

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Master
Conception et Production Industrielle
Présenté par : HAMRERAS TAQIYEDDINE

***Etude de comportement mécanique sous
Sollicitation statique et cyclique d'un PEHD80***

Sous la direction du : Pr. FATMI Louendi

Juin 2016

Remerciement

Je remercie dieu avant tout

Je remercie chaleureusement

Le Pr. Fatmilouendi d'avoir encadré ce travail.

Pour tous les précieux conseils qu'ils nous ont apportés.

*Ainsi que tout le personnel du département de génie
mécanique.*

Merci à mes collègues qui

Mon accompagnent dans mon parcours

Je voudrais remercier tout

Particulièrement mes parents ainsi que tous

Les membres de ma famille pour leur soutien et

leurs encouragements.

Résumé

Du fait de leurs excellentes propriétés mécaniques, les PEHD de dernière génération ne peuvent être discriminés par des tests usuels de durée de vie, qui conditionnent la mise en service. Progresser dans la compréhension du comportement du HDPE tubulaire et tenter de mettre en place des tests mécaniques à court terme permettant de mieux maîtriser leur comportement est l'objectif principal de ce projet.

Les essais de traction statique ont montré que les caractéristiques mécaniques de matériau étudié sont fortement liées à la vitesse de chargement. La traction cyclique du PEHD80 à déplacement imposé pour différents nombres de cycles.

Mots clés : *Polyéthylène, Contraintes, Déformations, Propriétés mécaniques, Rupture, Traction Cyclique.*

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I Recherche bibliographique	1
I. Introduction	3
I.2. Les polymères	3
I.2.1. Définition	3
I.2.2. Structure	3
I.2.2.1. Polymères linéaires	3
I.2.2.2. Polymères ramifiés	4
I.2.2.3. Polymères tridimensionnels	4
I.2.3. Classification des polymères	4
I.3. Les polyéthylènes	6
I.3.1. Définition	6
I.3.2. Structure et propriétés	6
I.3.3. Polyéthylènes haute densité (PEHD)	7
I.3.4. Propriétés des polyéthylènes	8
I.3.5. Caractéristiques du PEHD	9
I.3.6 Tubes en polyéthylènes	9
I.3.6.1. Spécification pour composition de base	9
I.3.6.2. Caractéristiques et classification	9
I.3.6.3. Domaine d'utilisation	10
I.3.6.4. Extrusion de tubes	10
I.3.6.5. Les produits obtenus	14
I.3.7. Principales Propriété du PEHD	14
Chapitre II	1
II.1. Introduction	17
II.2. Caractérisation du PEHD 80	17
II.3. préparation des éprouvettes	17
II.3.1. Matériau étudié et modes l'obtention des éprouvettes	17
II.3.2. Eprouvettes obtenues par déformation plastique	17
II.4. Effet du mode d'obtention des éprouvettes sur le comportement mécanique d'un PEHD 80 soumis à une traction	19
II.4.1. Eprouvettes d'essais	19

Table des matières

II.4.2. Banc d'essais	19
II.4.3. Essai de traction	20
II.5. Conclusion	22
Chapitre III	17
III.1. Introduction	32
III.2. Résultats obtenus	32
III.2.1. Point de vue comportement	32
III.2.2. Analyse des résultats	36
III.2.3. point de vue endommagement	36
III.3. Caractérisation du PEHD 80 en traction cyclique	38
III.3.1. Résultats obtenus	39
III.4. Conclusion	41
Conclusion générale	42

Chapitre I

Figure I- 1: Définition d'un polymère.	3
Figure I- 2: Principaux critères d'états de surface [1].....	5
Figure I- 3: Réaction d'addition	6
Figure I- 4: Matières premières PEHD pour extrusion de tubes.....	7
Figure I- 5: La ligne d'extrusion de tube polyéthylène.....	11
Figure I- 6: Extrudeuse mono vis.	12
Figure I- 7: Tubes en PEHD pour distribution de gaz.	14

Chapitre II

a) Emporte-pièce	b)Eprouvettes d'essais	Figure II- 1: Emporte- pièce et éprouvettes obtenues	18
Figure II- 2: Eprouvettes normalisées en déformation plastique.....			18
Figure II- 6: Machine d'essai universelle Type Zwick Z005.....			20
Figure II- 7: Courbe de traction d'un PEHD.[6]			21
Figure II- 8: Différentes zones de traction uni axiale d'un PEHD.[4]			22

Chapitre III

Figure III- 1: Courbes comportement mécanique expérimentale en traction	33
Figure III- 2 : Courbes comportement mécanique expérimentale en traction	34
Figure III- 3: courbes comportement mécanique expérimentale en traction	35
Figure III- 4: observation des mécanismes d'endommagement (pour $v=100\text{mm/min}$)	37
Figure III- 5: Structure du PEHD 80 observée par microscope optique.	37
Figure III- 6: Courbe de comportement expérimentale contrainte –déformation du PEHD80 en traction statique (pour $V=500\text{mm/min}$).	38
Figure III- 7: Courbes de comportement expérimental contraint déformation du PEHD80 en traction cyclique (pour $V=500\text{mm/min}$).	40

Chapitre I

<i>Tableau I- 1: Evolution des propriétés mécaniques en fonction des paramètres structuraux.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau I- 2: Propriétés du PEHD.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau I- 3: Composition de base.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau I- 4: Classification de la résine.....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau I- 5: Valeurs des températures d'extrusion</i>	<i>12</i>
<i>Tableau I- 6: Principales propriété du PEHD.....</i>	<i>15</i>

Chapitre III

<i>Tableau III- 1: Valeurs expérimentales des propriétés mécanique du PEHD80</i>	<i>33</i>
<i>Tableau III- 2: Valeurs expérimentales des propriétés mécanique du PEHD80</i>	<i>34</i>
<i>Tableau III- 3: Valeurs expérimentales des propriétés mécanique du PEHD80</i>	<i>35</i>

Introduction générale

Parallèlement au développement de nouvelles techniques d'analyses, les dernières décennies ont vu l'explosion de l'utilisation des polymères dans notre environnement et plus particulièrement les polyéthylènes. Cette forte utilisation a conduit à de nombreuses études sur le comportement de ces nouveaux matériaux entraînant le développement de nouvelles techniques et méthodes adaptées aux polymères et en particulier aux polyéthylènes.

Les polymères et polyéthylènes sont de plus en plus présents dans la vie quotidienne. De tout temps l'homme a cherché à les exploiter pour se nourrir, pour produire de l'énergie, pour construire, améliorer et agrémenter son habitat, pour se protéger et se vêtir, pour se déplacer et etc...

Ces matériaux sont rarement utilisés seuls, mais combinés à d'autres matériaux, permettant ainsi d'associer les propriétés de chacun.

De nos jours, les réseaux de distribution sont majoritairement construits avec des polymères résistants. La caractéristique des polymères découle de leur structure atomique et notamment de l'existence de chaînes réticulées. Le matériau le plus convoité est le polyéthylène et notamment le polyéthylène haute densité. Le polyéthylène est issu de la polymérisation du monomère éthylène. Il possède l'une des structures chimiques les plus simples de tous les polymères.

Les tubes en polyéthylène haute densité sont considérablement employés dans la distribution et le transport du gaz naturel, puisque plus de 80% des nouveaux réseaux utilisent les polyéthylènes haute densité (PEHD) [1]. La flexibilité des tubes, la résistance aux agents chimiques, la qualité et la fiabilité des jonctions assurent des canalisations fiables et économiques. La Nouvelle classe PE 100 est supposée résister à une contrainte circonférentielle de 10 MPa pour 50 ans [1].

La stabilité de ces propriétés dans le temps est un facteur déterminant pour une utilisation industrielle.

Le **premier chapitre** présente une recherche bibliographique sur les différents types de polymères et polyéthylènes, la polymérisation, les paramètres structuraux, la mise en forme, le comportement mécanique et les paramètres influents sur les propriétés mécaniques.

Introduction générale

Le **deuxième chapitre** est réservé à la procédure expérimentale et donc la préparation des éprouvettes d'essais, le banc d'essais ainsi que le comportement global des polymères.

Le **troisième chapitre** est une étude expérimentale du matériau considéré, il présente les aspects suivants :

Le premier considère l'influence de la vitesse d'essais sur le comportement mécanique expérimental du matériau.

Le deuxième porte sur l'observation des mécanismes d'endommagements.

Le troisième consacré à l'étude de l'influence du nombre de cycles pour un niveau de chargements d'une part sur le comportement et les propriétés mécaniques du PEHD 80 et d'autre part sur la morphologie du matériau.

Chapitre

I Recherche bibliographique

I. Introduction

L'objectif assigné au présent travail est l'étude de l'influence du mode de préparation des éprouvettes sur le comportement mécanique expérimental du polyéthylène haute densité grade 80 soumis à des sollicitations statiques et cycliques et en particulier : le fini de surface des éprouvettes, la vitesse de chargement, le nombre de cycles et le niveau de chargements d'une part sur les caractéristiques mécaniques et d'autre part sur la morphologie de ce matériau, le mémoire est structuré en trois chapitres.

I.2. Les polymères

I.2.1. Définition

Les polymères sont des substances constituées de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou de plusieurs unités de base.

Le nombre moyen de ces unités de base (**monomères**) dans les molécules finales (**polymères**) est le degré de polymérisation. Si ce degré de polymérisation est élevé, on parle de hauts polymères, lorsqu'il est faible, le composé est une oligomère.

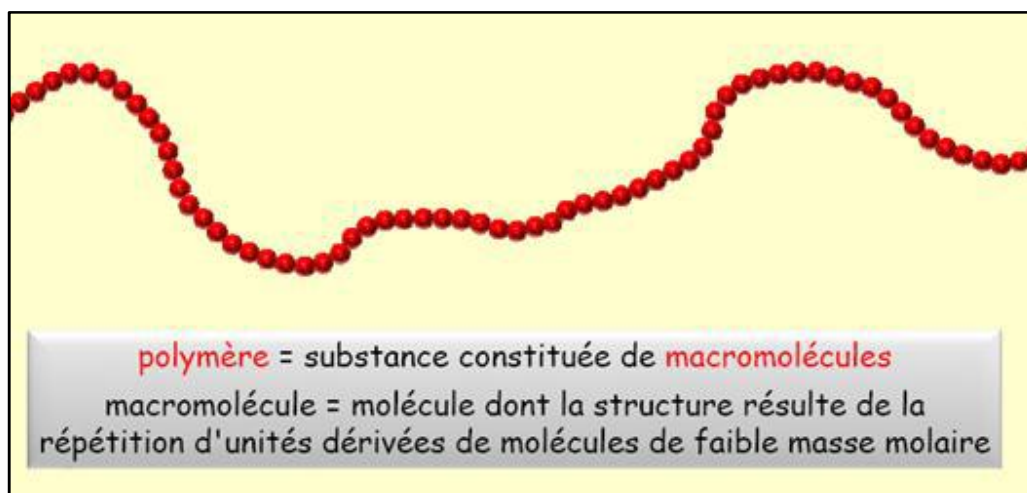


Figure I- 1: Définition d'un polymère.

