

**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

**Simulation du comportement de
PEHD en cisaillement**

Dirigé par :

Mr. HACHOUR.K

Etudié par :

M^{me}. BEN MECHEDAL Cylia

Mr. CHARANE Rachid

PROMOTION : 2021 /2022

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 remercions également Mr. BEN CHRIF.M.

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.

Liste des symboles

S_0 : Dimension de l'éprouvette initiale.....	(mm)
L_0 : Longueur entre repère.....	(mm)
D_0 : Diamètre partie calibrée	(mm)
L_c : longueur calibrée.....	(mm)
D_1 : Diamètre des têtes filetées	(mm)
h : Longueur des têtes	(mm)
$\varepsilon \%$: Allongement relatif	(%)
$A\%$: Allongement relatif total.....	(%)
Σ : Résistance élastique à la traction.....	Mpa)
$Z\%$: Coefficient de striction	(%)
A_r : Allongement jusqu'au maximum de la charge.....	(mm)
A_z : Allongement localisé de striction	(mm)
L_u : Longueur de l'éprouvette après rupture.....	(mm)
S_u : Diamètre après rupture	(mm)
r_e : La limite élastique en cisaillement	(Mpa)
τ : Contrainte de cisaillement	(Mpa)
E : Module d'Young	(Gpa)
S_r : Section de la vis et la goupille	(mm²)

Liste des abréviations

PEHD : polyéthylène à haute densité

DP : Le degré de polymérisation

M : La masse moléculaire moyenne de la macromolécule du polymère

m : Masse moléculaire des monomères

PE : Le polyéthylène

PVC : Le poly (chlorure de vinyle)

PP : Polypropylène

PS : polystyrène

Tg : La température de transition vitreuse

Tf : La température de fusion

PEBD : Polyéthylène a Basse Densité

P-IB : polyisodutylènes

DVC : Digitale Versatile Disc

IF : Indice de fluidité

Liste des figures

Figure 1.1: la représentation schématique d'un polymère.....	3
Figure I.2: macromolécule	4
Figure I.3: la polymérisation du polyéthylène à partir de monomère d'éthylène	6
Figure I.4: Exemple de polycondensation : la polymérisation de l'éthylène à partir d'un monomère d'éthylène	7
Figure I.5: polymères linéaires.....	6
Figure I.6: homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)	12
Figure I.7: polymère réticulé avec pont di-sulfure reliant deux chaînes.....	13
Figure I.8: polymère amorphe.....	14
Figure I.9: polymère semi-cristallin	14
Figure I.10: courbe schématique de traction.....	17
Figure I.11: évolution du module d'élasticité d'un polymère amorphe en fonction de température (macromolécules monodimensionnelles)	19
Figure I.12: représentation des températures T_g et T_f du polymère.....	19
Figure I.13: schéma représentatif du polyéthylène	21
Figure I.14: La polymérisation du polyéthylène	21
Figure II.1 : Machine d'essai de traction uniaxiale et ses équipements.....	30
Figure II. 2: Exemple d'une éprouvette de traction	31
Figure II.3 : Diagramme effort-déformation.....	32
Figure II.4 : Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale 34	
Figure II.5 : Schéma et courbe de cisaillement pur.....	35
Figure II.6 : Schématisation de l'éprouvette et du dispositif de compression	37
Figure II.7 : Courbe contrainte-déformation lors d'un essai de compression uni-axiale d'une mousse.....	37
Figure II.8 : Principe de l'essai de flexion 3 points	38
Figure II.9: Schéma de principe d'essai de torsion	39
Figure II.10: principe de l'essai de fatigue par flexion rotative ou charge axial.....	40
Figure II.11: Essais de traction biaxial	41

Figure II.12 : L'ensemble de la machine.....	42
Figure II.13 : Eprouvette cruciforme de traction biaxiale.....	42
Figure II.14 : Schéma cinématique de la traction-torsion	44
Figure II.15: essais de traction torsion.....	44
Figure II.16: Eprouvette tubulaire sollicité traction-torsion	45
Figure II.17: Tube à parois minces sollicité en traction-compression.....	46
Figure III.1 : Eprouvette papillon en chargement biaxial.....	47
Figure III.2 : Dispositif de l'essai Arcan fixé sur la machine de traction.....	49
Figure III.3 : Montage de l'éprouvette papillon sur le Dispositif Arcan.....	49
Figure III.4: Eprouvette papillon en cisaillement pur	50
Figure III.5: courbe force-déplacement	51
Figure III.6: courbe contrainte-déformation	52
Figure IV.1 : méthode des éléments finis	54
Figure IV.2 : structure d'une analyse sur ABAQUS.....	57
Figure IV.3 : module part	58
Figure IV.4 : l'arborescence du modèle	61
Figure IV.5 : le modèle étudié (éprouvette papillon)	62
Figure IV.6: conditions aux limites imposées au modèle.....	63
Figure IV.7 : maillage de l'éprouvette papillon.....	63
Figure IV.8 : résultats de la Simulation numérique	64
Figure IV.9 : courbe force-déplacement de la simulation numérique	65
Figure IV.10 : courbe contrainte-déformation courbe de la simulation numérique.....	65
Figure IV. 11. comparaison courbes forces-déplacements.....	66
Figure IV.12 : Comparaison courbes contrainte-déformation	67

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les domaines d'application des polymères	15,16
Tableau I.2 : Les caractéristiques du PEHD	25.
Tableau II.1: Forme et dimension normalisées de l'éprouvette compression.....	36
Tableau II.2 : différentes éprouvettes biaxiales.....	43
Tableau III.1. Type de l'état de contrainte plane développée dans la section centrale de l'éprouvette papillon.....	48
Tableau IV.1 : Tableau des unités	55

Sommaire

Remerciement

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Etude bibliographique

Généralités sur les polymères

I.1. Introduction.....	03
I.2. Définitions	03
I.2.a. Polymère	03
I.2.b. Monomère.....	04
I.2.c. Le terme macromolécule.....	04
I.3. La formation des polymères	04
I.3.a. Polymérisation par addition ou polyaddition	05
I.3.b. Polycondensation.....	07
I.3.c. Le degré de polymérisation.....	07
I.4. Différentes familles de polymère.....	08
I.4.a. Les homopolymères.....	08
I.4.b. Les copolymères.....	08
I.5. Classification des polymères.....	09
I.5.1. Selon leurs origines	09
I.5.1.a. Les polymères naturels.....	09
I.5.1.b. Les polymères artificiels (dérivés des polymères naturels)	10
I.5.2. Selon les propriétés thermomécaniques.....	10
I.5.2.a. Les thermoplastiques	10
I.5.2.b. Les thermodurcissables.....	11
I.5.2.c. Les élastomères.....	11
I.5.3. Selon la nature chimique [5]	12
I.5.4. b. Les polymères ramifiés (ou bidimensionnels)	12
I.5.4.c. Les polymères réticulés.....	13

I.5.5. Selon les unités.....	13
I.5.5.1. Homopolymères	13
I.5.5.2. Copolymères	13
I.6. Les différents types des polymères	14
I.6.1. Les polymères amorphes	14
I.6.2. Les polymères semi-cristallins	14
I.7. Les applications des polymères	15
I.8. Propriétés des polymères	16
I.8.1. Propriétés mécaniques	17
I.8.2. Propriétés physiques des polymères	18
I.8.3. Propriétés électriques.....	18
I.8.4. Propriétés thermiques	19
I.9. La température	19
I.9.1. La température de transition vitreuse Tg	19
I.9.2. La température de fusion Tf.....	20
I.10. Les polyoléfines.....	20
I.10.1. Introduction	20
I.10.2. Polyéthylène.....	20
I.10.2.1. Définition.....	20
I.10.2.2. Les différents types de polyéthylène.....	21
I.11. Conclusion.....	27

Chapitre II : Généralités sur les essais mécaniques

II. Généralités sur les essais mécaniques.....	28
II.1. Définition.....	28
II.2. Les essais mécaniques uniaxiaux.....	28
II.2.1. Essai de traction	28
II.2.1.1. Principe de l'essai	29
II.2.1.2. Machine d'essai de traction uniaxiale	29
II.2.1.4 : Réponse du matériau en traction uniaxiale.....	32

II.2.1.5 : Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale	33
II.1.2. Essai de cisaillement uniaxial	34
II.1.2.1. Principe de l'essai de cisaillement uniaxial	34
II.1.2.2. Essai de compression	36
II.2.2.3. Essai de flexion	38
II.2.4. Essai de torsion uniaxiale	38
II.2.4.1. Principe de l'essai de torsion	39
II.2.4.2. Machine d'essai de torsion	39
II.2.4.3. But d'essai de torsion uniaxiale	39
II.2.5. Essai de fatigue	40
II.3. Les essais mécaniques multiaxiaux	40
II.3.1. Essai de traction biaxiale	41
II.3.1.1 Machine d'essai de traction biaxial	41
II.3.1.2 Eprouvette de traction biaxiale	42
II.3.2 Essai de traction-torsion	43
II.3.1.1 Principe de l'essai	45
II.3.3. Essai de traction-compression	45
II.3.3.1. Principe de l'essai	45
II.3.4. L'essai Arcan : traction-cisaillement	46
II.4. Conclusion	46

Chapitre III : Méthodes expérimentales

III.1. Introduction	47
III.2. Principe de l'essai de traction-cisaillement	47
III.3. Principe de fonctionnement	48
III.4. Essai de cisaillement pur	50
III.5. Résultat de l'essai	51
III.6. Conclusion	54

Chapitre IV : Simulation de l'essai de cisaillement

V.1. Introduction	55
IV.2. Simulation numérique.....	55
IV.2.2. Présentation du code de calcul Abaqus.....	56
IV.2.3. Présentation de l'interface ABAQUS/CAE	59
IV. 3. Simulation numérique.....	63
IV. 3.1. Présentation du modèle.....	63
IV.3.2. Problème mécanique.....	63
IV.3.3. Introduction des conditions aux limites	64
IV.3.4. Maillage	64
IV.3.5. Résultats de la simulation numérique	65
IV 4. Confrontation des résultats de la simulation à ceux de l'expérimental	69
IV.5. Conclusion	71
Conclusion générale.....	72

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

Le choix du polyéthylène pour la fabrication des canalisations de distribution d'eau comme alternative à l'acier ou à la fonte découle des nombreux avantages technico-économiques procurés par ce matériau. C'est un polymère semi cristallin qui présente de bonnes propriétés mécaniques, qui dépendent elles-mêmes de la microstructure. Il a une ténacité élevée qui répond aux exigences de produits devant résister à des conditions d'utilisation sévères (impact, fluage, fatigue...etc.). Sa légèreté facilite les opérations de manutention et de mise en œuvre sur le terrain. Il possède une bonne résistance à la corrosion, quelles que soient les conditions au sol, ce qui permet d'éviter les surcoûts dus à l'application d'une protection passive ou active. Il possède également l'avantage de pouvoir assembler les tubes par des techniques de fusion efficaces et faciles à mettre en œuvre. De plus, les systèmes en PE supportent les effets des mouvements du sol dus aux instabilités et aux grandes variations de température. Du fait aussi de leur bonne résistance à la fissuration, les canalisations en PE présentent un degré de fiabilité élevé dans des conditions d'utilisations normales. En plus de son utilisation dans le transport d'eau et de gaz, le PE a connu ces dernières années une utilisation croissante dans plusieurs autres applications telles que l'automobile, l'aéronautique et le domaine médical. [1]

L'objectif de ce travail de recherches est d'étudier à l'aide d'un code de calcul à base d'éléments finis, le comportement d'une éprouvette papillon en PEHD au cisaillement pur et de comparer les résultats obtenus à ceux obtenus lors des essais expérimentaux effectués dans le cadre d'une étude de thèse de doctorat [1].

Pour cela, le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique sur les polymères et en particulier le polyéthylène à haute densité. Les différents types de polymères ont été présentés, les modes d'obtention ainsi que leurs propriétés ont été discutés.

Dans le chapitre II on a présenté les différents essais mécaniques utilisés dans la caractérisation du comportement mécanique des matériaux des essais uniaxiaux et multiaxiaux sont présentés en expliquant le domaine d'utilisation et les conditions de leur déroulement.

Le chapitre III « méthodes expérimentales », présente l'essai de cisaillement pur réalisé sur une éprouvette papillon, à l'aide d'un dispositif Arcan [1]. On montre alors, le principe de l'essai le dispositif Arcan, ainsi que l'éprouvette papillon.

De même, les résultats de l'essai sont donnés sous forme de courbes.

Dans le dernier chapitre « simulation de l'essai de cisaillement », on présente le code de calcul ABAQUS et les différents modules utilisés lors de la simulation.

Ensuite, on traite la simulation numérique de l'éprouvette papillon, en présentant les résultats sous forme d'images et de courbes « force-déplacement » et « contrainte-déformation »

Enfin, ces résultats sont confrontés a ceux de l'expérimental puis discutés.

CHAPITRE I :

Etude bibliographique

Généralités sur les polymères

I.1. Introduction

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

Ces matériaux sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'imaginer la morphologie qui en découle et les propriétés qui s'y rattachent. Ce chapitre a pour objet une présentation des principales générales sur les polymères, et en particulier le polyéthylène à haute densité appelé PEHD.

I.2. Définitions

I.2.a. Polymère

Un polymère est un matériau naturel ou synthétique de masse moléculaire importante. Il est formé de macromolécules dont la liaison est sous forme de chaînes linéaires ou ramifiées d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) qui par polycondensation ou polymérisation engendrent des structures moléculaires à base de carbone (C), de l'hydrogène (H) et des radicaux tels que :CH₃, Cl, N₂, S, Si .[2]

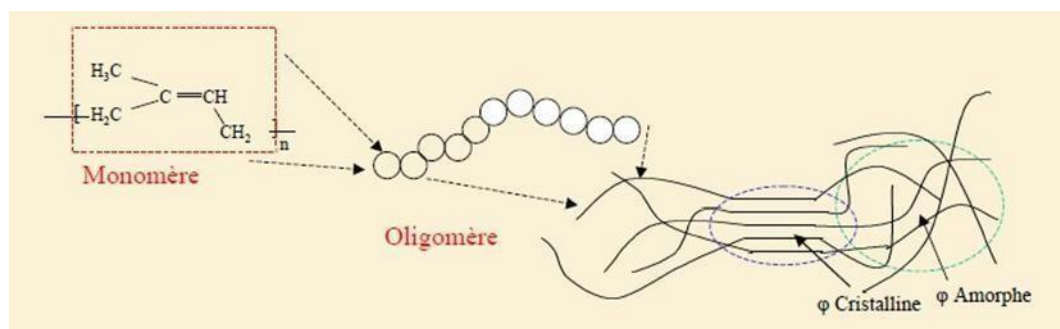


Figure I.1: la représentation schématique d'un polymère [3]

I.2.b. Monomère

Un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire.[4]

Constitué de molécules simples, et capable de se combiner à d'autres molécules semblables ou différentes pour former un polymère.

I.2.c. Le terme macromolécule

Souvent utilisé à la place de polymère [4]. Molécule de masse moléculaire élevée généralement constituée par la répétition en grand nombre d'atome ou de groupes d'atomes et dérivant de molécules de faible masse moléculaire [5].

La liaison chimique prédominante des chaînes est covalente. Tant dit que celle régnant entre chaînes est de type Vander Walls.

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.

Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère. [4]

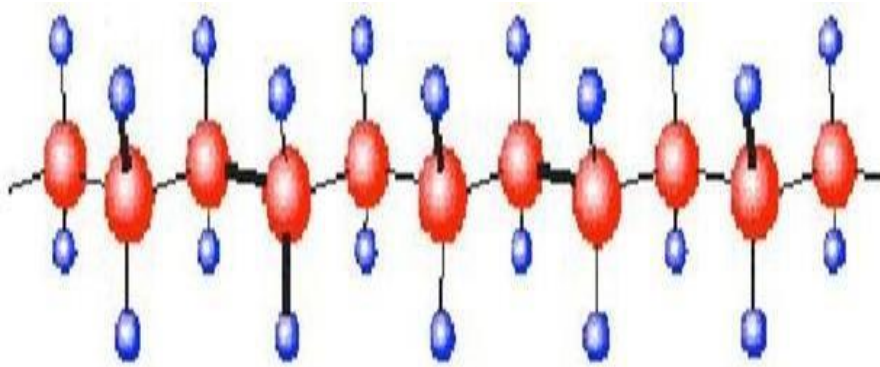


Figure 2.I. macromolécule

I.3. La formation des polymères

On distingue habituellement deux grandes méthodes de synthèse des polymères : la polycondensation ou polymérisation par étapes et la polymérisation par addition. La plupart des procédés industriels découlent de ces deux méthodes de synthèse.

I.3.a. Polymérisation par addition ou polyaddition

La polyaddition est une polymérisation par simples liaisons successives de monomères, sans apparition de sous-produit.

Dans la polymérisation par croissance en chaîne, le catalyseur qui amorce la réaction provoque la formation d'un site actif, sur lequel se fixe rapidement une molécule de monomère et ainsi de suite. Le monomère réagit rapidement, toujours par la même addition à la chaîne qui s'allonge. Le processus est interrompu par une réaction de terminaison. Selon la nature du centre actif qui provoque l'addition successive des motifs, on peut classer toute réaction de polymérisation en chaîne dans l'un des groupes suivants :

- Polymérisation radicalaire.
- Ionique (anionique, cationique).
- Polymérisation par des catalyseurs métalliques.

La polymérisation en chaîne nécessite la présence de centres actifs. Ceux-ci peuvent être créés soit sous l'influence d'une forme d'énergie externe (chaleur, radiations lumineuses ou ultraviolettes, rayonnements α , β , γ , neutrons), soit le plus souvent à partir d'un composé réactif ou amorceur, que l'on ajoute au milieu réactionnel, et qui donne naissance à une substance amorçant R^* possédant un centre actif. Les centres actifs peuvent être des radicaux, des anions et des cations. Ils sont capables de réagir avec des molécules monomères insaturées, puis d'assurer la croissance rapide du polymère par addition successive de monomères dans une réaction en chaîne. La croissance de la macromolécule ne s'arrête que lorsque le centre actif a disparu. Ainsi, une réaction de polymérisation comporte trois phases : amorçage, propagation, interruption. [6]

L'exemple le plus courant de polymérisation en chaîne est fourni par les monomères vinyliques, de formule générale :

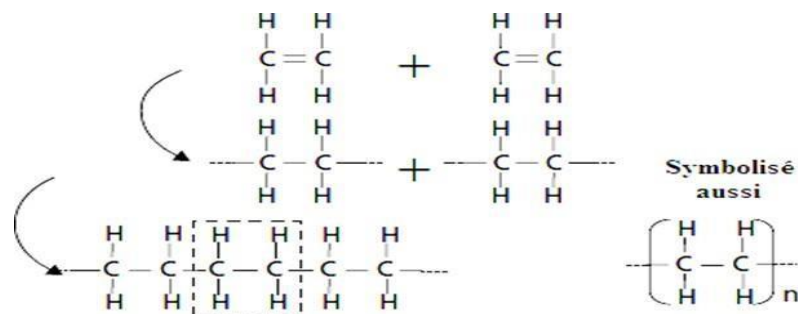


Figure 3.I: Exemple de la polyaddition la polymérisation du polyéthylène à partir de monomère d'éthylène

I.3.b. 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.

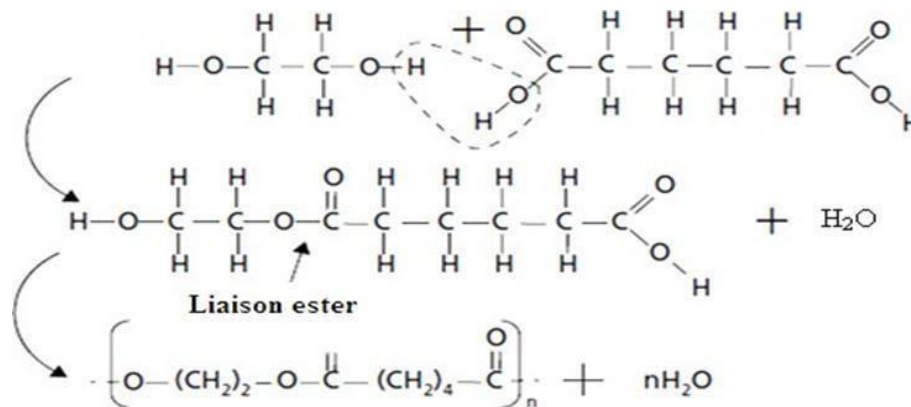


Figure 4.I: Exemple de polycondensation : la polymérisation de l'éthylène à partir d'un monomère d'éthylène.

I.3.c. Le degré de polymérisation

Le degré de polymérisation (DP) représente le nombre moyen de monomères dans les macromolécules d'un polymère. Il peut être calculé par le rapport de la masse moléculaire moyenne M d'une macromolécule du polymère considéré, à la masse moléculaire m du monomère correspondant :

$$DP = M/m$$

Ce résultat ne peut être déterminé que statistiquement, car dans un polymère, il existe toute une distribution de tailles de chaînes macromoléculaires, fonction des conditions de polymérisation (pression, température, concentrations en monomères...). DP atteint couramment 10^2 à 10^4 . Sa valeur a une grande influence sur les propriétés du polymère considéré : un DP élevé conduit à un matériau globalement plus rigide et plus résistant mécaniquement. [7]

I.4. Différentes familles de polymère

Il existe deux familles de polymères :

I.4.a. Les homopolymères

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène. Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles [8].

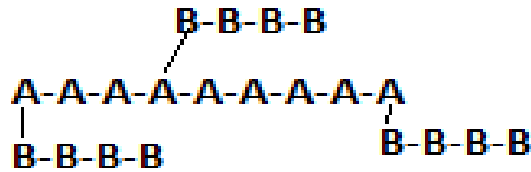
Parmi les différents types d'homopolymères, nous trouvons :

- Les homopolymères linéaires.
- Les homopolymères branchés.
- Les homopolymères étoilés.

I.4.b. Les copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères. Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :

- Le mode statistique A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-B
- Le mode alterné A-A-R-A-R-R-R-A-A-R-A
- Le mode séquencé 1-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A
- Le mode greffé



Les polymères, qu'ils soient homos ou copolymères. Peuvent être réticulés. Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents.

La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler [8].

I.5. Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés selon divers critères qui ne s'excluent pas les uns des autres. On peut classer les polymères en trois groupes :

I.5.1. Selon leurs origines

On peut les classer en trois catégories. On distingue les polymères naturels, artificiels, et les polymères synthétiques

I.5.1.a. Les polymères naturels

Issus des règimes végétal, animal ou minéral, leur économie et le rôle qu'ils jouent dans les mécanismes vitaux leur a assuré une place de premier choix. [9]

Exemple :

- Les polysaccharides (cellulose, amidon). [10]
- Les protéines (la laine, la soie...), Le caoutchouc naturel.[10]

I.5.1.b. Les polymères artificiels (dérivés des polymères naturels)

Sont obtenus par modification chimique des effectuée sur les macromolécules naturelles sans altération profonde de la structure du squelette de façon à transformer certaines de leurs propriétés. [9]

Exemple :

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

I.5.1.c. 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, ils sont obtenus par la polymérisation de molécules monomères (PVC, polystyrène, polypropylène).[11]

I.5.2. Selon les propriétés thermomécaniques

Trois grandes familles de polymères peuvent être distinguées : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

I.5.2.a. 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 et l'opération reste réversible. Dans la majorité des cas, le polymère ayant la forme désirée récupère sont partiellement cristallin ou amorphe après refroidissement.

Exemple : PE, PVC, PP[11]

I.5.2.b. Les thermodurcissables

Un thermodurcissable ou thermodur 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 thermodurcissable. Leurs chaînes sont fortement réticulées par des liaisons covalentes dans les trois directions de l'espace : ces liaisons résistent à l'agitation thermique jusqu'à la température de pyrolyse ou de combustion. Ces polymères ne présentent donc ni transition vitreuse marquée, ni fusion.[11] 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.[7] Ils sont stables même à des températures relativement élevées et présentent en général une bonne tenue vis-à-vis des milieux agressifs.

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, les thermodurcissables présentent une résistance mécanique, chimique et thermique plus élevées que les thermoplastiques.

I.5.2.c. 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 grandes allongements (jusqu'à 500 %) tout en étant capables de retrouver leur géométrie initiale en restituant au milieu l'énergie qui leur a été fournie lors de la déformation.[12]

I.5.3. Selon la nature chimique

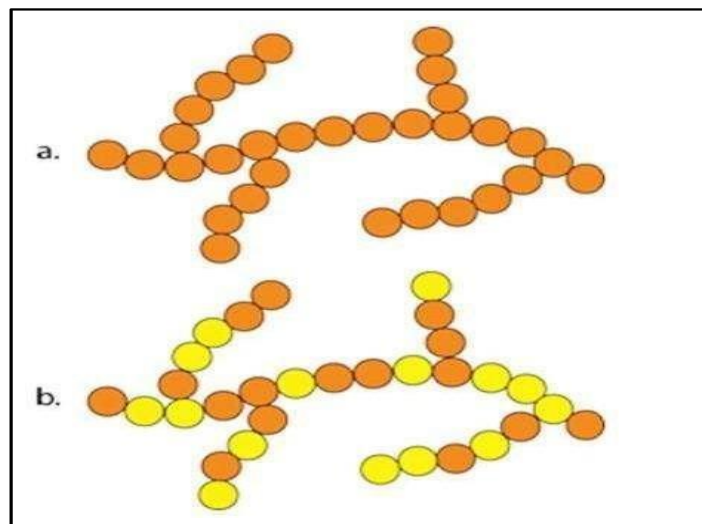
I.5.3.1. Polymères minéraux : sont constitués par des chaînes renfermant un seul corps simple comme le diamant, le graphite, le phosphore et le soufre ou par des chaînes renfermant plusieurs hétéronomes comme les silicates, les acides polyphosphoriques et les chlorures de polyphosphonitriles.[5]

I.5.3.2. Polymères organiques : c'est la classe la plus riche, ils constituent presque la totalité des polymères d'utilisation courante. Les principaux polymères organiques de synthèses sont : polyoléfines, les polyvinyles, les polydiènes, les polyamides, les polyesters et les polyacryliques.

I.5.3.3. Polymères mixtes : sont doués de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique (300-350 C°). L'hétéroatome peut être soit dans la chaîne principale soit dans les motifs latéraux

I.5.4.a. Les polymères ramifiés (ou bidimensionnels)

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires [14]



Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)

Figure I.6 : les polymères ramifiés

I.5.4.b. Les polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace, au cours d'une polymérisation de polymères linéaires, qui conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel.

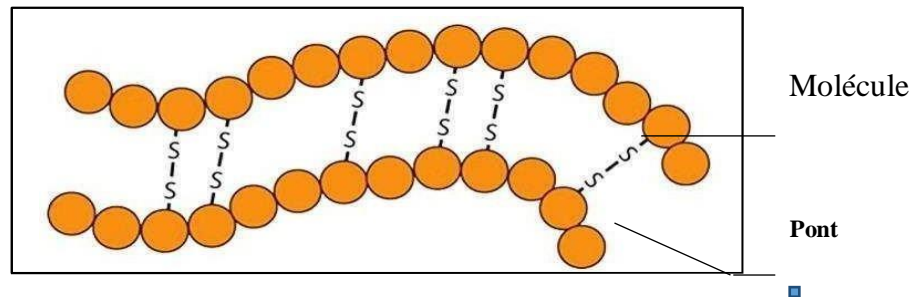


Figure I.7: polymère réticulé avec pont di-sulfure reliant deux chaînes.

I.5.5. Selon les unités

I.5.5.1. Homopolymères

Qui sont une répétition d'une même structure moléculaire, il existe, au sein des homopolymères, différentes familles. Pour la suite du paragraphe, A sera l'unité de l'homopolymère.

I.5.5.2. Copolymères

Les noms des copolymères sont constitués du préfixe poly, suivi, entre parenthèses, des noms chimiques des monomères donnés dans l'ordre décroissant des fractions massiques ou molaires de ces composants dans le copolymère, chaque monomère étant séparé des autres par une barre oblique. [1]

I.6. Les différents types des polymères

I.6.1. Les polymères amorphes

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

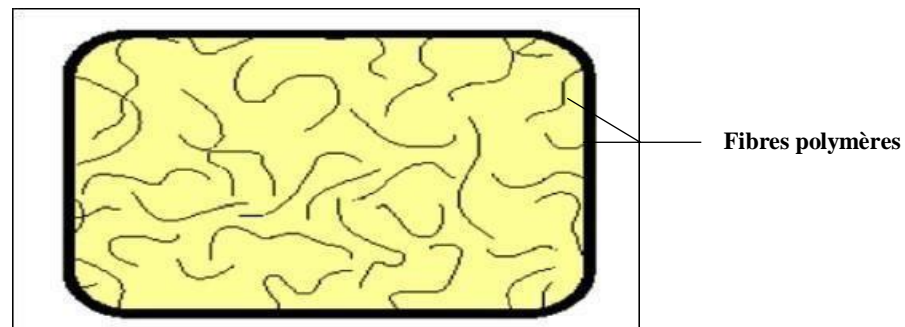


Figure 5.I: polymère amorphe [15]

I.6.2. 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 propriété 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

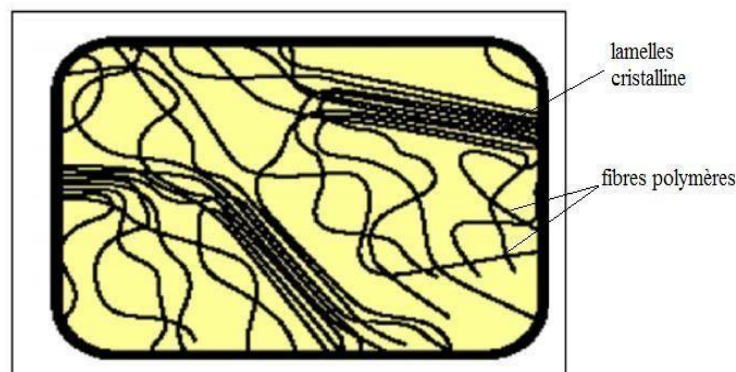


Figure I.9: polymère semi-cristallin [15]

I.7. Les applications des polymères

Les polymères sont utilisés pour un nombre extraordinaire d’applications à tous les échelons de la vie [10].

Les différents domaines d’applications sont la construction mécanique, la robotique, l’énergétique ou encore l’aéronautique [16]. Voir tableau suivant :

Domaines	Exemples d’applications
Automobile	Mousse de pare choc, finition intérieure, sièges, cache du moteur, garde boue, pneu, poignée de porte, volant, cadrans, réservoir...
Avion	Sièges, bacs de rangements, roue d’atterrissage, poignées, aménagement du sol, tuyaux de ventilation, gilet de sauvetage...
Eolienne	Pâles en composite, isolants, gaine des câbles
Chaine de montage	Tapis roulant, guides, tuyaux, pièces isolantes, écrans, manettes,
Le secteur de la construction	Les portes, conduites d’eau et l’assainissement, peinture des murs des plan chaires et des plafonds, revêtement du sol.
Industrie de l’emballage	Bouteilles, pots de yaourt, boites aux lettres, problème thermique, gainage films vidéo.
Médecine et santé	Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie
Articles ménagers	Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle.
Matériel électrique et électronique et les Communications	Tension d’isolement, isolation, laveuses, ordinateurs et les caméras, Radio et télévision, téléphone.

