

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté de Génie de la construction  
Département de génie mécanique



# Mémoire

*De fin d'études*

---

En vue de l'obtention du diplôme MASTER Professionnel En  
Génie Mécanique

**Option : Fabrication Mécanique Et Productique**

## Thème

**Etude Du Comportement Du PEHD En  
Traction-Torsion**

Dirigé par :

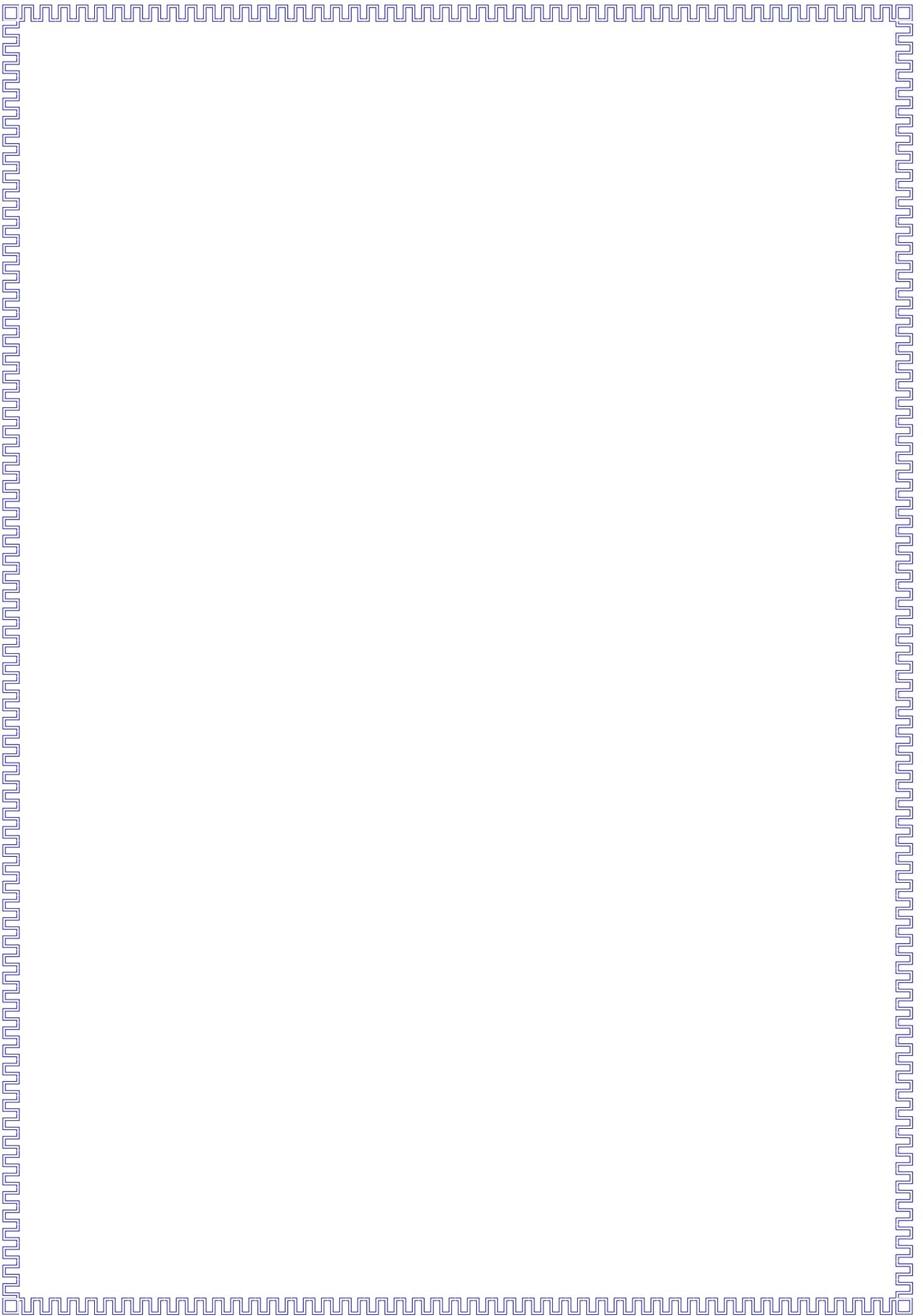
Mr. HACHOUR.K

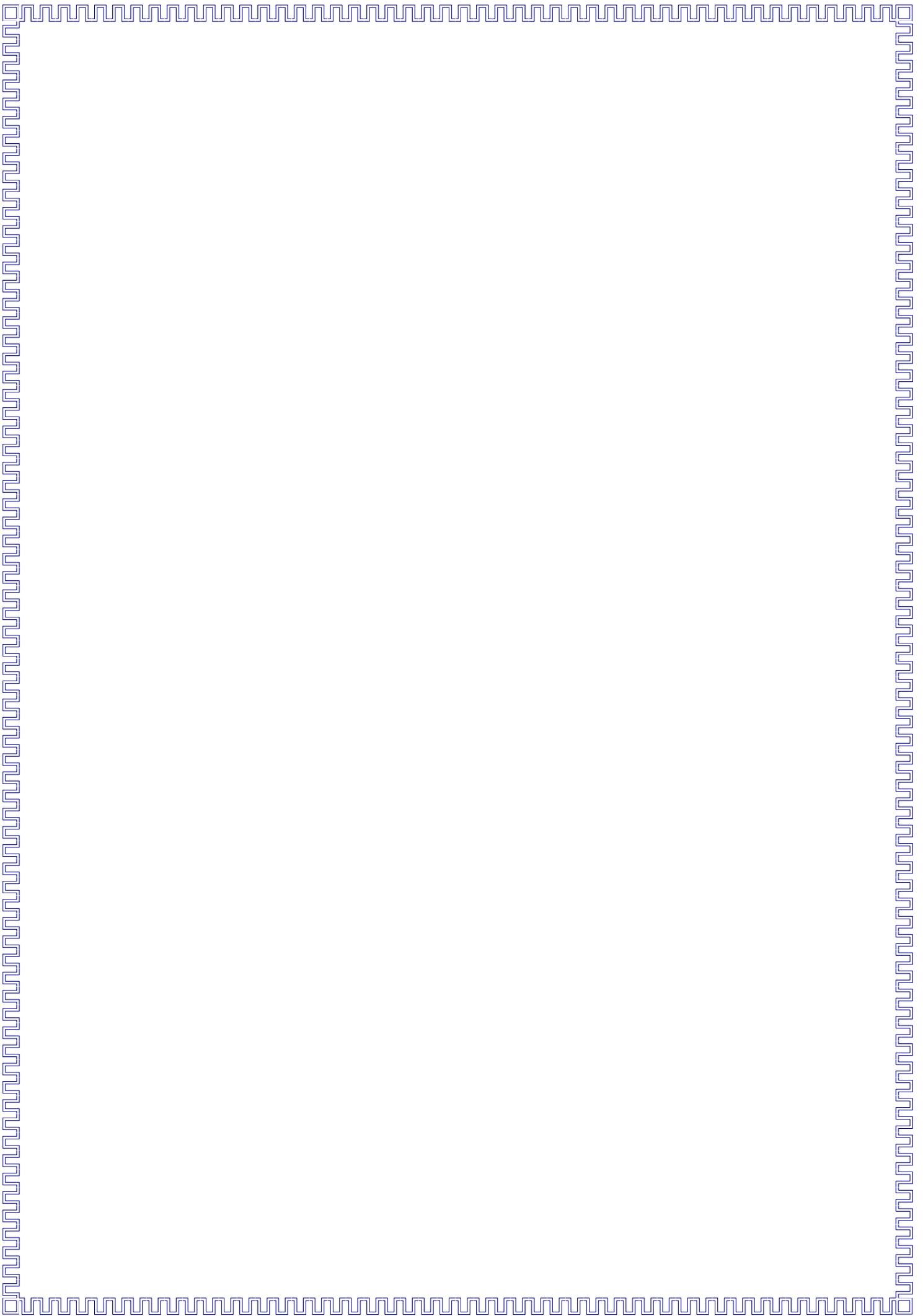
Etudié par :

Mr. SAADI Djamal

Mr. OUABBOU Atmane

**PROMOTION : 2016 / 2017**





# **Remerciements**

*Nous remercions, avant tout, le bon DIEU de nous avoir donné la santé, le courage et la volonté pour finir ce travail.*

*Nous exprimons nos profonds remerciements à notre promoteur*

*Mr. HACHOUR.K pour ses orientations et*

*sa disponibilité constante, tout au long de notre travail.*

*Nous tenons à remercier Mr. AHMEDZAID Amar pour l'aide qu'il nous a portée tout au long des essais effectués au laboratoire RDM.*

*Nous tenons aussi à remercier toute l'équipe du hall technologie à Oued-Aissi pour leurs suivis et leurs conseils judicieux.*

*Nous remercions également tous les enseignants de génie mécanique.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous tenons à remercier tous nos amis et toutes les personnes qui nous ont apporté leurs aides de près ou de loin pour réaliser ce travail.*

*Enfin, nous remercions toutes nos familles et tous ceux qui nous sont chers.*

# Sommaire

## CHAPITRE I : ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>GÉNÉRALITÉS SUR LES POLYMÈRES.....</b>	<b>2</b>
<b>I.INTRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
<b>I.1.DÉFINITION.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. L'ORIGINE DES POLYMÈRES.....</b>	<b>3</b>
I.2.1. Les polymères naturels.....	3
I.2.2. Les polymères artificiels :(dérivés des polymères naturels).....	3
I.2.3.Les polymères synthétiques.....	4
<b>I.3. LES PROCÉDÉS DE FABRICATION D'UN POLYMÈRE.....</b>	<b>4</b>
I.3.1. Polymérisation.....	4
I.3.2. Polycondensation.....	4
I.3.3.polyaddition.....	4
<b>I.4. LES DIFERENTS TYPES DES POLYMÈRES.....</b>	<b>4</b>
I.4.1.Les thermoplastiques.....	5
I.4.1.1.Les polymères amorphes.....	5
I.4.1.2. Les polymères semi-cristallins.....	5
I.4.2.Les thermodurcissables.....	6
I.4.3. Les élastomères.....	6
<b>I.5. CINÉTIQUE DE CRISTALLISATION DANS LES POLYMÈRES..</b>	<b>7</b>
I.5.1. Étape de germination.....	7
I.5.2.Étape de croissance.....	7
<b>I.6. PROPRIÉTÉS DES POLYMÈRES.....</b>	<b>7</b>
I.6.1. Les propriétés mécaniques.....	7

I.6.2. Les propriétés physiques.....	8
I.6.3. Les propriétés chimiques.....	9
I.6.4. Les propriétés optiques.....	9
<b>I.7. LA FORMULATION DU POLMÈRE.....</b>	<b>9</b>
<b>I.8. MISE EN ŒUVRE DES POLYMÈRES.....</b>	<b>9</b>
<b>I.9. QUELQUES PROCÉDÉS DE MISE EN ŒUVRE.....</b>	<b>10</b>
I.9.1. Extrusion.....	10
I.9.2. Extrusion soufflage-Extrusion gonflage.....	11
I.9.3. Thermoformage.....	11
I.9.4. Calandrage.....	12
I.9.5. Enduction.....	12
I.9.6. Roto moulage.....	13
<b>GÉNÉRALITÉS SUR LE POLYÉTHYLÈNE A HAUTE DENSITÉ</b>	
<b>(PEHD).....</b>	<b>14</b>
<b>I.10. LE MATÉRIAU POLYÉTHYLÈNE.....</b>	<b>14</b>
<b>I.11. MODE D’OBTENTION DES POLYÉTHYLÈNES A HAUTE</b>	
<b>    DENSITÉ.....</b>	<b>14</b>
<b>I.12. STRUCTURE MOLÉCULAIRE.....</b>	<b>15</b>
<b>I.13. PROPRIÉTÉS DES POLYÉTHYLÈNES A HAUTE DENSITÉ... 16</b>	
I.13.1. Les propriétés mécaniques.....	16
I.13.2. Les propriétés physiques .....	16
I.13.3. Les propriétés chimiques .....	17
I.13.4. Les propriétés thermiques .....	17
I.13.5. Les propriétés électriques .....	18

<b>I.14. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE POLYÉTHYLÈNE A HAUTE DENSITÉ.....</b>	<b>18</b>
I.14.1. La déformation élastique.....	18
I.14.2. La déformation plastique.....	19
I.14.3. La limite élastique.....	19
<b>I.15. TYPES DES POLYÉTHYLÈNES A HAUTE DENSITÉ.....</b>	<b>20</b>
<b>I.16. LE POLYÉTHYLÈNE : UN CHOIX DURABLE.....</b>	<b>20</b>
<b>I.17. CYCLE DE VIE DU POLYÉTHYLÈNE A HAUTE DENSITÉ....</b>	<b>21</b>
<b>I.18. PRINCIPALE APPLICATIONS DU POLYÉTHYLÈNE A HAUTE DENSITÉ.....</b>	<b>21</b>
I.18.1.Films.....	21
I.18.2.Les objets moulés.....	21
I.18.3.Extrusion-soufflage.....	22
I.18.4.Tuyaux.....	22
<b>I.19. CONTRÔLE DU POLYÉTHYLÈNE A HAUTE DENSITÉ.....</b>	<b>22</b>
<b>GÉNÉRALITÉS SUR LES ESSAIS MÉCANIQUES.....</b>	<b>23</b>
<b>I.20. DÉFINITION.....</b>	<b>23</b>
<b>I.21. LES ESSAIS MÉCANIQUES UNIAXIAUX.....</b>	<b>23</b>
I.21.1. Essai de traction uniaxiale.....	23
I.21.1.1. Principe de l'essai de traction uniaxiale.....	23
I.21.1.2. Machines d'essais de traction uniaxiale.....	24
I.21.1.3. Forme et dimension de l'éprouvette.....	25
I.21.1.4. Réponse du matériau en traction uniaxiale.....	26
I.21.1.5. Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale.....	26
I.21.2. Essai de compression.....	29

I.21.2.1. But de l'essai.....	29
I.21.2.2 Réalisation de l'essai.....	29
I.21.2.3.Mécanisme d'essai de compression uniaxiale.....	30
I.21.2.4. Eprouvette de compression.....	30
I.21.3. Essai de flexion uniaxiale.....	31
I.21.4. Essai de cisaillement.....	32
I.21.5. Essai de torsion uniaxiale.....	33
I.21.5.1.Principe de l'essai de torsion uniaxiale.....	33
I.21.5.2.Machine d'essai de torsion.....	34
<b>I.22. LES ESSAIS MÉCANIQUES MULTIAxiaux.....</b>	<b>34</b>
I.22.1. Essai de traction biaxial.....	34
I.22.1.1. Principe de l'essai traction biaxial.....	34
I.22.1.2. Machines d'essai.....	35
I.22.2. Essai de traction-torsion.....	36
I.22.2.1. Principe de l'essai.....	36
I.22.3. Essai de traction-compression.....	36
I.22.3.1. Principe de l'essai.....	36
I.22.4. Essai de traction-cisaillement.....	37
I.22.4.1. Essai Arcan.....	37
I.22.4.2. Principe de l'essai Arcan.....	37
I.22.4.3. Objectif.....	37
<b>I.23. CONCLUSION.....</b>	<b>38</b>
<b>CHAPITRE II : MÉTHODES EXPERIMENTALES</b>	
<b>II. INTRODUCTION.....</b>	<b>39</b>
<b>II.1. LE MATÉRIAU D'ÉTUDE.....</b>	<b>39</b>

<b>II.2. GÉOMÉTRIE DES ÉPROUVETTES.....</b>	<b>40</b>
<b>II.3. MISE EN PLACE DE L'ESSAI DE TRACTION-TORSION.....</b>	<b>42</b>
II.3.1. Système de fixation par méplat.....	44
II.3.2. La sollicitation traction-torsion biaxiale.....	45
<b>II.4. LA MACHINE DE TRACTION IBERTEST MOD UIB.100/W....</b>	<b>45</b>
<b>II.5. DISPOSITIF DE TRACTION-TORSION.....</b>	<b>46</b>
II.5.1. Définition.....	46
II.5.2. Principaux éléments constitutifs.....	46
II.5.3. Principe de fonctionnement.....	47
II.5.4. Fixation du dispositif de traction-torsion sur la machine de traction IBERTEST.....	48
II.5.5. Réglage de l'angle de torsion.....	48
<b>II.6. ESSAI DE TRACTION-TORSION SUR DES ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES CREUSES.....</b>	<b>50</b>
II.6.1. Principe de l'essai.....	50
<b>II.7. CONCLUSION.....</b>	<b>50</b>
<b>CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	
<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>51</b>
<b>III.2. L'ESSAI DE TRACTION-TORSION.....</b>	<b>51</b>
<b>III.3. RÉSULTATS OBTENUS APRÈS LES ESSAIS DE TRACTION- TORSION POUR LE PEHD.....</b>	<b>51</b>
<b>III.4. EFFET DE LA VITESSE DE CHARGEMENT SUR LE COMPORTEMENT DES ÉPROUVETTES CREUSES EN TRACTION-TORSION.....</b>	<b>54</b>
III.4.1. Résultats des essais.....	54

<b>III.4.2. Interprétations des résultats des essais.....</b>	<b>58</b>
<b>III.4.2.1. Détermination de la limite élastique.....</b>	<b>58</b>
<b>III.4.2.2. Détermination du module d'Young.....</b>	<b>59</b>
<b>III.5. EFFET DE L'ANGLE DE TORSION SUR LE</b>	
<b>COMPORTEMENT DES ÉPROUVETTES CREUSES.....</b>	<b>61</b>
<b>III.6. CONCLUSION.....</b>	<b>65</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>66</b>

## Introduction générale

Le polyéthylène occupe une position très dominante dans la vie quotidienne et son utilisation, et touche pratiquement tous les domaines sans exception et principalement dans les canalisations d'adduction d'eau potable et de gaz. La connaissance de diverses propriétés de ce matériau est indispensable dans la mesure où sa consommation mondiale connaît une forte augmentation. En effet, ceci est devenu une préoccupation des scientifiques ces dernières années. [30]

Dans ce travail, le comportement du polyéthylène à haute densité sera étudié. Un intérêt particulier sera porté sur la limite élastique et le module d'élasticité. Pour chaque type d'essai et sa sensibilité sur l'angle et la vitesse donnée sur la base des résultats obtenus. Des résultats de traction combinée à la torsion seront présentés à la température ambiante. Les éprouvettes utilisées pour cette étude ont été relevées des tubes de PEHD.

Les essais de traction-torsion ont été effectués sur quatre(04) vitesses et sept(07) angles différents pour étudier l'effet de comportement et pour voir la sensibilité des caractéristiques mécaniques de ce matériau.

Nous tenons à souligner, que la machine disponible dans nos laboratoires n'est pas équipée par des systèmes qui permettent le bon déroulement des essais et parfois le matériel est inexistant.

Ce présent travail est constitué de trois(03) chapitres : Le premier chapitre porte sur les généralités sur les polymères et principalement sur le polyéthylène à haute densité (PEHD). Dans ce chapitre on s'est intéressé à la composition chimique, aux procédés d'obtention, aux divers propriétés, aux techniques de mise en œuvre et les domaines de leur utilisation. Les essais mécaniques normalisés, uniaxiaux et multiaxiaux sont aussi présentés dans ce chapitre. Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie est aux différentes techniques expérimentales ainsi qu'au mode d'obtention des éprouvettes et la procédure des essais de traction-torsion. Dans le troisième chapitre nous allons analyser des résultats obtenus à partir de ces essais et nous déterminerons les caractéristiques intrinsèques du matériau telles que : le module d'Young (E), la limite d'élasticité ( $\sigma_e$ ).

En fin, nous terminons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous ferons allusion à quelques perceptives.

## **Chapitre I**

### **Généralités sur les Polymères**

## Généralités sur les polymères

### I. Introduction

Les polymères tant que matériaux sont connus depuis longtemps. L'homme à utilisé des polymères naturels comme matière première à partir de laquelle il fabriquait des produits dont il a besoin pour faciliter sa vie.

Aujourd'hui, les polymères naturels qui comprennent des matériaux tels que le bois, le caoutchouc, le cuir et les réclines végétales et la cellulose qui jouent un rôle important dans les processus biologiques et physiologiques des végétaux et des animaux. Les outils de la recherche scientifique moderne ont permis de déterminer la structure moléculaire de groupe de matériaux et de mettre au point de nombreux polymères synthétisés à partir de petites molécules organiques. [1]

Au cours de ces dernières années, les domaines d'utilisation des matériaux polymères se sont considérablement diversifiés. Certains sont utilisés dans des applications dentaire, médicales et l'équipement pharmaceutique. Et aussi dans les produits d'hygiène, alimentaires et les appareils électroménagers. Leur excellente isolation les rend bien adaptés aux applications électriques. En outre ils ont un usage intensif comme matériaux d'emballage (Goblet, Sacher ...etc.), ils sont maintenant largement utilisés pour la fabrication des tubes pour le transport des fluides. Leurs propriétés mécaniques sont alors d'un extrême intérêt pour le concepteur. Par contre leur production représente un immense tonnage au point d'être susceptibles de polluer l'environnement car ils proviennent généralement du pétrole ou du gaz. [1]

Pour mettre en œuvre correctement ces matériaux, il est important de connaître leur mécanisme de réaction avec leurs avantages et leurs inconvénients spécifiques.

## I.1. Définition

Le mot polymère nous vient du grec. Les racines « poly et mères » signifient plusieurs parties. On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentale appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes dont sa formule est symbolisée par celle de l'unité répétitive, mise entre parenthèses et accompagnée d'un indice « n » qui indique le nombre de monomères constituant chaque chaîne de polymères. Lorsque ce nombre « n » est inférieur à une dizaine de polymère reçoit le nom d'oligomère.[1]

Les propriétés des polymères dépendent de la nature des monomères, de la masse moléculaire et de leurs liaisons chimiques dans la macromolécule.

Dans un polymère linéaire les macromolécules sont indépendantes les unes des autres (sans liaison chimique), la cohésion est assurée par des interactions physiques qui diminuent quand la température s'élève. Ce sont des thermoplastiques.

Dans un polymère réticulé, les chaînes macromoléculaires sont reliées par des liaisons chimiques qui se forment par chauffage, en présence d'un catalyseur, ou par irradiation.

Un monomère est un composé constitué de molécules simple pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère.

Contrairement au polymère, un monomère à une faible masse moléculaire.

Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère. [3]

## I.2. L'origine des polymères

On distingue les polymères naturels, artificiels, et les polymères synthétiques

### I.2.1. Les polymères naturels

Issus des régimes végétal, animal ou minéral, leur économie et le rôle qu'ils jouent dans les mécanismes vitaux leur a assuré une place de premier choix. [10]

#### Exemple :

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

### I.2.2. Les polymères artificiels (dérivés des polymères naturels)

Sont obtenus par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés.[10]

**Exemple :**

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

**I.2.3. Les polymères synthétiques**

Les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature. Cependant, on peut remarquer que les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels.[10]

**I.3. Les procédés de fabrication d'un polymère**

Dans la chimie des matières plastiques, le produit de base mis en œuvre par les producteurs est appelé monomère et celui utilisé par le transformateur polymère. On passe du monomère au polymère essentiellement de trois façons, par polymérisation, polycondensation, ou polyaddition. [12]

**I.3.1. Polymérisation**

C'est une transformation à partir de molécules de base identiques, qui s'effectue rapidement et sans résidu, sous pression et température par amorçage radicalaire ou ionique, par rayonnement, avec utilisation de catalyseurs appropriées, ou sous l'effet conjugué de plusieurs de ces facteurs. On aboutit alors à un polymère se présentant sous forme d'une macromolécule à chaîne linéaire dans laquelle le motif structural de la molécule de base est répété plusieurs milliers de fois. Si l'on opérerait à partir de monomères différents, on obtiendrait un copolymère. [15]

**I.3.2. Polycondensation**

Le point de départ est ici une réaction qui a lieu sans amorçage, entre des molécules de base différentes, elle est plus lente que précédemment et donne un résidu (généralement de l'eau). Le produit résultant est un polycondensat qui se présente sous forme d'un réseau linéaire ou tridimensionnel dans lequel le motif structural de la molécule est répété seulement quelques centaines de fois, c'est donc une macromolécule de taille plus réduite que celle obtenue par polymérisation. [31]

**I.3.3. Polyaddition**

Il s'agit ici d'une réaction avec amorçage et sans résidu, consistant en addition successive des molécules monomères sur une molécule initiatrice. [31]

**I.4. Les différents types des polymères**

On peut trouver des matériaux polymères sous plusieurs formes de thermoplastiques, thermodurcissables, et élastomères.

### I.4.1. Les thermoplastiques

Un thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié pouvant être ramolli par chauffage et durcit par refroidissement dans un intervalle de température spécifique. Ces polymères peuvent cristalliser en thermoplastes amorphes ou en thermoplastes semi-cristallins comme le polyéthylène (PE). Le poly (chlorure de vinyle) (PVC) ou le polystyrène (PS) sont mis en forme par diverses techniques comme l'injection, l'injection-soufflage, l'extrusion ou le roto moulage. Dans la majorité des cas, le polymère ayant la forme désirée récupère sont partiellement cristallin ou amorphe après refroidissement. [24]

#### I.4.1.1. Les polymères amorphes

Les chaîne macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituent ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est en théorie équivalente à un liquide « figé » sans ordre moléculaire à orientations macromoléculaires préférentielles (Figure I.1).

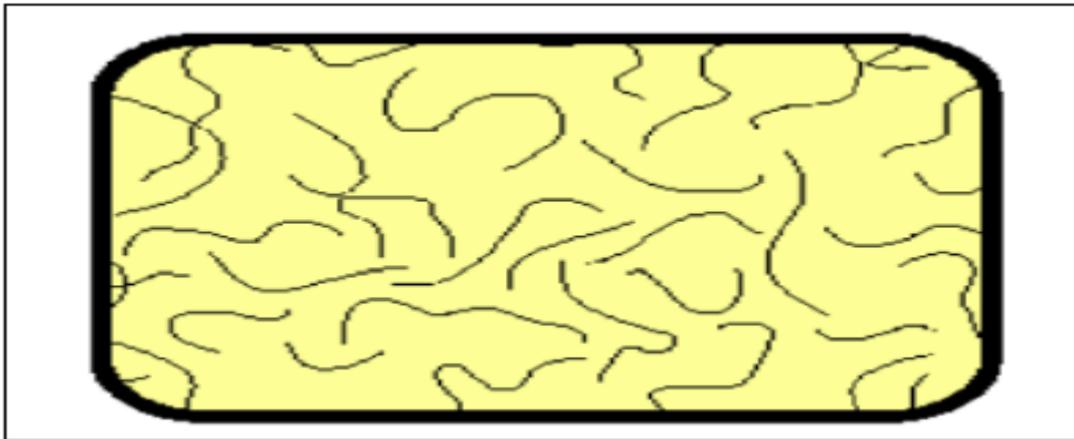
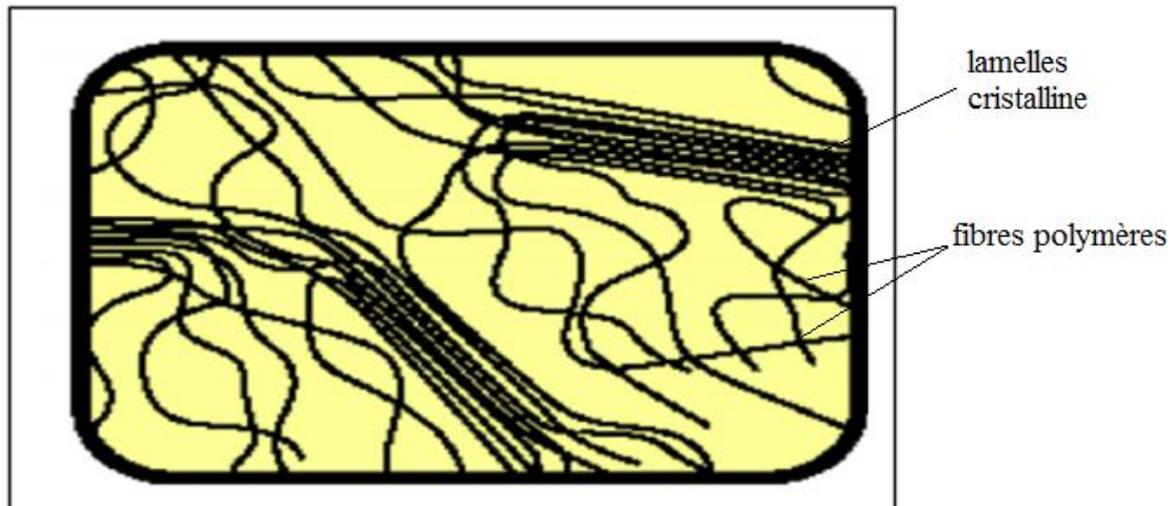


Figure I.1 : Polymères amorphes [3]

#### I.4.1.2. Les polymères semi-cristallins

Ils sont constitués de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe, et en conséquence la description de leur propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes (Figure I.2). [13]

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



**Figure I.2 :** Polymères semi-cristallins [3]

#### **I.4.2. Les thermodurcissables**

Un thermodurcissable est un produit poudre à mouler solide, ou résine liquide transformé irréversiblement par polymérisation en un réseau tridimensionnel infusible et insoluble que l'on qualifie de thermo durci. Il est souvent d'usage, dans l'industrie, d'employer abusivement le terme thermodurcissable pour désigner à la fois le système réactif initial. Soluble et fusible et le produit final et infusible. Le réactif initial peut être composé d'un monomère ou d'un mélange de monomères (résine, aminoplastes, siclons, etc.), ou plus fréquemment d'un mélange de polymère linéaire de faible masse molaire et de monomère (résine époxy, résines polyesters insaturés...etc.). La mise en œuvre des thermodurcissables est donc moins aisée que celle des thermoplastiques car il faut impérativement effectuer la mise en forme en même temps que la réaction chimique de réticulation. Cependant, le thermodurcissable présente une résistance mécanique, chimique et thermique plus élevées que les thermoplastiques. [10]

#### **I.4.3. Les élastomères**

Un élastomère est un polymère linéaire ou ramifiée transformé par vulcanisation en un réseau tridimensionnel faiblement réticulé infusible et insoluble. Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchoutique, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contrainte mécaniques. Ils peuvent atteindre de très grands allongements, tout en étant capables de retrouver leur géométrie initiale en restituant au milieu l'énergie qui leur a été fournie lors de la déformation. [1]

## **I.5. Cinétique de cristallisation dans les polymères**

Comme dans n'importe quel autre matériau, la cristallisation d'un polymère à partir de l'état fondu procède en deux étapes suivantes :

### **I.5.1. Étape de germination**

Elle consiste en la formation au sein de la phase liquide, d'identifiés appelées germes actifs, à partir desquelles les cristaux vont pouvoir prendre naissance.