I.2.2. Structure

I.2.2.1. Polymères linéaires

Appelés aussi polymères monodimensionnels, Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns à la suite des autres par des liaisons chimiques.

Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu est partiellement cristallisé : on dit qu'il est semi-cristallin [2].

Chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre élevé mais fini d'unités monomères, de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère.

I.2.2.2. Polymères ramifiés

Dans les polymères ramifiés, certaines chaînes latérales sont liées à la chaîne principale. Les ramifications peuvent être dues à des impuretés ou à la présence de monomères ayant plusieurs groupes réactifs. Les polymères formés de monomères présentant des ramifications. [2]

I.2.2.3. Polymères tridimensionnels

Les polymères tridimensionnels, qui résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule, Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système.

I.2.3. Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés différemment selon la considération de leurs structures, le type de réaction qui a servi à les préparer leurs propriétés physiques ou leurs usages technologiques [2].

a) Selon la nature chimique

- Polymères minéraux.
- Polymères organiques.
- Polymères mixtes.

b) La structure des chaînes

- Polymères linéaires.
- Polymères ramifiés.
- Polymères réticulés.

c) Selon leur origine

- Polymères naturels.
- Polymères synthétique et de transformation.

d) Selon leur comportement thermique

- Polymères thermoplastiques.
- Polymères thermodurcissables.
- Polymères thermo élastiques.

e) Selon les usages technologiques

On peut distinguer :

- Les fibres synthétiques.
- Les plastomères (thermodurcissables et thermoplastiques).
- Les élastomères [1]

Nous pouvons conclure la famille de polymères dans la *figure I-2*

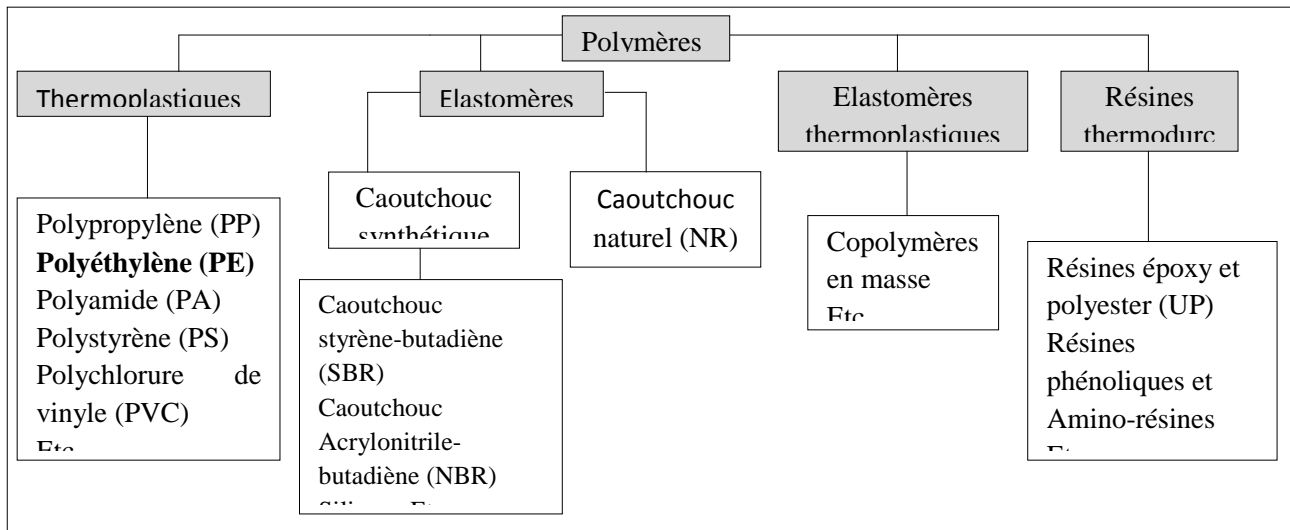


Figure I- 2: Principaux critères d'états de surface [1]

I.3. Les polyéthylènes

I.3.1. Définition

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique, de molécule C_2H_4 , représentant une longue chaîne d'atomes de carbone. Parfois les atomes de carbone au lieu d'être liés à des atomes d'hydrogène, ils sont liés à de longues chaînes de polyéthylène, appelé polyéthylène ramifié, ou polyéthylène basse densité (PEBD). Ces polyéthylènes sont des polymères à branches longues et courtes fabriqués par amorçage radicalaire avec les procédés haute pression, de masse volumique: 0,910 à 0,935 g/cm^3 [10]. L'absence de ramification mène, au polyéthylène linéaire, dit de haute densité (PEHD). Les polyéthylènes sont issus de la polymérisation d'éthylène gazeux et peuvent être de natures différentes suivant les modes de synthèse. Divers procédés sont utilisables pour cette polymérisation, parmi lesquelles nous citerons : la déshydratation d'alcool éthylique sur de l'alumine, l'hydrogénation de l'acétylène, le cracking des hydrocarbures aliphatiques et les gaz naturels. L'éthylène doit être soigneusement purifié, pour donner lieu à une croissance saine de la chaîne [11], Le polyéthylène peut être très différent d'un industriel à l'autre. Cette différence est due au fait que tous les polymères contiennent une gamme moléculaire de longueurs variables; une légère différence d'élaboration entraîne une modification de cet aspect. Les processus de polymérisation influent également sur la ramification des molécules et sur le degré de cristallinité du produit final. Les propriétés peuvent être modifiées par un traitement mécanique ou par des additifs appropriés. Dans le cadre de notre travail nous intéressons aux polyéthylènes de haute densité.

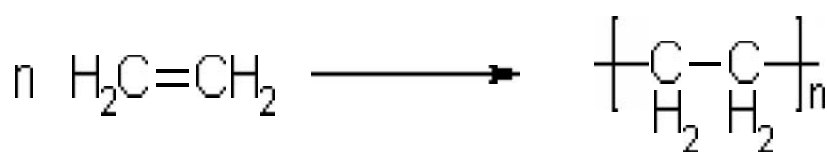


Figure I- 3: Réaction d'addition

I.3.2. Structure et propriétés

Les polyéthylènes (PE) possèdent l'une des structures chimiques les plus simples de tous les polymères, Ce sont des matériaux thermoplastiques semi cristallins qui représentent un enchaînement de groupe $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)$ [3]. Ils sont obtenus par polymérisation d'éthylène gazeux.

Ce dernier est polymérisé en présence d'un Co monomère (butène, pentène, hexane, octane...etc.). Divers procédés sont utilisables pour cette polymérisation, au nombre desquelles nous citerons : la déshydratation de l'alcool éthylique sur l'alumine, l'hydrogénation de l'acétylène et le cracking des hydrocarbures aliphatiques se trouvant dans le naphta (pétrole brut) et les gaz naturels. Cette dernière s'effectue à haute température, vers 800°C. L'éthylène doit être soigneusement purifié, pour le débarrasser de diverses impuretés gazeuses comme : CO, CO₂, N₂, NH₃, S...qui pourraient jouer le rôle d'inhibiteurs de polymérisation, en rompant les chaînes de polymère, au fur et à mesure de leur formation .

I.3.3. Polyéthylènes haute densité (PEHD)

Le polyéthylène haute densité est un polymère thermoplastique de grande diffusion. Il fait partie, La famille des **polyoléfines**, au même titre que les polyéthylènes basse densité ou moyennedensité, et le propylène. Les principales qualités de PEHD sont: bonne résilience même à basse température, résistance aux produits chimiques, faible sensibilité à l'eau, imperméabilité à la vapeur d'eau, excellentes propriétés électriques. Donc un matériau de choix pour des applications variées comme l'extrusion-soufflage de corps creux, l'injection de divers articles, l'extrusion de films, de tubes et de câbles. Le polyéthylène haut densité est habituellement présent sous forme de granulés cylindriques ou lenticulaire de quelque millimètre *figure I-4* Ces granulés sont incolores et translucides à l'état naturel. Certaines applications nécessitent l'utilisation de compounds colorés dans la masse.



Figure I- 4: Matières premières PEHD pour extrusion de tubes

Le polyéthylène haute densité est obtenu par des procédés de polymérisation de l'éthylène à basse pression (exemple: Ziegler-Natta), seul ou avec des co monomères. La polymérisation rompt la double liaison, ce qui active le monomère d'éthylène et lui permet de se lier à d'autres, pour former une longue chaîne, ou macromolécule.

Le procédé Ziegler est basé sur l'emploi d'un catalyseur à base de tétrachlorure de titane associé à un composé organométallique: un chlorure d'alkyl l'aluminium. Les premières unités dépolymérisation en solution ont peu à peu laissées la place à d'autres fonctionnant en suspension dans un hydrocarbure de type hexane. Les températures de réaction sont généralement légèrement inférieures à 100° C et la pression est de quelques mégas pascaux (50 bars). Le degré de copolymérisation dépend des proportions relatives d'éthylène et de Co monomère dans le milieu réactionnel. La masse est contrôlée par un agent de transfert qui est l'hydrogène [4].

I.3.4. Propriétés des polyéthylènes

Elles dépendent de ses paramètres structuraux comme la cristallinité, la masse volumique et la distribution des masses molaires, de la conception de la pièce, des conditions de mise en œuvre et des conditions d'utilisation comme le type et la durée des contraintes, ainsi que de la température. Le tableau 1 regroupe l'influence des paramètres structuraux sur les propriétés mécaniques du PEHD.