Industrie automobile	Système vitre claire, Tapie, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, Façades de téléviseurs, gainage de câbles.
Industrie textile	Vêtement, fibres textiles naturelles et synthétiques, sacs, skaï, similicuir, non tissés.
Sports-loisirs	Certaines parties des bâtiments, des avions et des bateaux, DVD, bandes magnétiques, Files de pêche et les cordons utilisés, piscines, coques de bateaux.
Industrie chimique	Tuyauterie, cuves, revêtements.
Le domaine alimentaire	Procédés de fabrication d'aliments, emballages (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boites à œufs) ou industriel (flacons de détergent, sachets et sacs, casiers)...
Le matériel de maison	Meuble, vaisselle, accessoires... ; Utilisés en industrie pour maintenir le matériel d'une violente collision.

Tableau I.1: Les domaines d'application des polymères [10,16].

I.8. Propriétés des polymères

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures telles que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques.

Les caractéristiques de résistance peuvent différer 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). [10]

I.8.1. Propriétés mécaniques

La grande majorité des polymères sont utilisés pour supporter des charges, c'est-à-dire qu'ils ont une fonction mécanique. Pour assurer cette fonction souvent critique, il convient de dimensionner les pièces de structures, afin d'assurer leurs résistances mécaniques et leur durée de vie en service. Les propriétés mécaniques des polymères sont fortement influencées par la température et la vitesse de déformation. Pour un même matériau, une augmentation de la température conduit à un comportement évoluant de fragile à ductile, de même qu'une décroissance de la vitesse de déformation [12].

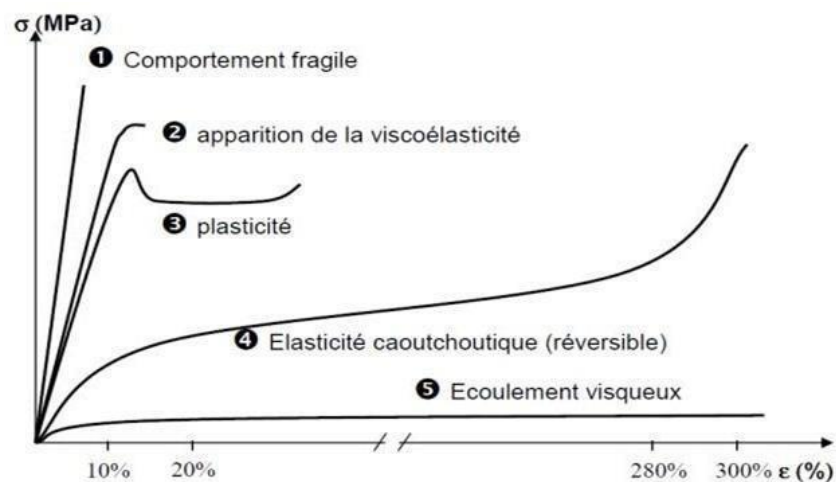


Figure I.10: courbe schématique de traction.

I.8.2. Propriétés physiques des polymères

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques, une des caractéristiques physiques générales des polymères est :

La masse volumique : La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion.

En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques.

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone). [10]

I.8.3. Propriétés électriques

Par la nature même des liaisons atomiques qui existent dans les polymères (liaisons covalentes le long des chaînes, liaisons de Van der Waals ou ponts hydrogène entre les chaînes), ceux-ci ne comprennent aucun porteur de charges électriques (électron ou ions). Les matières plastiques ont donc une résistivité très élevée et constituent par conséquent d'excellents isolants électriques. Le comportement des polymères sous champs électriques de haute fréquence, dépend de la polarité de la molécule. Sur ce plan, les polyéthylènes et les Polypropylènes, grâce à leur structure régulière constituée uniquement d'atomes de carbones et d'hydrogène, sont les plus intéressants [11].

I.8.4. Propriétés thermiques

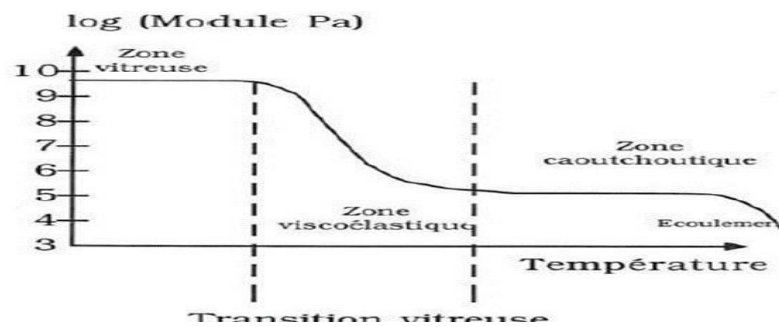


Figure I.11: évolution du module d'élasticité d'un polymère amorphe en fonction de température (macromolécules monodimensionnelles).[13]

I.9. La température

La température de transition vitreuse " T_g " et la température de fusion " T_f " sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères. La température de transition vitreuse est particulièrement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de cohésion importante autre que l'enchevêtrement [10].

I.9.1. La température de transition vitreuse T_g

Qui est observée dans la phase amorphe du polymère [4].

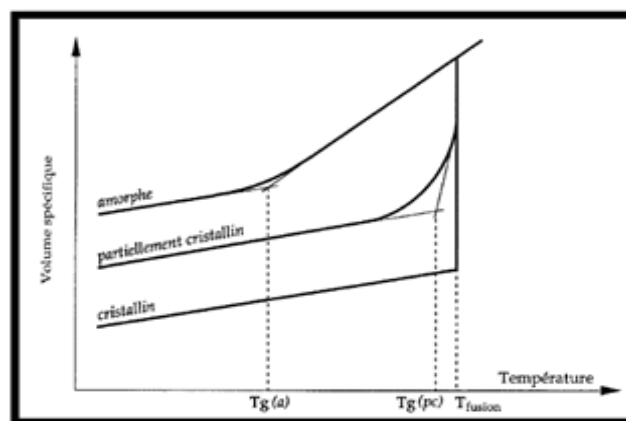


Figure I.12 : représentation des températures T_g et T_f du polymère [17].

Pour la plupart des polymères, la température T_g marque la frontière entre 2 états fondamentaux :

L'état caoutchouteux : (mou, visqueuse, liquide) à haute Température. L'état vitreux : (dur, cassant) à basse Température [17].

I.9.2. La température de fusion T_f

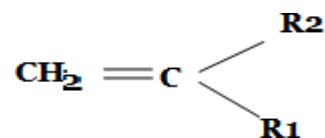
Qui ne concerne que la phase cristalline du polymère. Est définie comme la température moyenne de fusion des zones cristallines du polymère [4].

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents. Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semi cristallins dans un domaine même étroit de la température [10].

I.10. Les polyoléfines

I.10.1. Introduction

Les polyoléfines sont des matériaux résultant de la polymérisation d'oléfines c'est-à-dire de monomères hydrocarbonés dont la formule générale est :



Où R_1 et R_2 sont des groupements tels que : H ; CH_2 ; $-\text{CH}_2-\text{CH}-(\text{CH}_3)_2\dots$ Les principales polyoléfines industrielles sont :

Les polyéthylènes (PE) ; les polypropylènes (PP) et les polyisobutylenes (P-IB) [18]

I.10.2. Polyéthylène (PE)

I.10.2.1. Définition

Le polyéthylène, ou polythène (sigle générique PE), est un des polymères les plus simples et les moins chers [7] sa formule moléculaire est $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$ Ce matériau semi cristallin obtenu par la polymérisation de l'éthylène est le polymère de synthèse le plus important, devant le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyl (PVC) et le polystyrène (PS).

Sa production mondiale était d'une quarantaine de millions de tonnes en 2010.[19]

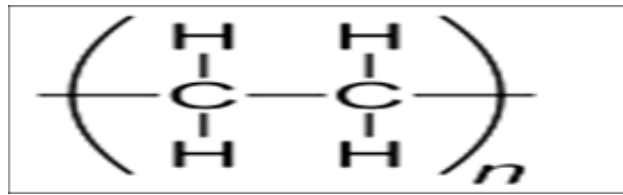


Figure I.13 : schéma représentatif du polyéthylène [19].

La polymérisation du polyéthylène est représentée dans la figure suivante :

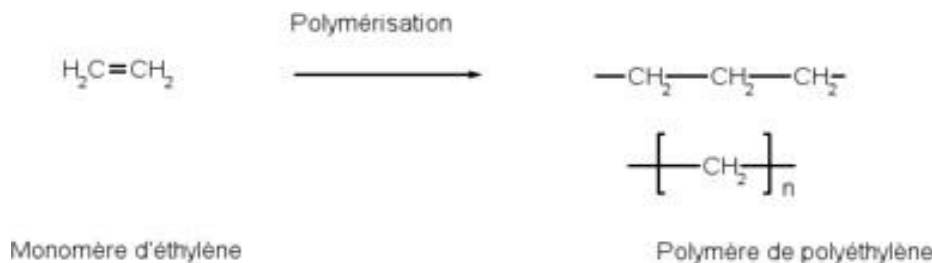


Figure I.14 : La polymérisation du polyéthylène [19].

II.2.2. Les différents types de polyéthylène

Les PE (polyéthylène) font partie des thermoplastiques, c'est-à-dire qu'ils ont des propriétés qui leur confèrent une malléabilité à chaud et une thermoplasticité réversible. Mais ils sont classés en fonction de leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires.

- PE-BD, polyéthylène basse densité (en anglais LDPE, low-density polyethylene)
- PE-BDL, polyéthylène à basse densité linéaire (en anglais LLDPE, linear low-density polyéthylène)
- PE-UHPM, polyéthylène à masse molaire élevée (en anglais UHMWPE, ultra-high-molecular-weight polyéthylène)
- PE-R, polyéthylène réticulé (en anglais PEX, cross-linked polyéthylène)
- PE-RHD, polyéthylène réticulé à haute densité (en anglais HDXLPE, high density)

cross-linked polyéthylène)

- PE-MD, polyéthylène à moyenne densité (en anglais MDPE, medium density polyéthylène)
- PE-TBD, polyéthylène à très basse densité (en anglais VLDPE, very low density polyéthylène) [20].

I.10.3. Le polyéthylène haute densité (PEHD)

I.10.3.1. Présentation

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

Le polyéthylène haute densité (PEHD) a été synthétisé en 1953 par le chimiste allemand Karl Ziegler .

I.10.3.2. Propriétés des polyéthylènes à haute densité

Le polyéthylène, ou polythène (sigle générique PE), est un des polymères les plus simples et les moins chers [7] sa formule moléculaire est $-(CH_2-CH_2)_n-$ Ce matériau semi cristallin obtenu par la polymérisation de l'éthylène est le polymère de synthèse le plus important, devant le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyl (PVC) et le polystyrène (PS).

I.10.3.2.a. Le taux de cristallinité

Le taux de cristallinité est étroitement dépendant de la structure moléculaire. Il est faible dans le cas du polyéthylène basse densité radicalaire (PEBDR), dû à sa structure branchée qui empêche pratiquement les molécules de se serrer les unes contre les autres, et est élevé dans le cas du PEHD homopolymère, dû à la structure linéaire de ses chaînes qui se replient facilement pour former des cristallites.

L'incorporation des branches courtes dans les chaînes linéaires, favorisant l'encombrement stérique, abaisse la cristallinité. La diminution du taux de cristallinité amène à la diminution de la densité, et par conséquent à l'augmentation de certaines propriétés mécaniques comme la résistance au choc.

I.10.3.2.b. La masse moléculaire

D'une manière générale, plus les chaînes polymériques sont longues (masse moléculaire grande) plus la viscosité à l'état fondu est élevée, la mise en œuvre est plus difficile et les propriétés mécaniques sont meilleures. Dans la pratique, la détermination de l'indice de fluidité à chaud (IF) du PE, qui est inversement proportionnel à la viscosité, donne une estimation sur sa masse moléculaire.

I.10.3.2.c. La distribution de la masse moléculaire

En plus de la densité et de la masse moléculaire, la répartition des masses moléculaires est un facteur qui peut aussi affecter les propriétés du PE. Un polymère avec une distribution étroite se cristallise plus rapidement avec un grand uniforme permettant d'avoir une grande rigidité et un minimum de torsion.

Une large distribution assure la facilité de mise en œuvre ainsi qu'une bonne résistance au choc et à la fissuration sous contrainte.

I.10.3.2.d. Propriétés rhéologiques

Le PEHD à l'état fondu présente un comportement viscoélastique non linéaire, cela signifie que sa viscosité diminue avec l'augmentation du cisaillement. Lors de l'extrusion, le polyéthylène est soumis à un gradient de vitesse de cisaillement, du cylindre de l'extrudeuse à la filière. Il est donc important de connaître la courbe de viscosité-vitesse de cisaillement sur l'étendue de la plage de cisaillement. La mesure de l'indice de fluidité à chaud (IF) permet d'estimer la viscosité à une vitesse de cisaillement donnée.

I.10.3.2.e. Propriétés mécaniques

La rigidité et la dureté du PEHD augmentent avec la densité, et donc avec la cristallinité. La rigidité est mesurée au moyen de module d'élasticité qui varie d'environ 1600 MPa (dans le cas du PEHD) alors que la dureté (Shore D) varie d'environ 60

Le PE est un thermoplastique résistant au choc et à l'impact, même à des basses températures ($T < 0^{\circ}\text{C}$), due à sa faible température de transition vitreuse $\ll T_g \gg$ (jusqu'à -110°C). Cette résistance est d'autant meilleure que :

- La masse molaire est plus élevée.
- La cristallinité est plus faible.
- La distribution des masses moléculaires est plus large.

Le touché paraffinique du PE lui assure un faible coefficient de friction. Sa résistance à l'abrasion augmente avec la masse moléculaire et la cristallinité. Elle est remarquable pour les PEHD de masse moléculaire très élevée.

I.10.3.2.f. Propriétés thermiques

Le point de fusion du PEHD se situe entre 120 et 136°C . La conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique linéaire sont fonction du taux de cristallinité, ils sont plus élevés pour les homopolymères que les copolymères.

I.10.3.2.g. Propriétés chimiques

Propriétés chimiques du PE vis-à-vis des agents chimiques sont déterminées par leur structure paraffinique apolaire, par son caractère cristallin et sa très haute masse moléculaire. Il résiste bien aux acides forts (les acides inorganiques) et les bases fortes (les solutions salines), mais il est attaqué par les acides oxydants (les acides nitriques concentrés).

Il se gonfle dans les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques et dans leurs dérivés halogénés, dans lesquels il se dissout à température élevée, ce qui explique sa grande perméabilité aux vapeurs de ces produits. Il est également peu perméable à la vapeur d'eau, à cause de son caractère hydrophobe (l'absorption d'eau est d'environ 0.01% et 0.5 % pour le PE contenant du noir de carbone).

I.10.3.2.h. Propriétés électriques

Le PE présente d'excellentes propriétés d'isolation électrique quelles que soient sa masse moléculaire et sa cristallinité. Sa faible permittivité relative et son faible facteur de dissipation diélectrique font de lui un matériau de choix en isolation électrique.[19]

I.10.3.3. Caractéristiques du PEHD

Les caractéristiques du PEHD sont présentés dans le tableau

<i>Propriétés</i>	<i>PEHD</i>
Masse volumique(g/cm ³)	0.95-0.98
Taux de cristallinité (%)	73-82
Module de Young à 20°C (GPa)	0.55-100
Résistance à la traction (MPa)	20-37
Module en flexion (MPa)	800-1100
Tenacité à 20°C (MPa m ^{1/2})	2-5
Température de transition vitreuse Tg (K)	300

Température de ramollissement Tg (K)	390
Chaleur massique (J Kg-1K-1)	2100
Conductivité thermique (W m-1 K-1)	0.52
Coefficient de dilatation thermique (MK-1)	150-300

Tableau I.2 : Les caractéristiques du PEHD.

I.10.3.4 Avantages et Inconvénients du PEHD

I.10.3.4.a. Avantages

Les avantages d'utilisation du PEHD sont :

- Mise en œuvre aisée.
- Excellentes propriétés d'isolation électrique.
- Résistance aux chocs.
- Grande inertie chimique.
- Qualité alimentaire
- Perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux hydrocarbures [21].