### **I.5.2. Étape de croissance**

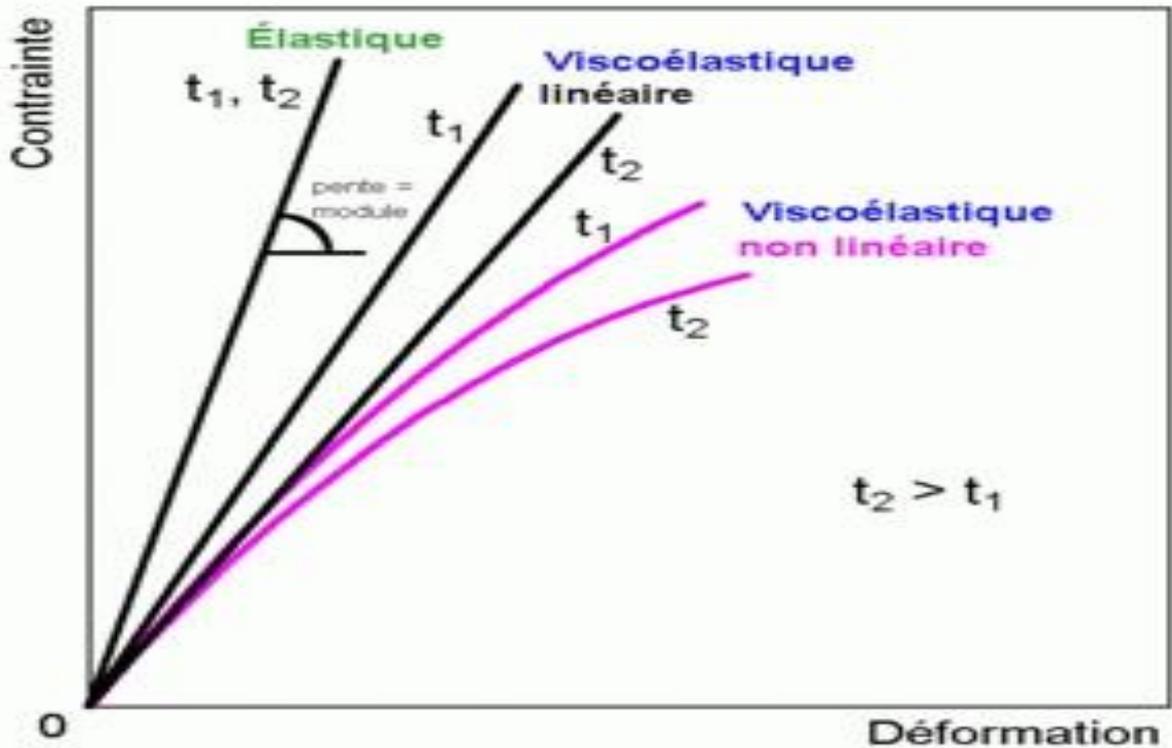
C'est le développement des germes en cristaux observables. La croissance des cristaux polymères présente des caractères tout à fait spécifiques. Les cristaux sous forme lamellaire alors que la forme cristalline la plus stable thermodynamiquement est celle dans laquelle les chaînes sont étendues. La vitesse de croissance des cristaux et par conséquent la vitesse de croissance des sphéroïdes auxquelles ils donnent naissance constante à température de cristallisation imposée [12]. Contrairement aux cristaux de petites molécules, les cristaux polymères peuvent subsister sans croître dans le bain liquide surfondu.

## **I.6. Propriétés des polymères**

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celle des métaux aux influences extérieures telle que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques. Les caractéristiques de résistance peuvent être différentes seulement d'un ordre de grandeur. Hormis les paramètres spécifiques ou matériaux (masse molaire, taux de ramification, mobilité des chaînes, taux de réticulation,...), et les conditions extérieures (humidité, agents chimiques, température, vitesse de sollicitation, type et intensité des contraintes appliquées). [1]

### **I.6.1. Les propriétés mécaniques**

Le comportement mécanique des polymères est caractérisé par une très grande diversité apparente. En effet, pour la même condition d'utilisation et d'un point de vue technologique, on peut trouver des polymères qui sont soit rigides fragiles, soit ductiles, soit caoutchoutiques. (Figure I.3) [9]



**Figure I.3** : Comportements mécaniques des polymères [7]

Ainsi dans la famille des polymères, on peut retrouver un grand nombre de type de comportement : viscoélastique, viscoplastique, hyper élastique, durcissant, endommageable.

Cette diversité se retrouve pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut être rigide fragile, ductile ou élastique...etc. Ceci ne veut pas dire que le comportement d'un polymère est variable, voire incontrôlé, ce sont les Paramètres contrôlant son comportement et les processus élémentaires envisageables qui sont nombreux.

### I.6.2. Les propriétés physiques

Si l'on considère l'usage des matériaux polymères. On distingue deux classes : Les polymères techniques et les polymères à usage structural. Les polymères techniques sont généralement produits en petites quantités pour leur propriété optique, électronique, physico-chimique pharmaceutique... etc. Les polymères à usage structural sont formulés pour adapter leurs propriétés mécaniques à usage donné. C'est essentiellement la rigidité et l'amortissement qui sont conservés, bien sûr plusieurs propriétés peuvent être concernées simultanément, par exemple dans le cas de polymères transparent ou bien de bonne propriété optique et une moindre fragilité sont exigées. Les polymères sont de bon voire très bon isolants électriques et des isolants thermiques de qualité moyenne tant qu'il ne forment pas de mousse. [7]

### I.6.3. Les propriétés chimiques

Le comportement chimique du matériau dépend de la nature chimique de la partie polymère, mais aussi de son accessibilité aux agents extérieurs. Le rayonnement ionisant provoque la rupture « homolytique » des liaisons chimiques, cette rupture fait apparaître des radicaux libres très actifs, ceux-ci réagissent et provoquent des réticulations ou des réarrangements moléculaires parfois avec départ de petites molécules. Les macromolécules aromatiques sont généralement plus résistantes que les molécules aliphatiques. Les rayons ultraviolets, en présence de l'oxygène de l'air, conduisent aussi à des oxydations destructrices, les formulations très souvent des agents de protection spécifiques. Les polymères fluores sont très peu sensibles à l'action des ultraviolets. [7]

### I.6.4. Les propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un polymère sont déterminées par sa structure chimique. En effet, un polymère semi-cristallin dont les cristallites ont au moins une dimension voisine de celle de la longueur d'onde de la lumière va la diffuser le matériau sera alors opaque ou translucide. Par contre, un polymère amorphe isotrope a la lumière visible, est en général transparent, l'ajout de renforts au d'additifs conduit bien souvent à une réduction de la transmission de lumière. [10]

### I.7. La formulation du polymère

Un polymère industriel est toujours formulé, soit pour le stabiliser en cours de mise en œuvre, soit pour faciliter sa transformation, soit pour ajuster ses propriétés finales. Il convient donc d'essayer de connaître au mieux la nature et les taux : [15]

- D'additifs divers, de plastifiants, de charges, de fibres...
- D'éléments de mélanges ; nature des constituants, dispersion des phases. Par exemple, l'absorption d'énergie lors de chocs est souvent ajustée en dispersant une phase nodulaire, dont la taille conditionne l'efficacité du renfort, dans une matrice.
- L'existence d'un agent de couplage entre phase. Il s'agit parfois d'un troisième Polymère greffé qui stabilise plus ou transfère des contraintes d'une phase à l'autre.

### I.8. Mise en œuvre des polymères

Le polymère est mélangé à différents produits (charges, stabilisants...), pour élaborer une formulation qui se présente le plus souvent sous forme de poudre ou de granules. Cette formulation est ensuite fondue ou plastifiée à la fois par conduction thermique depuis les parois de l'outillage de mise en forme et par dissipation d'énergie mécanique, cette matière liquide très visqueuse est ensuite forcée dans un outillage qui va donner une première forme au produit (tube, jonc, film...) ; cette matière mise en forme est alors refroidie, dans certains cas étirée ou bi étirée pour obtenir le produit final. [8]

L'originalité de la mise en œuvre des polymères tient à un certain nombre de caractéristiques qui leur sont propres et qui sont les suivantes :

- Les polymères sont des macromolécules.
- Les polymères fondus ont une très forte viscosité.
- Les polymères fondus ont un comportement à la fois pseudo plastique et viscoélastique.
- Les polymères fondus ont d'une part une faible diffusivité thermiques, et d'autre part une viscosité fortement thermo dépendante.
- Les polymères présentent la particularité d'être soit amorphe soit semi-cristallins, selon la régularité de leur structure chimique, et de développer des morphologies cristallines originales.

## I.9. Quelques procédés de mise en œuvre

### I.9.1. Extrusion

C'est de loin le procédé le plus important, la fabrication en continu des produits thermoplastiques de faibles sections par rapport à leurs longueurs, la plupart des polymères passent au moins une fois dans une extrudeuse mono vis ou bi vis, seul une partie de ces granulés sera extrudée par la suite pour fabriquer les plaques, des films, tube et profils. (Figure I.4) [13]

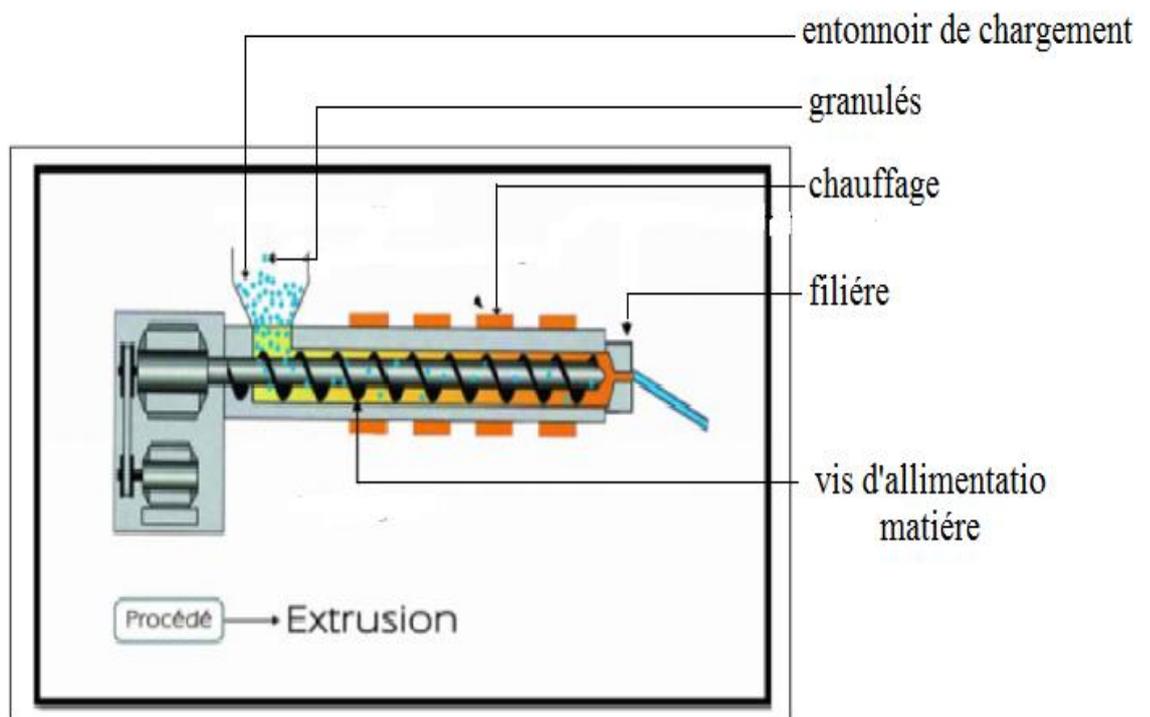


Figure I.4 : Extrusion [13]

### I.9.2. Extrusion soufflage-Extrusion gonflage

Il s'agit d'un cas particulier d'extrusion, mais qui a pris une importance économique considérable du fait des tonnages de films en polyéthylène haute, moyenne densité qu'il permet de réaliser (bouteilles.....). (Figure I.5) [13]

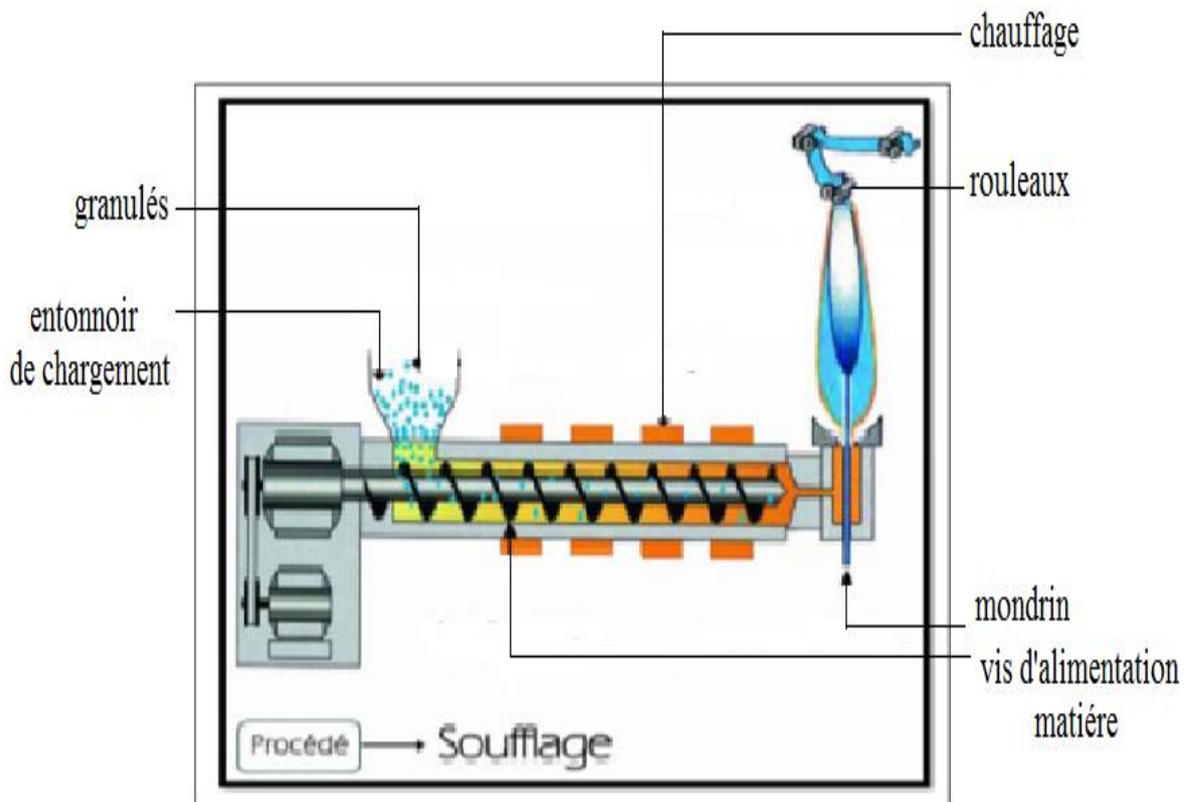


Figure I.5 : Procédé d'extrusion gonflage [13]

### I.9.3. Thermoformage

Déformer un film, une feuille ou une plaque préchauffée par aspiration ou emboutissage. On peut également combiner ces deux effets ou encore abaisser le cadre sur une forme fixe, ce procédé est utilisée pour la réalisation de Corps. Creux ouverts. (Figure I.6). [22]

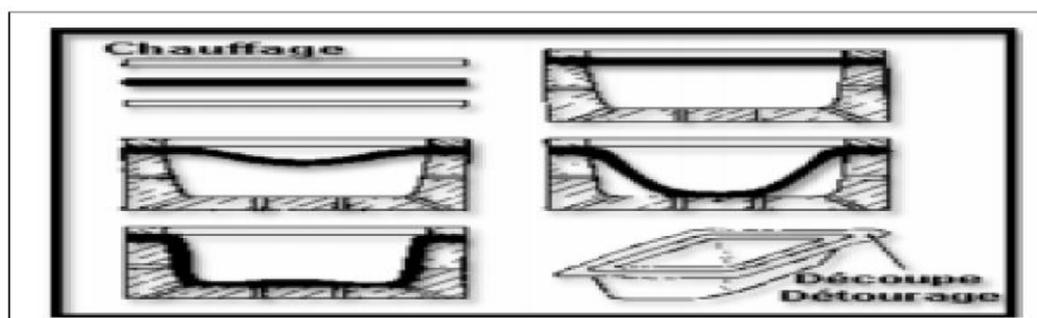
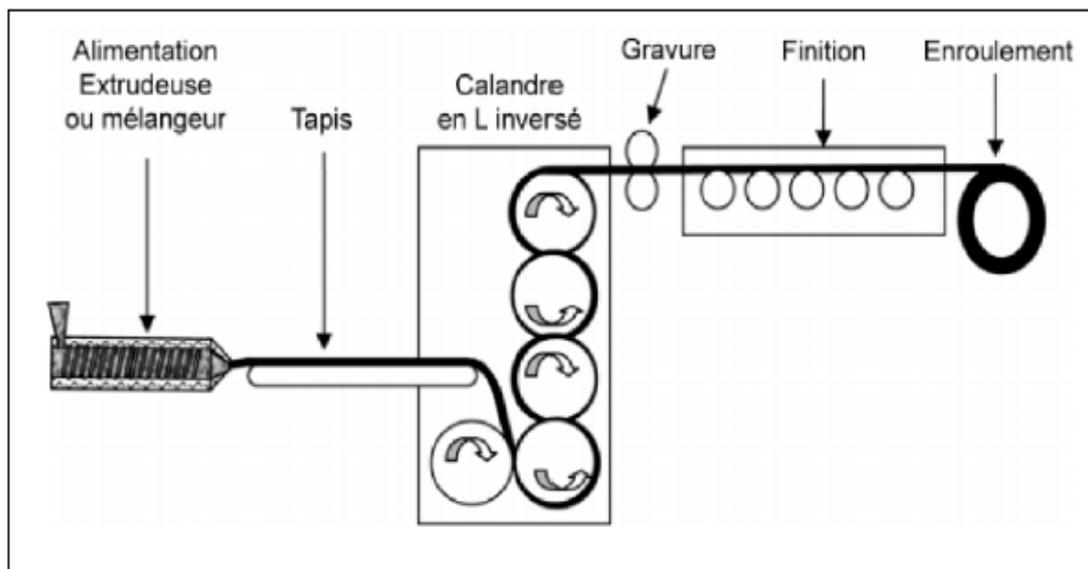


Figure I.6 : Procède de thermoformage [22]

### I.9.4. Calandrage

Il s'agit d'un procédé atypique, issu de l'industrie du caoutchouc, et qui s'apparente plutôt, du fait de la succession d'opérations distinctes, aux procédés réservés au caoutchouc et au PVC ;

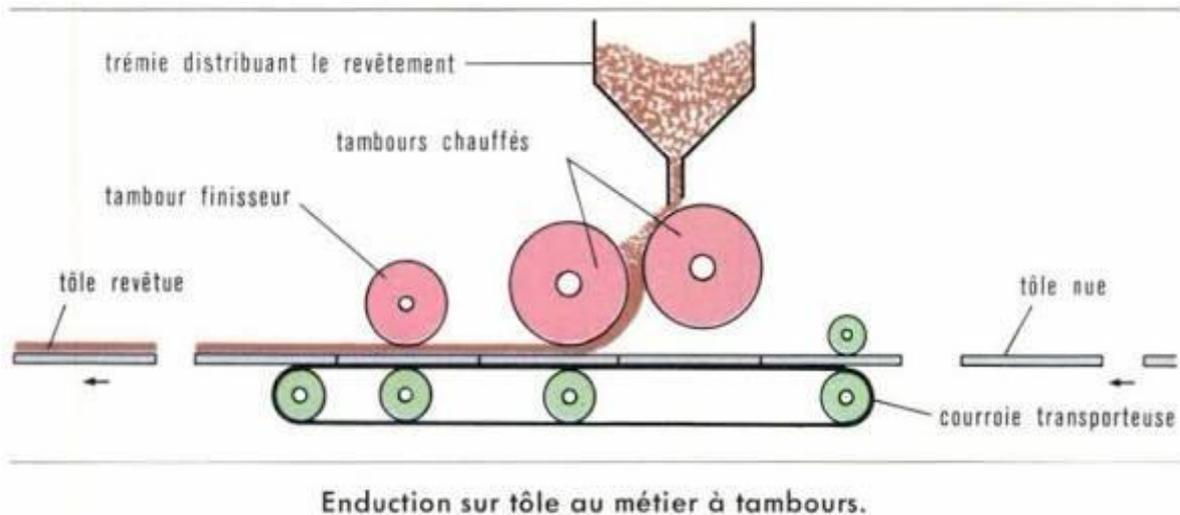
Les opérations successives ont pour but de mélanger le polymère à un certain nombre d'additifs, de gélifier progressivement le « compound » obtenu en dissipant de l'énergie par cisaillement sans atteindre la température de dégradation, puis de forcer le polymère entre les cylindres successifs d'une calandre entre 3 et 5 cylindres selon le cas. Les feuilles obtenues sont étirées puis refroidies avant d'être enroulées. (Figure I.7) [15]



**Figure I.7** : Schéma illustrant le principe du calandrage [15]

### I.9.5. Enduction

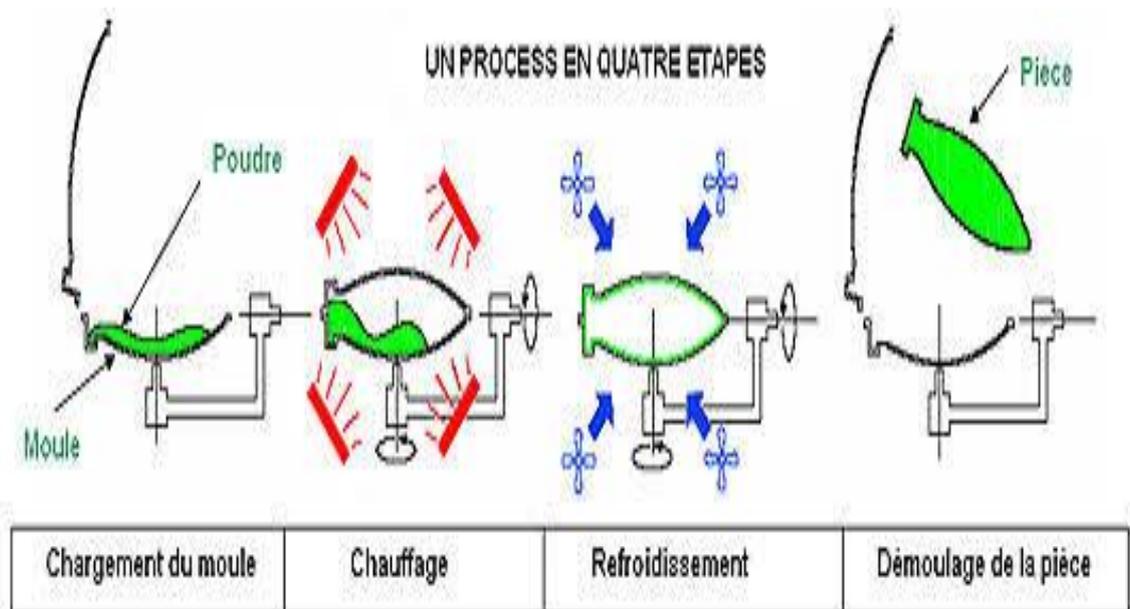
Cette technique consiste à imprégner superficiellement un support, sous la traverse à l'aide d'une matière plastique sous forme de pâte ou de dissolution qui est alors déposée par coulées ; plus rarement, on part d'une matière plastique à l'état solide en poudre qui est déposée sur le support, puis fondue pour l'imprégner. Utilisé pour la protection, revêtements des sols... (Figure I.8).