Tableau I- 1: Evolution des propriétés mécaniques en fonction des paramètres structuraux

Propriétés		Effet de l'augmentation de :		
		Cristallinité	Masse molaire	L'indice de fluidité
Mécaniques	Rigidité	↑	↑	↑
	Dureté	↑	↑	=
	Résistance à l'abrasion	↑	↑	=
	Résistance à Re élastique	↑	↑	=
	Allongement à la rupture	↓	=	=
	Allongement au choc	↓	↓	=
	Résistance au fluage	=	↓	=
↑Augmentation		↓ Diminution	= Pas de variation	

I.3.5. Caractéristiques du PEHD

Le *tableau I-2* illustre les valeurs indicatives des caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques.

Tableau I- 2: Propriétés du PEHD

Propriétés	PEHD
Masse volumique (g/cm ³)	0.95-0.98
Taux de cristallinité (%)	73-82
Module de Young à 20°C (GPa)	0.55-100
Résistance à la traction (MPa)	20-37
Module en flexion (MPa)	800-1100
Ténacité à 20°C (MPa m ^{1/2})	2-5
Température de transition vitreuse T _g (K)	300
Température de ramollissement T _g (K)	390
Chaleur massique (J Kg ⁻¹ K ⁻¹)	2100
Conductivité thermique (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.52
Coefficient de dilatation thermique (MK ⁻¹)	150-300

I.3.6 Tubes en polyéthylènes

I.3.6.1. Spécification pour composition de base

Le *tableau 3* regroupe quelques Valeurs de composition de base pour les tubes en polyéthylènes.

Tableau I- 3: Composition de base

Caractéristiques	Spécifications	Paramètres d'essais	Méthodes d'essais
Teneur en matière Volatile	≤ 350mg/kg		NF EN 12099
Teneur en noir de Carbone	2.0 à 2.6 en masse		ISO 6964 ou NF T51-140
Dispersion du noir De carbone	≤ 3		ISO 11420 ou NF T51-142
Tenue aux Composants des gas	≥ 20 h	80°C, 2MPa	NF-T54-065

I.3.6.2 Caractéristiques et classification

Les tubes polyéthylènes sont caractérisés par:

- la classification de la résine : PE 40 - 63 - 80 - 100.
- la pression nominale
- le SDR: Diamètre extérieur / Epaisseur;

- la. NIRS (Minimal Required Strength) ou " contrainte minimale requise ", d'où est issue la classification des résines en PE **tableau 4** L'appellation retenue par la future norme européenne donne à la fois la MRS de la résine et la " résistance hydrostatique à long terme ", En tenant compte du coefficient de sécurité fixé à 1,25.

Les canalisations en polyéthylène se classent selon la MRS de la résine utilisée pour leur fabrication. Des normes d'utilisation axent le cadre conventionnel des comparaisons entre plusieurs résines PE sur une durée de 50 ans à une température de 20° C. D'une façon générale, la tenue d'une canalisation est fonction de sa durée et de sa température d'initialisation.

Tableau I- 4: Classification de la résine

Classification résine (Selon ISO)	Contrainte minimale requise (MRS)	Résistance hydrostatique à long terme (à 20° C)
PE100	10.0 MPa	8.0 MPa
PE80	8.0 MPa	6.3 MPa
PE63	6.3 MPa	5.0 MPa
PE40	4.0 MPa	3.2 MPa
PE32	3.2 MPa	2.5 MPa

I.3.6.3 Domaine d'utilisation

Les applications sont nombreuses et intéressantes, on distingue:

- les conduites de transport de pétrole, fuel, gaz, eau potable
- les conduites de transport de pâtes cellulósiques
- les conduites de ventilation et de dépoussiérage
- l'irrigation et le drainage
- le gainage de câbles.

I.3.6.4 Extrusion de tubes

L'extrusion est le procédé le plus utilisé pour la mise en forme des polymères, et en particulier les thermoplastiques. Cette opération a pour objet la transformation de la matière thermoplastique en une masse visqueuse homogène, susceptible de s'écouler à débit constant à travers une filière, sous l'effet d'une pression pour fabriquer des produits finis ou des semi-produits (films, plaques, tubes, profilés, isolations de câbles...).

Les principaux problèmes rencontrés lors de l'extrusion de tubes sont les difficultés liées à l'obtention d'une épaisseur homogène sur toute la périphérie du tube; et le contrôle de la température pour éviter tout échauffement préjudiciable à la qualité du produit [5]

La ligne d'extrusion est globalement constituée de 4 zones suivantes :

- Zone 1 : l'extrudeuse ou boudineuse qui consiste à fondre les granulés de polyéthylène à température de 230°C qui donne une pâte et le pousse à travers la zone suivante.
- Zone 2 : Tête d'extrusion qui met la matière fondue sous forme de tube.
- Zone 3 : pour les bacs de calibrage et de refroidissement, Le tube y est calibré en diamètre extérieur et en épaisseur. Il transite dans une enceinte de refroidissement par circulation ou aspersion d'eau.
- Zone 4 : Les périphériques consistent à faire sur le tube un marquage ou tirage de repérage situé tous les mètres et déposer la peinture par jet d'encre puis découper la longueur de tube et nécessaire de conditionner.

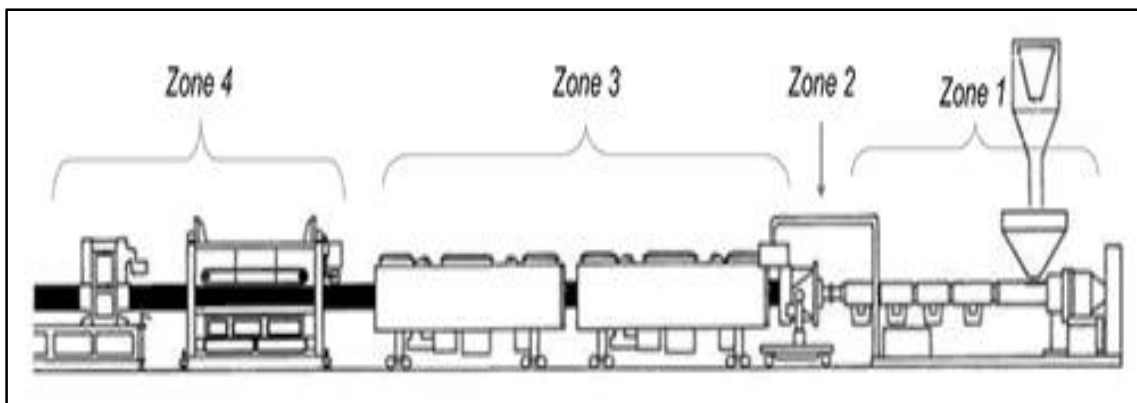


Figure I- 5: La ligne d'extrusion de tube polyéthylène

a) L'extrudeuse

La machine est alimentée en matière pulvérulente par une trémie (1). L'extrudeuse mono vis (2),

dans laquelle une vis de type Archimède tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique, ce dernier est généralement muni de colliers chauffants électriques reliés à un ensemble de régulateurs qui régulent la température le long du fourreau.

La principale fonction de l'extrudeuse est de fondre le polymère, le mettre en pression et le mélanger du polymère fondu, afin d'alimenter dans de bonnes conditions la filière en tête, qui

donnera la forme au produit fabriqué, Le **tableau I-5** montre quelques valeurs indicatives de réglage de température d'extrusion du polyéthylène haute densité.

D'après les observations qui ont été faites sur l'état du polymère dans la machine en régime permanent, on peut distinguer trois zones phénoménologiques **figure I-6**.

- la zone d'alimentation, dans laquelle le polymère est entièrement solide (en poudre, plus au moins compacte) :
 - La zone de plastification, dans laquelle coexistent le polymère et le copolymère déjà fondu
 - La zone de pompage, dans laquelle le polymère est totalement fondu [6].

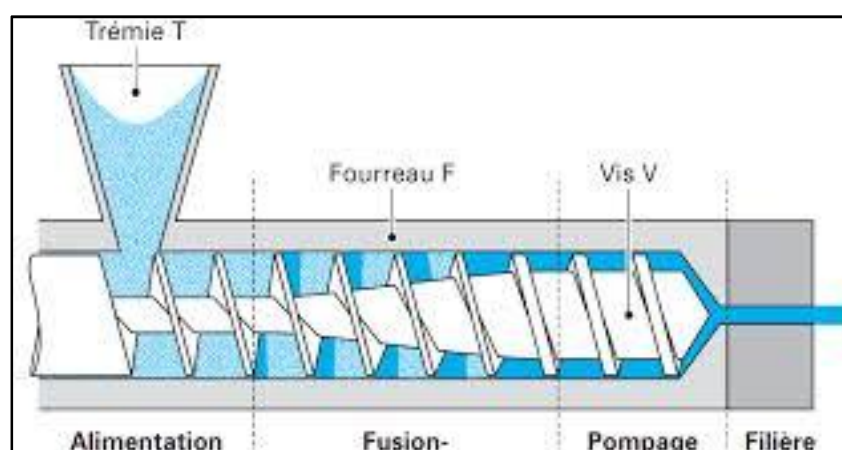


Figure I- 6: Extrudeuse mono vis [6].