I.10.3.4.b. Inconvénients

Comme tout autre matériau le PEHD certains inconvénients qui sont :

- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène.
- Sensibilité à la fissure sous contrainte.
- Mauvaise tenue à la chaleur.
- Collage important [21].

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un aperçu global sur les polymères permettant de situer l'importance de ces matériaux dans divers domaines technologiques. Les notions théoriques de base des polymères ont été présentées. Le polyéthylène qui va faire l'objet de notre étude, a été traité explicitement.

CHAPITRE II :
Généralités sur les essais
mécaniques

II. Généralités sur les essais mécaniques

II.1. Définition

Les essais mécaniques sont des expériences effectuées afin de caractériser les matériaux et de déterminer les lois qui décrivent leur comportement 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, 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 détermination. Ces essais peuvent être effectués suivant deux modes : en phase ou hors phase, selon que l'éprouvette subit simultanément ou non les différentes sollicitations. [22]

II.2. Les essais mécaniques uniaxiaux

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

Parmi ces essais, l'essai de traction est 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. [23]

II.2.1. Essai de traction

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies.

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante. L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions

normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette.

II.2.1.1. Principe de l'essai

Des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante S_0 et longueur L_0 raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction. Sauf indications contraires, l'essai est effectué à la température ambiante dans les limites comprises entre 10°C et 35°C. Des essais de traction peuvent être effectués à des différentes températures allant de la température cryogénique à celle des hautes températures inférieures à la moitié de la température de fusion pour modéliser le comportement du matériau en fonction de la température.

II.2.1.2. Machine d'essai de traction uniaxiale

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Grâce aux micro-ordinateurs, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Afin d'éviter tous moments de flexion, il est important que les fixations soient bien orientées et alignées suivant l'axe de traction. Bien que les machines de traction soient rigides, il ne suffit normalement pas de prendre le déplacement de la traverse comme mesure pour l'allongement. Il est en tout cas préférable de fixer un extensomètre aux extrémités de la longueur de mesure et d'utiliser ce signal pour tracer les courbes. C'est l'essai de traction effectué à vitesse de déformation constante, ce qui est le mode d'essai préféré. Comme alternative, on peut régler le déplacement de la traverse de façon à ce que la contrainte de traction ou de compression augmente selon une fonction du temps prédéfinie. Ce mode s'applique lorsqu'on veut uniquement déterminer la résistance à la traction sans fixation d'un extensomètre.

Dans les anciennes machines, ces rampes et fonctions du temps ont été générées par des circuits électriques analogiques que l'on a dû brancher avant l'essai dans le circuit de réglage. Le logiciel de contrôle se charge de presque toutes les tâches survenant lors d'un essai, du début jusqu'à la fin des mesures. Le rôle de l'opérateur se réduit au choix du type d'essai à effectuer et à l'échange des éprouvettes. Après le choix du type d'essai, l'opérateur doit entrer les paramètres particuliers pour l'essai prévu. [24]

Il s'agit notamment des valeurs pour la force ou le déplacement maximal, le nombre de cycles, ainsi que des paramètres qui déclenchent un arrêt automatique de l'essai. Souvent ces paramètres se laissent charger en bloc, à partir d'un fichier de paramètres ou d'un fichier de configuration que l'on a déjà enregistré lors d'un essai précédent. Avec ces informations, le programme numérique passe à l'initialisation de la machine de traction, des instruments de mesure utilisés pour les signaux reçus du capteur de force et l'extensomètre. Une fois en route, le programme entre dans une boucle qu'il ne quitte que lorsqu'un capteur signale un incident, l'opérateur intervient manuellement ou lorsqu'une condition de fin d'essai programmée est atteinte.

Comme condition de fin d'essai on peut, selon le type d'essai, demander une force ou un déplacement maximal, un nombre de cycles ou surveiller la chute de la contrainte après la rupture. Essai de traction C5 mesures en cours. Pour éviter ces dégâts, les machines de traction doivent être dotées d'interrupteurs de fin de course qui agissent directement sur l'alimentation du moteur. Normalement une paire d'interrupteurs est prévue pour la protection de l'extensomètre.

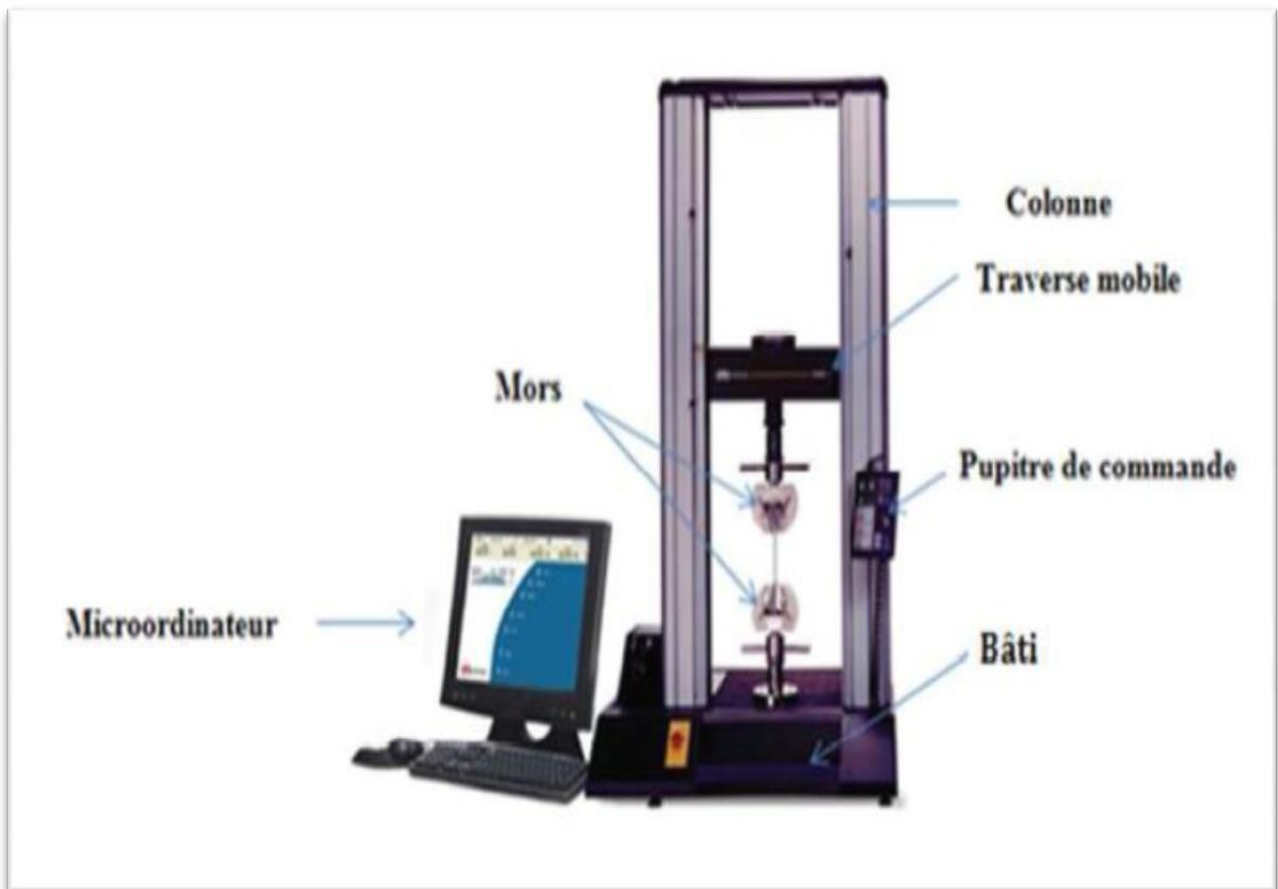


Figure II.1 : Machine d'essai de traction uniaxiale et ses équipements [25]

L'essai de traction est exécuté soit sur des barres de section constante, soit sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. Afin de garantir des résultats obtenus sous contrainte uniaxiale, toutes les déterminations faites au cours de l'essai ne portent que sur une partie de la longueur de l'éprouvette. Dans la pratique aussi, on doit garder à l'esprit que la limite d'écoulement plastique déterminée dans un essai de traction ne tient compte que d'un état de contrainte uniaxiale. L'éprouvette fixée par ses têtes, entre deux mordaches, est soumise à un effort de traction suivant son axe.

Au début, la déformation plastique est encore uniforme mais vers la fin lorsque la rupture s'approche, il y a apparition d'une striction et rupture. Au-delà de la limite élastique, la courbe de traction force = f (allongement) ne dépend pas seulement de la déformation, mais aussi des dimensions géométriques de l'éprouvette. Lorsque la déformation commence à se localiser et ne se produit qu'à l'endroit de la striction, il importe par quelle longueur L (longueur de mesure initiale) on divise l'allongement L pour obtenir la déformation moyenne. L'expérience a montré que l'allongement relatif de deux éprouvettes mesurés sur la base d'une longueur L ne dépend pas de la forme de

La section droite (aire initiale S_0) si le rapport $L_0/\sqrt{S_0}$ est le même. Pour pouvoir comparer les résultats provenant de différents laboratoires. [26]

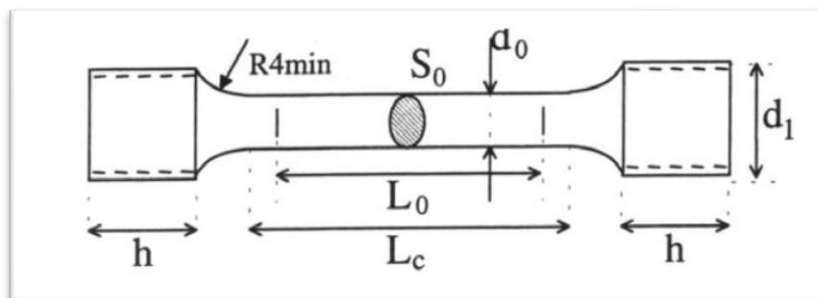


Figure II. 2 : Exemple d'une éprouvette de traction.

$$D_0 = \varnothing \text{ partie calibrée}$$

$$D_1 = \varnothing \text{ des têtes filetées}$$

$$L_0 = \text{longueur entre repère} = 5D_0$$

$$L_c = \text{longueur calibrée}$$

$$h = \text{longueur des têtes}$$

II.2.1.4 : Réponse du matériau en traction uniaxiale

Sur un diagramme effort-déformation, on observe les phases successives suivantes :

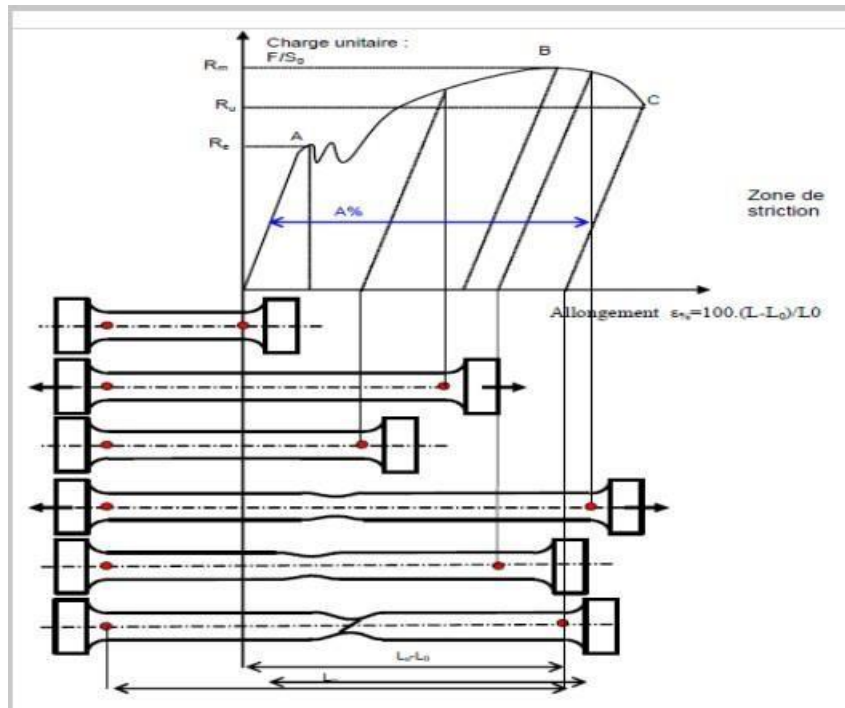


Figure II.3 : Diagramme effort-déformation

Zone OA: domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales Zone AB: la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

Zone BC : la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge. [27]

II.2.1.5 : Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale

Sur le diagramme charge-allongement, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes : 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).

$$\varepsilon_0 = 100((L - L_0)/L_0)$$

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

$$\sigma = \Phi/\varepsilon_0$$

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

$$P_S = \Phi_S/\varepsilon_0$$

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)

$$P_\mu = \Phi_\rho/\varepsilon_0$$

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.

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure L_U et S_U respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes.

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

$$A\% = 100 ((L_u - L_0) / L_0)$$

Où L_μ 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 :

$$AL_0 = A_r + A_z$$

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture. Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid :

$$Z\% = 100((S_0 - S_u)/S_0)$$

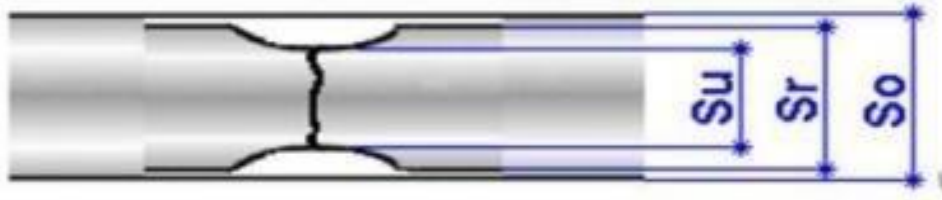


Figure II.4 : Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale [28]

- S_0 : dimension d'éprouvette initiale.
- S_r : dimension d'éprouvette après la rupture.
- S_u : dimension de la striction après rupture.

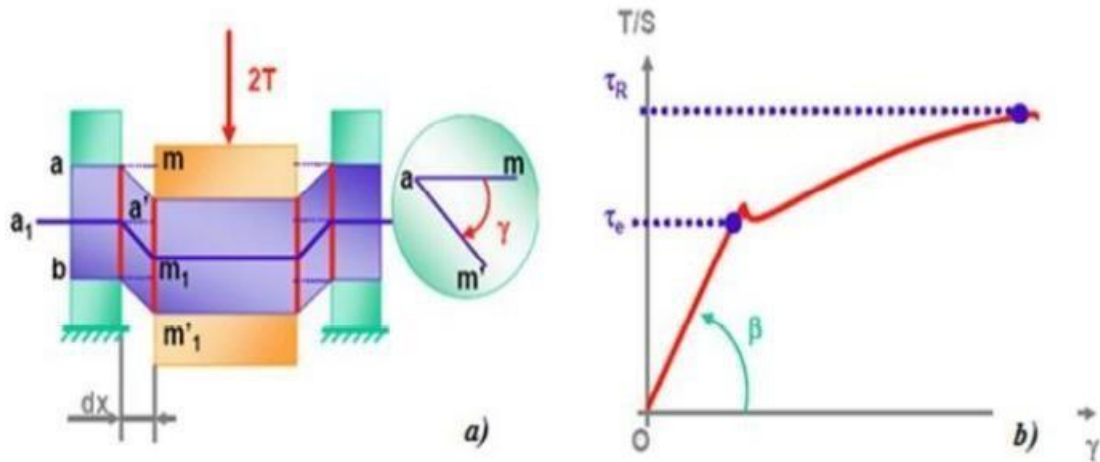
II.1.2. Essai de cisaillement uniaxial

II.1.2.1. Principe de l'essai de cisaillement uniaxial

Lors de l'essai de cisaillement pur, les sections infiniment voisines ab à ' b ' glissent en bloc l'une par l'autre.