**Figure I.8 :** Enduction sur tôle [7]

### I.9.6. Roto moulage

Ce procédé concurrence le soufflage pour les volumes importants mais est moins adapté aux grandes séries et aux petits articles à parois minces. On utilise dans cette technique un thermoplastique en poudre fixe qui est déposé dans un moule clos pouvant être mis en double rotation autour de deux axes orthogonaux, la poudre se répartira alors sur toute la face interne du moule, si ce dernier est chauffé, elle se gélifie au contact de la paroi, ensuite un refroidissement fixera la partie gélifiée et l'on réalisera ainsi, par démoulage, un corps creux fermé (Figure I.9). [11]



**Figure I.9 :** Rotomouleuse [11]

## Généralités sur le PEHD

### I.10. Le matériau polyéthylène

Parmi les polymères semi-cristallins, le polyéthylène à haute densité (PEHD). Les polyéthylènes sont des matériaux bis plastiques dont l'une des phases est un élastomère amorphe, l'autre étant constituée de cristallites rigides. Les propriétés à l'état solide des polyéthylènes dépendent de plusieurs éléments : La proportion des deux phases, la perfection des cristallites, la ténacité de la phase amorphe et la cohésion entre les deux phases et entre cristallites [13]. Dans la pratique courante, les polyéthylènes sont caractérisés d'une part par leur viscosité à l'état fondu, mesurée par l'indice de fluidité, qui donne une idée de leur masse moléculaire, d'autre part par leur masse volumique qui reflète le taux de cristallinité. Ils peuvent se présenter sous plusieurs formes : polyéthylène à basse densité-haute pression ; à basse densité linéaire ; ainsi que le polyéthylène à haute densité, ce dernier est rencontré dans plusieurs domaines d'application grâce à ces caractéristiques. Le polyéthylène à haute densité a une excellente stabilité chimique, et une meilleure tenue aux radiations, une moindre sensibilité à la fissuration sous tension, une meilleure tenue en température et au froid. [14]

### I.11. Mode d'obtention des polyéthylènes à haute densité

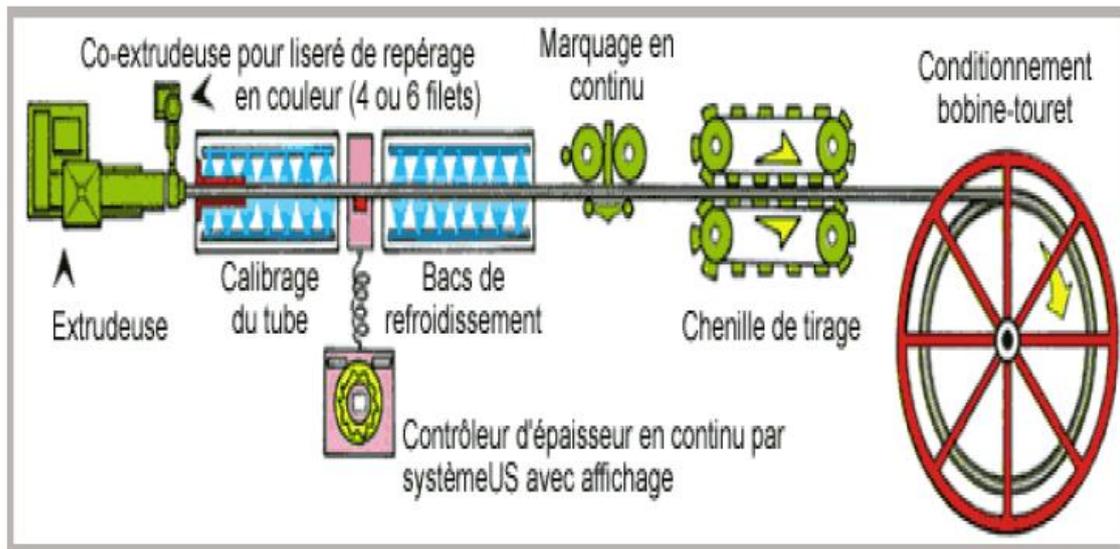
La matière première polyéthylène est sous forme de granulés noirs principalement et colorés pour le liseré de couleur déterminant l'application du tube bleu pour les tubes qui transportent l'eau potable, jaune pour le gaz naturel. Les granulés sont aspirés par un aspirateur et stockés dans une trémie. (Figure I.10) [8]



**Figure I.10** : Matière première PE sous forme de granulés et tube PEHD [8]

Le tube en polyéthylène est fabriqué par extrusion. L'extrudeuse avec un système de résistance et une ou plusieurs vis va chauffer le granulé, le transforme en pâte à 230°C

et le pousse à travers un outillage de forme. La pâte traverse une filière qui donne le diamètre et l'épaisseur désirés au tube et une Co-extrudeuse fait liserés de couleurs bleu sur le tube (transport de l'eau potable). Le tube extrudé passe par un calibreur et un bac de refroidissement. Après refroidissement on obtient un tube qui sera marqué, ensuite scie selon la longueur désirée. Une tireuse assure le déplacement du tube de long la chaîne et un enrouleur (pour les petits diamètres) enroule les tubes en couronne. (Figure I.11) [31]



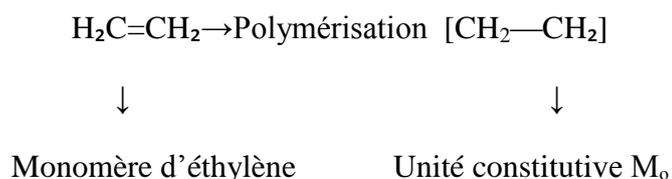
**Figure I.11** : Schéma du processus de production des tubes polyéthylènes [8]

## I.12. Structure moléculaire

Une macromolécule est constituée d'une chaîne principale appelée squelette sur laquelle des atomes de natures chimiques différentes ou des molécules peuvent se substituer de façon plus ou moins régulière, à certains atomes appartenant au monomère constitué d'origine. Dans le cas où les groupes d'atomes disposés latéralement sur le squelette ont une structure chimique identique à celle de la chaîne principale, on parle de ramification ou de branches. La présence de ces substituants peut avoir deux effets, soit ils rendent la chaîne principale et l'ensemble des macromolécules plus mobiles et flexibles, soit au contraire ils tendent à rigidifier l'édifice macromoléculaire. [25]

La macromolécule du polyéthylène est obtenue par la répétition de l'unité constitutive de masse molaire  $M_0$ . Le nombre de répétition  $n$  de cette unité est appelé degré de polymérisation (DP). Il est donc possible de calculer la masse molaire de la macromolécule selon l'expression :

$$M = n \cdot M_0$$



**Figure I.12 :** Représentation de la polymérisation du polyéthylène

## I.13. Propriétés des polyéthylènes à haute densité

### I.13.1. Les propriétés mécaniques

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

La nature para finie que du polyéthylène à haute densité, en fait un matériau avec de bonnes propriétés de frottement (surtout sous forme injectée) ; les facteurs de frottement dynamique pour une vitesse donnée sont indépendants de la pression de surface ( $s=0,15$  à  $0,25$ ), pression admissible  $\leq 10\text{N/mm}^2$ , vitesse  $\leq 2\text{m/s}$ . On résume les différentes caractéristiques de ce matériau dans le tableau I.1. [10]

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

**Tableau I.1 :** Propriétés mécaniques des polyéthylènes à haute densité [10]

### I.13.2. Les propriétés physiques

Les polyéthylènes à haute densité sont opaques en forte épaisseur et transparents en films. L'augmentation de la cristallinité se traduit par une diminution de la stabilité et de la diffusivité (d'une part de la perméabilité) des diffusants car leur transport ne peut s'effectuer dans la phase amorphe. (Tableau I.2) [26]

<b>Transmission lumineuse</b>	<b>Masse volumique g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Absorption d'eau %</b>	<b>Taux de cristallinité %</b>
Mauvaise	0,95	0,01	70 à 80

**Tableau I.2 :** Propriétés physique du PEHD [10]

### I.13.3. Les propriétés chimiques

Les polyéthylènes à haute densité possèdent une grande stabilité chimique, à des températures inférieures à 60°C, ils sont pratiquement insolubles, ils ne sont attaqués ni par les acides (sauf oxydants), ni par les bases, ni par les solutions de sel. Ils sont insolubles dans l'eau, mais ils sont sensibles à l'état naturel à l'action des ultraviolets en présence d'oxygène (aire) ; pour cela, ils sont chargés de poudres de carbone, 2 à 3% ou de stabilisantes lumières. Ils sont sensibles au feu et à la fissuration sous contrainte en présence de savon, alcool...etc. [31]

### I.13.4. Les propriétés thermiques

En absence de contraintes, le polyéthylène à haute densité peut supporter une température de 110°C à 120°C (stérilisation par exemple), mais cette température décroît avec la charge  $\leq 100^\circ\text{C}$  ; augmente avec le taux de réticulation. Le passage de la température de transition vitreuse est d'autant moins sensible que le polyéthylène à haute densité est plus cristallin. (Tableau I.3)

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

**Tableau I.3 :** Propriétés thermiques du polyéthylène à haute densité [11]

### I.13.5. Les propriétés électriques

Les polyéthylènes à haute densité sont d'excellents isolants électriques pour des conditions varie d'ambiance, ceci explique leur tendance à être électrostatiques. Ils ont une résistivité très élevée et une rigidité électrique élevée. Le faible facteur de perte diélectrique interdira le soudage haute fréquence. (Tableau I.4) [8]

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

**Tableau I.4 :** Propriétés électriques du polyéthylène à haute densité [8]

### I.14. Comportement mécanique de polyéthylène à haute densité

La description des caractéristiques mécaniques des PE a été largement traitée dans la littérature. Par exemple, de nombreuses études se sont consacrées à la caractérisation complète de la courbe de traction uniaxiale et à l'explication détaillée de ses différentes caractéristiques, certaines propriétés telles que le taux de déformation naturelle restant encore à bien explorer. D'un point de vue industriel, l'intérêt repose dans l'étude de la rupture des matériaux sous diverses conditions et l'étude portera plutôt sur la description détaillée de toutes les causes de rupture et leurs origines. [31]

#### I.14.1. La déformation élastique

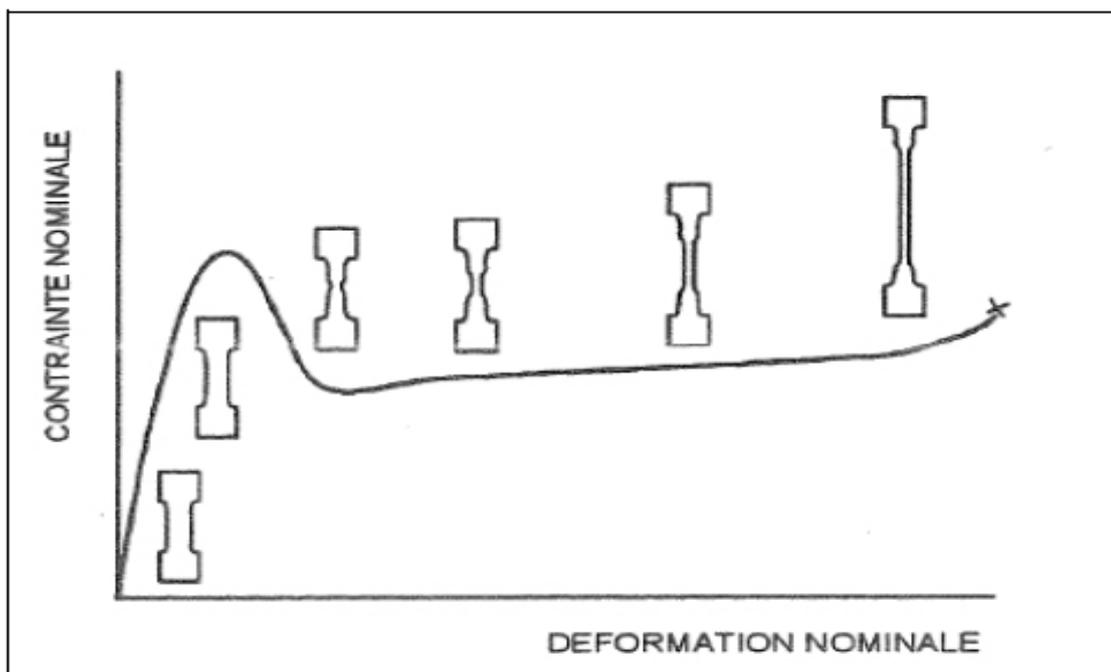
Le mécanisme de la déformation élastique du polyéthylène à haute densité soumis à une contrainte de traction consiste en un allongement, dans la direction de cette contrainte ; des chaînes de molécules en conformation stable, lequel découle de la flexion et de l'étirement des liaisons covalentes forte des chaînes, il peut également se produire un léger déplacement des molécules adjacentes ; auquel s'opposent des liaisons secondaires relativement faibles. [34]

De plus, le polyéthylène peut être qualifié de matériau composite, dans la mesure où il se compose de régions cristallines et de région amorphes, auquel cas le module d'élasticité résulte d'une combinaison des modules d'élasticité des cristallites et amorphe.

### I.14.2. La déformation plastique

Le mécanisme de déformation plastique consiste en interaction entre des régions lamellaires et des régions amorphes alternantes soumises à une contrainte de traction ; la déformation plastique passe par trois étapes :

- Au cours de la première étape de la déformation, les chaînes présentées dans les régions amorphes glissent l'une par rapport à l'autre et s'alignent dans la direction de la contrainte.
- La deuxième étape se caractérise par une torsion des lamelles qui amène les chaînes pliées à s'aligner sur l'axe de traction, qui des segments cristallins en blocs se détache des lamelles tout en demeurant liés les uns aux autres par des chaînes de liaison.
- A l'étape finale les blocs et les chaînes de liaison s'orientent sur l'axe de traction ; il s'avère ainsi qu'une déformation de traction notable du polyéthylène à haute densité engendre une structure fortement orientée. [13]



**Figure I.13** : Courbe contrainte-déformation nominale d'un polymère

Semi-cristallin (PE) en traction uniaxiale [13]

### I.14.3. La limite élastique

Certains polymères ne présentent pas de limite élastique évidente. C'est le cas des polymères fragilisés pour lesquels l'échantillon rompt au cours du stade viscoélastique, ou bien des élastomères, caractérisés par leur comportement hyper-élastique. Lorsqu'une limite élastique se produit, en général pour une déformation de l'ordre de quelques pour cent, elle se manifeste [14] :

- Soit sous la forme d'un maximum local de la courbe présentant l'évolution de la contrainte vraie en fonction de la déformation vraie.
- Soit sous la forme d'un brusque changement de sa pente.

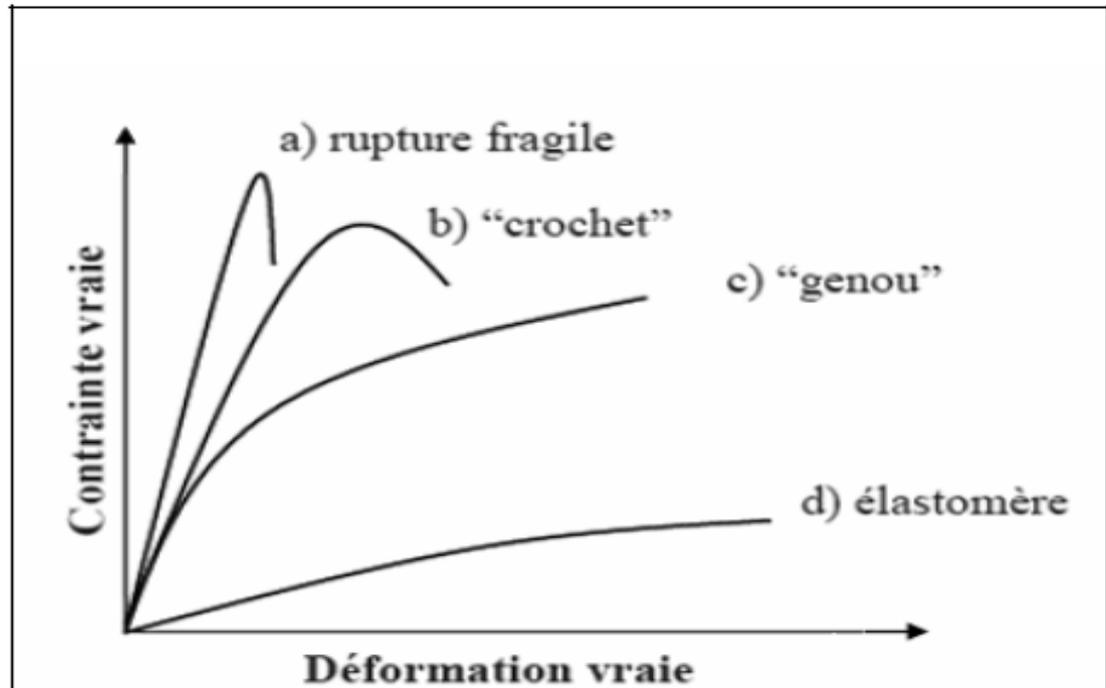


Figure I.14 : Comportements typiques des polymères [14]

### I.15. Types des polyéthylènes à haute densité

Suivant les procédés de polymérisation d'éthylène, on obtient deux types distincts de polyéthylène :

- Les procédés à haute pression : fournissant le polyéthylène à basse densité (PEBD).
- les procédés à basse pression : fournissant un polymère légèrement plus dense, le polyéthylène à haut densité (PEHD). [32]

### I.16. Le polyéthylène un choix durable

Le PEHD est utilisé depuis plus de 35ans à grande échelle pour la réalisation des réseaux hydrauliques de toutes sortes et sa fiabilité exceptionnelle n'est plus à démontrer. Le PEHD possède donc des caractéristiques mécaniques supérieures et permet de fabriquer des tubes de pression nominale plus élevée (jusqu'à 25 bar) avec épaisseurs réduites. La contribution du PE à l'amélioration du rendement des réseaux est importante et durable :

- Homogénéité des tubes et raccord offrant la garantie d'une absence de corrosion par le terrain.
- Flexibilité lui permettant d'accepter sans dommage les éventuels mouvements du terrain.

- Raccordement par soudage permet d'éliminer le maximum de joints enterrés tout en renforçant mécaniquement la canalisation. [32]
- Résistance durable à la pression et aux surpressions alliées à une durée de vie Importante : 16 à 50 bar à 20°C et avec un coefficient de sécurité à l'éclatent Supérieur à 3.
- Performance hydraulique durable: encrassement insignifiant, pertes de charges réduites et haute résistance à l'abrasion. [34]

### **I.17. Cycle de vie du polyéthylène à haute densité**

La production des tubes et canalisations polyéthylène PEHD n'émet aucun rejet dans l'environnement. 100% des rebuts de production sont recyclés sur site et l'eau servant refroidissement des canalisations produites circule en circuit fermé. En conséquence, aucun rejet n'est à craindre pour l'environnement. La fiabilité du polyéthylène PEHD en termes d'étanchéité surclasse tous les autres matériaux. Sa flexibilité lui permet de s'adapter à tous les terrains, sans risque de casse ou de fuites. Le réseau soudé, son taux de défaillance est proche de zéro, même sous contraintes. C'est un matériau extrêmement résistant, ce qui explique son expansion sous tous les climats et permet de préserver de manière considérable la ressource en eau. Le polyéthylène est le matériau le plus utilisé au monde pour sa fiabilité. [36]

### **I.18. Principales applications du polyéthylène à haute densité**

Le polyéthylène à haute densité (PEHD) est utilisé dans les secteurs où la rigidité est recherchée, comme l'emballage de substitution du papier, certaines propriétés sont intéressantes, d'autres sont nettement inférieures à celles du polyéthylène à basse densité.

#### **II.18.1. Films**

**Films thermo rétractables :** On fige à la sortie de l'étirage, les macromolécules à un état déformé, un réchauffement pourra leur permettre de reprendre leur état stable conduisant à une rétraction (diminution des dimensions) et d'épouser ainsi parfaitement l'objet emprisonné (emballage, conditionnement....etc.). [4]

**Films étirés :** On utilise le film dans le domaine des allongements de 5 à 20 % pour maintenir des charges en palette de manutention. [4]

#### **I.18.2. Les objets moulés**

Dans le domaine des objets moulés, le polyéthylène à haute densité se développe dans le secteur industriel : manutention, seaux, bouchonnage, et dans les applications techniques telles que les mobiliers urbains. On peut obtenir de grands récipients de forme complexe à partir de poudre. [16]

### I.18.3. Extrusion-soufflage

Le domaine d'extrusion-soufflage est réservé principalement au polyéthylène à haute densité, les secteurs sont l'embouteillage rigide : bouteilles, flacons, bidons de lait, récipients pour lessive et les grands récipients : fosses septiques.....

### I.18.4. Tuyaux

Le polyéthylène à haute densité (PEHD) est employé pour la réalisation de tuyauteries de gaz et aussi étiré pour les tuyaux sous pression, eau chaude, chauffage par le sol. L'indice de fluidité à chaud doit être  $\leq 2$ . La fabrication de tube de  $D_{EXT} \leq 6$  mm ne nécessite pas de calibration, mais Pour les tubes jusqu'à  $D_{EXT} = 110$  mm on utilise un conformateur à vide, et pour les diamètres plus importants en calibre par surpression à l'intérieur de l'extrudât.

## I.19. Contrôle du polyéthylène à haute densité

Les paramètres de structure des polyéthylènes à haute densité sont mesurés par les techniques suivantes :

- Par chromatographie sur gel perméable (GPC) à haute température pour les masses moléculaires et leur distribution.
- Par analyse d'enthalpie différentielle pour le taux de cristallinité et les paramètres de fusion et de cristallisation.
- Par résonance magnétique du carbone-13 pour la composition en monomères.

Les contrôles courants réalisés par les producteurs sont des testes mécaniques classiques, tenus à la fusion ou à la traction, et des testes spécifiques de chacune des applications envisagées. [22]

Les testes usuels sont : la mesure de l'indice de fluidité, celle de la masse volumique, et le dosage des adjuvants. L'indice de fluidité est défini comme le poids de matière extrudée en 10 min à révère une filière calibrée standardisée à 190 °C sous 2,16 Kg. La masse volumique est mesurée à 23 °C selon différentes méthodes. La tenue aux adjuvants est contrôlée par spectroscopie infrarouge ou par des méthodes de dosage spécifiques.

## Généralités sur les essais mécaniques

### I.20. Définition

Les essais mécaniques sont des expériences effectuées afin de caractériser les matériaux et de déterminer les lois qui décrivent leur comportements dans des conditions données. Les essais mécaniques normalisés se divisent en deux catégories : les essais uniaxiaux et les essais multiaxiaux. Pour la première catégorie les essais les plus classiques et courants sont ceux de traction, de compression, de torsion et de flexion. Tandis que les essais multiaxiaux sont malheureusement peu pratiqués en raison des difficultés expérimentales malgré les informations précieuses qu'ils apportent pour tester les modes de déformation. Ces essais peuvent être effectués suivant deux modes : en phase ou hors phase, selon que l'éprouvette subit simultanément ou non les différentes sollicitations. [36]

### I.21. Les essais mécaniques uniaxiaux

L'essai de traction, de cisaillement, de flexion, de torsion, de dureté, de résilience, de fatigue et de fluage sont dits essais mécaniques uniaxiaux.

Parmi ces essais, l'essai de traction est l'essai le plus utilisé. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques des matériaux telles que : la limite élastique, le module d'élasticité, le coefficient de poisson et la résistance à la traction. [28]

#### I.21.1. Essai de traction uniaxiale

##### I.21.1.1. Principe de l'essai de traction uniaxiale

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction de façon progressive généralement jusqu'à la rupture dans le but de définir une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. Un essai de traction est une expérience qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque. (Figure I.15) [16]

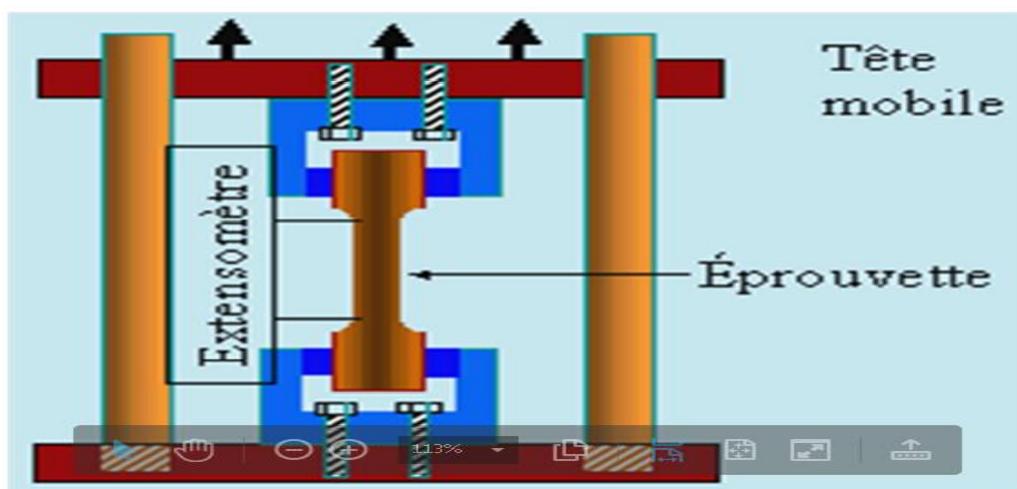


Figure I.15 : Dispositif d'essai de traction uniaxiale [16]

### I.21.1.2. Machines d'essais de traction uniaxiale

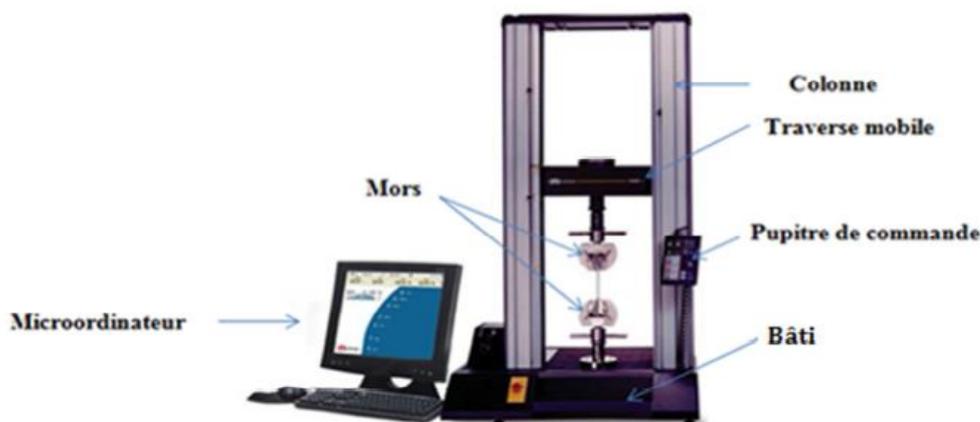
La machine de traction comporte une cellule de charge qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette. Il ne faut pas oublier d'étalonner périodiquement cette cellule.

L'éprouvette est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine, alors que sa tête supérieure est accrochée soit à la traverse mobile dans le cas d'une machine mécanique, soit au vérin hydraulique. Le déplacement vers le haut réalise une traction sur l'éprouvette. [23]

Dans certains cas, il peut être commode de disposer d'un montage inverse, celui-ci est tel que l'amarrage supérieur passe à travers un trou dans la traverse de la machine et l'amarrage inférieur est fixé en dessous de travers par l'intermédiaire d'une pièce creuse.

Pour réaliser une traction, il faut alors évidemment faire descendre la traverse. Un tel montage permet de plonger l'éprouvette dans un bain pour des essais à des températures différentes de l'ambiante, ou en présence d'un milieu agressif.

Les machines d'essais sont hydrauliques ou selon que le déplacement est réalisé grâce à un moteur actionnant deux vis agissant sur la traverse. Les machines mécaniques, si elles ne sont pas asservies, travaillent à vitesse de déplacement de la traverse imposée. Ce peut être un inconvénient puisque la vitesse de déformation n'est pas alors constante, mais décroissante, dans la mesure où la base de mesure s'allonge au cours de l'essai, et où l'effort, non constant, produit une déformation de la machine variable elle aussi. Les machines hydrauliques, solution adoptée dès les premiers essais, sont maintenant asservies. Il est alors possible de les faire travailler à vitesse de déplacement de vérin, ou de montée en charge, ou de déformation constante. Dans ce dernier cas par asservissement aux indications de l'extensomètre fixé sur l'éprouvette. Il est évidemment aussi possible de réaliser toutes sortes de pilotages différents. Ils peuvent être fournis par un ordinateur. Cela est particulièrement indiqué si l'on souhaite effectuer des décharges, ou encore des changements de vitesse périodiques. Toutefois les modifications de pilotage au cours de l'essai sont toujours des déformations imposées à un maintien en charge. Pour des maintiens en charge de longue durée les machines mécaniques sont mieux adaptées. (Figure I.16) [22]

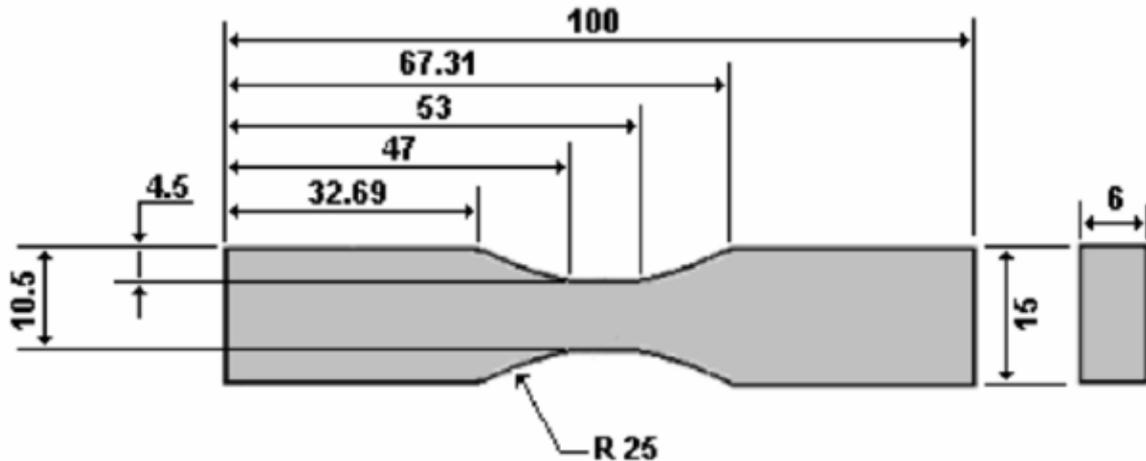


**Figure I.16 :** Machine d'essai de traction uniaxiale et ses équipements [16]

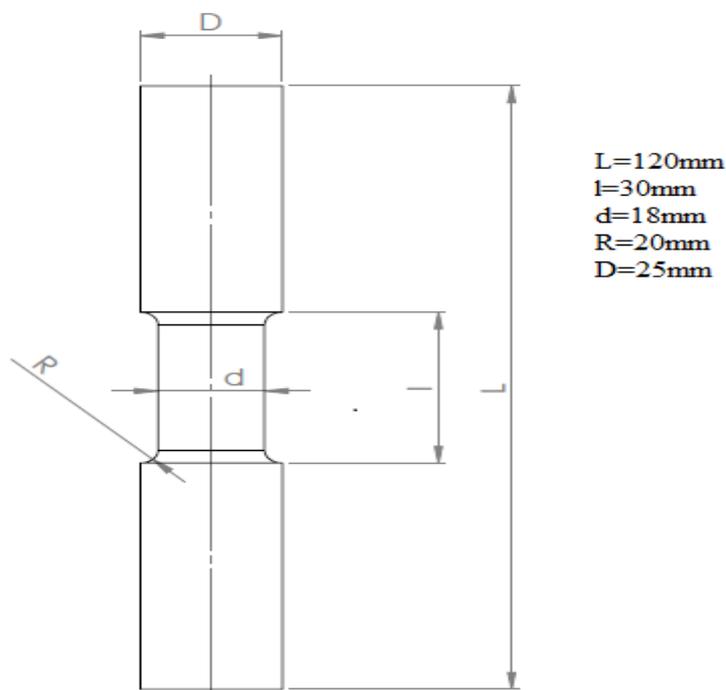
### I.21.1.3. Forme et dimension de l'éprouvette

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate de section constante sur une longueur suffisante pour que la contrainte soit homogène.

Pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contraintes excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes. (Figure I.17) [17]



a)



b)

**Figure I.17** : Les différents types d'éprouvette de traction [17]

a) éprouvette plate

b) éprouvette cylindrique

#### I.21.1.4. Réponse du matériau en traction uniaxiale

Sur un diagramme contrainte-déformation ils permettent de tracer une courbe dite de traction à partir de laquelle les caractéristiques sont déterminées. On observe les différentes phases décrivant le comportement du matériau. (Figure 18)

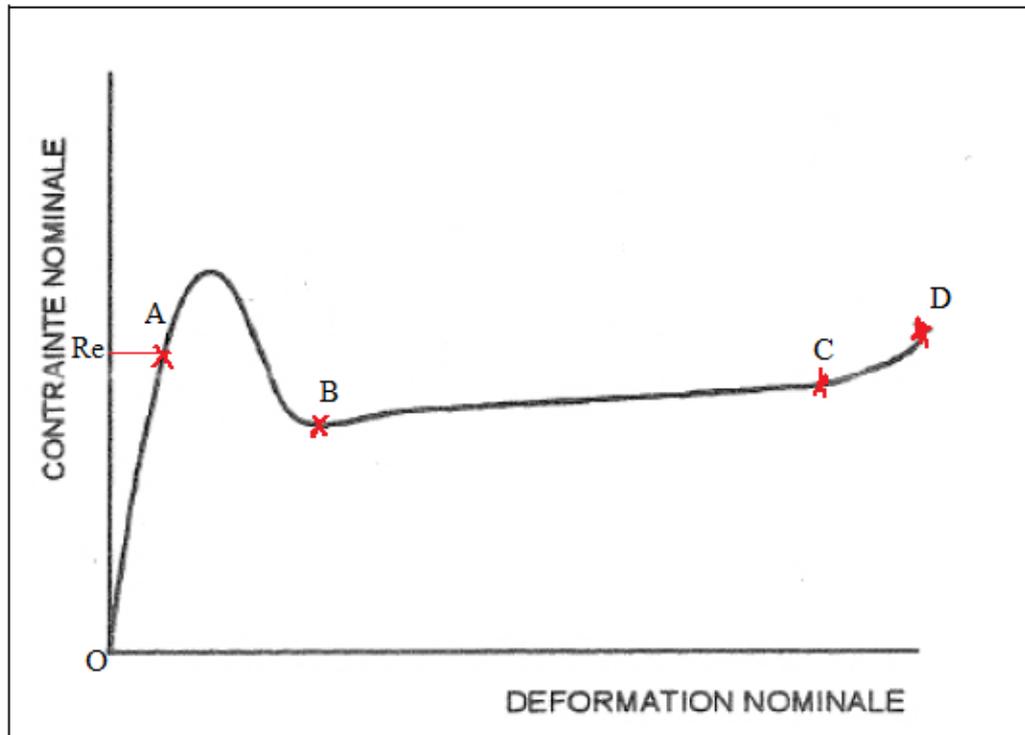


Figure I.18 : Différentes phases du comportement du matériau polymère [17]

**Zone OA :** Domaine de déformation **élastique ou réversible**. Elle est parfois linéaire ; si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.

**Zone AB :** C'est le crochet de traction ; à ce niveau il ya une instabilité plastique appelée **striction**. Et la déformation n'est plus complètement réversible (homogène).

**Zone BC :** La déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène.

**Zone CD :** La déformation conduit progressivement à la rupture pour un allongement maximum en D. On parle de contrainte à la rupture.

#### I.21.1.5. Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale

Sur le diagramme charge-allongement, qui peut être enregistré ou tracé par pointe, on utilise les coordonnées suivantes : [17]

En abscisse, l'allongement relatif  $\Delta L/L_0$  de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure  $L_0$  ( $L_0$  est la longueur initiale de l'éprouvette) :

$$\varepsilon\% = 100 \cdot \frac{L - L_0}{L_0}$$

En ordonnée : la **charge unitaire**, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette  $S_0$ .

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Le point A est la **limite d'élasticité** (ou résistance élastique à la traction) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

Le point B correspond à la charge maximale ; il est appelé **résistance à la traction** ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) ;

$$R_m = \frac{F_r}{S_0}$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au-delà du point B.

Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non-conformité géométrique. Le point C correspondant, lui, à la **charge ultime**. [35]

Après la rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure **LU** et **SU** respectivement longueur entre repères et sections minimales ultimes.

L'allongement relatif total ou **A pour cent** de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

$$A\% = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

Où  $L_u$  est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau. Cet allongement est la somme de l'allongement réparti  $A_r$  jusqu'au maximum de la charge et de l'allongement localisé de striction  $A_z$  :

$$A = A_r + A_z$$

La **striction** est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture (Figure I.19). Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

Avec ;  $S_0$  : section initiale et  $S_u$  : section après rupture.

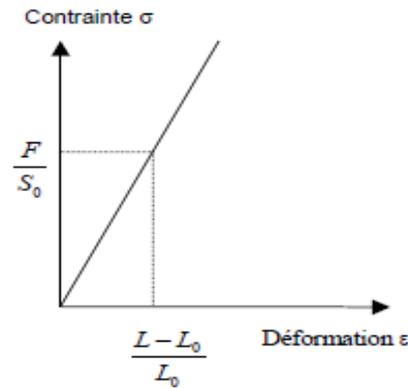


**Figure I.19** : Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale [18]

Cette déformation est également la somme de la déformation homogène répartie et de la déformation de striction proprement dite.

Dans la partie élastique, il ya proportionnalité entre charge unitaire appliquée appelée **Constante d'élasticité**.

La caractéristique d'élasticité du matériau est exprimée par le rapport entre la charge unitaire appliquée et la déformation longitudinale de l'éprouvette. (Figure I.20)



**Figure I.20 :** Module d'Young

Bien que l'essai de traction permette difficilement de les mesurer, il est intéressant de rappeler les définitions des constantes élastiques et leurs relations lorsqu'on trace la courbe de  $\sigma$  en fonction de  $\epsilon$  dans la zone élastique, la pente de la courbe est donnée par  $\tan\theta$ .

$$E = \frac{F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L}$$

## I.21.2. Essai de compression

### I.21.2.1. But de l'essai

L'objectif de ce type d'essai est la détermination de la contrainte limite en compression pour les matériaux fragiles. [34]

### I.21.2.2. Réalisation de l'essai

L'essai de compression est l'un des essais les plus faciles à réaliser : il consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique ou prismatique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales égales et directement opposées, qui tendent à la comprimer. Si le matériau étudié est ductile, la rupture ne peut être atteinte avec ce test. L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (céramiques, pierres, fontes, ...). [21]

Les machines utilisées pour l'essai de compression sont similaires à celles utilisées pour les essais de traction ; souvent la même machine peut être employée pour effectuer les deux essais.

Bien que les essais de compression soient simples et faciles à réaliser, ils sont rarement effectués en comparaison des essais de traction. Cela peut être expliqué de la manière suivante :

En ce qui concerne les matériaux ductiles, les deux essais (traction et compression) fournissent presque les mêmes valeurs pour le module d'Young, la limite d'élasticité et la limite d'écoulement.

De plus, il est impossible d'obtenir la résistance ultime pour ces matériaux, puisque l'éprouvette ne se détruit guère, mais elle s'élargit avec l'accroissement de la force de compression tout en prenant la forme d'un tonneau. Il en est de même des propriétés de ductilité qui ne peuvent pas être obtenues pour matériaux ductiles. De sorte que l'essai de compression est, souvent, réalisé sur les matériaux fragiles pour lesquels la résistance à la compression est beaucoup plus importante que la résistance à la traction.

### I.21.2.3. Mécanisme d'essai de compression uniaxiale

Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette. On mesure simultanément les contraintes et déformations au cours de l'essai. [5]

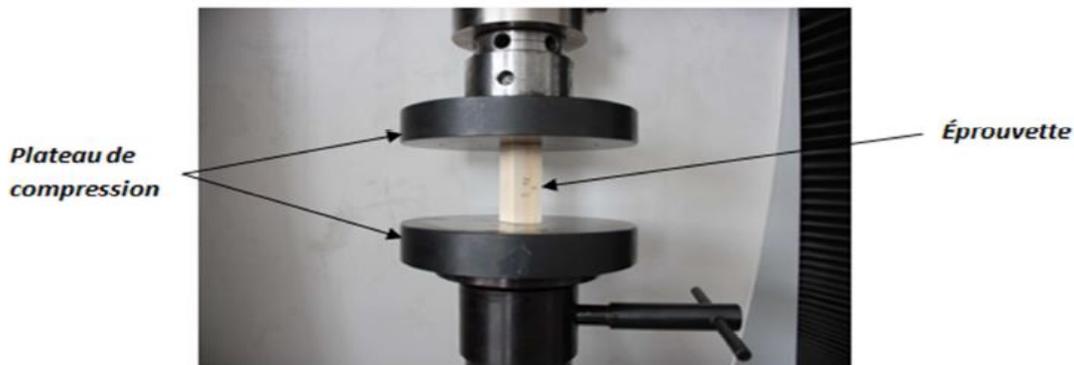


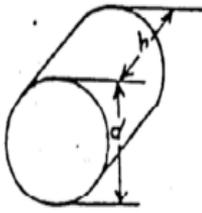
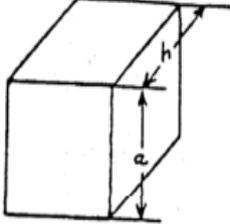
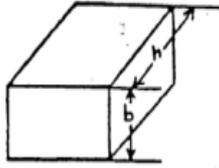
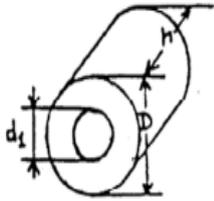
Figure I.21 : Dispositif d'essai de compression [5]

### I.21.2.4. Eprouvette de compression

L'éprouvette doit être constituée d'un cylindre droit, d'un prisme droit ou d'un tube droit. Les extrémités des éprouvettes doivent être parallèles et perpendiculaires à la direction de l'application de l'effort. [5]

Sauf spécification contraire, la hauteur des éprouvettes, en fonction des dimensions de leur section droite, doit être égale à  $h$ .

Dans le cas où un flambage des éprouvettes se produit au cours de l'essai, le rapport d'effilement doit être réduit ce qui conduit à des éprouvettes de hauteur  $h_1$ . (Tableau I.5)

Cylindrique	Prisme carré	Prisme rectangulaire	Tube cylindrique
			
$h = 2,5 \cdot d$	$h = 2,9 \cdot a$	$h = 2,9 \cdot b$	$h = 2,5 \sqrt{D^4 + d^2}$
$h_1 = 1,5 \cdot d$	$h_1 = 1,74 \cdot a$	$h_1 = 1,74 \cdot b$	$h_1 = 1,5 \sqrt{D^4 + d^2}$

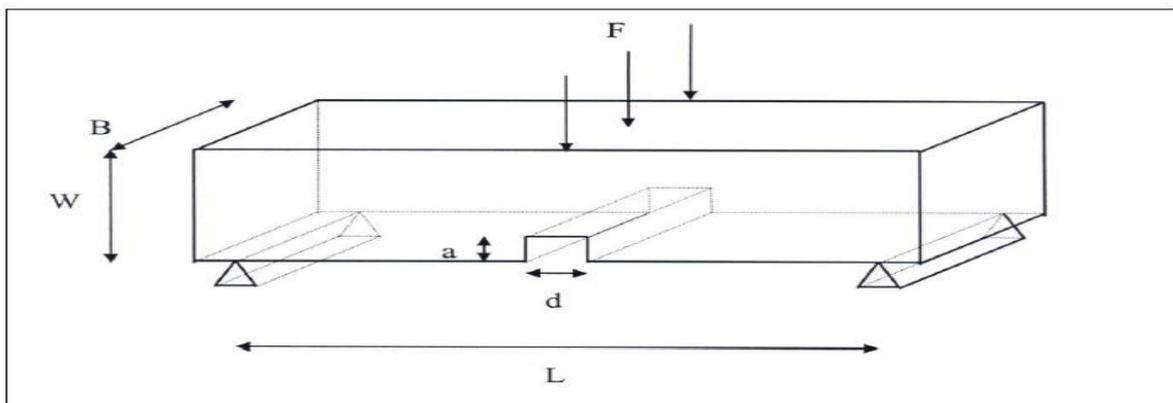
**Tableau I.5 :** Forme et dimension normalisées de l'éprouvette compression [5]

**I.21.4. Essai de flexion uniaxiale**

C'est l'essai le plus utilisé pour obtenir la valeur du facteur d'intensité de contrainte critique  $K_{IC}$  qui est un paramètre caractéristique de la propagation des fissures dans les solides. Ce paramètre permet, en effet, de déterminer le niveau de contrainte nécessaire pour initier une fissure, ainsi que l'énergie nécessaire pour la faire propager (moyennant le calcul du taux de restitution d'énergie).

Cet essai est normalisé et entièrement décrit dans la norme ASTM E 399. Il consiste à solliciter un barreau entaillé, en flexion trois points ou en flexion quatre points. Le barreau est sollicité jusqu'à la rupture. [19]

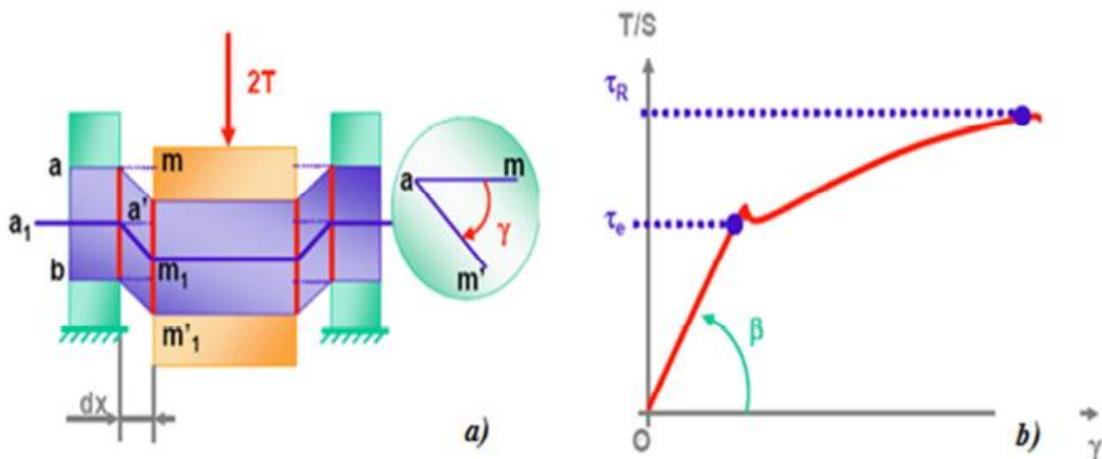
Au cours de l'essai, nous mesurons l'effort et le déplacement du point de chargement. La valeur à la rupture de l'effort nous permet de calculer  $K_{IC}$ .



**Figure I.22 :** Dispositif de flexion trois points [19]

### III.21.5. Essai de cisaillement

Lors de l'essai de cisaillement pur, les sections infiniment voisines  $ab$  et  $a'b'$  glissent en bloc l'une par rapport à l'autre. Donc on peut admettre que dans cette section cisailée, la condition de cisaillement pur est approximativement remplie. Si on note par l'angle de cisaillement, avec «  $m$  » la position initiale du point appartenant à la section cisailée et sa position finale ou position après déformation. (Figure 23. a). Si on relève la courbe représentant  $T/S$  en fonction de l'angle, on obtient un diagramme d'allure semblable à celle de la traction pure (Figure I.23. b). [20]



**Figure I.23** a) Schéma de principe de l'essai de cisaillement  
b) Courbe de cisaillement pur [20]

On remarque en particulier que le début de la courbe est rectiligne, ce qui traduit le fait que les efforts et les déformations sont directement proportionnels dans le domaine élastique. Au-delà de  $\tau_e$  (limite élastique en cisaillement du matériau), la relation contrainte déformation n'est plus linéaire ni réversible.

Pour  $T/S > \tau_e$ , lorsqu'on abaisse progressivement la valeur de  $T$  jusqu'à zéro, on décrit une droite parallèle à celle du premier domaine élastique (Domaine pour lequel  $0 \leq T/S \leq \tau_e$  à  $T=0$ , une déformation résiduelle subsiste. Enfin, pour  $T/S = \tau_e$ , il y a rupture de l'éprouvette.

On remarque ainsi deux domaines de comportement :

- Le domaine élastique linéaire défini par  $0$ .
- Le domaine plastique défini par  $T/S = e \tau$ .

Dans le domaine élastique, on relie la contrainte de cisaillement  $\tau = T/S$  à l'angle de cisaillement  $\gamma$  par :

$$\tau = \mu\gamma = G\gamma$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Avec :

$m$  : Module de Coulomb ou deuxième coefficient de Lamé (GPa).

$g$  : L'angle de cisaillement (rad).

$G$  : Module de glissement (GPa).

$E$  : Module d'Young (GPa).

## I.21.6. Essai de torsion uniaxiale

### I.21.6.1. Principe de l'essai de torsion uniaxiale

C'est une méthode utilisée pour caractériser le comportement d'un matériau soumis à une charge de torsion. Les résultats de l'essai de torsion sont utilisés pour tracer une courbe de contrainte déformation qui permet de déterminer la limite d'élasticité, le module d'élasticité en torsion, le module de rupture en torsion et la résistance à la torsion.

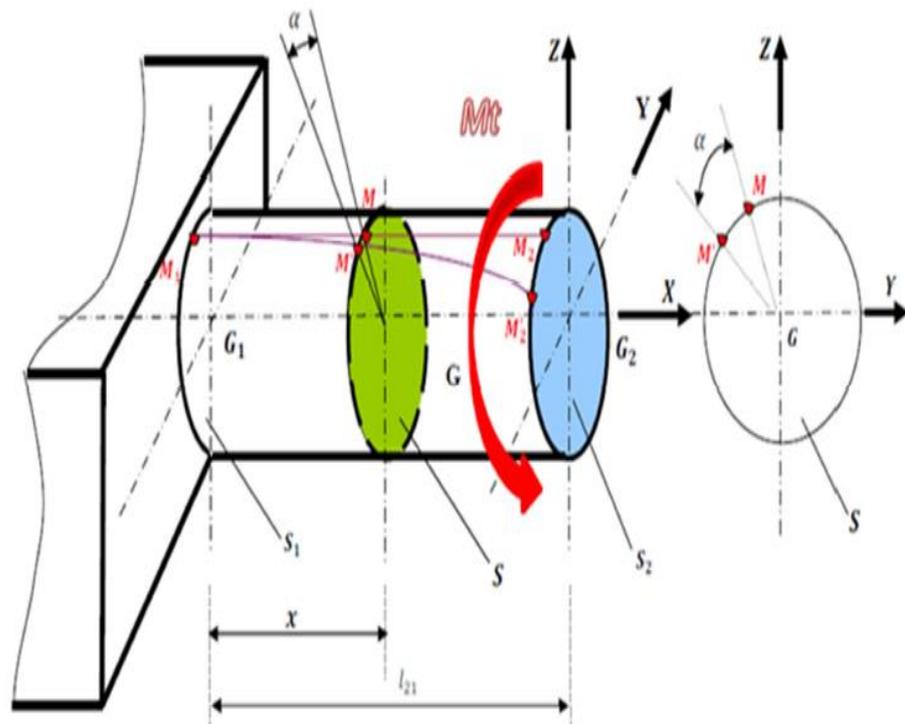


Figure I.24 : Schéma de principe d'essai de torsion [21]

### **I.21.6.2. Machine d'essai de torsion**

L'essai de torsion permet d'étudier l'influence de différents facteurs, par exemple : le matériau, la section, la longueur d'encastrement et le type d'appui sur la déformation d'une barre soumise à une charge de flexion ou à un moment de torsion. [21]

## **I.22. Les essais mécaniques multiaxiaux**

Les essais multiaxiaux apportent une information précieuse pour tester les modèles de déformation, mais ils sont malheureusement peu pratiqués en raison des difficultés expérimentales. Les essais possibles, classiquement, sont les essais de traction (ou compression) - torsion, les essais de traction biaxial. L'essai de traction cisaillement est le plus riche pour tester les aspects d'anisotropie. Nous présenterons ici les essais de traction biaxial et les essais de traction - torsion. [29]

Les essais multiaxiaux peuvent être effectués suivant deux modes : en phase ou hors phase, selon que l'éprouvette subit simultanément ou non les différentes sollicitations. Les déplacements et les forces appliquées peuvent être enregistrés de la même façon que dans le cas des essais de traction uniaxiale [30]. Ces essais sont utilisés soit dans des conditions quasi statiques soit dans le cadre d'essais de fatigue multiaxiale.

### **I.22.1. Essai de traction biaxial**

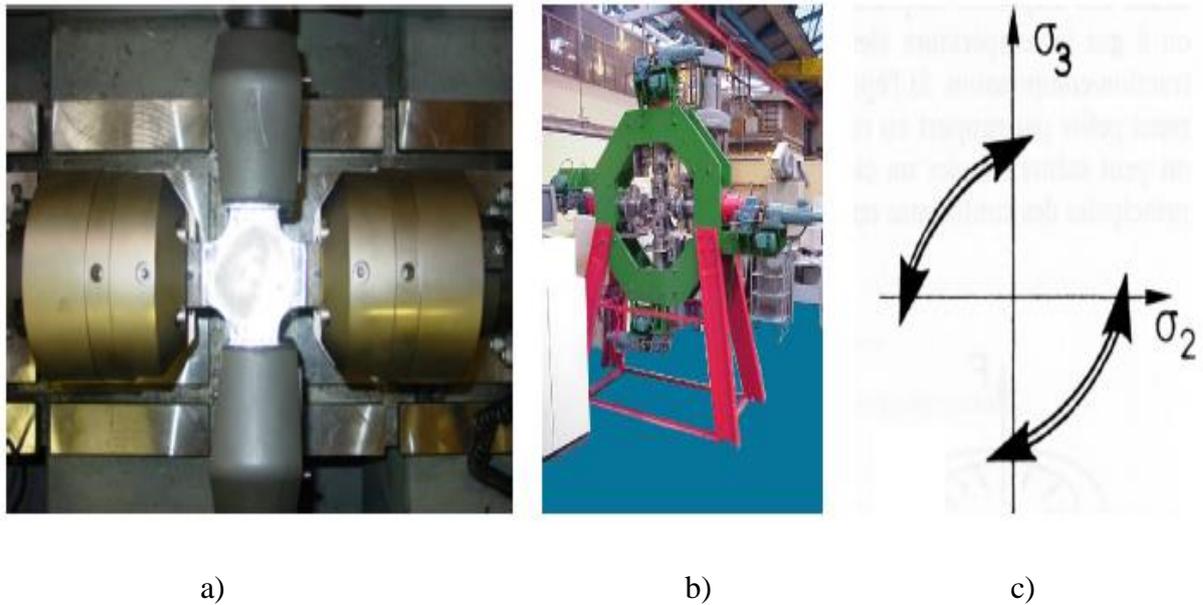
Ces essais ont pour but d'élargir les capacités d'identification du comportement plastique sous sollicitation biaxiale. Ils nécessitent de disposer d'une machine ou d'un dispositif appliquant un système de déplacements orthogonaux sur une éprouvette forme de croix. [28]

Dans le cas où l'on recherche une identification directe du comportement biaxial, la conception de la géométrie de l'éprouvette doit être faite de sorte que le champ de déformation soit aussi uniforme que possible sur une large zone centrale de l'éprouvette.

#### **I.22.1.1. Principe de l'essai traction biaxial**

Les essais de traction biaxiaux consistent à exercer une contrainte dans deux directions perpendiculaires sur une même éprouvette. Ceci impose d'utiliser des éprouvettes cruciformes. Pour réaliser des états de contrainte uniformes, il faut que les bras de la croix aient des rigidités transversales assez faibles. Les directions principales des contraintes sont fixées et on peut effectuer des chargements dans leur l'espace.

(Figure I.25) [29]



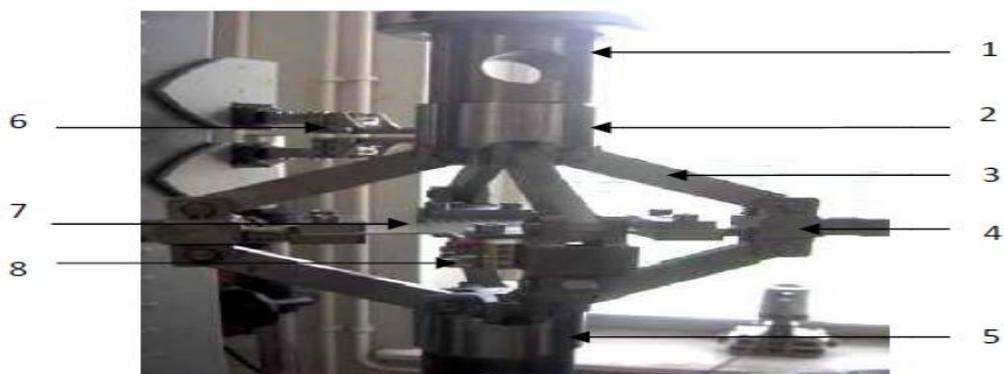
**Figure I.25 :** a) Epreuve de traction biaxiale montée

b) Dispositif de traction biaxial

c) Chemin mécanique pouvant être appliqué sur une épreuve de traction biaxial [23]

### I.22.1.2. Machines d'essai

Le dispositif de traction biaxial est constitué d'un ensemble articulé, sans forme propre en l'absence d'éprouvette. La mise en place de l'éprouvette nécessite l'utilisation d'un dispositif annexe qui sert d'appui pour les mors de fixation de l'éprouvette. Il est important que le serrage soit le même sur les quatre bras de l'éprouvette. [24]



1-Partie supérieure, 2-Tête supérieure, 3-Bras, 4-Mors, 5-Tête inférieure,

6-Système de guidage, 7-Eprouvette, 8-Caméra d'acquisition

**Figure I.26 :** L'ensemble de la machine [24]

### I.22.2. Essai de traction-torsion

Ce type d'essai permet d'étudier les trajets de chargement avec modification des directions principales des contraintes. La machine utilisée est constituée d'un vérin linéaire et d'un vérin torique avec dispositif de découplage. [26]

#### I.22.2.1. Principe de l'essai

Pour déterminer la loi de comportement en contraintes biaxiaux, l'essai le plus utilisé consiste à solliciter un tube mince à la fois en torsion (Figure I.27). Ce type d'essai permet d'étudier les trajets de chargement avec des modifications des directions principales des contraintes de découplage. [24]

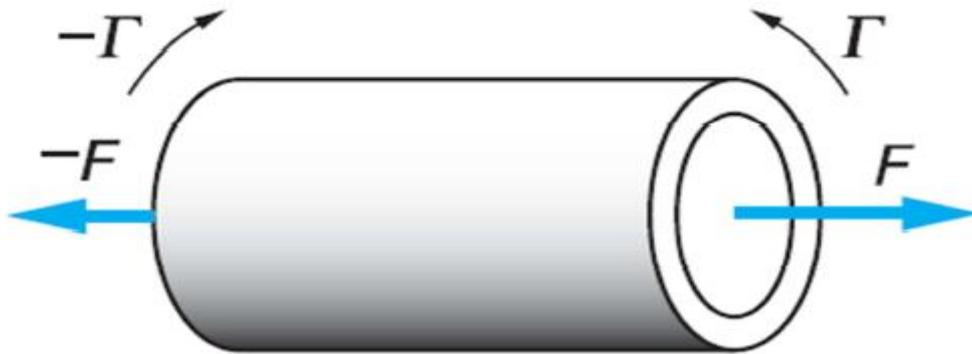


Figure I.27 : Eprouvette tubulaire sollicitée traction-torsion [24]

### I.22.3. Essai de traction-compression

#### I.22.3.1. Principe de l'essai

L'essai mécanique biaxial le plus classique et qui donne meilleurs résultats et qui engendre une bonne approximation, un état de contrainte plane homogène, consiste à solliciter un tube à parois minces à la fois à la traction et compression interne (Figure I.28). Le tube doit être relativement long pour éviter les efforts d'extrémités et les attaches particulièrement soignées pour éviter toute concentration de contraintes.



Figure I.28 : Tube à parois minces sollicité en traction-compression

## I.22.4. Essai de traction-cisaillement

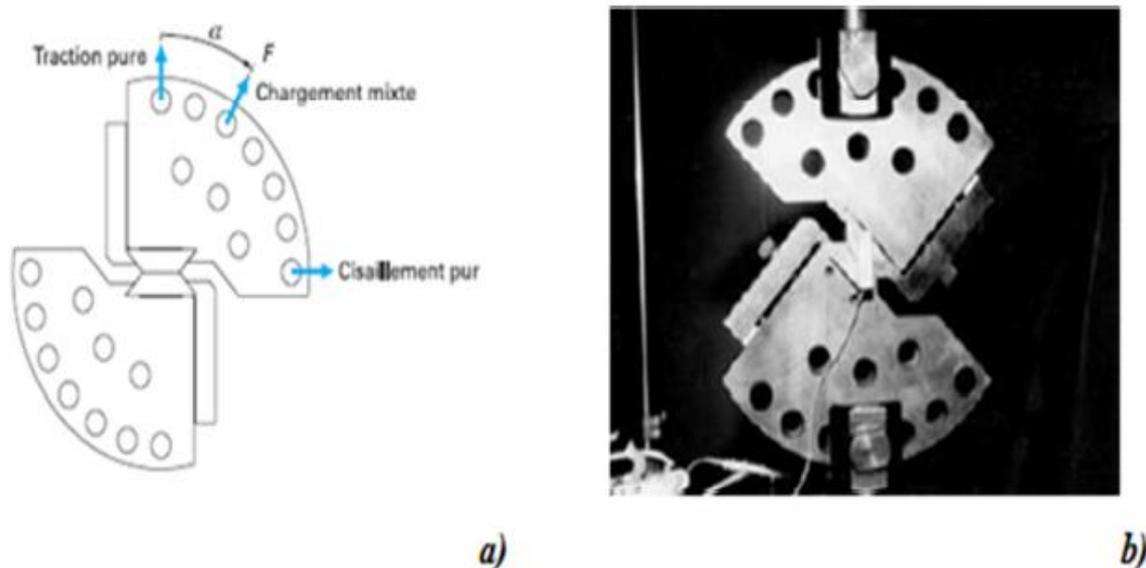
### I.22.4.1 Essai Arcan

L'essai Arcan a été développé pour l'étude et la caractérisation du comportement et l'endommagement des matériaux composites. Elle est également utilisée pour étudier d'autres problèmes tels que l'ouverture et la propagation des fissures. [29]

Cette procédure expérimentale permet de combiner et de contrôler parfaitement des sollicitations de traction perpendiculaire et de cisaillement transverse dans une éprouvette.