Tableau I- 5: Valeurs des températures d'extrusion

Matière	Pression en MPa	Température en °C				
		Zone d'alimentation	zone de compression	zone de pompage	Tête	filière
PE haute Densité	100-180	140	160	165	165	170

b) La filière

Le rôle principal que doit jouer une filière d'extrusion est de fournir à la sortie de l'outillage un produit aux dimensions requises, uniformes en température. Ceci est particulièrement important pour les phases qui suivent l'extrusion proprement dite (étirage,

conformation, refroidissement...), pour lesquelles toute hétérogénéité en sortie de filière pourrait qu'être aggravée et conduire éventuellement à un produit incorrect [7]. Le polymère fondu, est distribué autour d'un mandrin qui est relié au corps de la filière par l'intermédiaire d'ailettes. En sortie, le tube passe dans une filière dite froide, ou conformatrice, constituée d'un anneau refroidi et percé de trous par lesquels l'eau sous pression vient figer la surface extérieure du tube tout en lubrifiant son déplacement. Une légère surpression appliquée à l'intérieur du tube permet de lui conserver la géométrie cylindrique et le plaquer sur la filière froide.

c) Le refroidissement

Le tube poursuit son refroidissement par déplacement dans un ou plusieurs bacs d'eau (4) avant d'être découpé à la longueur requise [7]. Plusieurs types de conformateurs dans lesquels les parois encore chaudes et déformables sont plaquées contre les faces refroidies du calibre par le vide créé, agissant de l'extérieur, ou par la pression de l'air à l'intérieur du tube. Un des systèmes, nommé "conformation en bac d'eau sous vide", est très répandu. Il se compose d'un long réservoir fermé, rempli aux deux tiers d'eau froide constamment renouvelée. L'air au-dessus de l'eau est maintenu sous une dépression de 300 Pa. Le calibrage dans un bac sous vide limite les efforts de frottement entre tube et calibre [7].

d) Héritage

Pour que le profil, qui sort de la filière, ne se déforme pas immédiatement, on le soumet à traction ce qui contribue en partie au maintien de sa forme et de l'épaisseur des parois. L'effort de cette traction doit être ajusté à la vitesse de sortie du profil. Ce rôle est tirage qui agit sur le profil refroidi et dont la vitesse est réglée et contrôlée avec précision le dispositif de tirage conditionne les dimensions du profil et applique l'effort nécessaire au passage dans les conformateurs. Pour les tubes, on utilise plus fréquemment les tireurs à chenilles.

Les tubes fabriqués par extrusion peuvent avoir des diamètres non conformes, ou non calibrés à l'extérieur ou à l'intérieur. Les dimensions des tubes non conformes sont réglées par la vitesse de tirage et la vitesse de refroidissement [6].

e) L'extrudât

Les tubes rigides sont sciés à la longueur désirée, une scie circulaire suit le profil dans son mouvement d'avance, elle est entraînée par le profil lui-même, et commandée automatiquement

par un contacteur électrique. Les tubes souples sont dans la plupart des cas enroulés sur des bobines dont la rotation est liée à la vitesse de tirage.

I.3.6.5. Les produits obtenus

Les tubes en méthylènes doivent avoir des surfaces extérieurs et intérieurs propres et lisses et être exemptes de défauts, tels qu'ils soient susceptibles d'être nuisibles à leur qualité, rayures, piqûres, gains, bulles, soufflures et criques.

L'examen est effectué à l'œil nu, sur des éprouvettes ouvertes selon deux génératrices diamétralement opposées. Les extrémités des tubes doivent être coupées proprement et perpendiculairement à l'axe du tube.

Les filets de repérage jaunes sont au moins au nombre de trois, répartis également sur la circonférence du tube *figure I-7*. Ces filets doivent avoir une faible épaisseur et une faible largeur de façon à ne pas modifier les caractéristiques physiques et mécaniques des tubes.

Le contrôle dimensionnel des tubes doit se faire automatiquement en ligne d'extrusion par scanner.

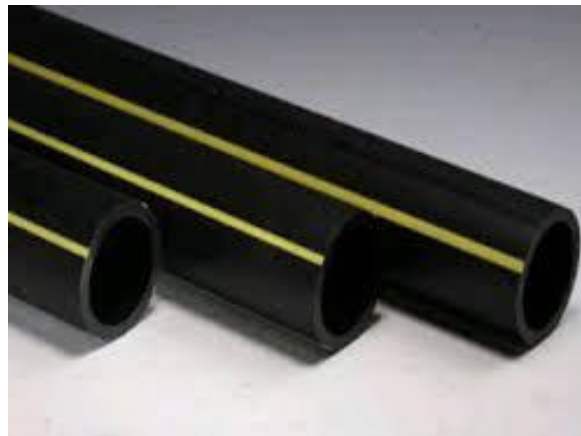


Figure I- 7: Tubes en PEHD pour distribution de gaz.


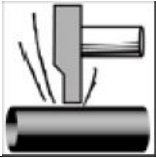

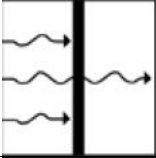


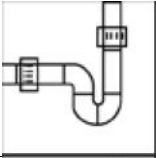

I.3.7. Principales Propriété du PEHD

Les canalisations PEHD s'inscrivent dans un programme complet :

- Fluides sous pression PN 2,5 à 25
- Fluides basse pression - Ecoulement - Assainissement
- Eau potable (PEHD bandes bleues)
- Gaz (PEHD bandes jaunes).

Le **tableau I-6** représente les principales propriétés du PEHD.

Tableau I- 6:Principales propriété du PEHD

	Résistance chimique	Le PEHD résiste aux eaux usées ménagères et chimiques, aux acides et aux eaux de lessive dans une large gamme de concentration et de température à des pH de 1 à 14. Insoluble dans la totalité des solvants organiques et inorganiques à 20°C, il est le mieux adapté pour la résistance au H ₂ S
	Solidité aux chocs	Le PEHD résiste bien aux chocs, même à basse température. C'est donc un matériau qui ne craint pas l'ambiance rude des chantiers, et des différents chocs dans les locaux techniques. D'autre part, il n'est pas sensible aux chocs thermiques.
	Absence de toxicité	Les tuyaux en PEhD sont employés pour le transport des fluides alimentaires et des eaux potables (sources ou compagnies des eaux) les tubes utilisés sont alors dits " organoleptiques " .
	Faible conductivité thermique	Toutes les matières synthétiques sont mauvaises conductrices de chaleur et donc bonnes isolantes. Conductivite du PEhD : 0,37 Kcal/mh°C = 0,43W/mK.
	Condensation	Grâce à leur faible conductibilité thermique, les conduites en PEhD condensent moins que celles en acier ou en fonte.
	Matériau recyclable	Facilement recyclable, le tube et les raccords peuvent être rebroyés. Certaines industries utilisent le polyéthylène ainsi récupéré pour leurs applications. En fin de cycle d'utilisation, la matière peut être brûlée sans résidu ou émanation nocif.
	Surfaces lisses	Le PEhD rigide réunit les caractéristiques idéales que l'on demande à des conduites pour véhiculer des fluides : Absence de rugosité Pas de gonflement (matériau hydrofuge).
	Résistance à l'abrasion	Elle est 4 fois supérieure à celle de l'acier. Les conduites en PEhD peuvent être employées pour le transport de sable et de graviers. Le PEhD résiste aussi aux débris de verre et de métal dans les applications de dragage par exemple.

	Isolant électrique	Le PEhD est une matière non-conductrice d'électricité. Sa valeur ohmique est de 10^{15} W/cm
	Résistance aux U.V.	Le PEhD que nous utilisons comporte un additif d'environ 2% de noir de carbone antioxydant opacifiant pour sa stabilisation aux rayons U.V. Ces mesures lui assurent une stabilité dimensionnelle et une résistance parfaite aux intempéries.
	Bonne élasticité	Elle donne au PEhD une bonne résistance mécanique, aux chocs, aux flexions et aux cisaillements, ce qui se passe lors d'affaissements d'immeubles ou de terrains, sous l'effet du trafic sur les ponts, de canalisations sous voie, de drainage et de tubes flottants.
	Dilatation	Les matières synthétiques réagissent aux changements de températures. Elles se dilatent pour se rétracter ensuite. Suivant les applications, on peut en tenir compte au montage et prévoir des manchons de dilatation ou des bras flexibles.
	Résistance au gel	Les siphons, gouttières et autres éléments en PEhD , pris dans la glace, se prêtent à la déformation et retrouvent sans dommage leur forme initiale au dégel. Le polyéthylène supporte sans dommage des températures atteignant - 40 °C
	Eaux usées radioactives	Les conduites en PEhD peuvent convenir a des effluents légèrement radioactifs (à étudier en fonctions de données précises).
	Adapte aux ambiances marines	Le PEhD résiste à la corrosion, il est souple et léger. De surface lisse et arrondie, il rend l'attaque des rongeurs difficile. Incollable, l'adhérence des mollusques est impossible.
	Tenue à la température	Le PEhD peut être utilisé sans crainte pour l'écoulement d'eau jusqu'à 80 °C en continu, 100 °C en intermittence, ceci sans solution mécanique. Les brèves expositions à la vapeur sont admises.
	Encastrer dans le béton	L'emploi du PEhD est permis, pour la mise en œuvre directement dans le béton. Cette technique implique l'utilisation d'assemblages noyés, effectués obligatoirement par polyfusion Bout à Bout ou manchon électro soudable, (même les assemblages collés du PVC ne sont pas autorisés encastrés). La dilatation du matériau est alors absorbée par lui-même.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1. Introduction

Les éprouvettes d'essai peuvent être obtenues par moulage, découpage ou usinage, Lorsque les éprouvettes sont obtenues par découpage ou usinage dans des plaques ou des objets, Le mode de prélèvement est fondamental quant à l'incidence qu'il peut avoir sur la signification des résultats d'essais. Il nécessite un outillage approprié qui n'entraîne pas de défauts (amorces de rupture, échauffements locaux, etc.) Susceptibles de fausser les résultats.

II.2. Caractérisation du PEHD 80

Les résultats obtenus de l'influence du mode d'obtention des éprouvettes sur le comportement mécanique ont permis de conserver seules les éprouvettes obtenues par déformation plastique pour caractériser le matériau considéré.

II.3. préparation des éprouvettes

II.3.1. Matériau étudié et modes l'obtention des éprouvettes

Les matériaux considérés sont des tubes en polyéthylène de haute densité (PEHD 80), de diamètres extérieur 40 mm et intérieur 32 mm destinés à la distribution de gaz naturel supportant une pression nominale en service de 4 bar, ils sont de fabrication algérienne (Sotuplastchlef). Les caractéristiques mécaniques de ces matériaux dépendent étroitement du mode d'obtention des éprouvettes et donc du fini de surface. La préparation des éprouvettes, conformément à la norme NF T 54-074 fait appelle au découpage par déformation plastique et à usinage.