Donc on peut admettre que dans cette section cisillée, la condition de cisaillement pur est approximativement remplie. Si on note par l'angle de cisaillement m à m' , avec m la position initiale du point appartenant à la section cisillée et m' sa position finale ou position après déformation (Figure II.5.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 pur (Figure II.5.b)



a : schéma de principe de l'essai de cisaillement ; **b** : courbe de cisaillement pur.[29]

Figure II.5 : Schéma et courbe de cisaillement pur

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 r_e (limite élastique en cisaillement du matériau), la relation contrainte déformation n'est plus linéaire ni réversible.

Pour $T/S > r_e$, 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 $0 \leq T/S \leq r_e$ à $T=0$, une déformation résiduelle subsiste).[29]

On remarque ainsi deux domaines de comportement :

- ❖ Le domaine élastique linéaire défini par 0 .
- ❖ Le domaine plastique défini par $T/S = r_e$.

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

$$r_e = \mu_y = G_y$$

$$\mu = G = E/2(1+\nu)$$

Avec :

μ : Module de coulomb ou deuxième coefficient de lamé(GPa) .

γ : L'angle de cisaillement (rad).

G : Module de glissement (GPa).

E : Module de Young (GPa).

II.1.2.2. Essai de compression

La mécanique des polymères en compression est différente de celui en comportement de traction. De ce fait vient l'utilité de l'essai de compression pour le matériau de cette étude.

Pour cet essai la forme des éprouvettes est classique. Les valeurs du diamètre et de la hauteur proches ou égaux évitent le flambement des éprouvettes. Le dispositif de compression est composé de deux plateaux circulaires. L'un montés sur la traverse mobile de la machine et l'autre sur le banc de la machine. Dans le cas de ce type d'essais, les difficultés principales restent le frottement entre le matériau et les plateaux de compression et l'assurance de la coaxialité de ces derniers.

Pour y remédier, les surfaces de contact sont lubrifiées avec de la graisse pour permettre le glissement de ces dernières. Toutefois, lorsque les efforts sont importants, le glissement n'est pas toujours parfait et la graisse peut être chassée vers l'extérieur et l'effet tonneau peut se créer et conduire à un état de contrainte inhomogène. [1]

Les éprouvettes à une forme cylindrique, cubique ou sous forme de table (Tableau II.1)

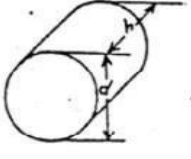
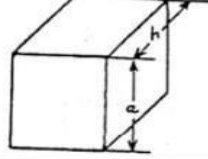
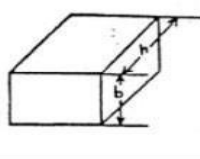
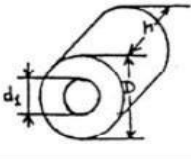
Cylindrique	Prisme carré	Prisme rectangulaire	Tube cylindrique
			
$h = 2,5 \cdot d$	$h = 2,9 \cdot a$	$h = 2,9 \cdot b$	$h = 2,5\sqrt{D^4 + d^2}$
$h_1 = 1,5 \cdot d$	$h_1 = 1,74 \cdot a$	$h_1 = 1,74 \cdot b$	$h_1 = 1,5\sqrt{D^4 + d^2}$

Tableau II.1: Forme et dimension normalisées de l'éprouvette compression

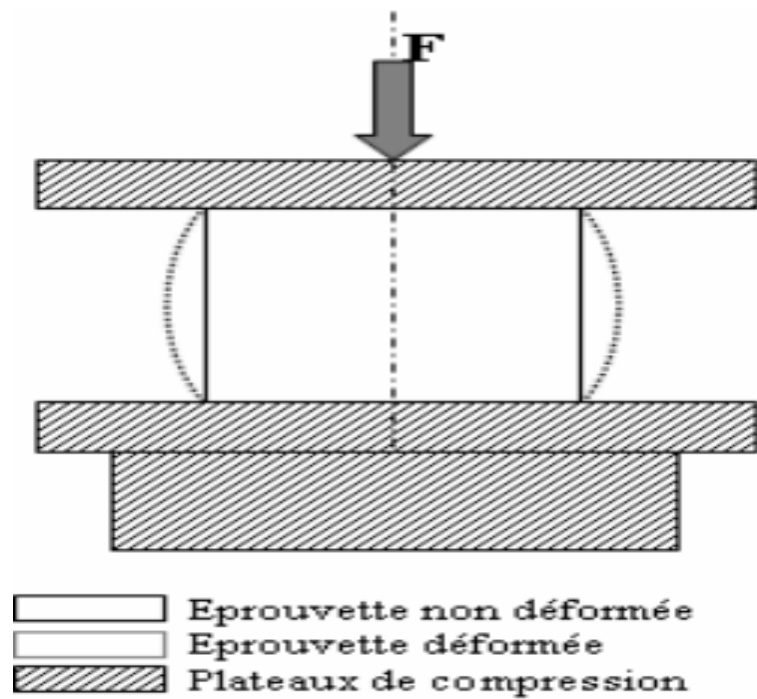


Figure II.6 : Schématisation de l'éprouvette et du dispositif de compression. [1]

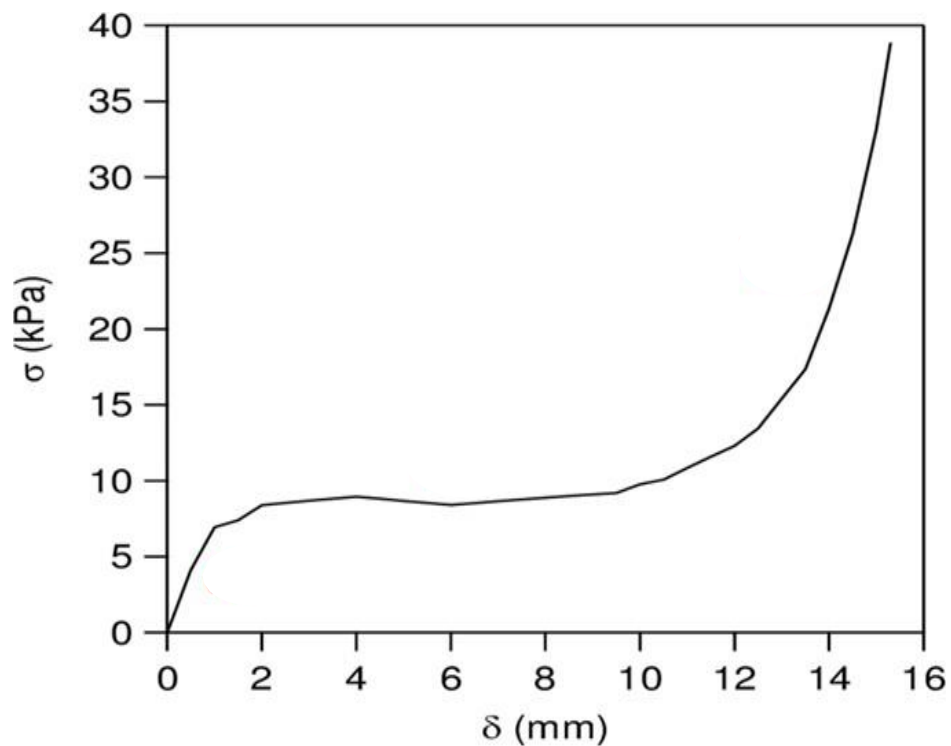


Figure II.7 : Courbe contrainte-déformation lors d'un essai de compression uni-axiale d'une mousse

II.2.2.3. Essai de flexion

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 (moyennement 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. Nous donnons sur (la Figure 7) le principe de l'essai de flexion 3 points.

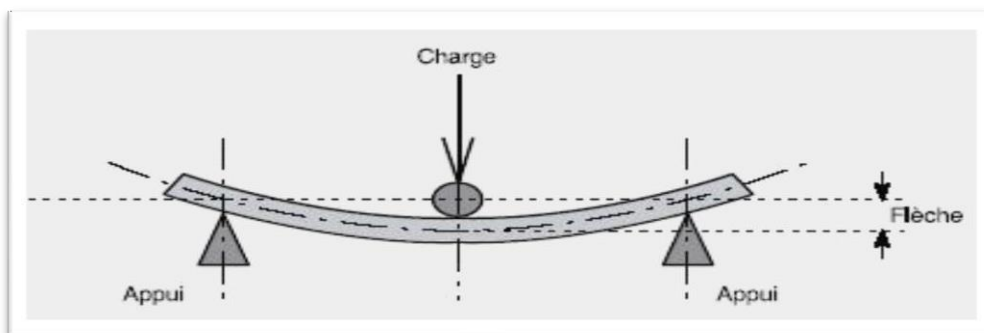


Figure II.8 : Principe de l'essai de flexion 3 points

II.2.4. Essai de torsion uniaxiale

II.2.4.1. Principe de l'essai de torsion

Les essais de torsion sont un type d'essai mécanique qui évalue les propriétés des matériaux ou des dispositifs lorsqu'ils sont soumis à des contraintes dues à un déplacement angulaire. Les essais de torsion peuvent être divisés en deux catégories distinctes : l'essai de matières premières comme les fils métalliques ou les tubes en plastique pour déterminer des propriétés telles que la résistance au cisaillement et le module, ou l'essai fonctionnel de produits finis soumis à la torsion, comme les vis, les bouteilles pharmaceutiques et les câbles gainés. Les propriétés mécaniques les plus courantes mesurées par les essais de torsion sont les suivantes :

- Module d'élasticité en cisaillement
- Résistance au cisaillement au seuil d'élasticité

- Résistance ultime au cisaillement
- Module de rupture en cisaillement
- Ductilité.

Le dispositif expérimental peut être schématisé de la manière suivante :

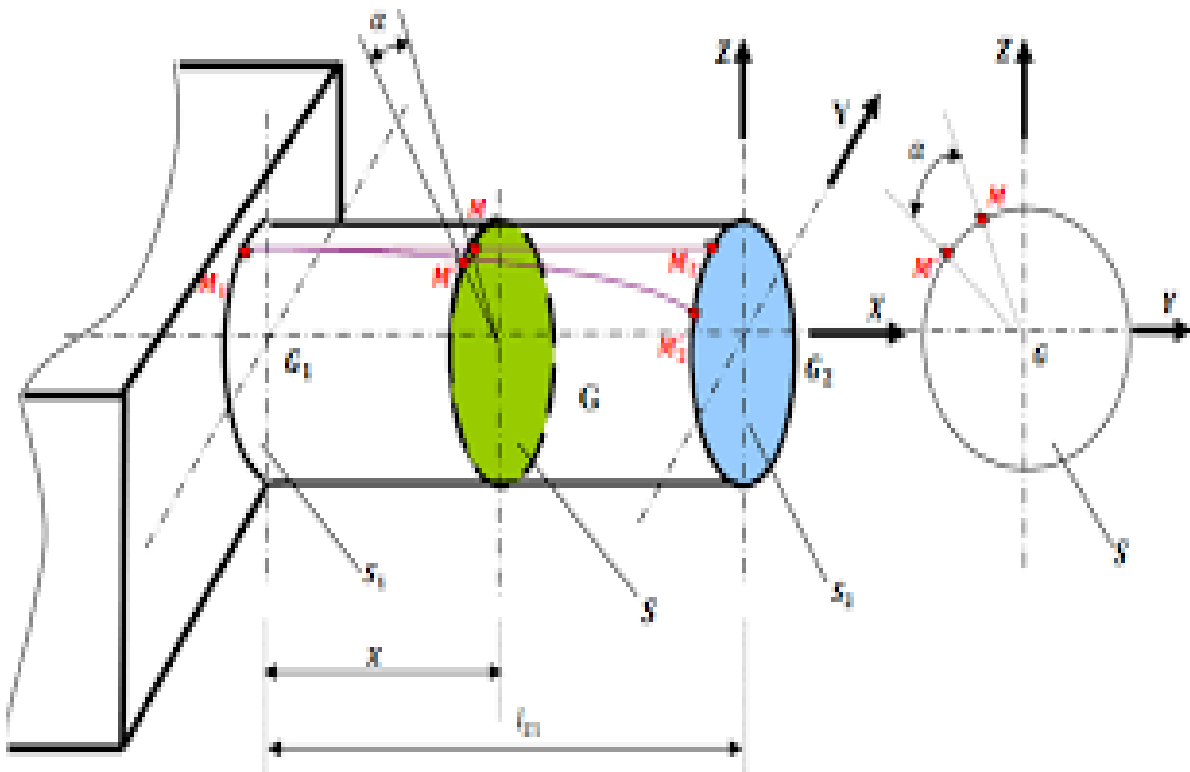


Figure II.9: Schéma de principe d'essai de torsion

II.2.4.2. 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.

II.2.4.3. But d'essai de torsion uniaxiale

Cet essai a pour but de déterminer la variation de l'angle de torsion due à la charge qui s'applique en extrémité qui développe un moment de torsion. En variant les nuances de la poutre et leur dimension pour mesurer expérimentalement de la déterminer théoriquement.

II.2.5. Essai de fatigue

L'essai de fatigue consiste à appliquer sur une pièce une charge variable alternée (la moyenne des contraintes appliquées est nulle) ou répétée (la moyenne des contraintes appliquées est non nulle). Il va essayer de reproduire au mieux les conditions d'exploitation de la pièce. Les ruptures par fatigue sont associées essentiellement au nombre total d'applications d'une charge et non au temps de service ou à l'âge de la pièce. La rupture par fatigue ne donne aucun signe préalable avant de casser, c'est pourquoi elle peut très souvent surprendre l'expérimentateur.

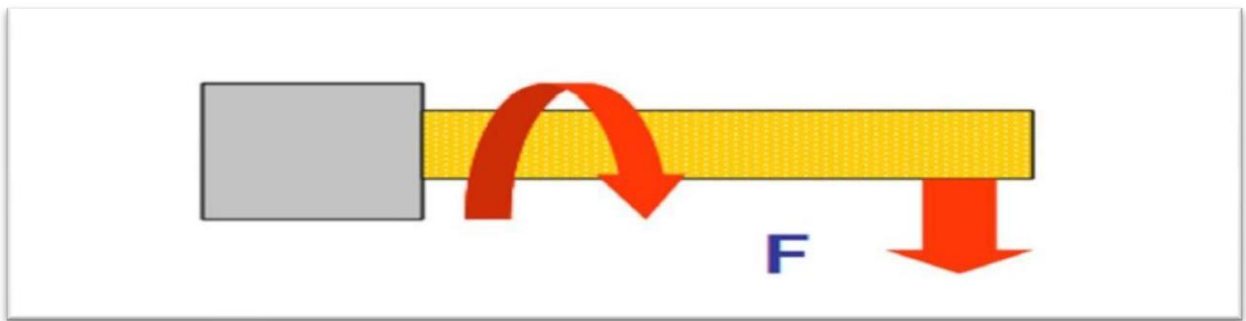


Figure II.10: principe de l'essai de fatigue par flexion rotative ou charge axiale.

II.3. 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-torsion (ou compression), les essais de traction biaxiale. L'essai de traction cisaillement est le plus riche pour tester les aspects d'anisotropie. Nous présenterons ici les essais de traction biaxiale et les essais de traction-torsion.

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.