### I.22.4.2 Principe de l'essai Arcan

Deux supports angulaires sont liés à deux embases au milieu desquelles se trouve l'échantillon à tester. L'orientation de ces deux secteurs par rapport à l'axe de chargement d'une machine d'essai uniaxiale définit exactement la répartition de (traction perpendiculaire /cisaillement transverse) dans l'axe du chargement. La variation de cette orientation permet d'obtenir plusieurs combinaisons de sollicitation. (Figure I.29) [30]



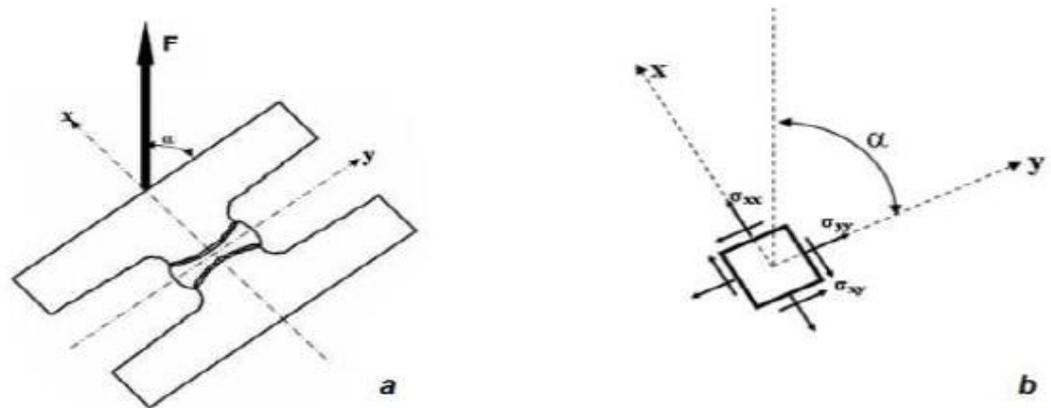
**Figure I.29 :** a) principe de l'essai Arcan [30]

b) Montage Arcan sur la machine de traction [30]

### I.22.4.3. Objectif

L'objectif du dispositif est développé dans la section centrale d'une éprouvette appelée éprouvette papillon sur la Figure I.30. Une contrainte normale  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{yy}$ , et une contrainte tangentielle  $\sigma_{xy}$ , en appliquant un effort vertical F. L'orientation de la section centrale par rapport à la direction de la charge verticale s'effectue par le réglage de l'angle a.

Le sens de l'effort F et la valeur de l'angle permettent de développer différents états de contraintes planes de traction-compression combinée ou cisaillement et cisaillement simple (Tableau I.6). [29]



**Figure I.30 :** a) Eprouvette papillon en chargement biaxial [30]

b) Etat de contrainte plane développé au centre de l'éprouvette [30]

L'angle $a$	Sens de l'effort $F$	Etat de contrainte
$90^\circ$	Positif	Traction
$90^\circ$	Négatif	Compression
$0^\circ$	Position (ou négatif)	Cisaillement
$0^\circ < a < 90^\circ$	Positif	Traction/cisaillement Combiné
$0^\circ < a < 90^\circ$	Négatif	Compression/cisaillement Combiné

**Tableau I.6 :** Etats de contraintes appliquées avec le dispositif ARCAN [25]

### I.23. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une synthèse bibliographique associée aux généralités sur les polymères en générale et en particulier sur le, PEHD, ainsi ces matériaux sont classés comme des matériaux complexes dans leurs structures en comparaison aux matériaux métalliques.

Nous sommes intéressés aussi au comportement mécanique de ces derniers, c'est pour cela que nous avons cités et expliqué les différents types d'essais mécaniques uniaxiaux et multiaxiaux, afin de définir leurs différentes caractéristiques mécaniques.



## II. Introduction

On présente dans ce chapitre le matériau étudié, la géométrie de l'éprouvette d'essai, ainsi que les procédés de réalisation de ces éprouvettes et les solutions prises pour prohiber tout glissement des éprouvettes durant les essais. On présentera ensuite, la machine de traction utilisée et le dispositif permettant d'effectuer une sollicitation combinée en traction-torsion.

### II.1. Le matériau d'étude

Le matériau d'étude est le polyéthylène à haute densité (PEHD). Il a été fabriqué dans un premier temps sous forme de granulés, importé par l'entreprise CHIALI située à SIDI BELABES (Algérie). Ensuite, il a été extrudé dans le but de fabriquer des tubes de différents diamètres. Les conditions d'extrusion sont déterminées afin de garantir un refroidissement le plus homogène possible dans les tubes. Il s'agit d'un thermoplastique semi-cristallin, comportant une phase amorphe et une phase cristalline et se présentant sous forme d'un agrégat sphéroïdique. La température de fusion, notée  $T_f$ , correspond à la fusion des cristallites. Elle correspond à la température de mise en œuvre de ce polymère. Les procédés basse pression permettent d'obtenir des chaînes macromoléculaires linéaires plus facilement cristallisables. Le polyéthylène plus cristallin que le polyéthylène à basse densité (PEBD), donc plus dense, est appelé polyéthylène à haute densité (PEHD).

Ce matériau est donc semi-cristallin, composé d'une phase cristalline, mélangé dans une phase amorphe, caractérisé par un taux de cristallinité, ainsi que la taille et la distribution des cristallites dans un matériau semi-cristallin influent sur ses propriétés mécaniques. [26]

Ces caractéristiques principales sont données dans le tableau II.1.

Propriétés	Unités	PEHD
Masse volumique	$\text{g.cm}^3$	0,945 à 0,970
Cristallinité	%	60 à 80
Température de la fusion	$^{\circ}\text{C}$	118 à 146
Température de transition vitreuse	$^{\circ}\text{C}$	-120
Contrainte à la rupture	Mpa	26 à 40
Allongement à la rupture	%	20 à 1100
Limite élastique	Mpa	13 à 27

**Tableau II.1** : Principales propriétés du PEHD

## II.2. Géométrie des éprouvettes

L'étude du comportement mécanique des polymères soulève toujours la question de la méthode d'obtention d'une éprouvette.

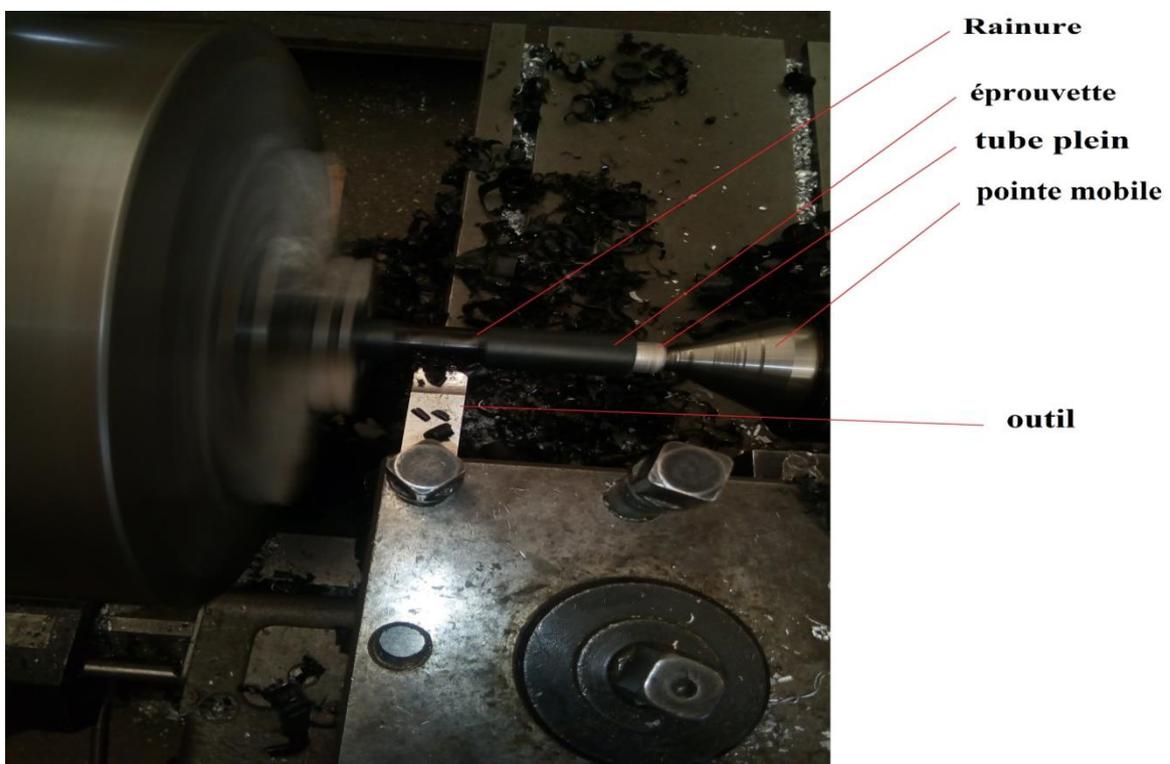
Les éprouvettes ont été prélevées par découpage à un même tube de diamètre extérieur et intérieur respectivement égale à 20mm et 14mm. Elles ont donc les mêmes conditions d'élaboration à savoir la température et la pression de mise en œuvre du tub. Par la suite on a effectué un dressage sur les extrémités de ces échantillons pour éliminer les bavures produites pendant le découpage. Et finalement on usine une rainure de rayon (R) = 25mm, et une longueur (L) = 30mm.

Pour réaliser cette rainure on a effectué un montage entre pointes, sur un tour parallèle pour éviter toute déformation durant l'usinage. Et pour cela on a utilisé un arbre. Ayant deux trous à centrer sur les extrémités, à l'intérieure de l'éprouvette.

L'outil utilisé, est un outil à rainure en acier rapide extra supérieure (ARES) obtenu par affutage d'une barre parallélépipédique.

Tous les travaux d'usinage ont été réalisés sur un tour parallèle au niveau du hall de technologie de Oued-Aissi.

Sur la figure II.1 on montre l'opération de rainurage de l'éprouvette cylindrique creuse. Leurs géométries et dimension sont présentées respectivement dans la figure II.2 et le tableau II.2.



**Figure II.1** : Usinage d'une éprouvette sur un tour parallèle

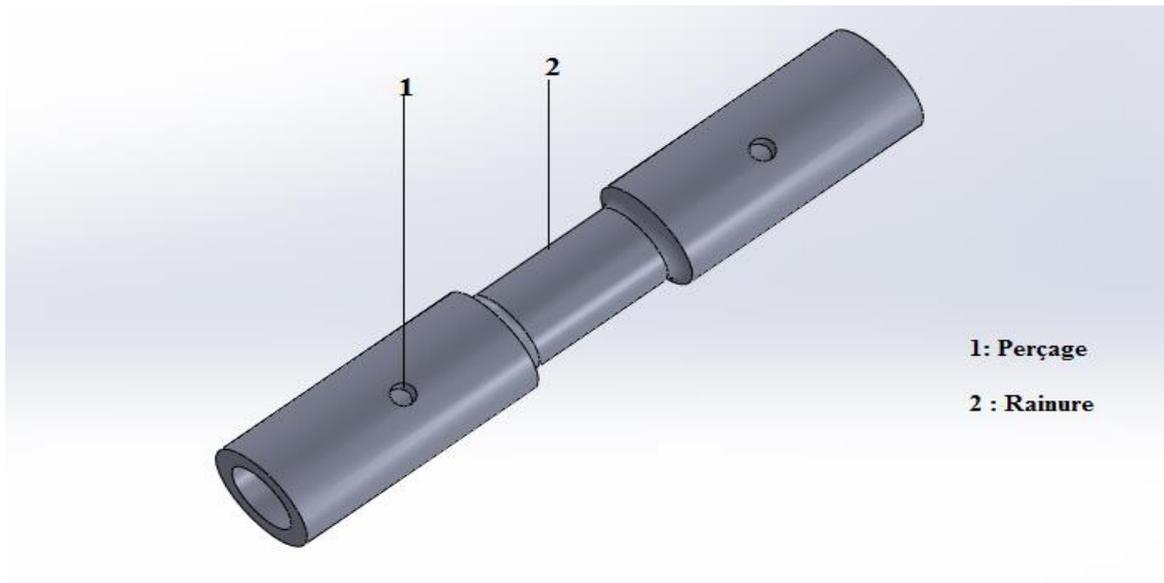


Figure II.2 : Epreuve cylindrique creuse.

Symboles	Dimensions en (mm)	Le schéma de l'éprouvette
L	120	
l	30	
D	20	
d	14	
R	25	
A	75	
Φ	5	

Tableau II.2 : Dimensions de l'éprouvette cylindrique creuse

### II.3. Mise en place de l'essai traction-torsion

Les essais sont réalisés sur la machine IBERTEST disponible au niveau de laboratoire de département de génie de la construction.

Sur la table de cette machine on fixe le dispositif de traction –torsion par 12 vis de diamètre 8 mm. Sur cette dernière est monté le mors inférieur de la machine.

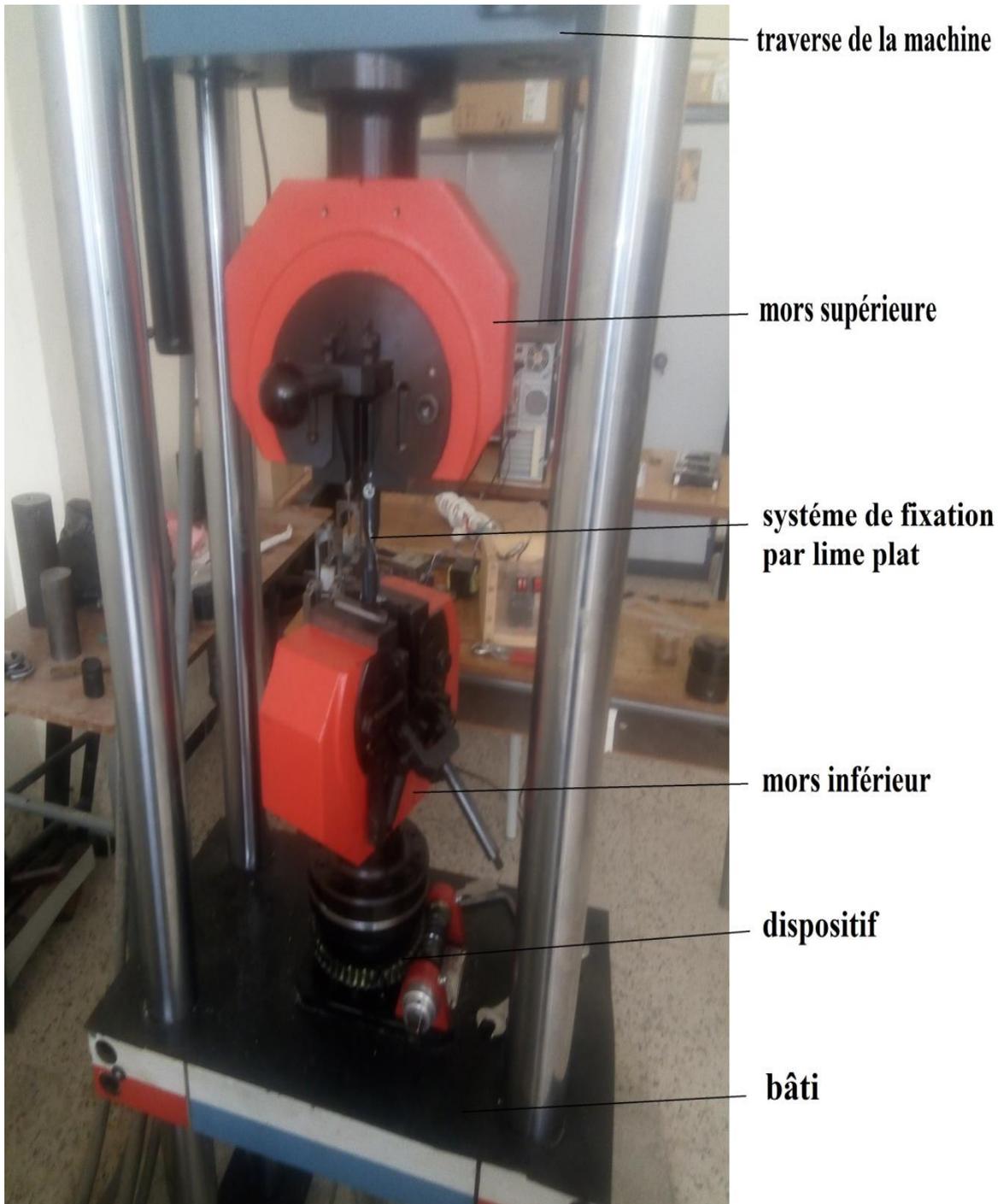
Entre le mors supérieur solidaire à la traverse mobile de la machine et le mors inférieur solidaire au dispositif de traction-torsion.

On fixe l'éprouvette de l'essai de telle manière que l'effort de traction appliqué soit confondu avec l'axe de symétrie de cette éprouvette. (Figure II.3)

L'effort de traction appliqué sur l'éprouvette est assuré par le mors mobile qui est relié à une cellule de charge de 100KN solidaire à la traverse qui constitue le système d'entraînement. Par contre le mors fixe sur la partie rotative de dispositif traction-torsion permet de charger l'éprouvette par un moment de torsion.

La machine de traction IBERTEST est reliée à un ordinateur et à l'aide d'un logiciel WINTTEST on saisit l'information nécessaire telles que :

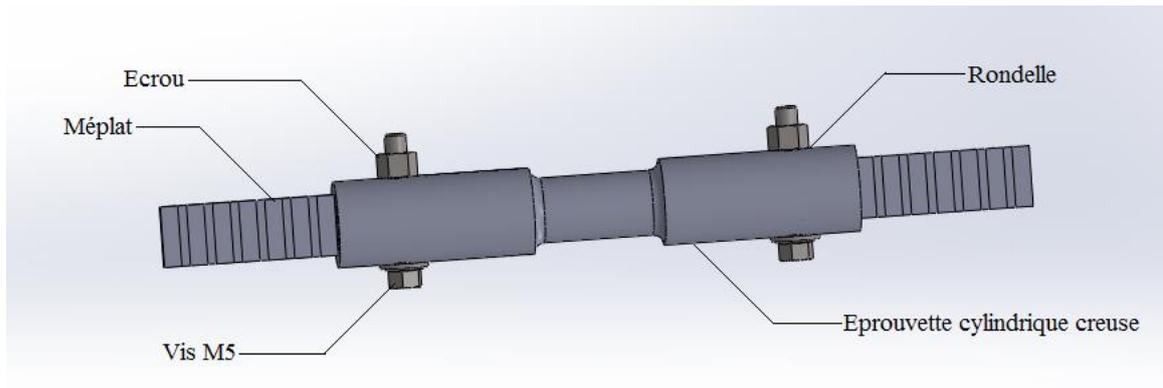
- La vitesse de chargement.
- Les dimensions de l'éprouvette.
- La température ambiante 25°C.



**Figure II.3 :** Montage de l'éprouvette sur la machine

Au cours des essais préliminaires, on a constaté des glissements de l'éprouvette dans les mors de fixation.

Le glissement tangentiel, lors de l'application de la torsion est plus apparent que le glissement axial. Afin d'y remédier on a opté pour une conception d'un système de fixation par méplat. (Figure II.4)



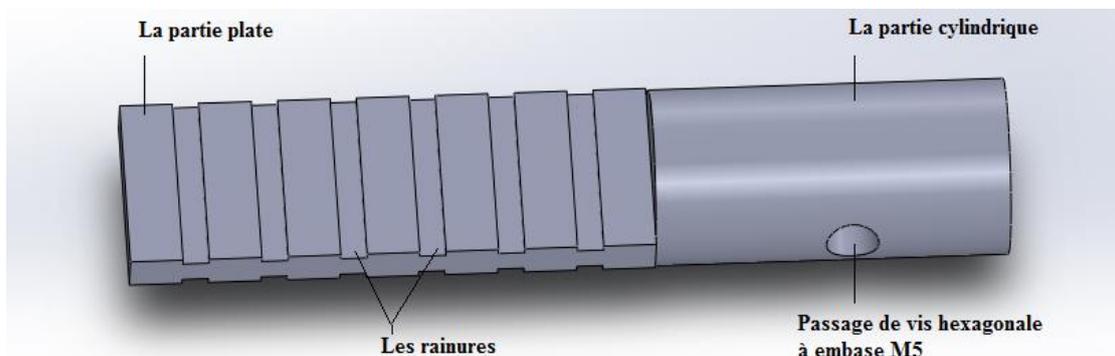
**Figure II.4 :** Système de fixation par méplat

### II.3.1. Système de fixation par méplat

La forme et les dimensions de ce système sont liées à la géométrie de l'éprouvette, aussi aux dimensions de la machine de traction IBERTEST, et à la manière d'assurer une bon fixation de l'éprouvette.

Le méplat a été usiné au niveau de hall de technologie de Oued-Aissi. L'usinage a été effectué sur un tour parallèle avec deux opérations, chariotage et dressage pour obtenir la forme cylindrique.

L'opération de surfacage pour obtenir la partie plate et l'opération de perçage des trous de diamètre 5mm ont été réalisées sur une fraiseuse verticale.



**.Figure II.5 :** Schéma d'un méplat

Des rainures réalisées à l'aide d'une meule sur la partie plate permettent d'éliminer le glissement axial au niveau des mors de la machine de traction, et dans la partie cylindrique, le trou de diamètre 5mm, permet le passage d'une vis hexagonale à embase M5 utilisé pour la fixation de l'éprouvette à l'aide d'un écrou hexagonale de construction grade A, et une rondelle pour éviter la déchirure de l'éprouvette lors de serrage du cette dernière avec méplat. (Figure II.5)

### II.3.2. La sollicitation traction-torsion biaxial

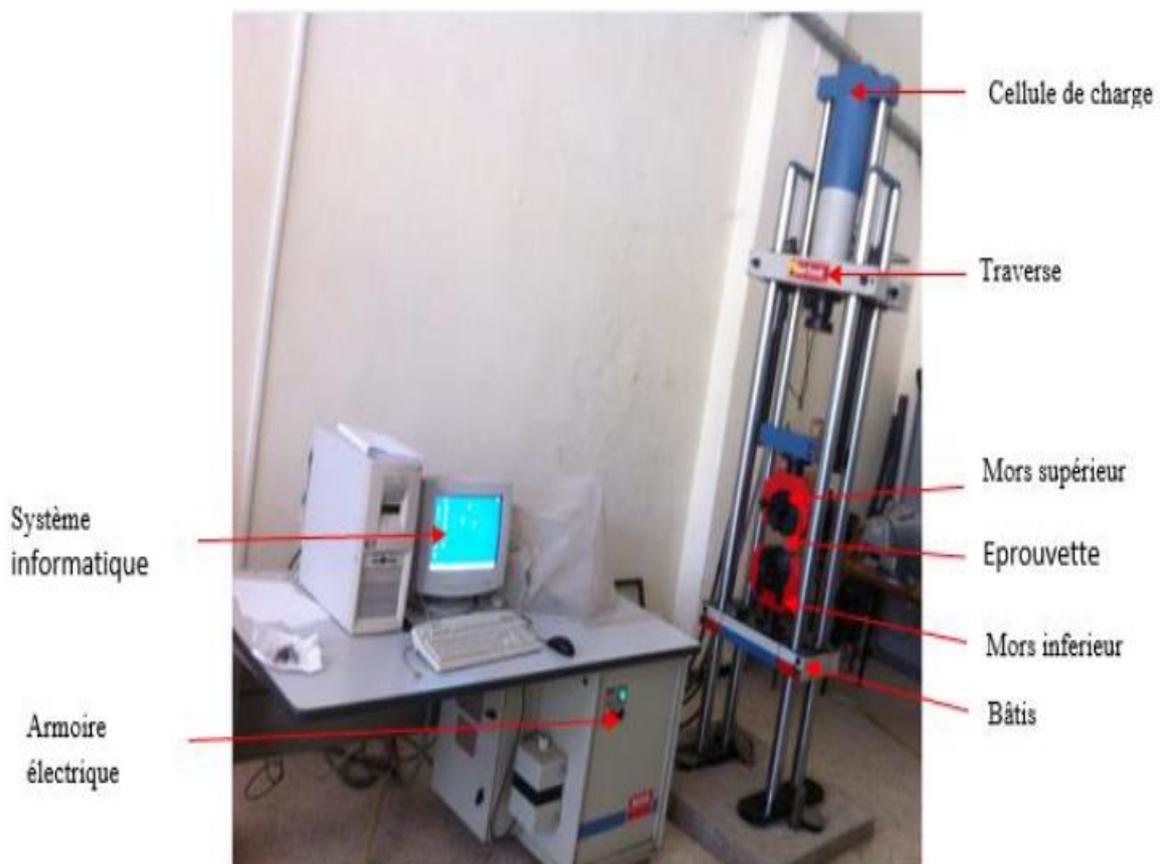
La sollicitation biaxial est assurée d'une telle manière que l'effort de traction est indépendant du mouvement de torsion. L'effort de traction est transmis par la machine de traction **IBERTEST mode U.I.B.100/W**, et le couple de torsion est assuré par un dispositif de traction-torsion, réalisé au laboratoire de recherche LCMM du l'UMMTO.

### II.4. La machine de traction IBERTEST mode UIB.100/W

C'est une machine universelle, dont la capacité de chargement est de 100KN. Elle permet d'exécuter des différents essais, telle que la traction, la compression, la flexion... (Figure II.6).

L'installation de cette machine est composée essentiellement de deux parties :

- Bâti d'essais.
- Système de contrôle et d'acquisition des données.



**Figure II.6 :** Machine d'essai de traction IBERTEST

## II.5. Dispositif de traction-torsion

### II.5.1. Définition

C'est un appareil d'essai qui sert essentiellement à faire des essais mécaniques biaxiaux de traction combinée à la torsion sur des éprouvettes cylindriques pour la caractérisation du polyéthylène à haute densité (PEHD), qui est adaptable sur la machine de traction IBERTEST.

Ce dispositif présente un système de sollicitation par roue tangente et vis sans fin, pour assurer le couple de torsion appliqué à l'éprouvette. [29]

### II.5.2. Principaux éléments constitutifs

Le dispositif traction-torsion est constitué essentiellement d'une plaque inférieure, d'une pièce rotative (partie supérieure), d'un axe principale de rotation, d'une roue tangente, d'une vis sans fin, d'une manivelle, de deux supports, d'un cadran gradué en degrés, et de quatre coussinets pour le guidage en rotation (deux pour le guidage de la vis sans fin et deux pour le guidage de la roue tangente), d'un écrou de réglage SKF, d'une vis de blocage, du cadran. [29]

Le déplacement vertical est assuré grâce à la partie supérieure de la machine de traction. Qui se déplace verticalement à l'aide des quatre colonnes de guidage. La rotation est assurée par le système roue tangente et vis sans fin en exerçant un effort manuel sur la manivelle où sera transmis à l'éprouvette sous forme d'un moment de torsion, grâce à un cadran gradué on peut varier l'angle de rotation lors de l'essai.