II.3.2. Eprouvettes obtenues par déformation plastique

Les éprouvettes obtenues par déformation plastique sont réalisées au sein de l'entreprise nationale Sotuplast de Chlef. Elles sont prélevées à partir d'un tronçon de tube d'une longueur de 150 mm, découpé en deux parties égales dans le sens longitudinal, sans chauffage, ni aplatissement de la bande, en exerçant une pression sur emporte-pièce placé au milieu de la face intérieure de celle-ci, les dimensions et la forme géométrique æ éprouvette sont reportées sur la *figure II-2*.



a) Emporte-pièce



b)Eprouvettes d'essais *Figure II-*

1:Emporte- pièce et éprouvettes obtenues

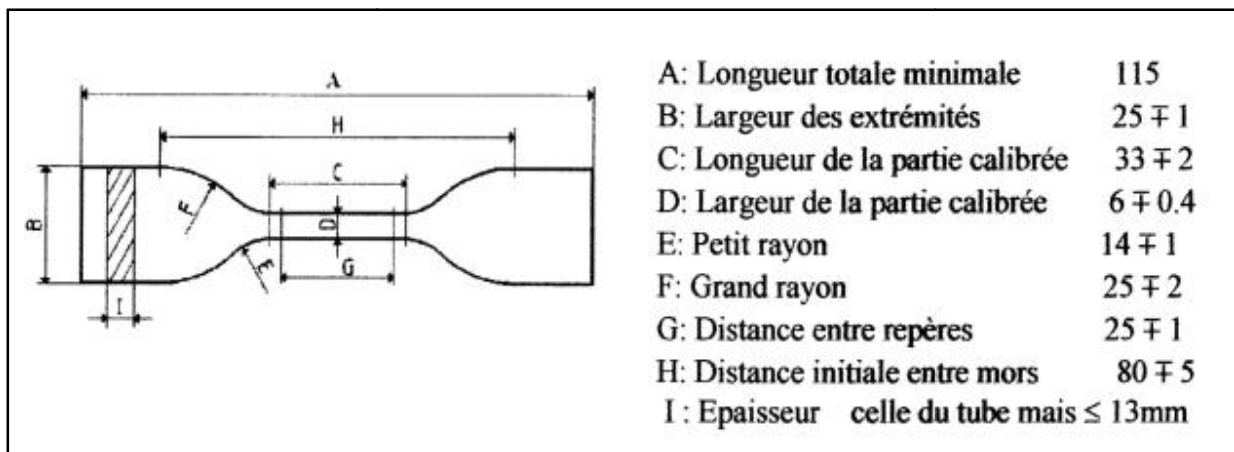


Figure II- 2:Eprouvettes normalisées en déformation plastique

II.4. Effet du mode d'obtention des éprouvettes sur le comportement mécanique d'un PEHD 80 soumis à une traction

II.4.1. Eprouvettes d'essais

Pour étudier l'influence du mode d'obtention des éprouvettes sur le comportement mécanique du PEHD 80, des prélèvements par déformation plastique et par usinage sont pratiqués sur des produits finis en respect de la norme NF T 54 - 074.

II.4.2. Banc d'essais

Les éprouvettes ont été soumises à des essais de traction monotones avec une machine d'essai universelle Zwick, Type Zwick Z005 particulièrement conçu pour la caractérisation des polymères avec une cellule de charge de 5 kN *figure II-6*. Une vitesse d'essai de 100mm/min a été utilisée. Le déroulement des essais a été contrôlé par le logiciel TestXpertR Version 9.0 qui a permis de les effectuer exactement de la même manière en se basant sur les recommandations générales de la norme ASTM D-638. Afin d'atteindre la rupture finale de l'éprouvette, la longueur calibrée choisie a été de 64 mm adaptée à la géométrie de l'éprouvette, et à la course maximale de la machine. L'acquisition des données sur ordinateur a été assurée en temps réel par une interface RS232. L'analyse statistique instantanée a été réalisée sur demande pendant chaque acquisition de données suivant un programme d'essai précédemment déclaré. Cette étape a assuré le calcul des moyennes et des écarts-type pour chaque ensemble d'éprouvettes appartenant à une même couche et constituant la courbe moyenne contrainte-déformation.



Figure II- 3:Machine d'essai universelle Type Zwick Z005

II.4.3. Essai de traction

Une des caractéristiques les plus remarquables pour les thermoplastiques semi- cristallins (cas du PEHD) est leur faculté à subir une grande déformation plastique avant la rupture à température ambiante. Ce phénomène provient en partie du fait que leur température de transition vitreuse (-125°C pour le PEHD) est située bien au-dessous de la température ambiante [3, 4].

Pour les semi-cristallins, la déformation plastique intervient de façon macroscopique et non homogène dans des tests de traction un axiale, ce phénomène de déformation plastique appelé striction ou instabilité plastique [5, 6].

La *figure II-8* montre l'allure typique de la courbe contrainte-déformation nominale en traction un axiale et l'évolution du profil de l'éprouvette tandis que celle-ci est étirée à vitesse d'allongement constante.

A partir de cette courbe, on peut décrire les différents types de déformations :

- 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 phase

cristalline [9,12]. La courbe initialement linéaire, fait apparaître un certain non linéarité juste avant le point A, par suite des effets viscoélastiques [5,6].

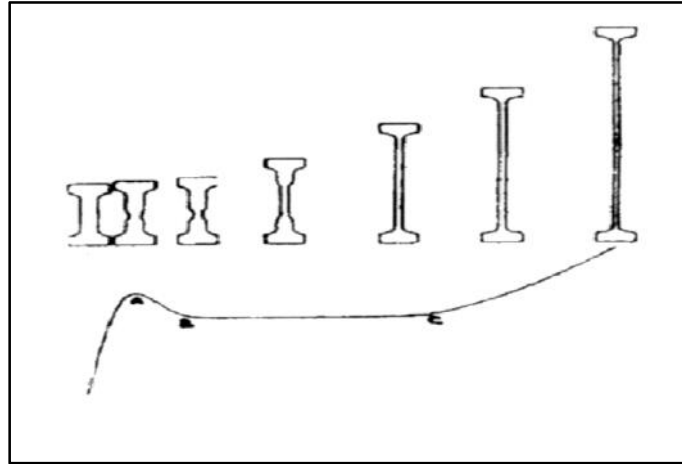


Figure II- 4: Courbe de traction d'un PEHD.[6]

- Au point A débuté 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, des structures globulaires ou fibrillaires ou des couches amorphes dans les polymères peuvent tous conduire à une distribution non uniforme de la contrainte).
- De A à B la striction se forme jusqu'à stabilisation.
- De B à C la striction se propage le long de l'échantillon jusqu'au taux naturel de déformation.
- Au-delà de C, la déformation redevient homogène grâce à un durcissement structural lié à l'orientation des chaînes macromoléculaires dans le sens de l'étirage et l'augmentation de la fraction fibrillaire du matériau. Ces différentes étapes peuvent être représentées dans la *figure II-8*.

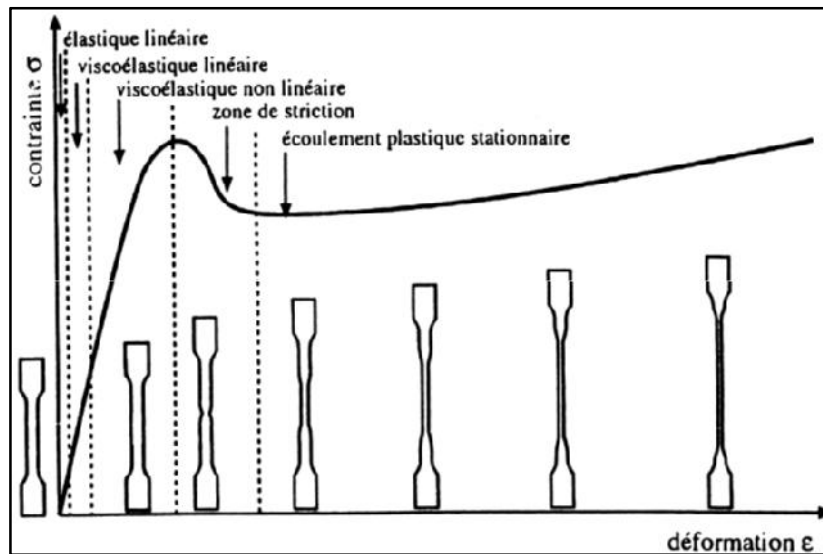


Figure II- 5: Différentes zones de traction uni axiale d'un PEHD.[4]

II.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les équipements indispensables aux essais au laboratoire de traction. Les propriétés techniques des éprouvettes et les caractéristiques du tube de PEHD80 ont été définies.

Chapitre III

Résultats obtenues et analyse

III.1. Introduction

Les tubes en polyéthylène haute densité trouvent une utilisation grandissante dans notre société et plus particulièrement dans la distribution de gaz et d'eau, conséquence de leurs bonnes résistances à la corrosion, légèreté et coût abordable. Nous présentons dans ce chapitre une étude de l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement mécanique du PEHD 80 en traction statique. Ainsi qu'une caractérisation du PEHD 80 en traction cyclique suivie par l'influence du nombre de cycles d'une part sur l'allongement et la charge atteinte lors du cyclique, d'autre part sur les caractéristiques mécaniques et la morphologie du matériau.

III.2. Résultats obtenus

Une série d'essais de traction statique sur neuf (9) éprouvettes pour trois vitesses de chargement est effectuée jusqu'à rupture du matériau dans les mêmes conditions d'essais.

III.2.1. Point de vue comportement

Les courbes de comportement mécanique sont représentées sur les *figures III-1 à III-3*. Les *tableaux III-1 à III-3* regroupent les caractéristiques mécaniques expérimentales déduites des courbes de comportement contraintes-déformations.