II.3.1. Essai de traction biaxiale

Les essais de traction biaxiale consistent à exercer une contrainte dans deux directions perpendiculaires sur une même éprouvette. Ceci impose d'utiliser des éprouvettes cruciformes, comme celle présentées sur la figure II.10. Pour réaliser des états de contrainte uniformes, il faut que les bras de la croix aient des rigidités transversales assez faibles, ce que l'on peut obtenir en les évidant. Les directions principales des contraintes sont fixées et on peut effectuer des chargements dans l'espace de contraintes tels que celui présenté sur la figure II.10. (Image de gauche). [30]

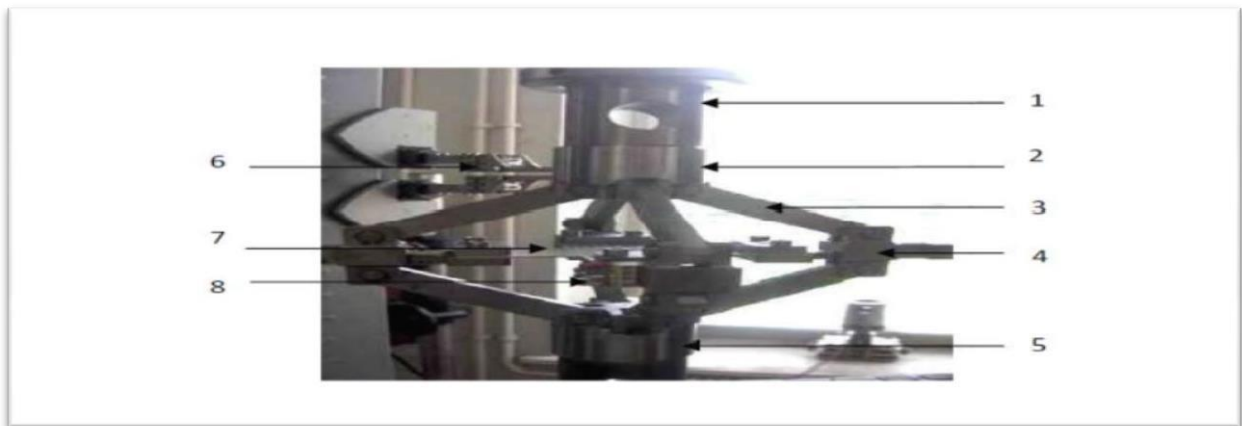


Image de gauche : éprouvette de traction biaxiale montée. Image du centre : dispositif de traction biaxiale du laboratoire 3S à Grenoble. Image de droite : Chemin mécanique pouvant être appliqué sur une éprouvette lors d'essais de traction biaxiale.

Figure 1 II.11: Essais de traction biaxiale

II.3.1.1 Machine d'essai de traction biaxial

Le dispositif de traction biaxiale 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 [31].



1-Partie supérieure, 2-Tête supérieure, 3-Bras, 4-Mors, 5-Tête inférieure, 6-Système de guidage, 7-Eprouvette, 8-Caméra d'acquisition

Figure II.12 : L'ensemble de la machine

II.3.1.2 Epreuve de traction biaxiale

L'éprouvette de traction biaxiale est chargée dans deux directions (horizontale). Les flèches indiquent la contrainte nominale. Une contrainte particulièrement élevée, appelée contrainte d'entaille, se produit dans les angles de l'éprouvette de traction biaxiale pendant l'essai. Les trajectoires de contrainte sont indiquées par des lignes rouges. [32]

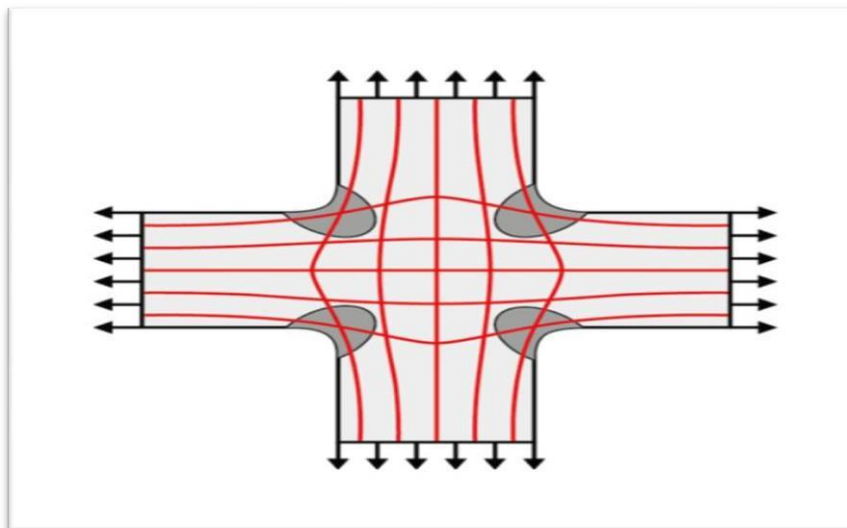


Figure II.13 : Eprouvette cruciforme de traction biaxiale [32]

On présente différentes éprouvettes dans le tableau II.2.

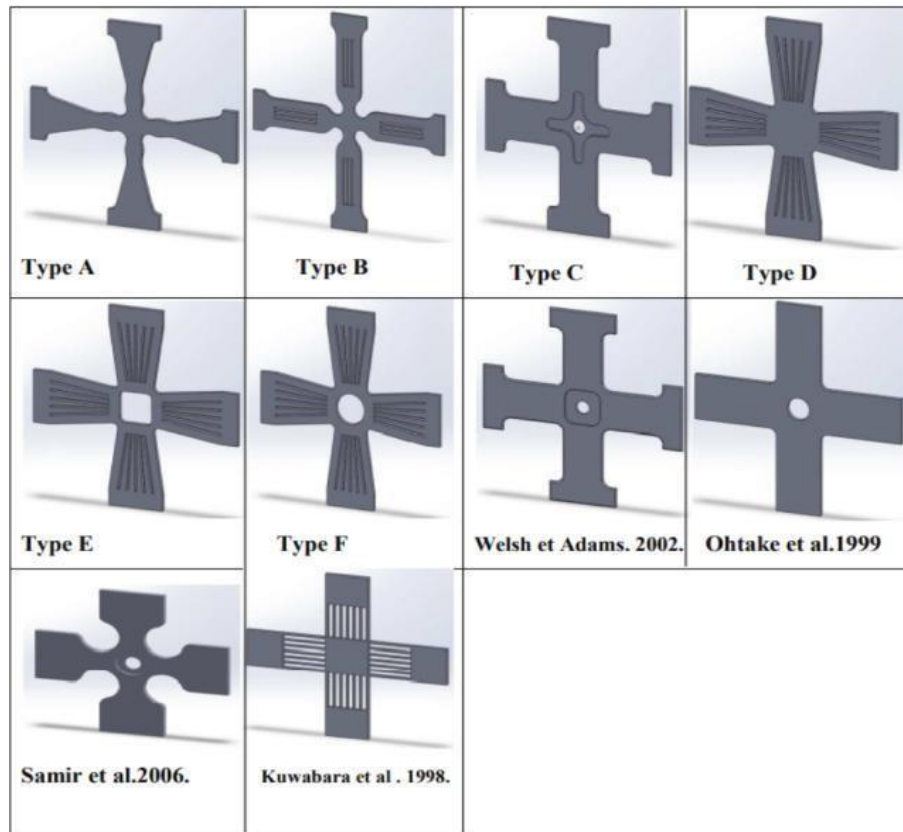


Tableau II.2. Différentes éprouvettes biaxiales

II.3.2 Essai de traction-torsion

C'est un essai mécanique qui permet de solliciter une traction et une torsion indépendamment ou simultanément sur une éprouvette de forme cylindrique (figure.II.13).

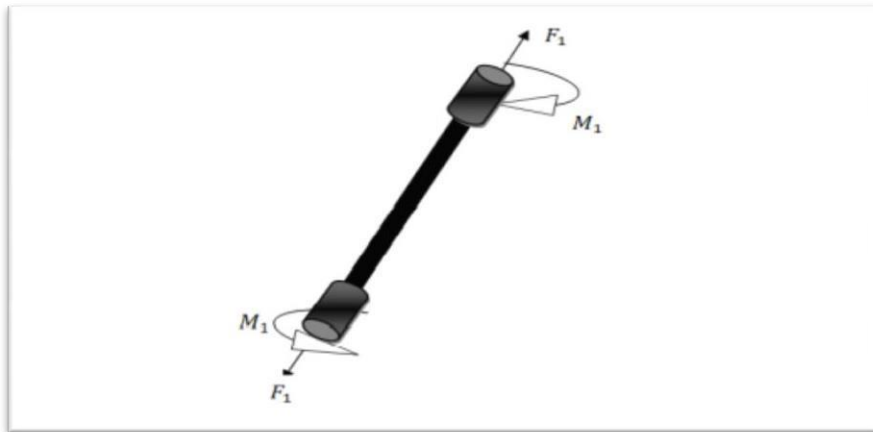


Figure II.14 : Schéma cinématique de la traction-torsion

Ou bien est un essai qui 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. [30]

La figure II.14 présente un dispositif de traction-torsion du CdM et un exemple de chemin mécanique dans l'espace des contraintes pouvant être appliqué à une éprouvette.



Image de gauche : dispositif de traction-torsion du Centre des Matériaux, image de droite : chemin mécanique pouvant être appliqué sur une éprouvette lors d'essais de traction torsion.

FigureII.15: Essais de traction torsion

II.3.1.1 Principe de l'essai

Pour déterminer la loi de comportement en contraintes biaxiale, l'essai le plus utilisé consiste à solliciter un tube mince à la fois en torsion (figure II.22). Ce type d'essai permet d'étudier les trajets de chargement avec des modifications des directions principales des contraintes de découplages. [31]

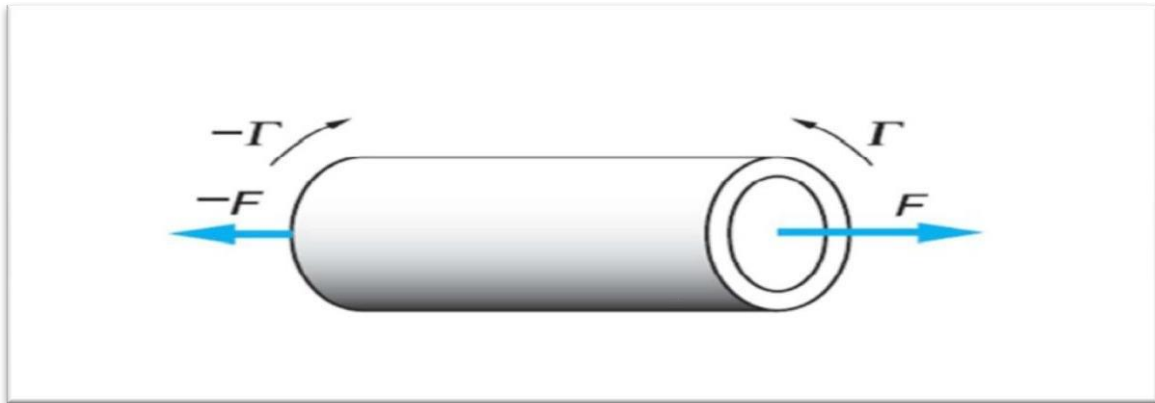


Figure II.16: Eprouvette tubulaire sollicité traction-torsion. [31]

II.3.3. Essai de traction-compression

II.3.3.1. 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 mince à la fois à la traction et compression interne (Figure II.16). Le tube doit être relativement long pour éviter les efforts d'extrémités et les attaches particulièrement soignées pour éviter toute concentration de contraintes.

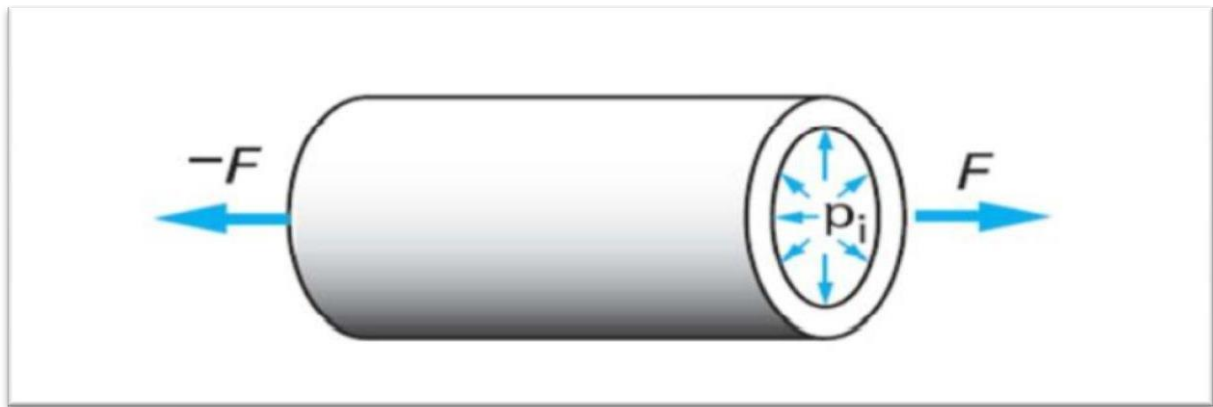


Figure II.17: Tube à parois minces sollicité en traction-compression.

II.3.4. L'essai Arcan : traction-cisaillement

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. [1]

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

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents types d'essais mécaniques et les différentes éprouvettes utilisées pour chaque type d'essais. On a aussi décrit les essais uniaxiaux qui permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux telles que la limite d'élasticité, la résistance du matériau, le module de Young et l'allongement des matériaux.

Ensuite on a décrit quelques essais biaxiaux qui permettent de générer des états de contraintes diverses.

CHAPITRE III :

Méthodes expérimentales

III.1. Introduction

Dans ce travail, on a utilisé les résultats expérimentaux obtenus dans un travail de recherche sur le comportement du polyéthylène à haute densité en chargement biaxiale « traction-cisaillement » [1] L'étude est portée sur le cas du cisaillement pur sur une éprouvette de forme particulière appelée « éprouvette papillon ».

III.2. Principe de l'essai de traction-cisaillement

L'essai de cisaillement pur est réalisé en utilisant un dispositif Arcan dont l'objectif est de développer dans la section centrale d'une éprouvette papillon une contrainte normale σ_x et une contrainte tangentielle τ_{xy} en appliquant un effort vertical F (figure III.1). L'orientation de la section centrale par rapport à la verticale doit s'effectuer par le réglage de l'angle α . Le sens de l'effort F et la valeur de l'angle α permettent de développer de différents états de contrainte plane : de la traction/compression simple, traction/compression et cisaillement combiné au cisaillement simple (tableau III.1).

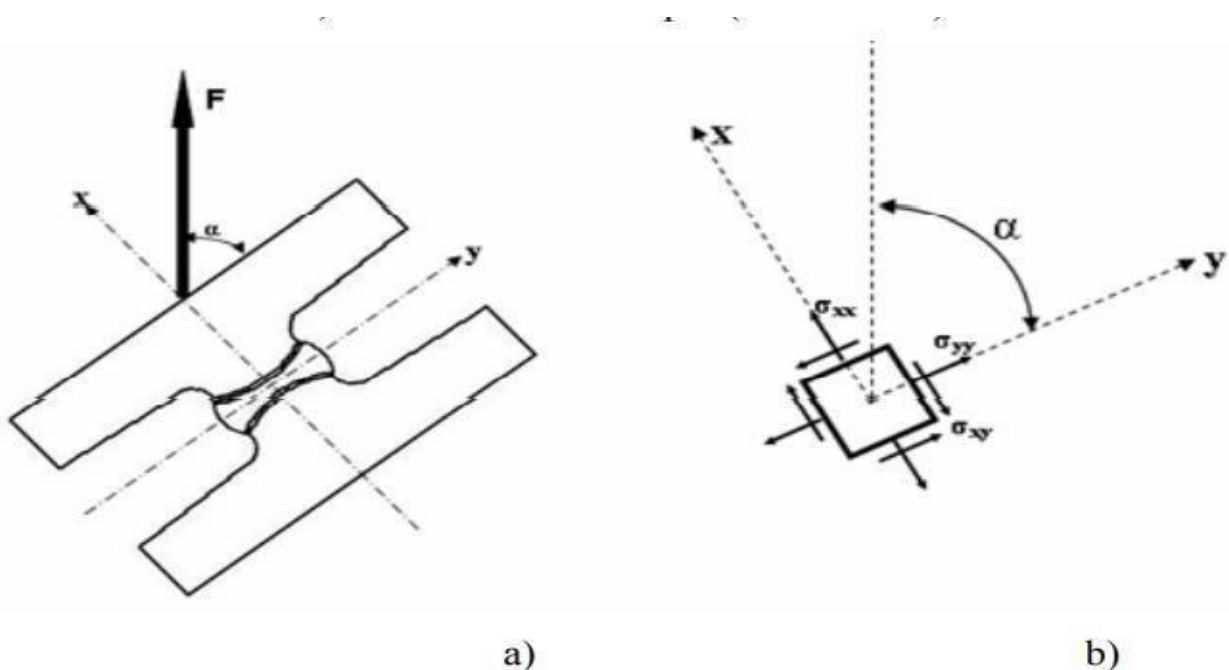


Figure III.1 : a) Eprouvette papillon en chargement biaxial
b) Etat de contrainte plane développée au centre de l'éprouvette papillon.