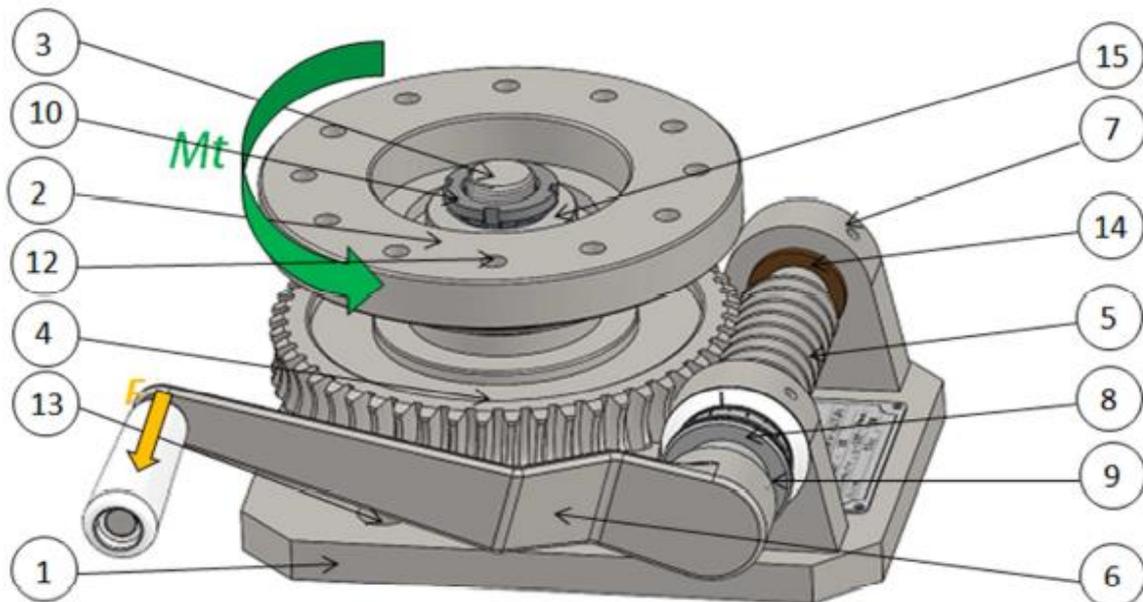


Figure II.7 : Schéma du dispositif traction-torsion [29]

- 1 : Plaque inférieure.
- 2 : Pièce rotative (partie supérieure).
- 3 : Axe principale de rotation.
- 4 : Roue tangente.
- 5 : Vis sans fin.
- 6 : Manivelle.
- 7 : Support de la vis sans fin.
- 8 : Cadran gradué.
- 9 : Vis de blocage du cadran.
- 10 : Ecrou de réglage SKF.
- 11 : Vis de fixation des supports.
- 12 : trous taraudé en M10.
- 13 : Passage de vis CHc M10.
- 14 : Bague en bronze.
- 15 : Rondelle d'appuis.

### II.5.3. Principe de fonctionnement

La partie inférieure est la partie fixe du dispositif. Elle contient 12 passages de vis CHc M10 disposés d'une manière circulaire par rapport à l'axe principal de rotation, pour la fixation sur le bâti de la machine. La pièce rotative représente la partie mobile du dispositif, elle assure la rotation autour de l'axe à l'aide de deux bagues en bronze, et elle est solidaire avec la roue. Le mors inférieur de la machine de traction est fixé avec cette pièce à l'aide de 12 vis CHc M10 disposées sur sa circonférence.

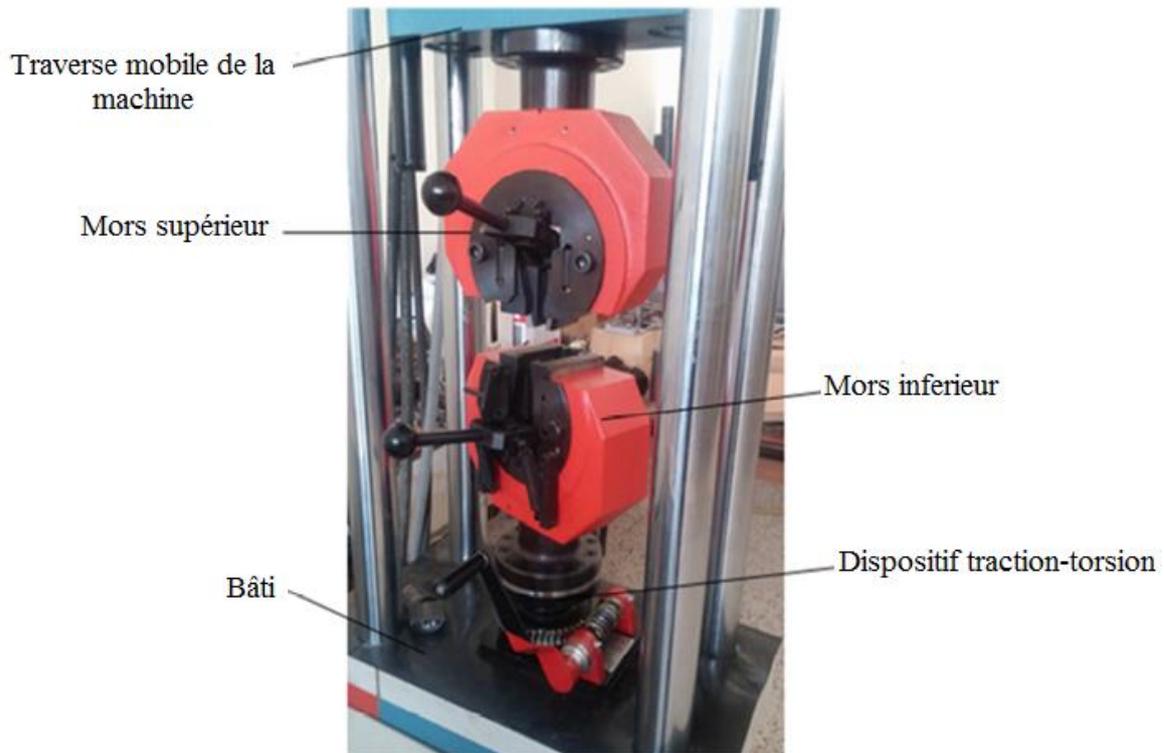
La vis sans fin reçoit le mouvement à partir d'un effort manuel appliqué par l'opérateur sur la manivelle qui sera transmis à la pièce rotative à l'aide du système roue tangente et vis sans fin. La rotation de la pièce et le mors inférieur permet de charger l'éprouvette par un moment de torsion.

Lors de l'essai on fixe des valeurs d'angle de rotation grâce à un cadran gradué, l'angle  $\theta$  lu sur le cadran correspond à  $r/\theta_0$ , avec  $\theta_0$  l'angle réel de rotation de l'éprouvette et  $r$  le rapport de cette transmission. [29]

### II.5.4. Fixation du dispositif traction-torsion sur la machine de traction IBERTEST

Le montage du dispositif traction-torsion sur la machine de traction a été fait de telle manière que l'axe de symétrie de ce dernier coïncide avec l'axe de la force appliquée lors du déplacement de la traverse mobile. (Figure II.8)

La partie fixe de dispositif est fixé sur le bâti de la machine, le mors inférieur de la machine est fixé sur la partie mobile de dispositif.



**Figure II.8 :** Dispositif traction-torsion monté sur la machine de traction

### II.5.5. Réglage de l'angle de torsion

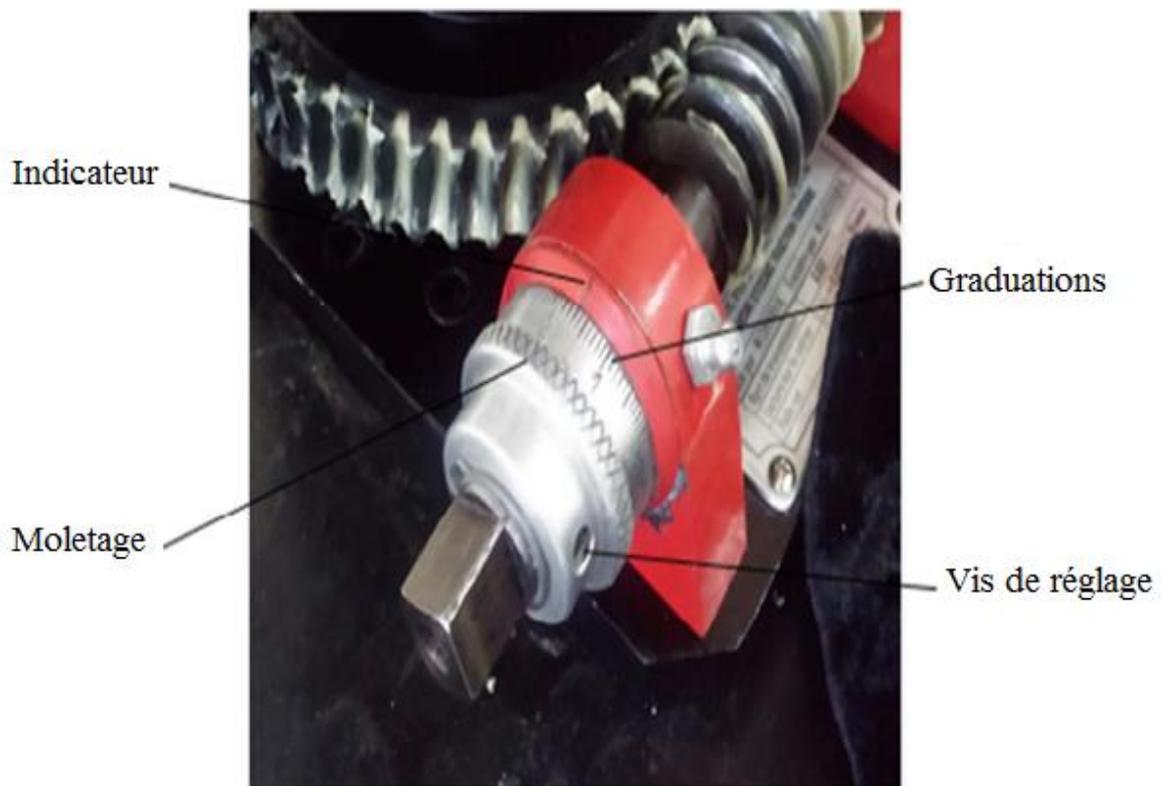
Le réglage de l'angle de torsion est effectué à l'aide du cadran gradué indiquant le nombre de tours de la vis sans fin. Le rapport de transmission de la vis sans fin-roue dentée est  $r = 1/50$  et le nombre de graduations sur le cadran est  $n = 100$  pour un tour de cadran. (Figure II.9) [29]

Pour calculer le nombre de tour « n » correspondant à l'angle  $\theta^\circ$  de torsion on utilise la formule  $n = \theta/g$  où  $g = 0,072^\circ$  qui est la valeur d'une graduation sur le cadran.

Le réglage des angles de torsion  $\theta$  pour tous les essais est donné par le tableau II.3.

Angle(°)	Nombre de graduation $n=\theta/g$	Nombre de tour du cadran
0	0	0
15	208,33	2 tours et 8,33 graduations
30	416,66	4 tours et 6,66 graduations
45	625	6 tours et 25 graduations
60	833,33	8 tours et 33,33 graduations
75	1041,66	10 tours et 41,66 graduations
90	1250	12 tours et 50 graduations

**Tableau II.3 :** Nombre de tours en fonction des angles de torsion



**Figure II.9 :** Lecture sur le cadran [29]

## II.6. Essai de traction-torsion sur des éprouvettes cylindriques creuse

### II.6.1. Principe de l'essai

Pour déterminer la loi de comportement en contraintes biaxial, l'essai le plus utilisé consiste à solliciter un tube creux à la traction combinée à une torsion dont le but d'étudier les trajets de chargement avec des modifications des directions principales des contraintes de découplage.

Les essais sont menés sur la machine de traction IBERTEST, l'éprouvette cylindrique creuse est fixée avec serrage par les mors de la machine, à l'aide de système de fixation méplat.

Pour chaque essai on effectue trois(3) testes pour vérifier la reproductibilité des résultats.

Ces essais consistent à appliquer un moment de torsion à l'éprouvette autour de son axe de symétrie, suivi d'une traction le long du même axe.

Le moment de torsion est contrôlé par l'angle de rotation  $\theta$  de l'extrémité inférieure de l'éprouvette. On a opté pour un intervalle d'angle de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  avec un pas de  $15^\circ$ . Pour chaque valeur de l'angle  $\theta$  on effectue des tractions axiales à des vitesses différentes 1mm/min, 2mm/min, 5mm/min et 26mm/min.

Le déroulement des essais est mené selon les étapes suivantes :

- Mise en marche de la machine de traction.
- Réglage de la machine selon le matériau à tester.
- Réglage du cadran du dispositif traction-torsion à zéro.
- Serrage de l'éprouvette par les mors de la machine.
- Réglage de l'angle de torsion, puis démarrage de l'essai.

### II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le matériau de l'étude et ses propriétés, et les étapes de l'usinage des éprouvettes ont été décrites.

Nous avons présenté aussi les solutions adoptées pour éviter le glissement axial et tangentiel de l'éprouvette lors des essais. Par la suite la machine d'essai a été décrite et le dispositif de torsion a été présenté avec détail. Enfin, le déroulement de l'essai est présenté.

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente les différents résultats obtenus par les essais de traction-torsion réalisés.

L'effet de la vitesse ( $V$ ) de chargement sur le comportement des éprouvettes du PEHD pour différents angles de torsion est présenté sous forme des courbes forces-déplacements et des tableaux indiquant les valeurs des modules d'Young et de la limite élastique.

De la même façon l'effet des angles de torsion ( $\theta$ ) sur le comportement de ce matériau est montré.

Notre intérêt est porté alors dans ce chapitre à la zone élastique et plastique de la courbe de traction-torsion pour les différents angles de torsion et aux différentes vitesses de chargement.

### III.2. L'essai de traction-torsion

D'après les résultats qu'on a obtenus à partir de l'essai traction combiné à la torsion sur les éprouvettes en polyéthylène à haute densité (PEHD), Une des caractéristiques les plus remarquables des thermoplastiques semi-cristallins 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 ( $-120^{\circ}\text{C}$  pour le PE) est située bien au-dessous de la température ambiante contrairement aux polymères vitreux pour lesquels la déformation est localisée dans les bandes de cisaillement fines. Pour les polymères semi-cristallins, la déformation plastique intervient de façon macroscopique et non homogène.

### III.3. Résultats obtenus après les essais traction-torsion pour le PEHD

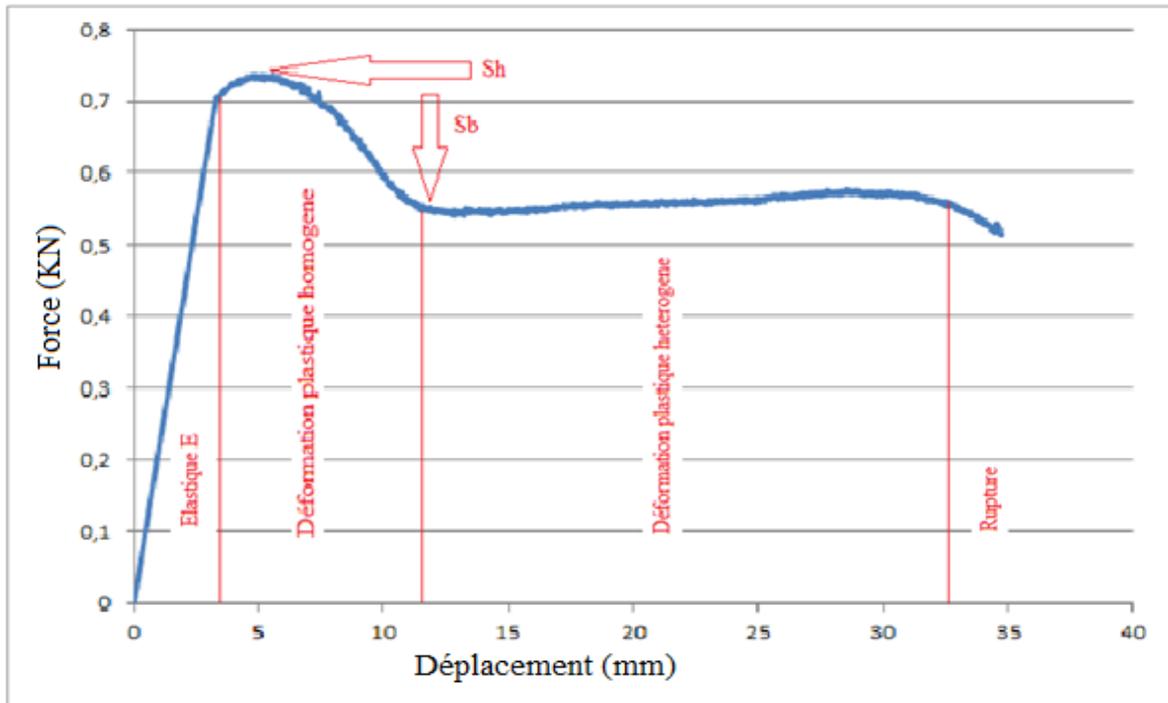
- Courbe de traction-torsion, force-déplacement:

Les résultats des essais sont représentés sous forme des courbes force-déplacement enregistrées par le logiciel de la machine de traction. Ces courbes présentent la même allure décrivant le comportement d'un matériau ductile. C'est le cas d'un grand nombre de matériaux thermoplastiques, présente ce type de comportement au voisinage de la température ambiante (Figure III.1). Elles présentent :

- Une zone élastique décrite par une courbe linéaire.
- Une zone de déformation homogène présentant deux points particuliers.
- Le Seuil d'écoulement haut ( $S_h$ ) : correspond à la charge maximale. Il désigne l'apparition du phénomène de striction ; une réduction de la section apparente pour les matériaux semi-cristallins.
- Le Seuil d'écoulement bas ( $S_b$ ) : est à charge quasiment constante.
- une zone de déformation hétérogène caractérisée par une propagation de la striction, le long de l'éprouvette suivie de la rupture.

Sur la figure III.2 on montre l'allongement de l'éprouvette au cours de l'essai de traction-torsion (Figure III.2.b). La déformation de l'éprouvette est importante comparée à sa longueur initiale.

Le phénomène de striction caractéristique des polymères semi-cristallins, apparait clairement dans cette figure. Cette diminution de section est suivie d'une rupture, généralement ayant lieu au centre de l'éprouvette. (Figure III.2.c)



**Figure III.1 :** Courbe de traction-torsion qui représente les différents domaines



a) Avant l'essai

b) Domaine plastique

c) La rupture

**Figure III.2 :** Déformation de l'éprouvette lors de l'essai traction-torsion

Sur la figure III.3 on présente quelques courbes obtenues lors des essais de traction-torsion par des angles et vitesses donnés. On remarque que l'allure générale de ces courbes est similaire à celle présentée dans le paragraphe (III.3), montrant les différents stades du comportement des éprouvettes creuses du PEHD en traction-torsion.

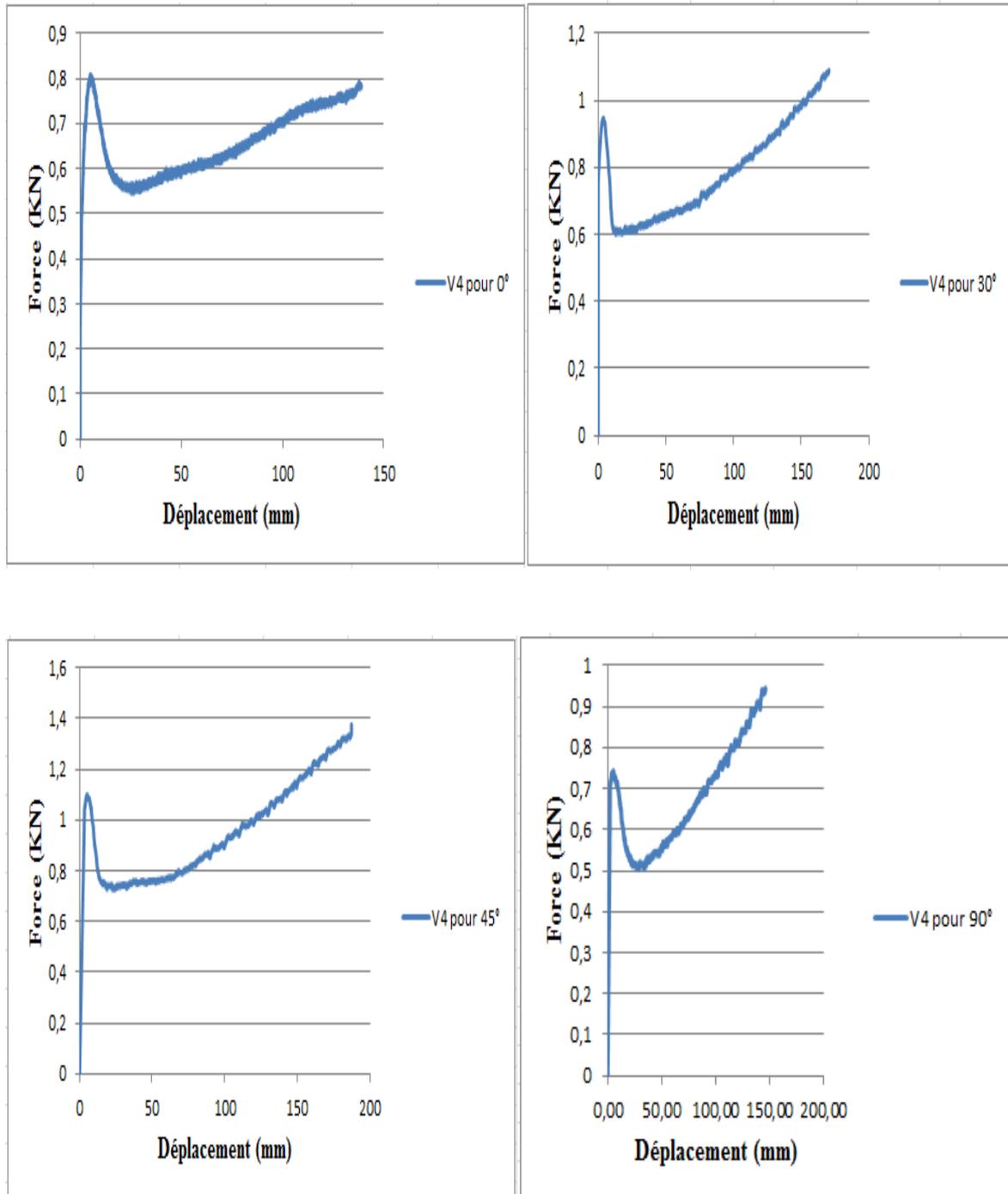


Figure III.3 : Courbe obtenue par des essais traction-torsion

### III.4. Effet de la vitesse de chargement sur le comportement des éprouvettes creuses en traction-torsion

#### III.4.1. Résultats des essais

Dans le but d'étudier l'effet de la vitesse de chargement sur la réponse mécanique des éprouvettes creuses en biaxial, on a réalisé des essais de traction combinée à une torsion de l'éprouvette d'un angle  $\theta$ . Pour chaque valeur de cet angle, on a effectué des vitesses différentes. Les valeurs des angles  $\theta$  et des vitesses de chargement sont présentés respectivement dans les tableaux III.1 et III.2.

$\theta^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
----------------	---	----	----	----	----	----	----

Tableau III.1 : Valeur des angles de torsion

V (mm/min)	1	2	5	26
------------	---	---	---	----

Tableau III.2 : Valeur des vitesses de chargement

Les courbes force-déplacement obtenues pour différentes vitesses, et pour chaque angle de torsion sont données dans les figures suivantes.

La forme générale de ces courbes semble homothétique, avec certaines imperfections dues principalement au matériau, à la forme de l'éprouvette et l'essai lui-même.