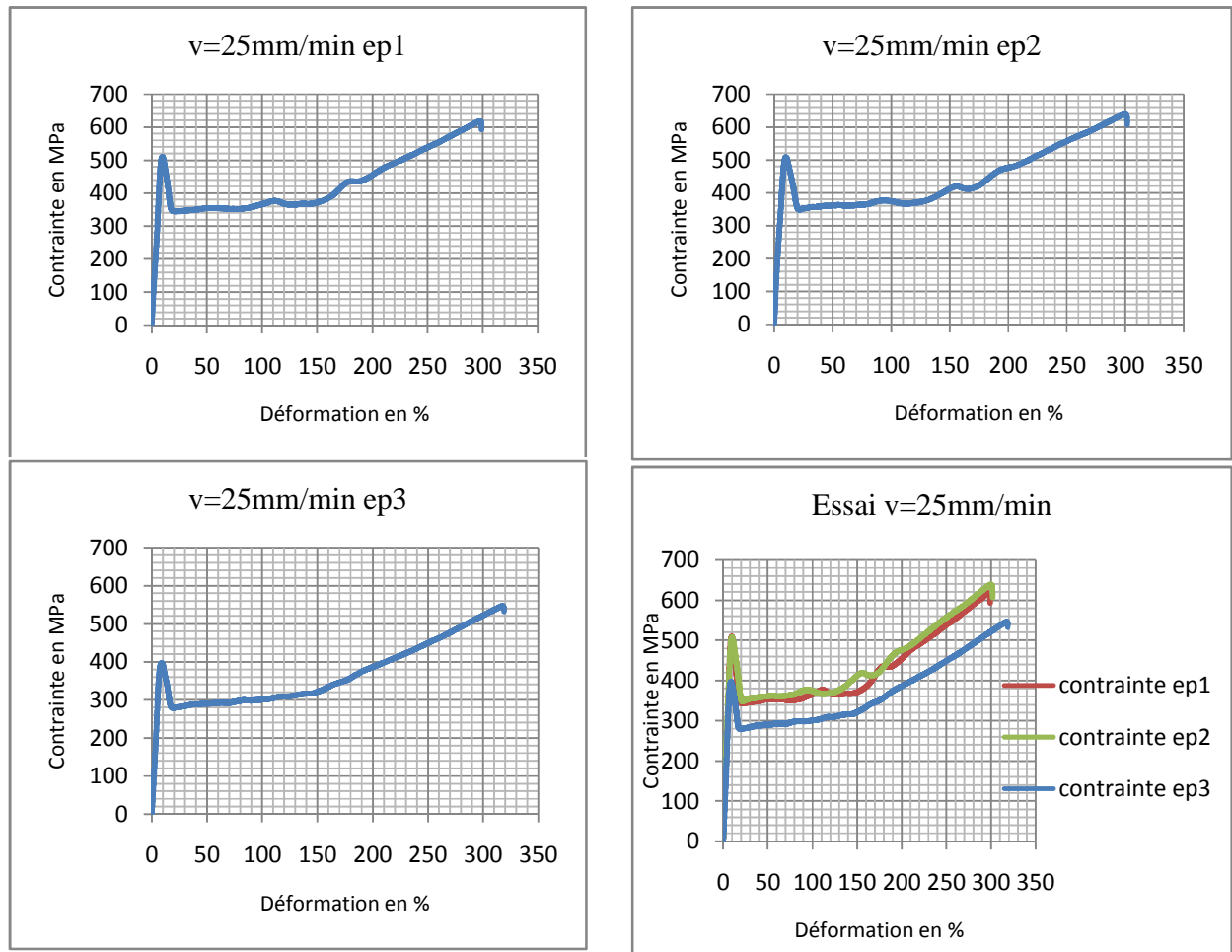


Figure III- 1: Courbes comportement mécanique expérimentale en traction Du PEHD 80 (pour $V=25\text{mm/min}$).

Tableau III- 1: Valeurs expérimentales des propriétés mécanique du PEHD80

$V=25$ [mm/min]	E [N/mm ²]	σ_e [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	ϵ_e %	ϵ_{rup} %	σ_e/σ_m %
Ep01	61.69	520	620	11	295	83.87
Ep02	56.33	520	640	12	300	81.25
Ep03	50.36	400	545	10	320	73.39
Valeurs moyennes	56.12	480	601.66	11	305	79.5

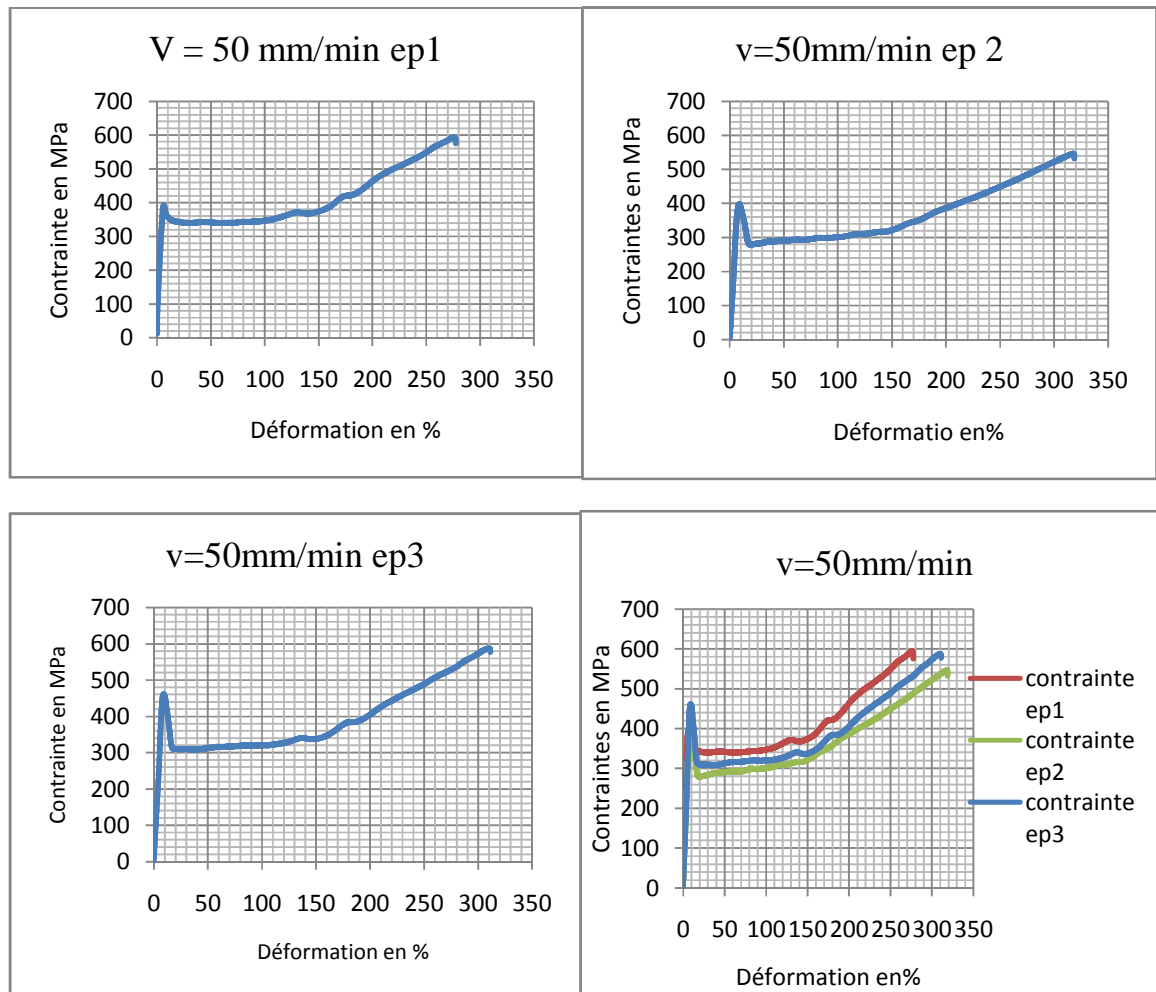


Figure III- 2 : Courbes comportement mécanique expérimentale en traction Du PEHD 80 (pour $V=50\text{mm/min}$).

Tableau III- 2: Valeurs expérimentales des propriétés mécanique du PEHD80

V=50 [mm/min]	E [N/mm ²]	σ_e [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	ϵ_e %	ϵ_{rup} %	$\frac{\sigma_e}{\sigma_m}$ %
Ep01	61.89	400	600	9.8	280	66.66
Ep02	54.26	400	540	11	320	74.07
Ep03	56.32	460	595	10	310	77.31
Valeurs moyennes	57.49	420	578.33	10.26	3303.33	72.68

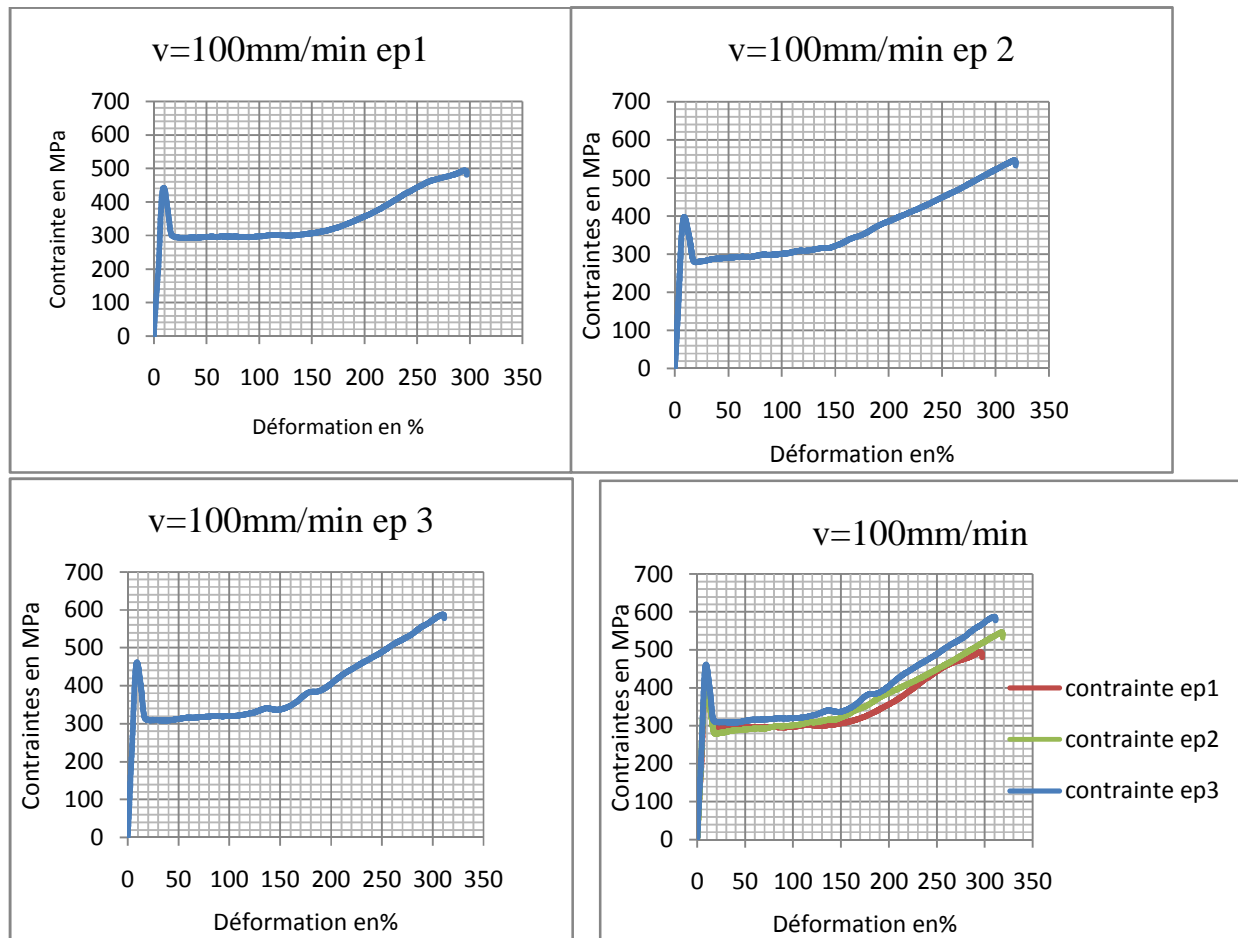


Figure III- 3: courbes comportement mécanique expérimentale en traction Du PEHD 80 (pour $V=100\text{mm/min}$).