L'angle α	Sens de l'effort F	Etat de contrainte
90°	Positif	Traction
90°	Négatif	Compression
00°	Positif (ou négatif)	Cisaillement
$0^\circ < \alpha < 90^\circ$	Positif	Traction / Cisaillement combiné
$0^\circ < \alpha < 90^\circ$	Négatif	Compression / Cisaillement combiné

Tableau III.1. Type de l'état de contrainte plane développée dans la section centrale de l'éprouvette papillon.

III.3. Principe de fonctionnement :

L'appareil Arcan utilisé, est constitué de deux demi disques fixés à la machine de traction par des attaches. Le déplacement du demi-disque supérieur par rapport à l'autre est orienté verticalement dans le sens du chargement par des guides. Toute rotation ou glissement des éprouvettes sont prohibés durant les essais (Figure III.2). La figure III.3 montrent l'éprouvette papillon montée sur le dispositif avec une orientation $\alpha=60^\circ$ par rapport à la verticale. Par des changements souhaitables de l'orientation de l'éprouvette avec le respect de la direction de chargement (déplacement vertical de la traverse de la machine de traction), différents états de contrainte peuvent être développés au centre de l'éprouvette : traction simple, compression simple, traction et cisaillement combiné, compression et cisaillement combiné, et cisaillement pur. Les essais ont tous été réalisés sur une machine hydraulique de traction de marque INSTRÖN à une vitesse constante de la traverse ($v=0,5$ mm/mn) et à la température ambiante. La force de réaction verticale de l'éprouvette est mesurée par une cellule de charge de 5kN.

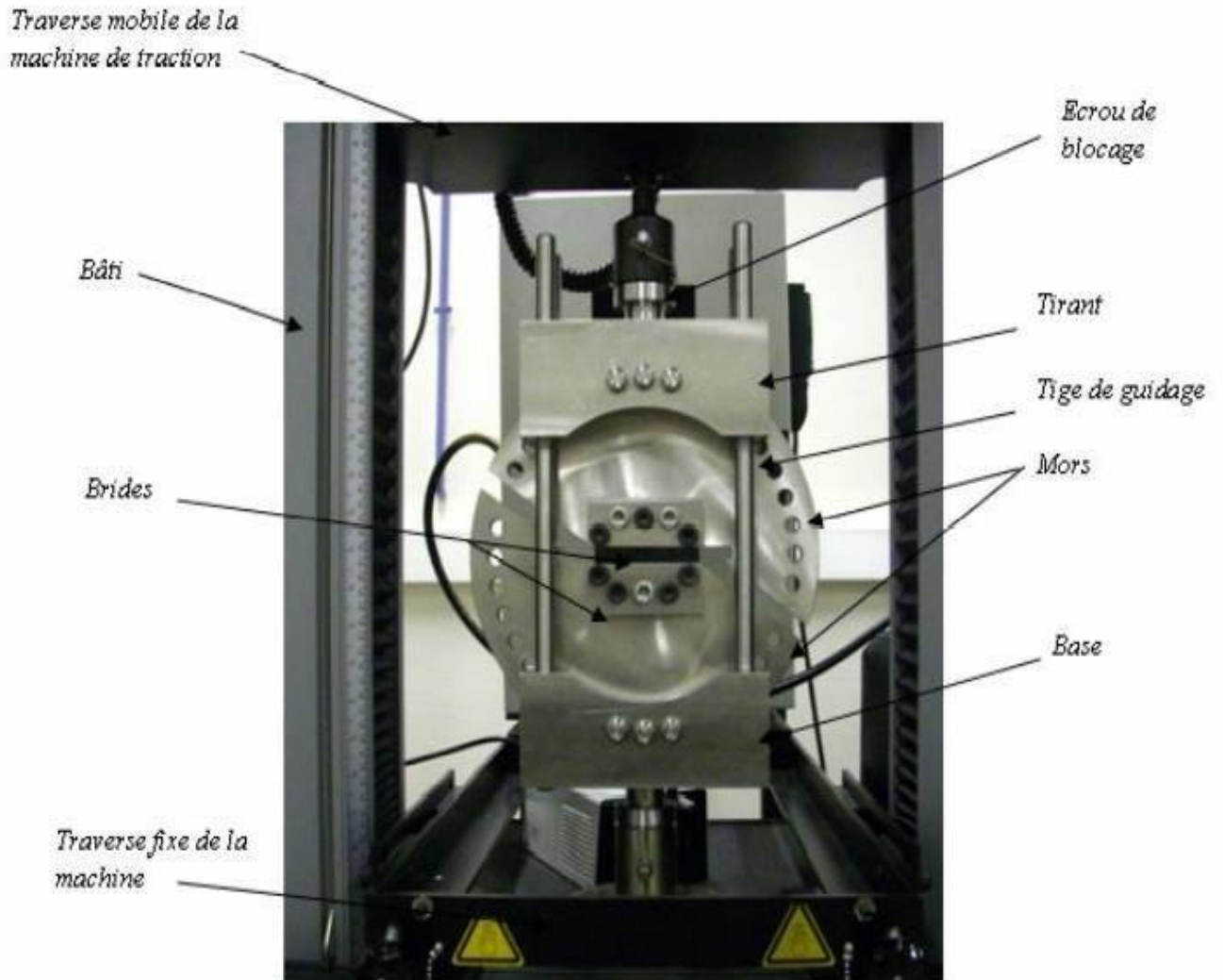


Figure III.2 : Dispositif de l'essai Arcan fixé sur la machine de traction

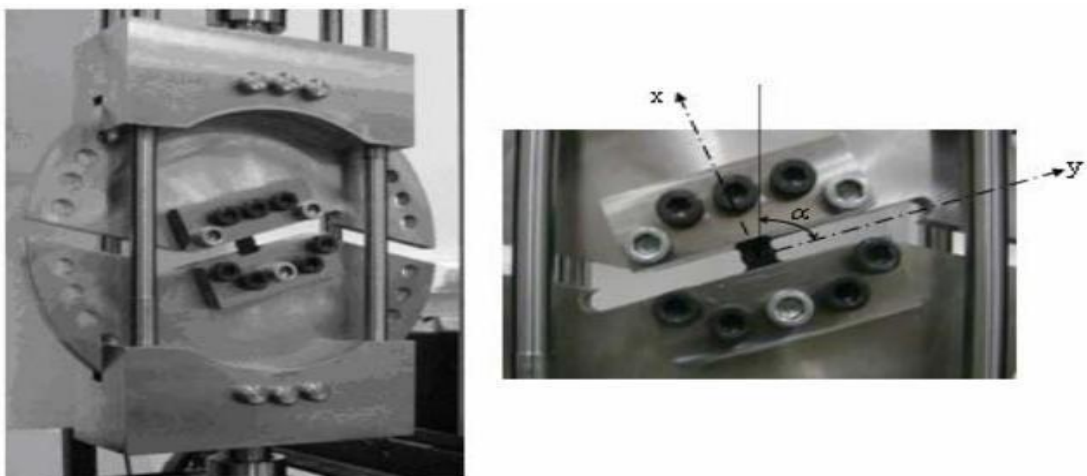


Figure III.3 : Montage de l'éprouvette papillon sur le Dispositif Arcan

III.4. Essai de cisaillement pur :

Dans ce cas, l'éprouvette papillon est fixé sur le dispositif Arcan avec l'angle $\alpha=00^\circ$ (figure.III.4). L'effort vertical F développé par la machine de traction génère un effort tranchant, donc une contrainte de cisaillement dans la section de la région centrale de l'éprouvette.

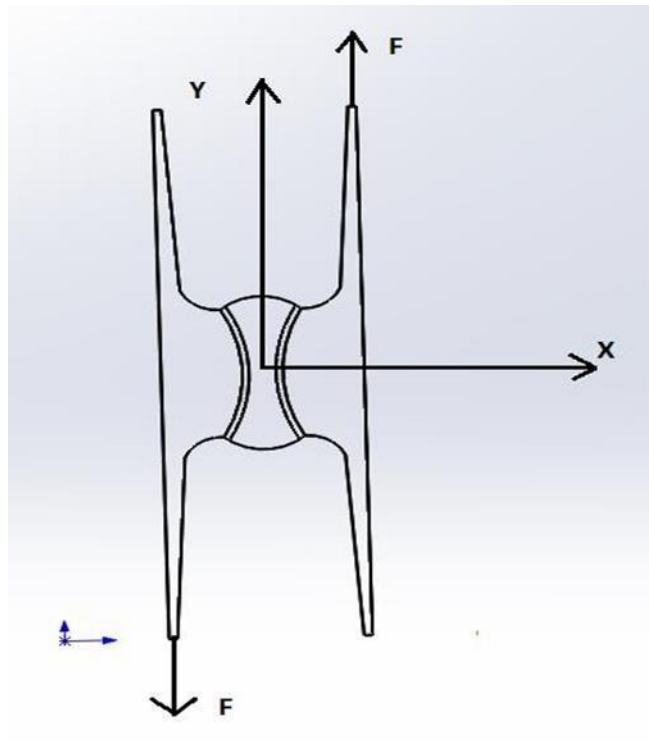


Figure III.4: Epreuve papillon en cisaillement pur

III.5. Résultat de l'essai :

Le résultat de l'essai de cisaillement pur est donné sous forme d'une courbe force-déplacement comme illustré dans la figure III.5. La forme générale de cette courbe présente une réponse élastique linéaire initiale est suivie par une réponse non linéaire qui s'accroît avec le déplacement, jusqu'à ce que sa pente devienne presque nulle. Dans la partie linéaire, les caractéristiques de l'élasticité du matériau : le module de Young et la limite d'élasticité peuvent être déterminées.

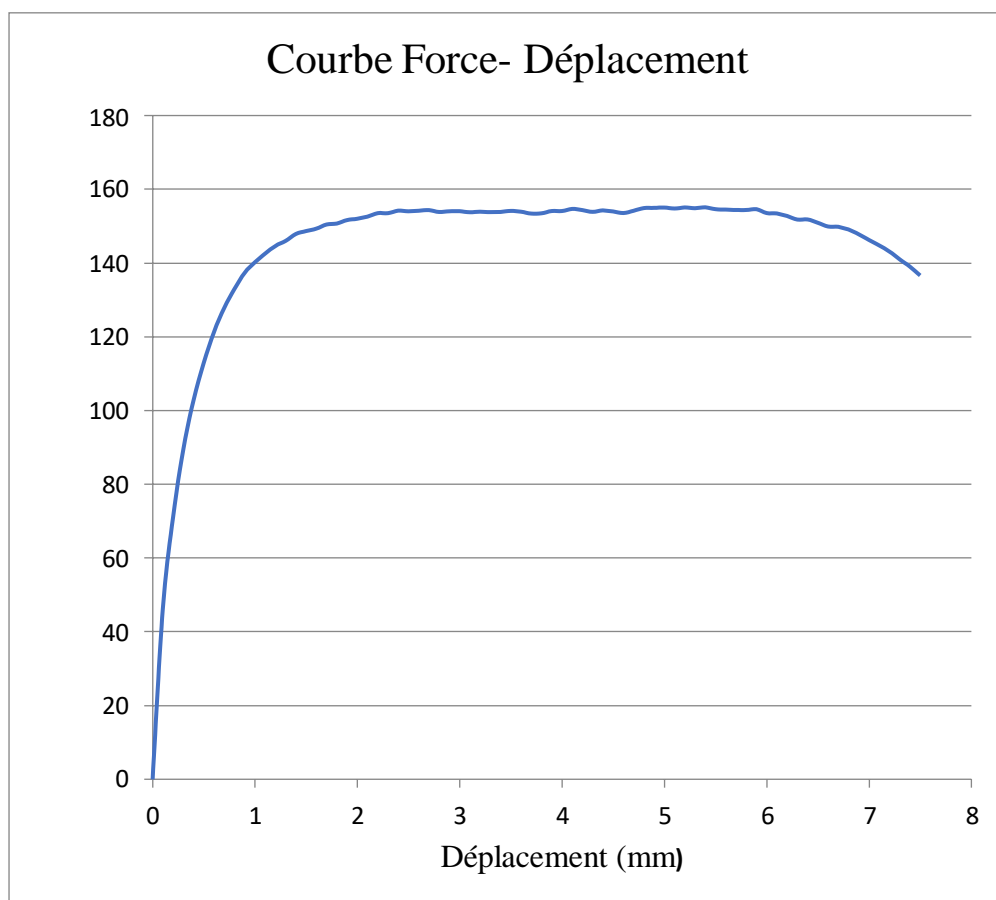


Figure III.5: courbe force-déplacement

Dans ce travail, l'état de contrainte élastique en biaxial dans la section centrale de l'éprouvette, peut donc être évalué en utilisant les expressions analytiques développées par Doyoyo et Wierzbicki [33] Dans le cas de cisaillement pur, la contrainte tangentielle σ_{xy} est calculée par la relation 3.

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} \left[\frac{\beta \sin \alpha}{(1 - \beta \cos^2 \alpha + \beta)} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \nu \sigma_{xx} \quad (2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{F}{S} \left[\frac{\cos \alpha}{1 - (1 - \beta) \sin^2 \alpha} \right] \quad (3)$$

Où : σ_{xx} et σ_{yy} sont les contraintes normales, σ_{xy} est la contrainte tangentielle, x et y sont les axes perpendiculaire et parallèle à la section centrale respectivement, et α est l'angle de chargement. La constante β est définie par la formule $\beta = 2/(1 - \nu)$, où ν est le coefficient de poisson. F désigne la force verticale appliquée et $S = lt$ la section au centre de l'éprouvette avec l sa largeur et t son épaisseur.

La courbe contrainte-déformation découlant des relations précédentes est donnée dans la figure III.6. Elle présente la même allure que celle décrivant la force en fonction du déplacement.