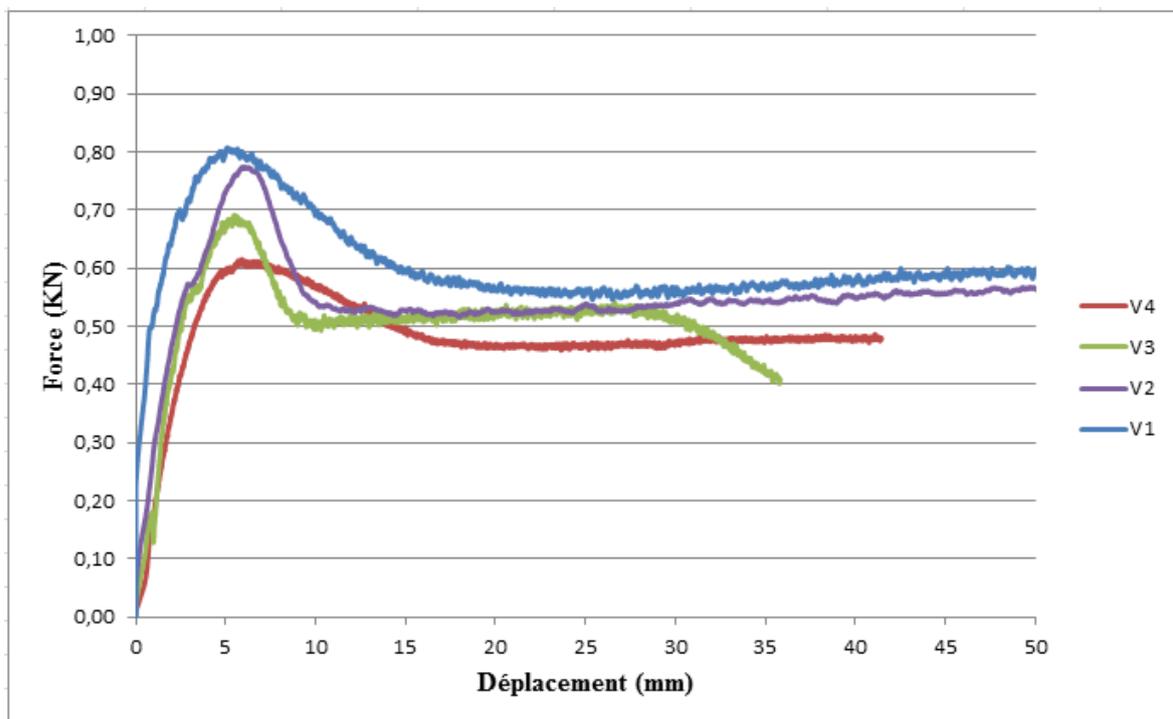


Figure III.4 : Courbe de force-déplacement pour un angle  $0^\circ$

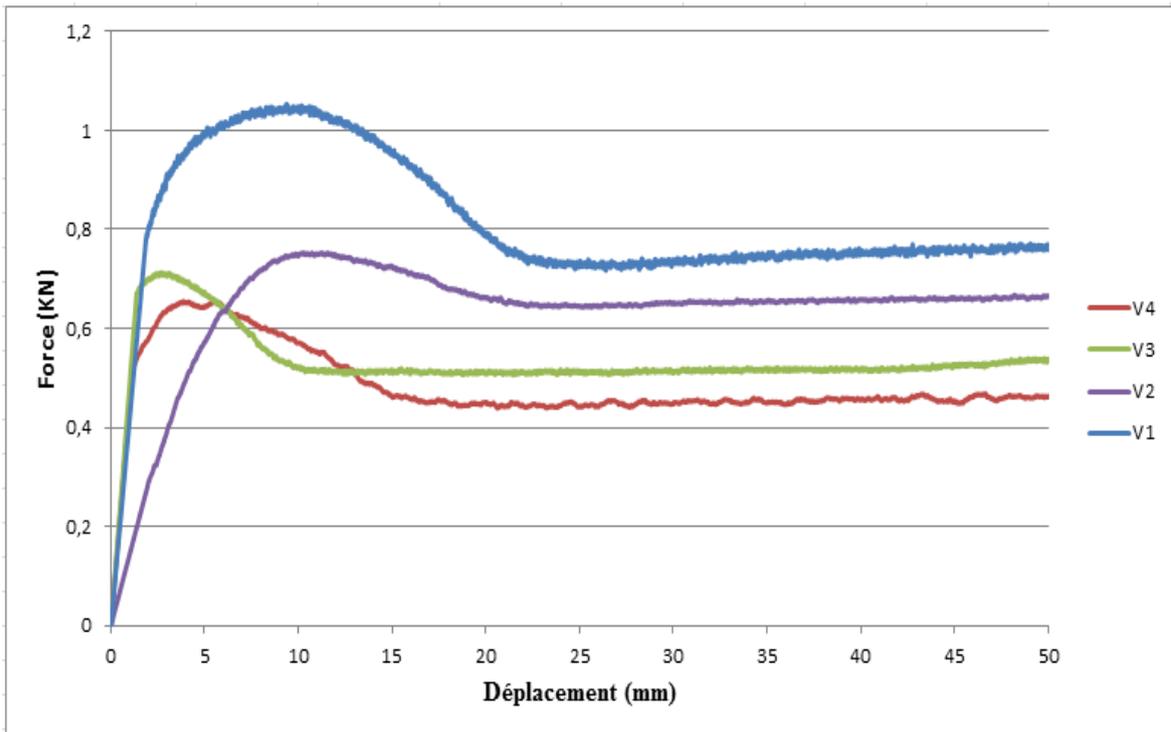


Figure III.5 : Courbe force-déplacement pour un angle 15°

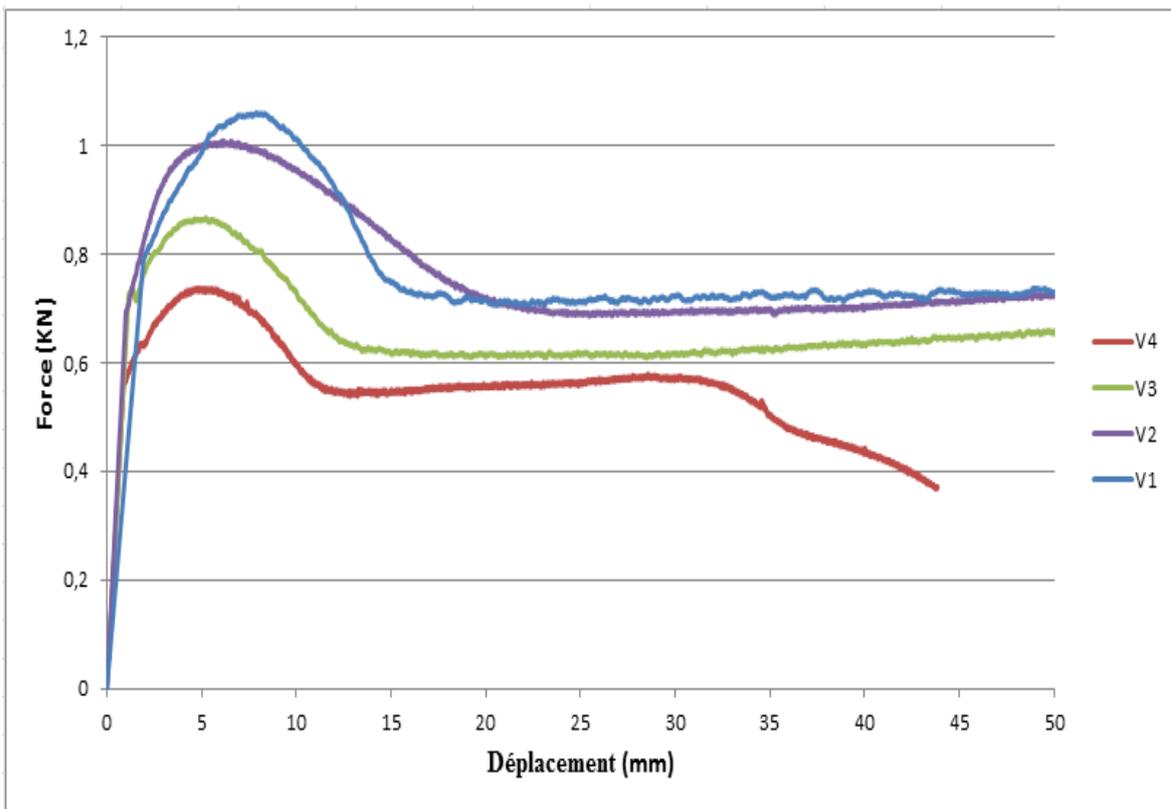


Figure III.6 : Courbe force-déplacement pour un angle 30°

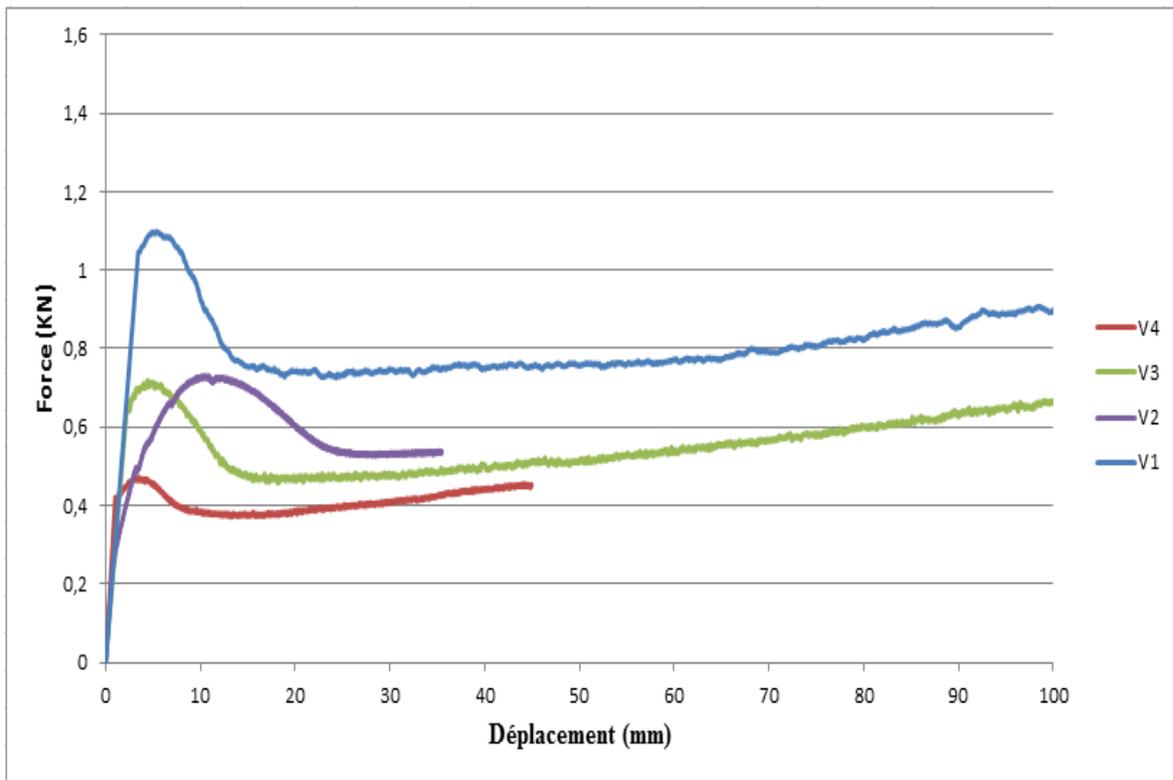


Figure III.7 : Courbe force-déplacement pour un angle 45°

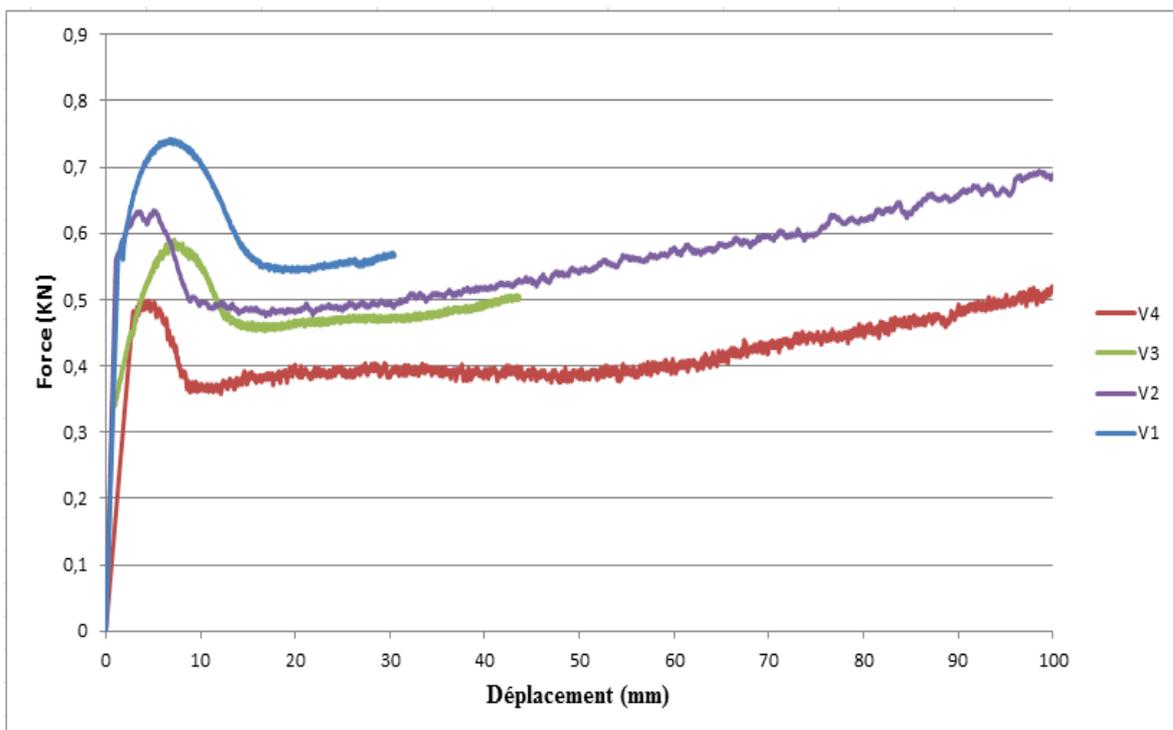


Figure III.8 : Courbe force-déplacement pour un angle 60°

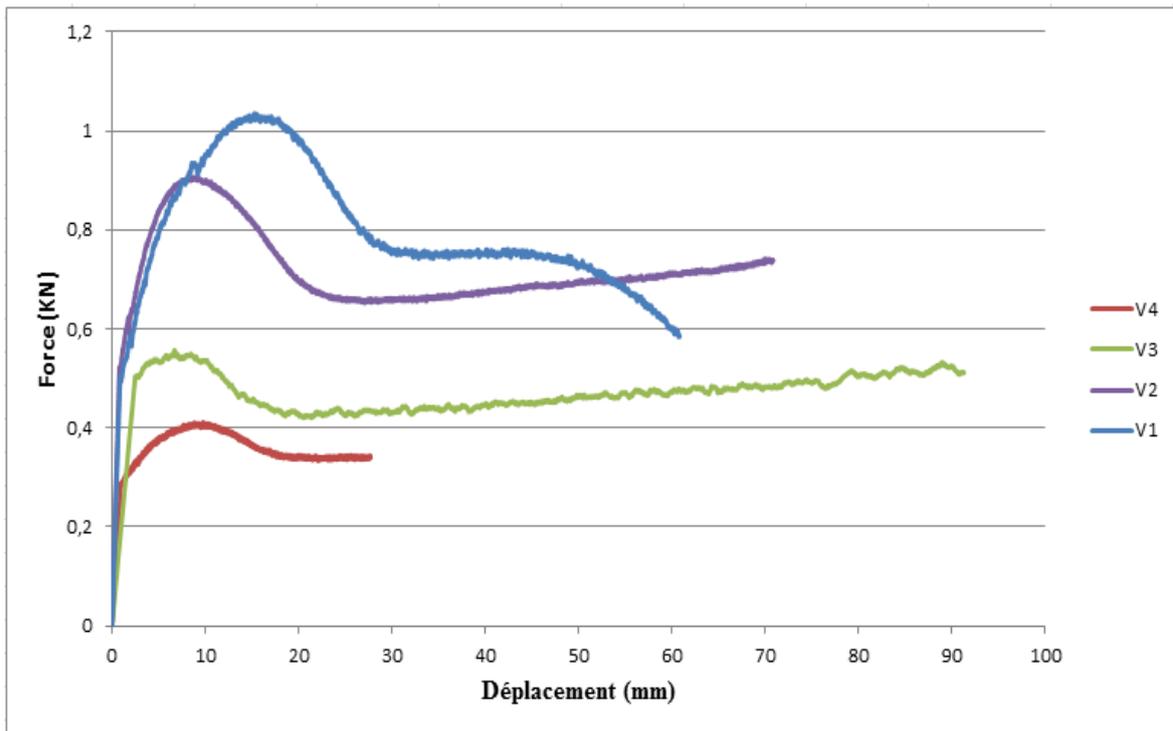


Figure III.9 : Courbe force-déplacement pour un angle 75°

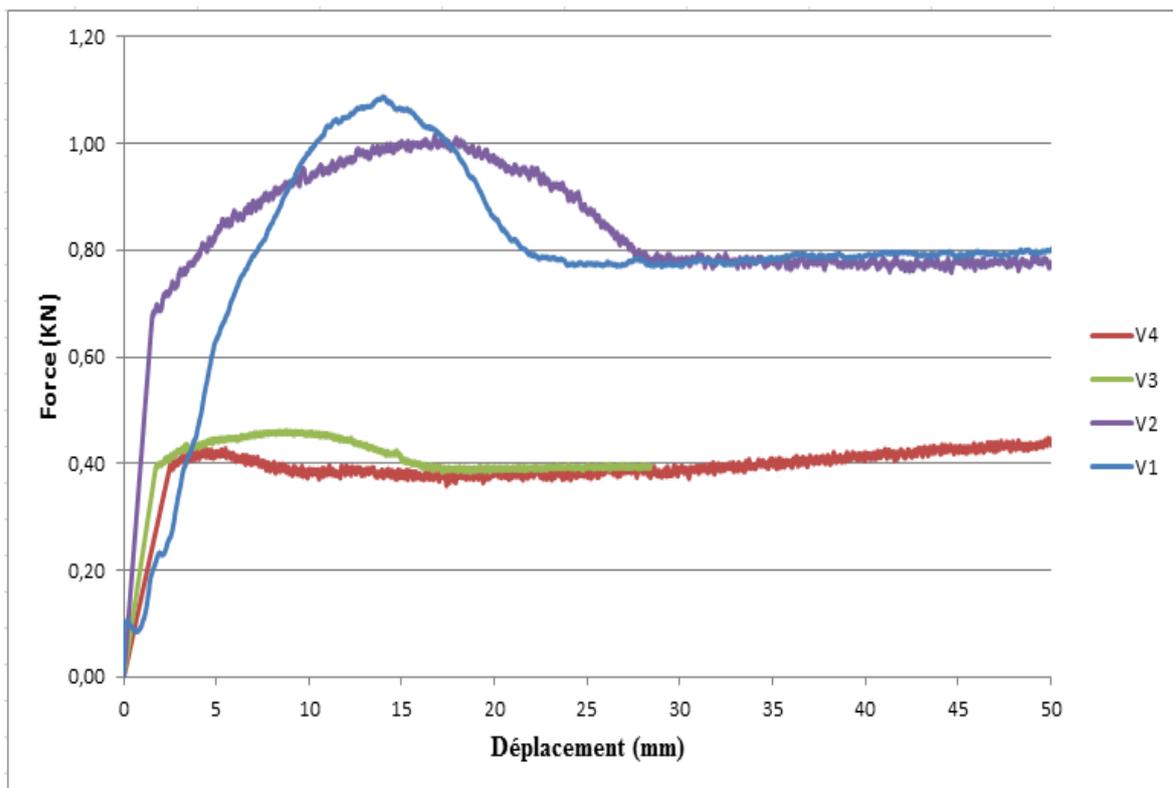


Figure III.10 : Courbe force-déplacement pour un angle 90°

### III.4.2. Interprétations des résultats des essais

Afin de bien expliquer l'effet de la vitesse sur le comportement mécanique en traction-torsion de PEHD, on présente tout d'abord les mécanismes régissant la déformation du matériau pour les différents stades de la courbe, en suite montrer l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement de ce matériau.

Le comportement élastique se caractérise par la contrainte d'élasticité et la déformation correspondante est due à la déformation des bandes de vanderwalls et le changement de conformation des chaînes dans la phase amorphe.

A la limite de la déformation élastique, on remarque l'apparition d'un col au milieu de la partie active de l'éprouvette, et cette dernière entre dans une déformation plastique qui consiste en une interaction entre les régions lamellaires et des régions amorphe alternantes. Cela correspond à l'apparition du phénomène de striction qui est généré par une déformation hétérogène du matériau.

A la fin de la déformation plastique le matériau entre dans une phase de durcissement jusqu'à la rupture.

Dans ce qui suit on présentera l'influence de la vitesse de chargement sur la limite élastique  $\bar{\sigma}_e$  (MPa) et l'effet du module d'Young E (MPa).

#### III.4.2.1. Détermination de la limite élastique

Cette contrainte marque la fin du domaine élastique. Pour les valeurs supérieures, à cette limite le matériau ne se déforme plus élastiquement. Et cette contrainte limite d'élasticité  $\bar{\sigma}_e$  ne peut être tirée directement de la courbe, car elle n'est pas évidente, comme pour les cas des métaux, ce qui rend difficile sa détermination. Pour la détermination de cette limite on utilise la tangente à l'origine où la limite est prise à l'endroit de perte de linéarité.

Sa valeur pour un essai de traction-torsion est la contrainte idéale tenant compte de la traction et la torsion donnée par l'équation suivante ;

$$\bar{\sigma}_e = F/S \text{ (MPa)}$$

Avec :  $\bar{\sigma}_e$  est la limite élastique de matériau

F : charge appliquée (N)    S : section de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>)

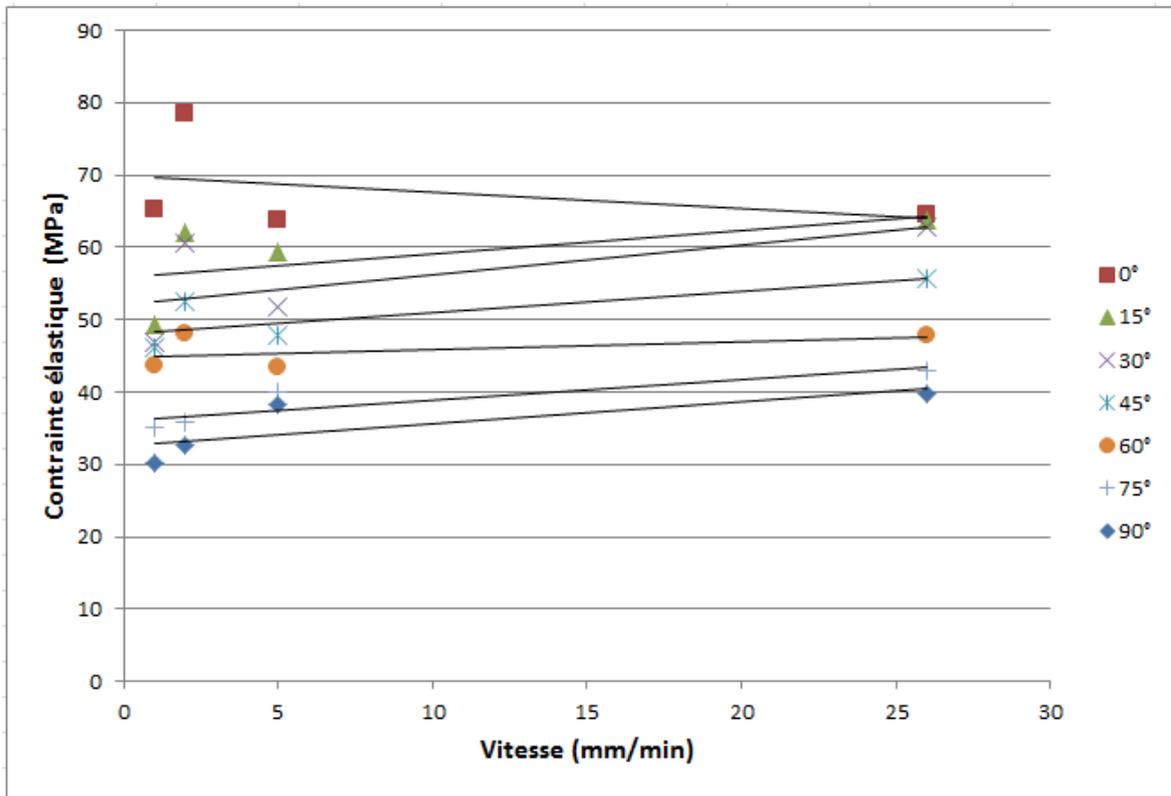
Les courbes de la limite élastique calculée à partir des charges limites, des courbes force-déplacement sont données par le tableau III.3.

V (mm/min) / $\theta^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
V1=1	65,28	49,36	46,97	46,17	43,78	35,03	30,25
V2=2	78,57	62,10	60,50	52,54	47,97	35,82	32,64
V3=5	63,69	59,31	51,80	47,77	43,49	40,01	38,21
V4=26	64,49	63,69	62,89	55,73	47,77	42,99	39,82

**Tableau III.3 :** Valeurs de la contrainte élastique

Sur la figure III.11 on représente l'effet de la vitesse pour différents angles de torsion sur la limite élastique. On constate que cette limite représentée par la pente des droites, croît linéairement avec la vitesse. Seulement cette croissance est faible pour tous les angles en général.

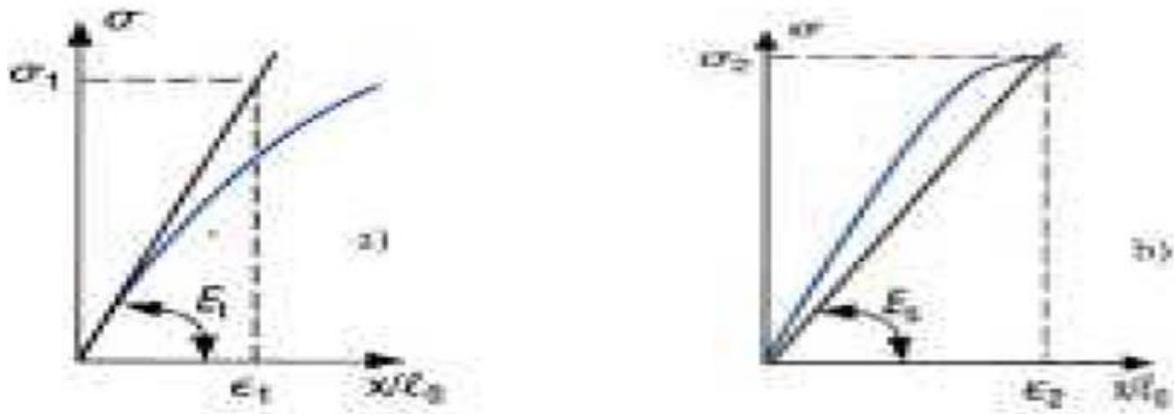
On peut conclure donc que la limite élastique du PEHD en traction-torsion n'est pas sensible à la vitesse de chargement dans l'intervalle de 1 à 26 mm/min.



**Figure III.11** : Effet de la vitesse de chargement sur la limite élastique ( $\sigma_e$ )

#### III.4.2.2. Détermination du module d'Young

Dans ce type de matériau contrairement aux métaux, il est rarement possible de départager la partie linéaire et celle non linéaire, pour cela afin de déterminer et cerner le module d'élasticité correspondant on peut appliquer deux méthodes :



**Figure III.12** : Les différentes méthodes de détermination de module d'Young E

Dans ce travail nous avons déterminé le module d'élasticité E avec la méthode de la tangente à l'origine par la pente initiale des courbes, on parlera alors de module d'Young apparent et déterminé par la loi suivante :

$$E = \bar{\sigma}_e / \varepsilon \text{ (MPa)}$$

Avec :

$$\varepsilon = \Delta L / l_0$$

Allongement relatif

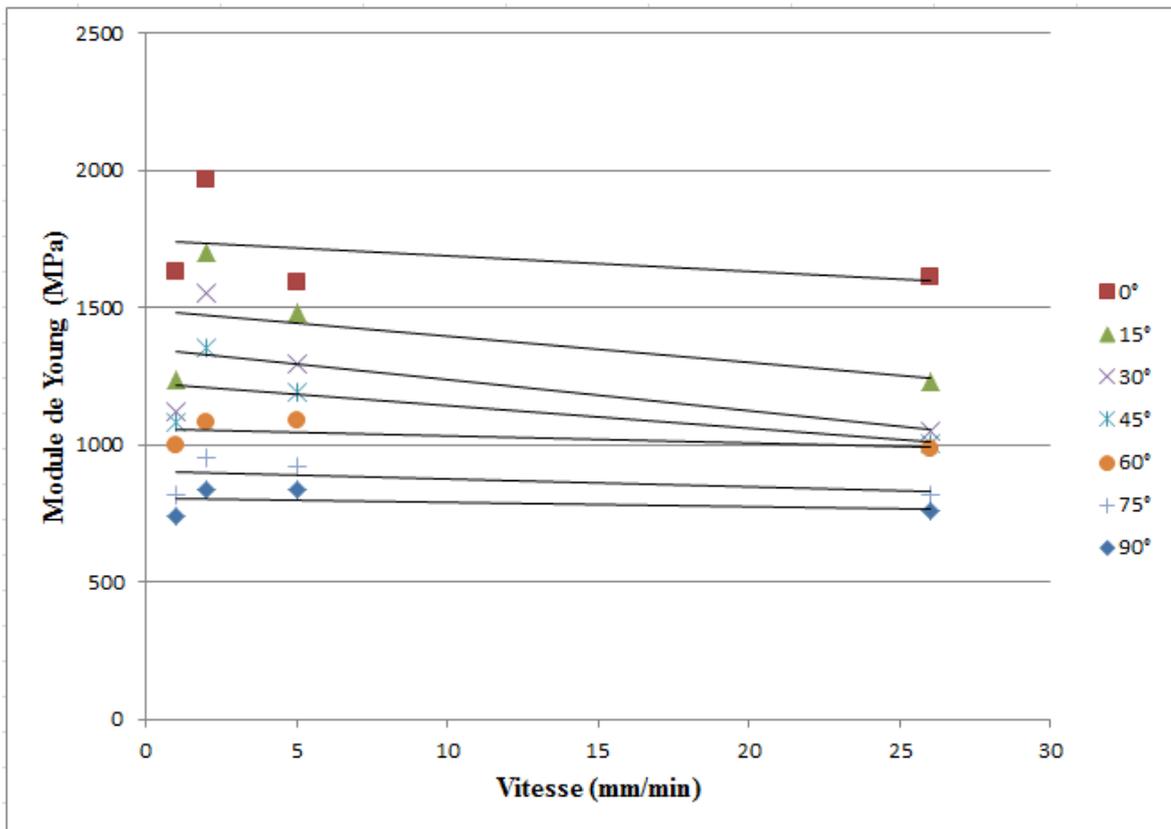
Les valeurs calculées de ce module pour chaque vitesse de chargement, et pour tous les angles de torsion sont données par le tableau III.4.

V(mm/min) \ $\theta^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
V1=1	1632	1234	1120	1080	998	820	740
V2=2	1964,25	1704	1550,2	1350,36	1080	950,36	836,80
V3=5	1592,55	1482,5	1295	1194,25	1087,25	920	840,12
V4=26	1612,23	1227,8	1048,16	1002,25	987,38	820,77	759,09

**Tableau III.4** : Valeurs de module d'Young E (MPa)

La variation de ce module d'Young en fonction de la vitesse de chargement est portée sur la figure III.13, représentée par des droites dont les pentes sont faibles.

En effet ces pentes négatives, indiquent une faible diminution de module d'Young en fonction de la vitesse de chargement pour les différents angles de torsion, et une valeur presque nulle pour l'angle  $\theta = 0^\circ$ .



**Figure III.13** : Effet de la vitesse de chargement sur le module d'Young E

### III.5. Effet de l'angle de torsion sur le comportement des éprouvettes creuses

On a porté la réponse mécanique des éprouvettes en traction-torsion pour chaque vitesse et pour différents angles de torsion dans le même graphe afin bien voir l'effet de l'angle de torsion sur le comportement du matériau. (Figure III.14, III.15, III.16 et III.17).