Tableau III- 3: Valeurs expérimentales des propriétés mécanique du PEHD80

V=100 [mm/min]	E [N/mm ²]	σ_e [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	ϵ_e %	ϵ_{rup} %	σ_e/σ_m %
Ep01	51.29	440	500	12	295	88
Ep02	50.85	400	545	10	320	73.39
Ep03	51.73	460	560	1	310	82.14
Valeurs moyennes	51.29	433.33	535	11	308.33	81.17

III.2.2. Analyse des résultats

Le comportement mécanique du PEHD 80 sous une sollicitation de traction statique est présenté par la courbe contrainte-déformation à vitesse constante, cette courbe est typique à celle des polymères semi-cristallins, elle présente trois zones distinctes :

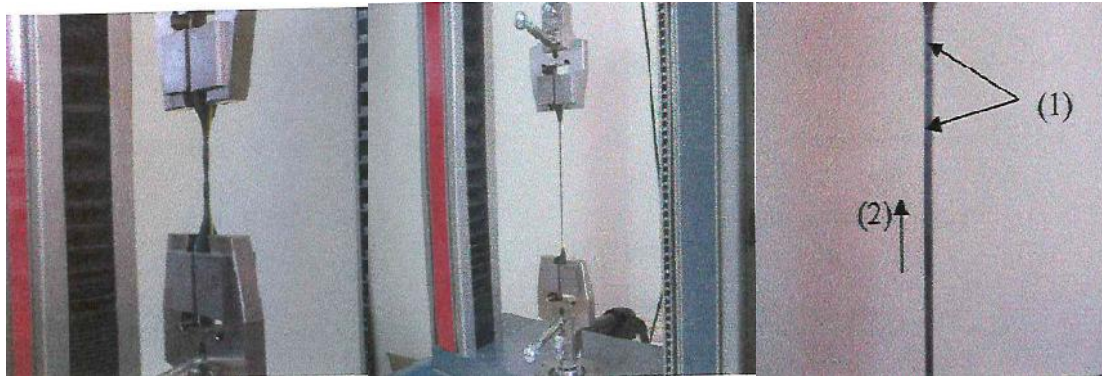
La première zone (I) où la contrainte augmente avec l'augmentation de la déformation d'une façon linéaire au début de la courbe, puis une perte de linéarité jusqu'au point d'écoulement. Qui correspond au seuil de plasticité déterminé par la contrainte d'écoulement (o. point 1). Cette perte de linéarité est due à un début de réorganisation structurale liée à des changements conformationnels. Suivie d'une diminution brusque de la contrainte portion (1-2), à ce stade il y a initiation d'une striction. La zone (II) est caractérisée par une déformation plastique, qui se produit à contrainte plus au moins constante, ce palier est dû essentiellement à une réorientation à grande échelle des chaînes macromoléculaires amorphes et des lamelles cristallines et au glissement des molécules par bandes de cisaillement.

Avant rupture, la courbe contrainte-déformation monte jusqu'au point 4 (zone III). L'edurcissement croissant du PEHD est lié à la formation d'une texture d'orientation de lamelles cristallines, consécutive à leur rotation plastique sous l'effet du cisaillement intra cristallin.

Cette situation peut être expliquée également par le fait que, lorsque les chaînes sont complètement étirées, la seule déformation possible réside dans l'extension des liaisons entre atomes et la distorsion des angles de Valence, nécessitant beaucoup d'énergie. La rupture intervient quand on atteint les caractéristiques à rupture des chaînes macromoléculaire.

III.2.3. point de vue endommagement

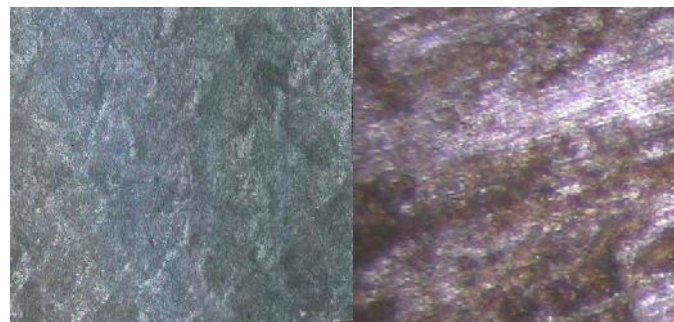
La **figure III-4** montre l'ensemble des mécanismes d'endommagement du PEHD 80 observés lors de l'essai de traction statique, l'initiation et la propagation de la striction sont illustrées successivement sur les **figure III-4 (a et b)**, tandis que l'apparition des zones blanchâtres sur les côtés latéraux de l'éprouvette sont représentées sur la **figure(III-4 c)**.



a) Initiation de la striction b) Propagation de la striction c) Zones blanchâtres (1) Sens d'étirage (2)

Figure III- 4: observation des mécanismes d'endommagement (pour $v=100\text{mm/min}$)

L'examen des surfaces des éprouvettes avant et après essai fait montrer que la matière s'allonge et s'aligne dans le sens de l'étirement **figure III-5**.



Avant l'essai

a) $v=25\text{mm/min}$



b) $v=50\text{mm/min}$

c) $v=100\text{mm/min}$

Figure III- 5: Structure du PEHD 80 observée par microscope optique.

Le suivi macroscopique des essais de traction à vitesse constante a montré que l'endommagement est initié par une striction localisée au milieu de l'éprouvette figure (III-5 a), puis elle se propage le long de la partie calibrée de celle-ci **figure(III-5 b)**, suivi d'une émergence de zones blanchâtres sur les côtés latéraux de l'éprouvette dans le sens perpendiculaire à l'axe de traction sur la partie étirée figure (III-5 c). Ces phénomènes s'expliquent sur la base de l'endommagement par cisaillement plastique qui joue un rôle important dans le blanchiment des éprouvettes [16].

III.3. Caractérisation du PEHD 80 en traction cyclique

Dans le but de voir l'influence du mode de chargement d'une part: sur le comportement mécanique et d'autre part sur les propriétés mécaniques de ces matériaux, nous avons procédé dans un premier temps à un essai de traction simple à une Vitesse d'essai de 500 mm/min le résultat obtenu est montré à la figure (III-6). Il est accompagné de quelque valeur de caractéristiques mécaniques regroupées dans le **tableau III-4**.

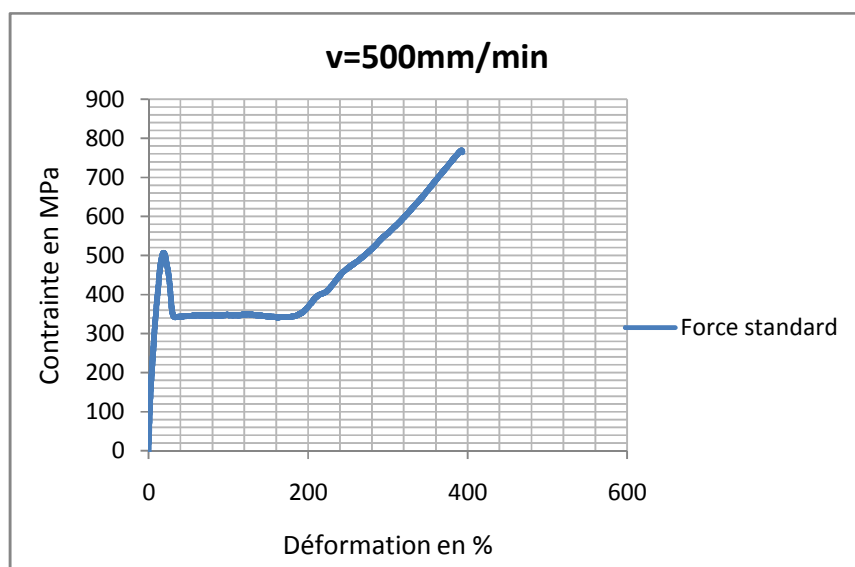
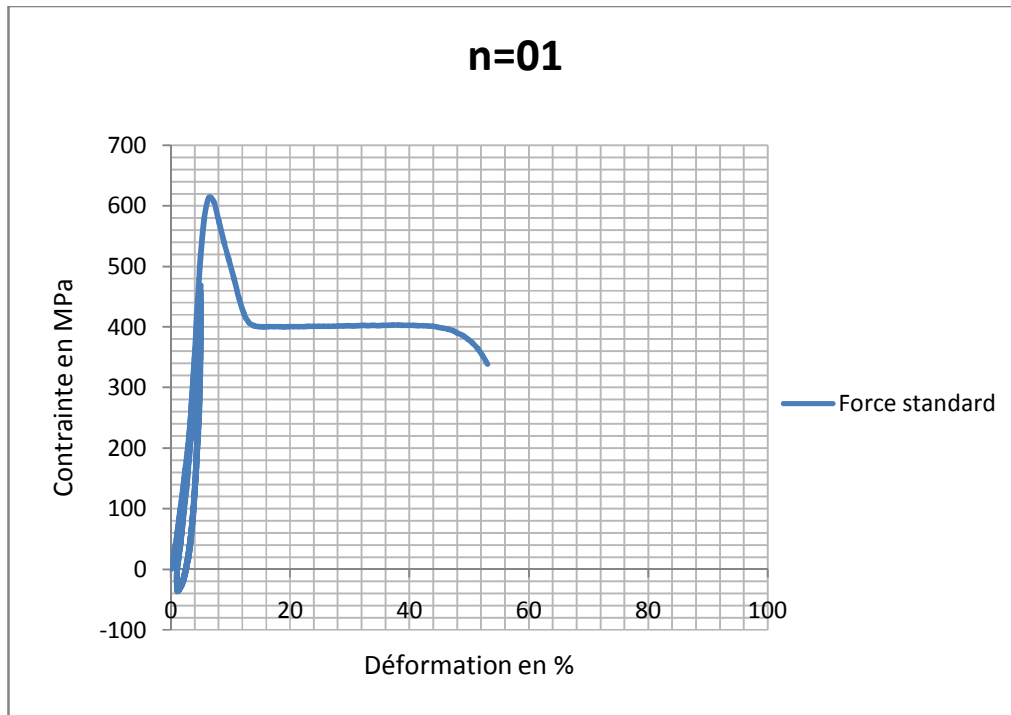


Figure III- 6: Courbe de comportement expérimentale contrainte –déformation du PEHD80 en traction statique (pour $V=500\text{mm/min}$).

