyaux en PEHD destinés pour le transport ou adduction des eaux à plus de 40°C, il faut prévoir plus d'entretien ou carrément leur remplacement à des temps relativement courts.

Bibliographie

- [1] <https://elydan.eu/applications/eau-potable/reseaux-eau-potable/>
- [2] <https://www.billmat.fr/systemes-canalisation/>
- [3] <https://www.naite.fr/blog/canalisation-pehd>
- [4] <https://www.aliaxis.fr/solutions/solutions-pour-les-infrastructures/tubes-pe100-le-pehd-pour-les-reseaux-dinfrastructures>
- [5] : Direction du tourisme et de l'artisanat de Guelma : Guelma.mta.gov.dz
- [11] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Polyethylene.html>
- [12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Poly%C3%A9thyl%C3%A8ne>
- [13] <https://www.rtprototype.com/what-is-polyethylene/>
- [14] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/matieres-thermoplastiques-monographies-42147210/polyethylene-haute-densite-pe-hd-am3315/definitions-am3315niv10001.html>
- [15] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/poly%C3%A9thyl%C3%A8ne/64934>
- [16] <https://www.nagwa.com/fr/explainers/643158384970/>
- [17] <https://www.conceptcuve.com/polyethylene-pehd.html>
- [18] <https://www.artis-groupe.fr/blog/pehd>
- [19] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/matieres-thermoplastiques-monographies-42147210/polyethylene-haute-densite-pe-hd-am3315/definitions-am3315niv10001.html>
- [20] <https://arapack.fr/plastique-pehd/>
- [21] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/poly%C3%A9thyl%C3%A8ne/64934>

- [22] http://fsm.univ-tiaret.dz/docs/cours/C_L3_CM_Mat%C3%A9riaux%20II_kebir.pdf
- [23] https://www.inrs.fr/dms/plastiques/PolymerePlastiques/PLASTIQUES_polymere_13-1/POLYMERE_PE.pdf
- [24] <https://arapack.fr/plastique-pehd/>
- [25] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Poly%C3%A9thyl%C3%A8ne>
- [26] <https://arapack.fr/plastique-pehd/>
- [27] <https://plaqueplastique.fr/quest-ce-que-le-polyethylene-pehd/>
- [28] <https://www.conceptcuve.com/polyethylene-pehd.html>
- [29] <https://arapack.fr/plastique-pehd/>
- [30] <https://arapack.fr/plastique-pehd/>
- [31] <https://www.gilac.com/fr/content/36-le-pehd-alimentaire>
- [32] <https://www.aliaxis.fr/solutions/solutions-pour-lindustrie/solutions-pehd>
- [33] <https://www.france-industrie.pro/recyclage-du-polyethylene-haute-densite-pehd-processus-avantages-et-utilisations/>
- [34] <https://www.fontaine-a-eau.com/actualites/impact-plastique-environnement>
- [35] <https://www.avenir-industrie.fr/les-avantages-du-plastique-pehd/>
- [36] <https://prototool.com/fr/moulage-par-injection-de-hdpe/>
- [37] <https://www.artis-groupe.fr/blog/pehd>
- [38] <https://elydan.eu/methode-de-fabrication-extrusion/>
- [39] https://fr.wikipedia.org/wiki/Moulage_par_soufflage
- [40] <https://xometry.pro/fr/articles/moulage-par-soufflage-technologie/>
- [41] <https://www.acaplastiques.com/details->

- [42] <https://www.nh-technology.de/fr/kunststoffverarbeitung/>
- [43] <https://www.france-industrie.pro/recyclage-du-polyethylene-haute-densite-pehd-processus-avantages-et-utilisations/>
- [44] <https://prototool.com/fr/moulage-par-injection-de-hdpe/>
- [45] <https://www.avenir-industrie.fr/les-avantages-du-plastique-pehd/>
- [46] <https://icpg.co/fr/materials-and-applications/high-density-polyethylene-hdpe/>
- [47] <https://fr.sunualszh.com/products/anti-rodent-termites-hdpe-shething-material.html>
- [48] <https://www.france-industrie.pro/recyclage-du-polyethylene-haute-densite-pehd-processus-avantages-et-utilisations/>
- [49] <https://icpg.co/fr/materials-and-applications/high-density-polyethylene-hdpe/>
- [50] <https://www.gilac.com/fr/content/36-le-pehd-alimentaire>
- [51] <https://www.artis-groupe.fr/blog/pehd>
- [52] <https://fr.sunualszh.com/products/anti-rodent-termites-hdpe-shething-material.html>
- [53] <https://www.wastetrade.com/fr/resources/introduction-to-plastics/types-of-plastics/high-density-polyethylene-hdpe/>
- [54] "Thermal conductivity." Encyclopædia Britannica, Encyclopædia Britannica, Inc., www.britannica.com/science/thermal-conductivity.
- [55] "Thermal Conductivity." Department of Materials Science & Metallurgy, University of Cambridge, www.doitpoms.ac.uk/tlplib/thermal-conductivity/index.php.
- [56] <https://www.avenir-industrie.fr/les-avantages-du-plastique-pehd/>
- [57] <https://www.gilac.com/fr/content/36-le-pehd-alimentaire>
- [58] <https://fr.sunualszh.com/products/anti-rodent-termites-hdpe-shething-material.html>
- [59] <https://icpg.co/fr/materials-and-applications/high-density-polyethylene-hdpe/>

- [60] Le principe du *soudage* par *bout-à-bout*, thèse de Doctorat *Hehn, Hal*, 2006
- [61] https://setiftube.com/products/pehd/eau_potable
- [62] <https://www.anjou-connectique.com/plomberie/tube-polyethylene-pehd-et-raccords/tubes-pehd.html>
- [63] <https://prototool.com/fr/moulage-par-injection-de-hdpe/>
- [64] <https://www.groupe-chiali.com/produits/tube-pehd-pe100-distribution-eau>
- [65] https://setiftube.com/products/pehd/eau_potable
- [66] <https://www.anjou-connectique.com/plomberie/tube-polyethylene-pehd-et-raccords/tubes-pehd.html>
- [67] tubexalgerie.com
- [68] Norme Iso : Iso1167
- [69] Norme Algérienne : NA 7700-2-2015
- [70] Norme Européenne : EN 12201-2+A1-2013
- [71] Norme Iso : Iso 1159-1 V 2015