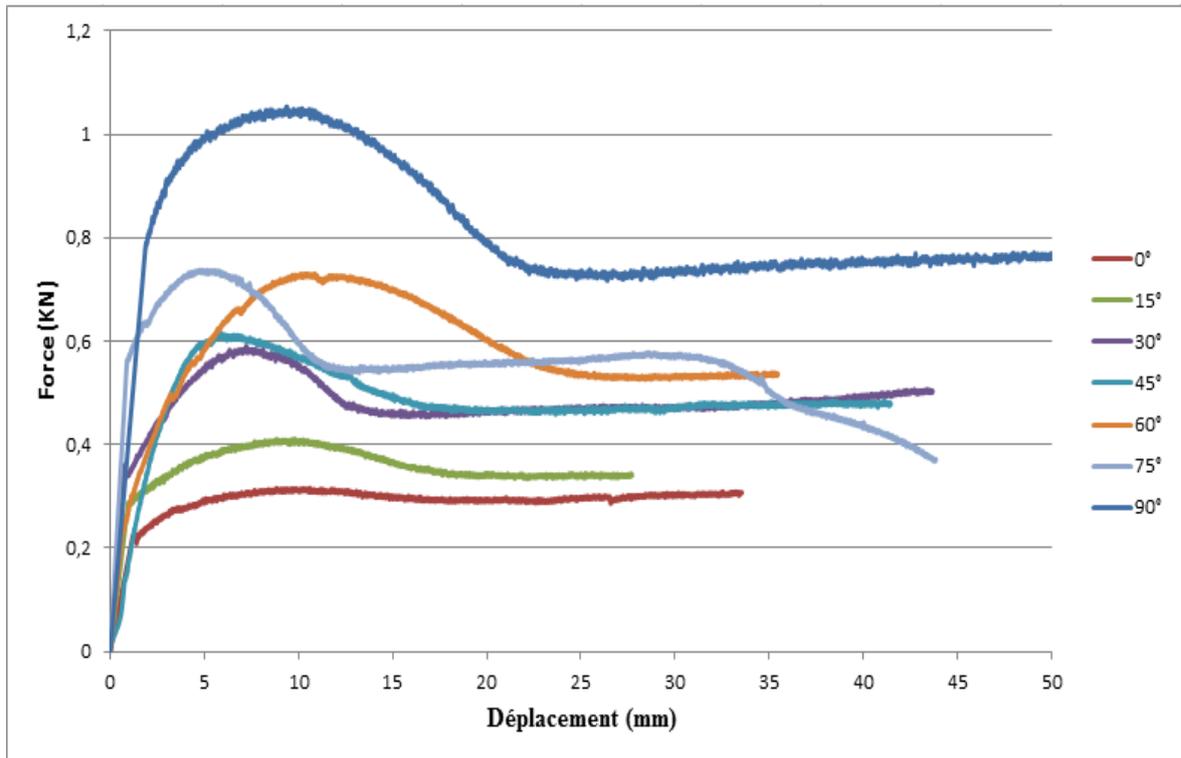


Figure III.14 : courbe force-déplacement pour  $V_1=1 \text{ mm/min}$

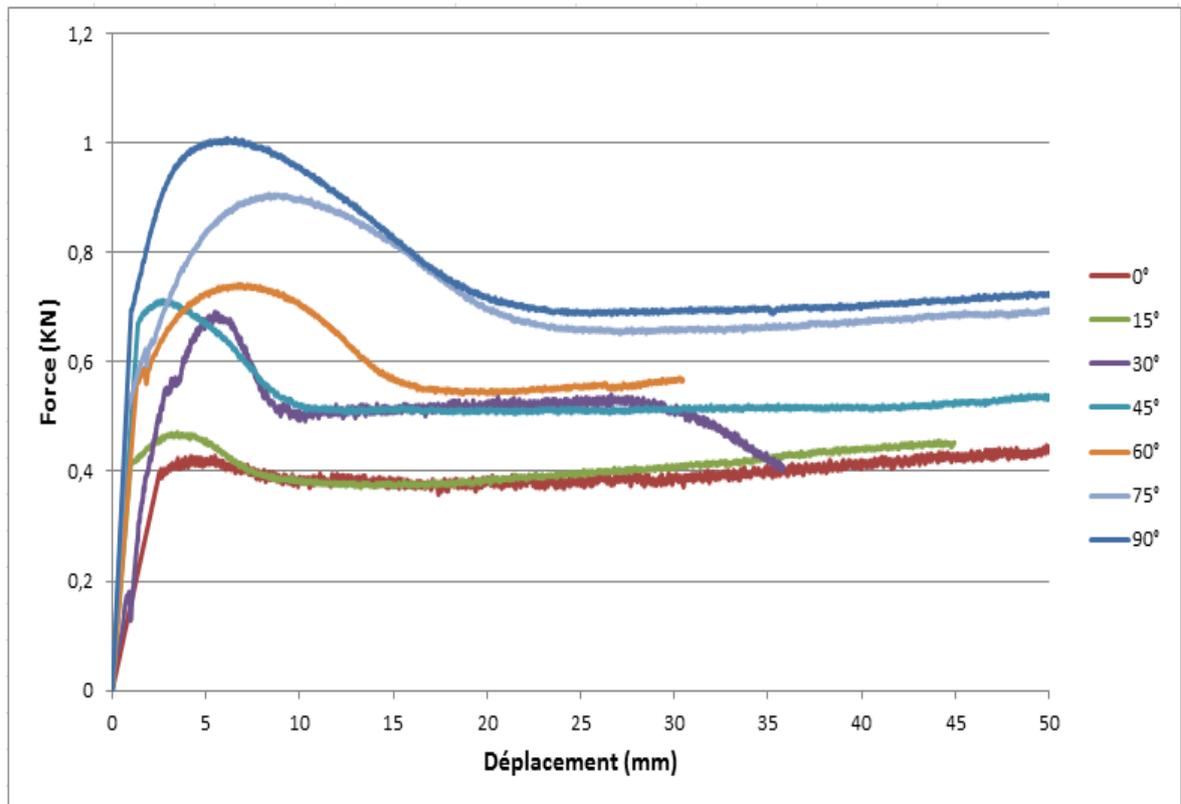


Figure III.15 : Courbe force-déplacement pour  $V=2 \text{ mm/min}$

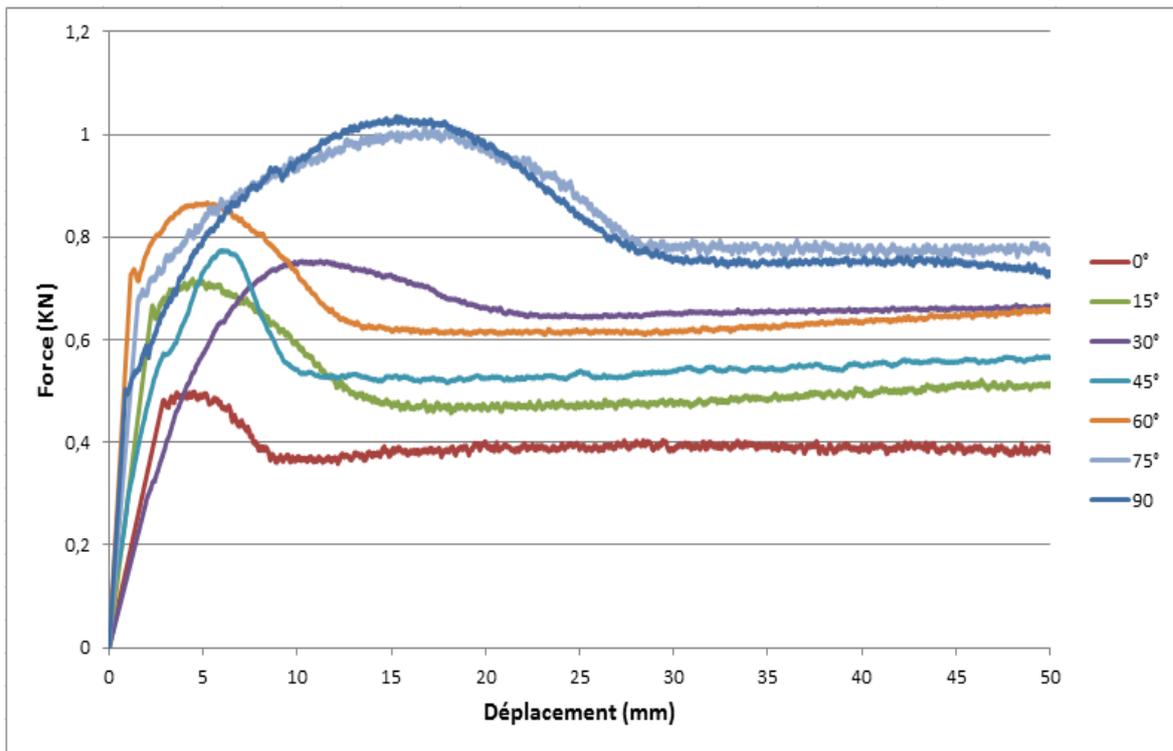


Figure III.16 : Courbe force-déplacement pour V=5mm/min

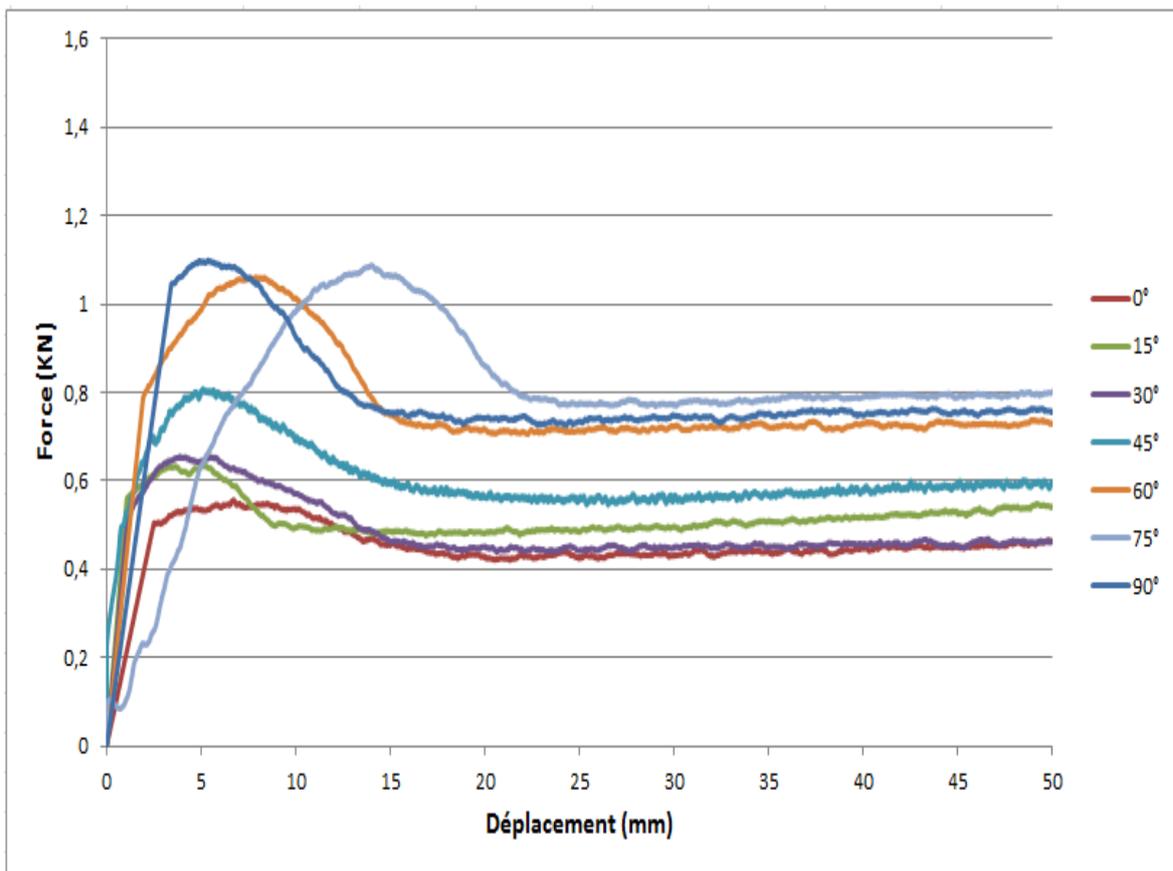
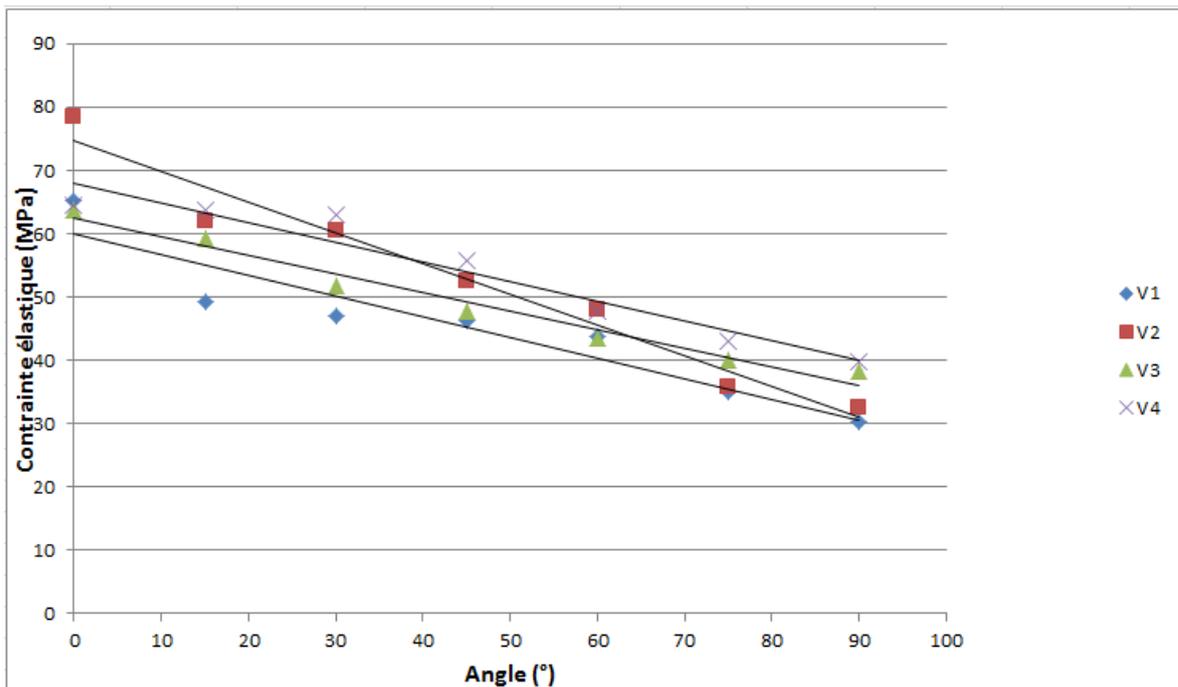


Figure III.17 : Courbe force-déplacement pour V=26mm/min

Contrairement à l'effet de la vitesse sur le comportement du matériau, l'effet de l'angle de torsion est plus notable. En effet, la limite élastique diminue considérablement avec l'augmentation de l'angle de torsion  $\theta$ .

Elle passe, par exemple pour la vitesse  $V1=1\text{mm/min}$ , la limite élastique passe de  $65.28\text{MPa}$  à  $30.36\text{MPa}$  pour les angles respectifs  $\theta=0^\circ$  à  $\theta=90^\circ$ . La figure III.18 montre les pentes des courbes de la limite élastique en fonction de l'angle de torsion pour chaque vitesse. Cette variation de la limite élastique est due au fait que le matériau subit une certaine déformation lors de l'application du moment de torsion, ce qui diminue sa limite élastique en traction.



**Figure III.18 :** Effet de l'angle de torsion sur la limite élastique ( $\sigma_e$ )

De même, on a constaté que le module d'élasticité subit le même effet de l'angle de torsion que celui sur la limite élastique. Par exemple pour la vitesse  $V1=1\text{mm/min}$ , le module d'Young passe de  $1632\text{MPa}$  à  $740\text{MPa}$  pour les angles respectif  $\theta=0^\circ$  et  $\theta=90^\circ$ .

Sur la figure III.19 on a représenté la variation de module d'Young en fonction de l'angle  $\theta$ . Cette variation est décrite par les pentes des droites tracées dans ce graphe de cette figure. La valeur de pente est importante pour toutes les vitesses de chargement. Cette influence peut être justifiée par le fait que le matériau subit une déformation de sa structure par l'application du moment de torsion avant la traction. Les chaînes sont donc tordue autour de l'axe de chargement de la traction, et les liaisons entre les molécules sont affaiblir, ce qui diminue l'élasticité du matériau en traction.

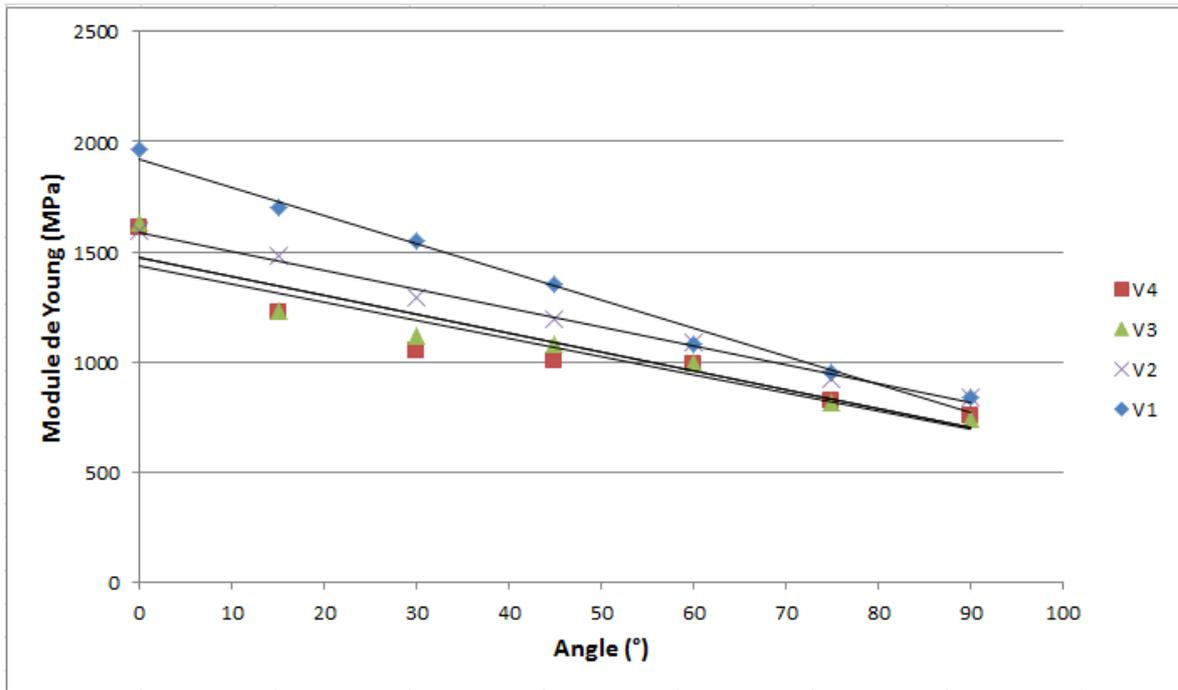


Figure III.19 : Effet de l'angle de torsion sur le module d'Young E

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats expérimentaux des essais de traction combinés à la torsion. Lors de l'étude de ces résultats, on a constaté que l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement du matériau, est à savoir sur la limite élastique  $\sigma_e$  et le module d'Young E. par contre l'effet de l'angle de torsion sur ces deux caractéristiques est très valable. Cet effet est justifié par l'affaiblissement de la structure du matériau par la torsion.



## Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était d'étudier l'effet de la vitesse de chargement en traction, et de l'angle de torsion sur le comportement du PEHD en sollicitation composée : traction combinée à une torsion.

Dans une première étape, des éprouvettes creuses ont été élaborées pour ce type d'essais. Lors des essais préliminaires on a constaté des glissements axiaux et radiaux, ce qui nous a amené à réaliser un dispositif pour remédier à ces glissements.

On a effectué par la suite, pour chaque angle de torsion  $\theta$ , des essais de traction à différentes vitesses de chargement. L'étude de l'influence de la vitesse de chargement sur les propriétés du matériau à savoir la limite d'élasticité et le module d'Young a été montrée négligeable. Contrairement à l'effet de l'angle de torsion, où on a observé une grande sensibilité de  $\sigma_e$  et  $E$  à l'angle de torsion  $\theta$ .

Ce travail peut être suivi par l'étude de la phase plastique et de la rupture des courbes force-déplacement obtenues pour ce type d'essais.

Et afin d'expliquer les mécanismes de déformation générés lors des essais, une analyse microstructurale par microscopie à balayage sera nécessaire.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] :M. Reyne. Technologie des plastiques, HERMES, Paris, 1998.
- [2] : Michel frontanille, Yves Gnanou, « chimie et physico chimie des polymères » 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> cycle école d'ingénieur.
- [3] : Dr. Gilles olive, chimie des matériaux, Ecole industrielle et commerciale de la ville de Namur ; 3<sup>ème</sup> édition, 07 /01/2005.
- [4] : Rida Arieby, « caractéristique Mécanique et Modélisation Thermodynamique du comportement anisotrope du PEHD », TH/DOC. Nancy. 2007.
- [5] : L. Mandelkem, et al., size and interfacial free energies of crystallites formed from fractionated linear polyethylene, journal of polymer science, polymer physics Edition, 4(3) ,p.285-400, 1966.
- [6]: L. Mandelkem and A.L. Peacock, the structure of linear polyethylene crystals formed in dilute solution, polymer bulletin, 16(6), p.392-336, 1986.
- [7] : J P trotignon ; « matière plastique », édition Nathan ,2006 Paris.
- [8] : Michel frontanille, Yves Gnanou, « chimie et physico chimie des polymères », 2eme et 3eme cycle école d'ingénieur.
- [9] : Kara Y, Mardjane R, « caractérisation Mécanique du polyéthylène à haute densité (PEHD) et l'influence des rayons de courbures », TH/DEUA, 2008/2009.
- [10] : Gottfried W. Ehrenstein, Fabienne Montagne matériaux polymères : structure, propriétés et application ; Hermès Science publication, 2000.
- [11] : Reynald Dossogne ; « polyéthylène haute densité PEHD » technique d'ingénieur, A3315
- [12] J. Bots, *Matières plastiques II*, Technologie-plasturgie, Technique et documentation, Paris, 1982.
- [13]. A. Peterlin, Molecular model of drawing polyethylene and polypropylene, Journal of materials science, 1971b, 6(6), p. 490-508.
- [14] : Julien Cazenave, thèse de doctorat : le compris rigidité/durabilité du Polyéthylène Haute densité en relation avec la structure de chaîne, la microstructure et topologie moléculaire issues de la cristallisation ; Institut National Appliqué de Lyon, France ; Mai 2005.

- [15] : Johann Houle ; « info plastique et caractéristique, (<http://infoplastiques.blogspot.com>)
- [16] U.S.A : ASTM E8 : "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials"  
Norme ISO 6892 : Matériaux métalliques – Essai de traction .
- [17]: U.S.A : ASTM E8 : "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials"  
Norme ISO 6892 : Matériaux métalliques – Essai de traction
- [18] R. Itterbeek Résistance des Matériaux - Introduction à la résistance des matériaux
- [19]: A. Peterlin, Mechanical properties of fibrous structure, extrait de «Ultra- High Modulus polymers», A Giffery, I M Ward, London: Appl. Sic. Pub. Ltd, 1979.
- [20] : BOUKARAA.F, MEZIANE.A.E.K, « Etude, conception, et réalisation d’une machine de torsion-flexion » PFE.INGM, juin 1990.
- [21] Marc Blétry-Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, 2006-2007
- [22] : Mihaela TEACA, caractérisation expérimentale et modélisation de la déformation plastique des tôles métalliques, thèse doctorat université Metz, 2009.
- [23] : Dominique FRANÇOIS « Essais mécaniques des métaux- Détermination des lois de comportement » M 120.
- [24] : Bertrand LANGRAND « comportement et modélisation des assemblages ponctuels »  
Bm7805, 2005, technique de l’ingénieur.
- [25]: PEACOCK (J.A.).-Handbook of Polyethylene- Structure, properties & applications. MARCEL DEKKER INC. (2000).
- [26] : Catalogue du Groupe CHIALI, Siège et Direction Générale : Voie A. Zone Industrielle  
B.P 160. SIDI BELABES, 22000 Algérie. Caractéristiques de la matière PE, p2.
- [27]:H.H. Kausch, R Gensler, C. Grein, C.JG Plummer, P. Scaramuzzino, “Crazing in semicrystalline thermoplastics”, Journal of macromoleculas science, part B-Physics, 1999
- [28] : Patrica Krawczak ; \_Essai plastique renforcé traité plastique et composite”, technique d’ingénieurs, AM5405 année 1997.
- [29] : M. CHERIFI. Karim « Etude, Conception et Fabrication d’un Dispositif d’essai en biaxial Traction-Torsion », Mémoire de fin d’études ; UMMTO, Algérie, 2015/2016.
- [30] : M. HACHOUR. Kamel « Contribution à l’élaboration d’un Critère de Plasticité pour le PEHD » TH/DOC, UMMTO, Algérie.

- [31] : Gottfried W.Ehrenstein, Fabienne Montagne matériaux polymères : Structure, propriétés et applications ; Hermès science publications, 2000.
- [32] : S.J.K. Ritchie, P. Davis & P.S. "Leevers, Brittle-tough transition of rapid crack propagation in polyethylene, Polymer", 1998, vol: 39
- [33] : C. G'Sell, JM. Hiver, A. Dahoun & A. Souahi," Video-controlled Tensile testing of polymers and metals beyond the necking point", Journal of Material Science, 1992
- [34] : H.H. Kausch, R Gensler, C. Grein, C.JG Plummer, P. Scaramuzzino, "Crazing in semicrystalline thermoplastics", Journal of macromoleculas science, part B-Physics,1999
- [35] : H. Peterlin, "Molecular model of drawing polyethylene and polypropylene", Journal of materials science, 6(6), 1971b
- [36] : Q.Fu, Y.Men et G. Strobl, "A molar mass induced transition in the yield properties of linear polyethylene, Polymer", 44(6), 2003





Page	Figure	Titre
05	I.1	Polymères amorphes
06	I.2	Polymères semi-cristallins
08	I.3	Comportements mécanique des polymères
10	I.4	Extrusion
11	I.5	Procède d'extrusion gonflage
11	I.6	Procède de thermoformage
12	I.7	Schéma illustrant le principe du calandrage
13	I.8	Enduction sur tôle
13	I.9	Rotomouleuse
14	I.10	Matière première PE sous forme de granulés et tube PEHD
15	I.11	Schéma du processus de production des tubes polyéthylène
16	I.12	Représentation de la polymérisation du polyéthylène
19	I.13	Courbe contrainte-déformation nominale d'un polymère Semi-cristallin (PE) en traction uniaxiale
20	I.14	Comportements typiques des polymères
23	I.15	Dispositif d'essai de traction uniaxiale
24	I.16	Machine d'essai de traction uniaxiale et ses équipements
25	I.17	Les différents types d'éprouvette de traction a) éprouvette plat. b) éprouvette cylindrique
26	I.18	Différents phases du comportement du matériau polymère
28	I.19	Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale
29	I.20	Module d'Young
30	I.21	Dispositif d'essai de compression
31	I.22	Dispositif de flexion trois points
32	I.23	a) Schéma de principe de l'essai de cisaillement b) Courbe de cisaillement pur
33	I.24	Schéma de principe d'essai de torsion
	I.25	a) Epreuve de traction biaxiale montée b) Dispositif de traction biaxiale c) Chemin mécanique pouvant être sur une éprouvette, lors d'essai de traction biaxiale
35	I.26	L'ensemble de la machine
36	I.27	Epreuve tubulaire sollicité traction-torsion
36	I.28	Tube à parois minces sollicité en traction-compression
37	I.29	a) Principe de l'essai Arcan b) Montage Arcan sur la machine de traction
38	I.30	a) Epreuve papillon en chargement biaxiale b) Etat de contrainte plane développé au centre de l'éprouvette

Page	Figure	Titre
41	II.1	Usinage d'une éprouvette sur un tour parallèle
42	II.2	Eprouvette cylindrique creuse
44	II.3	montage de l'éprouvette sur la machine
45	II.4	Système de fixation par méplate
45	II.5	schéma d'une lime plate
46	II.6	Machine d'essai de traction IBERTEST
47	II.7	Schéma du dispositif traction-torsion
49	II.8	Dispositif traction-torsion monté sur la machine de traction
50	II.9	Lecture sur le cadran
53	III.1	Courbe de traction-torsion qui représente les différents domaines
53	III.2	Déformation de l'éprouvette lors de l'essai traction-torsion
54	III.3	Courbe obtenue par des essais traction-torsion
55	III.4	Courbe force-déplacement pour un angle 0°
56	III.5	Courbe force-déplacement pour un angle 15°
56	III.6	Courbe force-déplacement pour un angle 30°
57	III.7	courbe force-déplacement pour un angle 45°
57	III.8	Courbe force-déplacement pour un angle 60°
58	III.9	Courbe force-déplacement pour un angle 75°
58	III.10	Courbe force-déplacement pour un angle 90°
60	III.11	Effet de la vitesse de chargement sur la limite élastique ( $\sigma_e$ )
61	III.12	Les différentes méthodes de détermination de module de Young E
62	III.13	Effet de la vitesse de chargement sur le module de Young E
63	III.14	Courbe force-déplacement pour $V=1\text{mm/min}$
63	III.15	Courbe force-déplacement pour $V=2\text{mm/min}$
64	III.16	Courbe force-déplacement pour $V=5\text{mm/min}$
64	III.17	Courbe force-déplacement pour $V=26\text{mm/min}$
65	III.18	Effet de l'angle de torsion sur la limite élastique ( $\sigma_e$ )
66	III.19	Effet de l'angle de torsion sur le module de Young E

## Liste des figures

Page	Tableau	Titre
16	I.1	Propriétés mécaniques des polyéthylènes à hautes densité
17	I.2	Propriétés physique du PEHD
17	I.3	Propriétés thermiques du polyéthylène à haute densité
18	I.4	Propriétés électriques du polyéthylène à haute densité
31	I.5	Forme et dimension normalisé de l'éprouvette compression
38	I.6	Etats de contraintes appliquées avec le dispositif ARCAN
40	II.1	Principales propriétés du PEHD
42	II.2	Dimensions de l'éprouvette cylindrique creuse
50	II.3	Nombre de tours en fonction des angles de torsion
55	III.1	Valeur des angles de torsion
55	III.2	valeur de vitesse de chargement
59	III.3	Valeurs de la contrainte élastique (MPa)
61	III.4	valeurs de module de Young E (MPa)

## Liste des tableaux

Symbole	Signification
M	Masse molaire
N	Nombre de répétition (unité)
$\varepsilon$	Déformation longitudinale relatif
L	Longueur totale de l'éprouvette
$L_0$	Longueur initiale de l'éprouvette
F	La charge appliquée
$S_0$	Section initiale de l'éprouvette
S	Section de l'éprouvette
$R_e$	Résistance élastique
$R_m$	Résistance à la rupture
$F_r$	Force à la rupture
A%	Allongement en %
$L_u$	Longueur après rupture
$\Delta L$	Allongement relatif
h	Hauteur de l'éprouvette
$\tau$	Contrainte de cisaillement
G	Module de glissement
E	Module de Young
D <sub>ext</sub>	Diamètre extérieur
D <sub>int</sub>	Diamètre intérieur
$\bar{\sigma}_e$	Contrainte élastique
$\bar{\sigma}_{idéal}$	Contrainte idéal
$\theta$	Angle de torsion

### Signification des symboles