Dans une deuxième étape nous avons effectué des séries d'essais cycliques à vitesse constante égale à 500 mm/min en déplacement imposé pour différents nombres de cycles, chaque essai de la série est poursuivi par une traction jusqu'à rupture, les **figures (III-7)**, illustrent les courbes de comportements obtenus pour un niveau de chargements.

III.3.1. Résultats obtenus



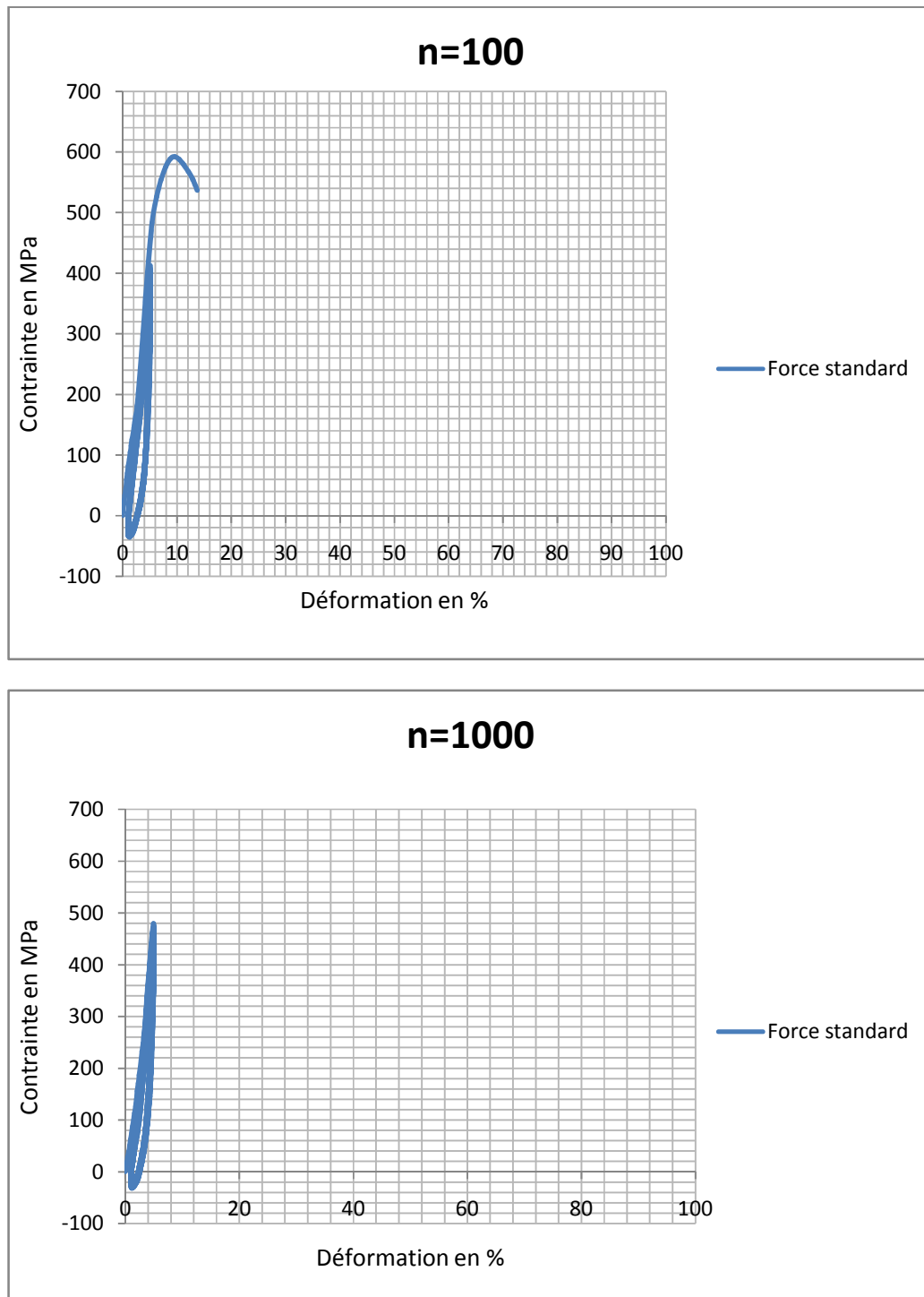


Figure III- 7: Courbes de comportement expérimental contrainte-déformation du PEHD80 en traction cyclique (pour $V=500\text{mm/min}$).

III.3.2. Analyse des résultats

Les *figure III-7* montrent le comportement mécanique du PEHD 80 soumis à la traction cyclique pour un niveau de chargement. Ces courbes indiquent que le polyéthylène haute densité a un comportement élastique comme la plupart des polymères pendant le chargement cyclique, il est traduit par une boucle hystérésis extrêmement large pour le premier cycle puis, elle se rétrécit avec l'augmentation du nombre de cycles. Lorsque la force revient à zéro l'allongement est différent de zéro, cela peut être expliqué par le fait que le matériau a acquis une certaine déformation plastique, liée aux glissements des chaînes les unes sur les autres.

III.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les comportements mécaniques du PEHD80 en traction statique et cyclique pour une vitesse de chargement et trois nombres de cycles, les résultats obtenus montrent que l'augmentation du nombre de cycle entraîne une baisse de la limite d'élasticité.

Conclusion générale

Cette étude s'est située dans le cadre de la contribution à la connaissance du comportement mécanique expérimental d'un polymère semi-cristallin soumis à des sollicitations de traction et de fatigue. Le mode de caractérisation le plus courant des propriétés mécaniques des matériaux est l'essai de traction normalisé à vitesse d'allongement constante. Il est cependant bien connu que lorsqu'un solide est soumis à une sollicitation cyclique, la rupture peut se produire pour des valeurs de la contrainte maximale bien inférieure à la charge de rupture et de même à la limite élastique : c'est le phénomène de fatigue. Physiquement, l'application d'une sollicitation cyclique à un solide y compris à un matériau plastique, conduit à une évolution des processus atomiques et moléculaires. L'évolution des structures atomiques et moléculaires lors du cyclage peut conduire un endommagement microscopique local.

Le comportement mécanique du PEHD 80 soumis à une sollicitation de traction à vitesse constante présente des courbes contraintes - déformations typiques à celles des polymères semi-cristallins. L'examen des surfaces des éprouvettes avant et après essais montre un allongement et un alignement des macromolécules dans le sens de l'étirement.

La caractérisation cyclique est effectuée une vitesse d'essais de 500 mm/min en déplacement imposé pour un nombre de cycle allant de 1 à 1000 cycles suivi d'une traction jusqu'à rupture pour un niveau de chargements. Les courbes de comportement mécanique obtenus montrent que le polyéthylène haute densité présente un comportement élastique comme la plupart des polymères, traduit par une boucle hystérésis large pour le premier cycle et se rétrécit pour les suivants, ce qui montre que le matériau a acquis une certaine déformation liée aux glissements des chaînes. Le matériau a subi un adoucissement dès les premiers cycles et décroît progressivement pour les cycles suivants. L'augmentation de l'allongement s'accompagne d'une baisse de la charge de cyclage au moins pour les 1000 premiers cycles, en dépassant ce nombre, une stabilité apparente est enregistrée en terme de charge et d'allongement.

Références bibliographique

- [1] **RAJENDRA K ,KRISHNASWAMRE.**Analysis of ductile and brittle failures form creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE)pipes ;(polymer 46-2005-111664-11672).(2005).
- [2] **ASHBY M.F. ; JONEC D.RH.** Matériaux2; Microstructure et mise en œuvre ; dunod paris (1991).
- [3]REYNALD DOSSOGNE Polyéthylène haute densité PEHD, Techniques de l'ingénieur,A3315, Mise à jour (2000).
- [4]H.LAIB & O.ZOUAOUI. Thermo et photodégradation de tuyaux en polyéthylène basse densité destinés à l'irrigation. Mémoire d'ingénieur-Septembre 2006. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO).(2006).
- [5]M.MEDKOUR. Livre de Polymères (synthèse macromoléculaire) Tome 1 en (1982).
- [6]GROUPE CHIALI. Tubes en polyéthylène PE. Catalogue technique de Groupe CHIALI
- [7]Kaang, S., Jin, Y. W., Huh, Y. I., Lee, W. J., &Im, W. B.A test method to measure fatigue crack growth rate of rubbery materials. Polymer testing, 25(3), 347-352.(2006).
- [8]Mujika, F. On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests. Polymer testing, 25(2), 214-220.(2006).
- [9]Ramsteiner, F., & Armbrust, T.Fatigue crack growth in polymers.Polymer Testing, 20(3), 321-327.(2001).
- [10]DETRRE R. FROYER G. (Introduction aux matériaux polymères), Lavoisier technique et documentation,(1997).
- [11] **BALOU D. FABRITIUS E. GILLES A.** (Chimie). Thome 2, Ellipse éditionMarketing S.A, (1999).
- [12]REYNALHD DOSSOGNE, (Polyéthylène haute densité PE-HD), Thechniques de l'ingénieur, A 3315, Mise à jour (2000).