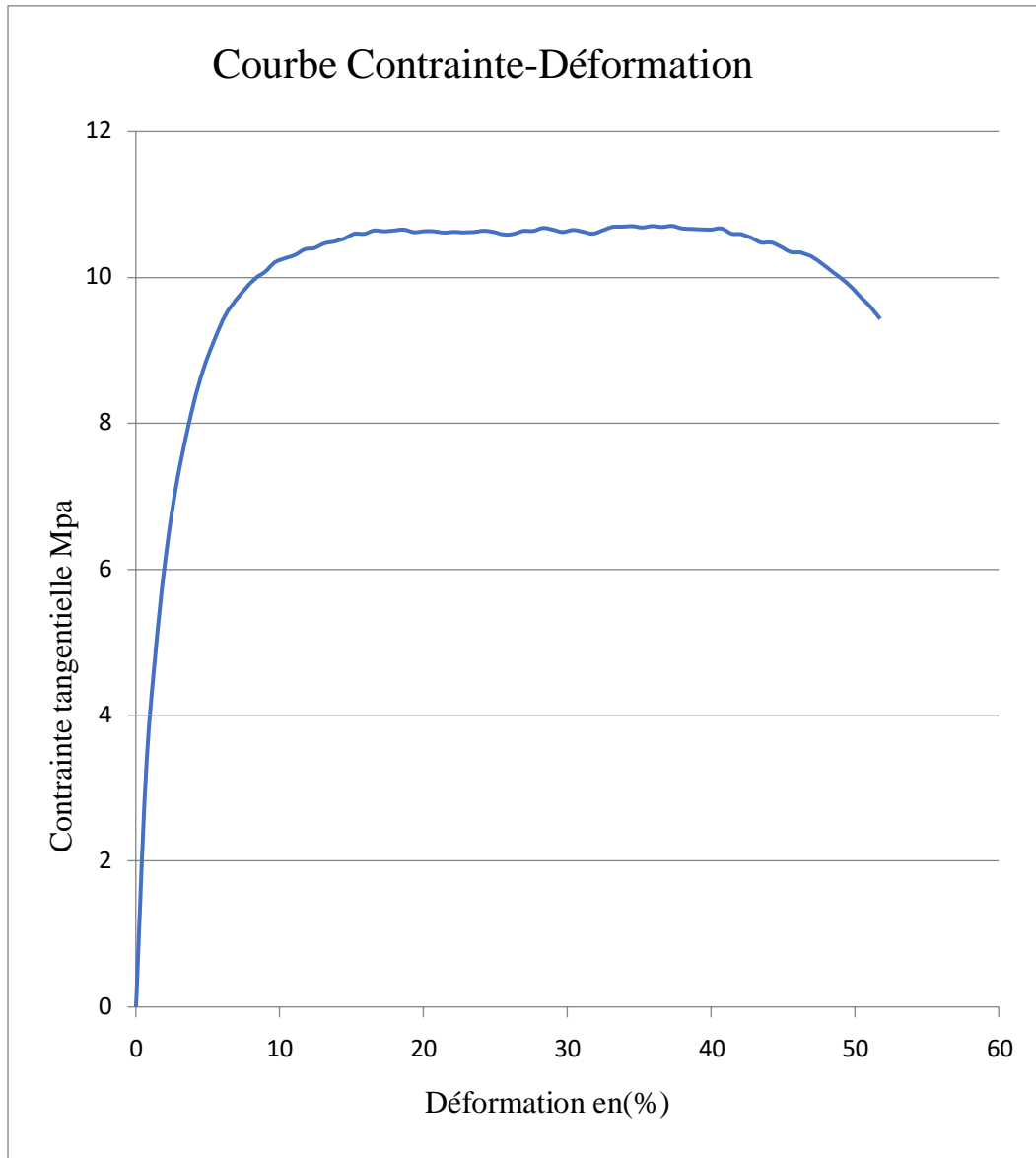


Figure III.6: courbe contrainte-déformation

III.6. Conclusion :

On a traité dans ce chapitre l'essai de cisaillement pur sur une éprouvette papillon en polyéthylène à haute densité, et on a présenté le dispositif Arcan utilisé. Les résultats sont présentés en termes de courbes Force- Déplacement et Contrainte- Déformation.

CHAPTRE IV :

**Simulation de l'essai de
cisaillement**

V.1. Introduction

La résolution analytique des problèmes mécaniques ne peut se faire que dans un nombre de cas limité, cependant les méthodes numériques basées sur la discrétisation de ses problèmes, présentent une alternative très efficace, souvent utilisées dans le domaine de la mécanique pour résoudre de problèmes complexe.

La méthode des éléments finis est la méthode de discrétisation la plus utilisée car elle peut traiter des problèmes de géométrie complexe, elle couvre de nombreux domaines de la physique. Les moyens informatiques actuels (puissance des calculateurs, outils de visualisation et de simulation) la rendent facile à la mise en œuvre. Elle est la méthode la plus utilisée actuellement, son champ d'application ne cesse de s'élargir, Le succès de la méthode est que sa formulation utilise des procédés standards qui se répètent au cours de la résolution de problèmes de natures différentes. De nombreux logiciels basés sur cette méthode, généraux ou dédiés sont disponibles sur le marché. Nous consacrons le présent chapitre à la simulation numérique à l'aide du logiciel de calcul (ABAQUS) pour étudier et déterminer le comportement du polyéthylène à haute densité d'une éprouvette papillon soumise à un cisaillement pur.

IV.2. Simulation numérique :

La simulation numérique par éléments finis permet de mettre au point des études sans avoir recours à la méthodologie expérimentale et de bien décrire les comportements des pièces ou éprouvettes soumises à des contraintes données.

La figure IV.1, présente un exemple de pièce simulé numériquement. Elle montre le maillage et la distribution du champs des contraintes dans les différentes parties de la pièce.

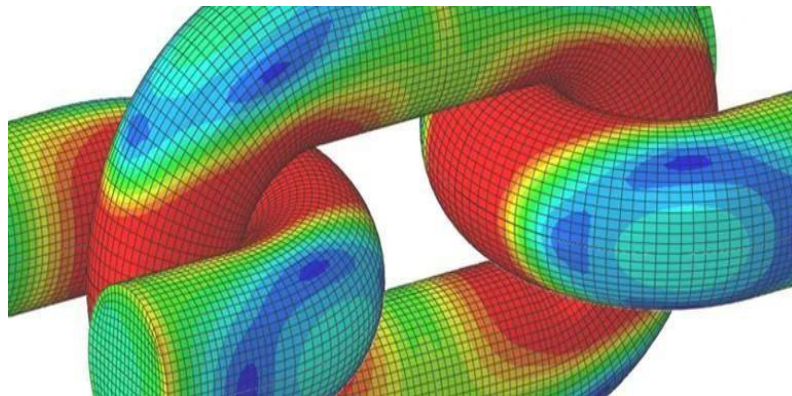


Figure IV.1 : méthode des éléments finis

IV.2.2. Présentation du code de calcul Abaqus

Pour réaliser la modélisation d'une structure par éléments finis, il existe plusieurs logiciels parmi lesquels on peut citer :

- ❖ ANSYS : Logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : traitement de géométrie, maillage, résolution, traitement de résultats et optimisation ;
- ❖ NASTRAN : Logiciel utilisant la méthode des éléments finis qui a été initialement développé par la NASA, à la fin des années 60 ;
- ❖ CATIA : Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée ;
- ❖ ABAQUS : Pour son historique, Abaqus a été développé en 1978 par Hibbit, Karlsson et Sorensen au début de la théorie des éléments finis. Il a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie. Il a été racheté par Dassault Systèmes en octobre 2005 et est devenu SIMULIA. Abaqus est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés. Il est connu et répandu pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires.

Un logiciel de modélisation idéal est celui qui permet de modéliser rapidement et facilement un problème, allant des éléments simples (poutres, poteaux, dalles en acier sur appuis simples) aux plus complexes (structures ayant plusieurs matériaux avec un comportement du matériau linéaire et une interface complexe). Il est important pour l'utilisateur d'avoir une idée précise sur ce qu'il veut faire, surtout lorsqu'il s'agit de choisir le maillage et le type d'éléments devant être adaptés au problème posé : cette vigilance permettrait à l'utilisateur de mieux analyser les solutions approchées.

Le cœur du logiciel est appelé « moteur de calcul ». À partir d'un fichier de données (caractérisé par l'extension. inp) qui décrit l'ensemble du problème, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier odb. Il faut ensuite générer le fichier de données (prétraitement) et exploiter les résultats contenus dans un fichier. odb (post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques et les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc. Abaqus propose le module Abaqus/cae, interface graphique permettant de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation.

Ce logiciel travaille sans unités, il est donc recommandé de les prendre en compte tout au long du calcul.

Quantity	SI
Length	<i>mm</i>
Force	<i>N</i>
Mass	<i>t (10³)</i>
Time	<i>s</i>
Stress	<i>MPa (N/mm²)</i>
Energy	<i>mJ (10⁻³)j</i>
Density	<i>t/mm²</i>

Tableau IV.1 : Tableau des unités

Le choix du logiciel Abaqus pour modéliser ce problème n'est pas fortuit car il répond parfaitement à l'attente et aux exigences : sa rapidité dans le prétraitement, la possibilité qu'il offre des solutions puissantes et complètes pour répondre aux problèmes d'ingénierie courants ou complexes au sein d'un large éventail d'applications industrielles. Dans le secteur automobile, les groupes d'ingénieurs peuvent prendre en compte la totalité des charges des véhicules, les vibrations dynamiques, les systèmes intégrant plusieurs carrosseries, les impacts/collisions, les éléments statiques non linéaires, le couplage thermique et le couplage acoustique-structure à l'aide de la structure de données d'un modèle commun et d'une technologie de solveurs intégrée. Il convient de noter qu'il est composé de trois sous-produits : Abaqus/standard, Abaqus/explicit et Abaqus/cae dynamique ou quasi-statique tandis que l'autre sous-produit, c'est-à-dire Abaqus/Standard utilise la méthode implicite qui adapte le problème statique.

a) Abaqus/Standard :

ABAQUS est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.

- ❖ Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks
- ❖ Problèmes linéaires et non linéaires

Géométrie 1D, 2D, 3D et axisymétrique

- ❖ Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.

b) Abaqus/Explicit :

ABAQUS/Explicit est un schéma d'intégration pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non linéaires.

- ❖ Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle)
- ❖ Problèmes transitoires et dynamiques des structures
- ❖ Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps

c) Abaqus/cae :

ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et optionnels, spécifiques à certaines applications.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

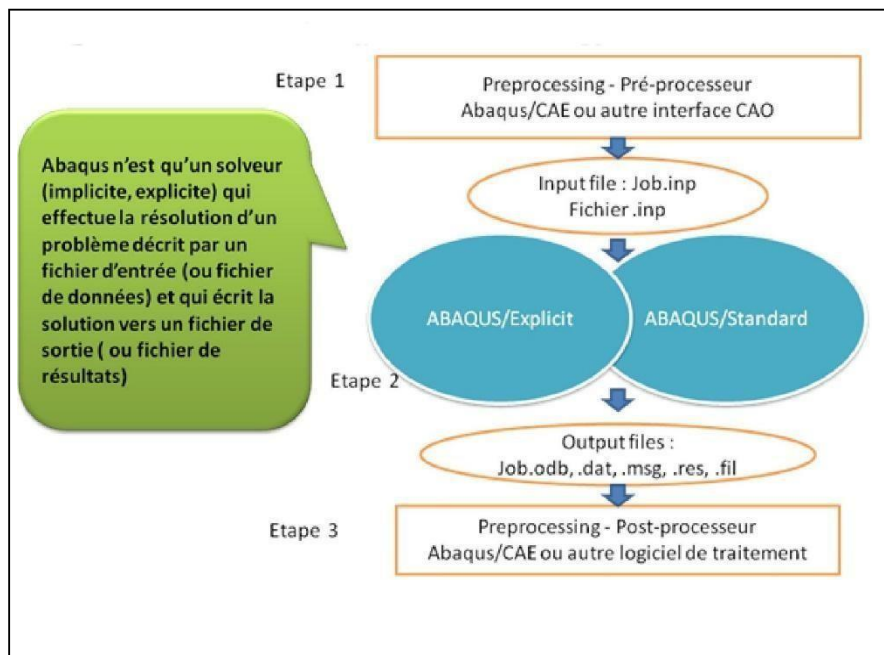


Figure IV.2 : structure d'une analyse sur abaqus

IV.2.3. Présentation de l'interface ABAQUS/CAE :

ABAQUS/CAE se présente sous la forme d'une interface graphique divisée en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation. ABAQUS/CAE se lance en entrant simplement la commande abaqus/cae.

IV.2.3.a. Modules d'Abaqus et étapes de modélisation

Le logiciel possède en tout neuf modules dont huit pour modéliser et introduire toutes les données nécessaires et le neuvième pour visualiser les résultats. Il s'agit des modules suivants :

- **Module Part**
- **Module Property**
- **Module Assembly**

- **Module Step**
- **Module Interaction**
- **Module Load**
- **Module Mesh**
- **Module Job**
- **Module Visualization**

- **Module Part :**

Ce premier module permet de créer des objets géométriques nécessaires au problème. Ces objets peuvent être soit dessinés dans Abaqus/CAE soit importés d'un logiciel de dessin. Le premier outil de ce module, « *create part* », permet de créer des pièces en fonction de leurs caractéristiques. Pour cela l'utilisateur doit d'abord définir l'espace de modélisation qu'il soit en 3D, en 2D ou en axisymétrique. La seconde étape consiste à définir le type de pièce (sa déformabilité) autant que ses caractéristiques mécaniques : solide, coque, fil ou point. Lorsqu'on travaille en trois dimensions comme c'est le cas dans ce projet.

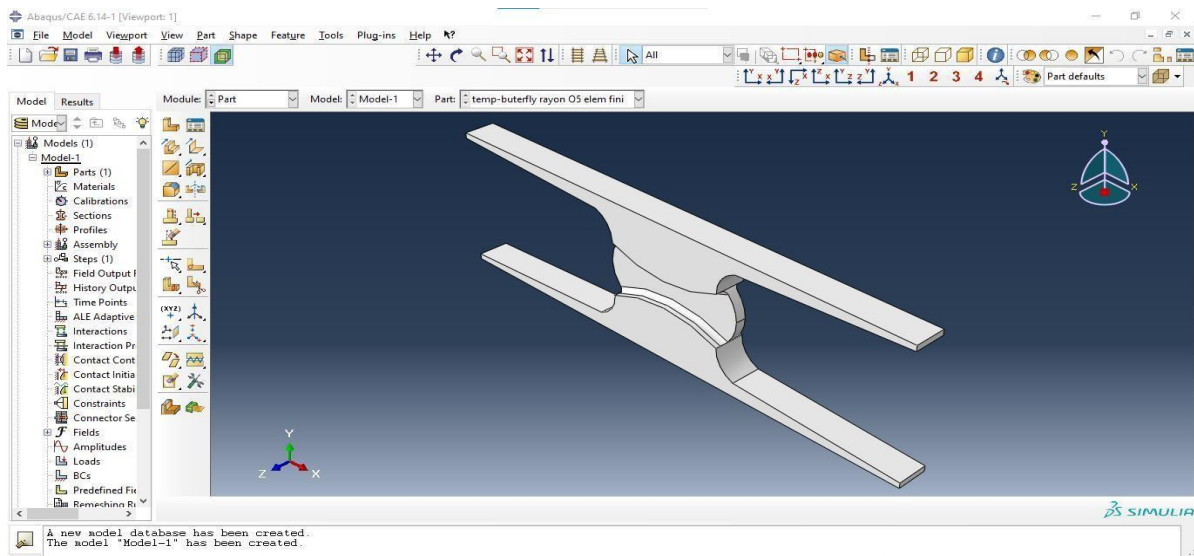



Figure IV.3 : module part

- **Module Property :**

Sa fonction principale est de définir les propriétés de l'objet à modéliser. Le module permet aussi de créer des matériaux et des sections et de leur affecter des repères d'orientation et des

types de profilés. La création des matériaux se fait avec l'outil « *create material* »  en définissant la loi de comportement du matériau de la pièce à modéliser tout en élaborant ses propriétés mécaniques, thermiques ou acoustiques. Le PEHD est le matériau qui a été défini dans ce travail.

- **Module Assembly :**

Le module Assembly permet d'assembler toutes les parties dans un même système de coordonnées. Chaque partie du modèle à réaliser se trouvant dans son propre système, indépendamment des autres parties.

- **Module Step :**

Il permet de définir des paramètres tels que l'incrémentation, la valeur du temps de pas et la valeur du temps final qui est un temps virtuel. C'est aussi dans cette partie qu'on introduit les variables de sortie nécessaires afin de les visualiser plus tard dans le module « *visualization* ».

- **Module interaction :**

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

- **Module Load :**

Il concerne les chargements et les conditions aux limites qui dépendent des Steps. Une force peut-être définie au Step 1.

Les conditions aux limites sont définies grâce à l'outil « *Create Boundary Condition* ». En fonction du travail et du résultat visé, on peut définir les conditions aux limites ou même imposer un déplacement, comme dans le cas de ce modèle en définissant l'amplitude.

- **Module Mesh :**

Grâce à ce module on peut générer un maillage élément fini sur un modèle ou un assemblage.

- **Module Job :**

Le module Job constitue en quelque sorte la partie qui synthétise tous les autres modules car il est utilisé pour analyser le modèle conçu. En effet, le calcul se fait à l'aide du module Job qui reprend les caractéristiques de celui-ci à partir du module Step.

- **Module Visualization :**

Comme l'indique son nom, ce module permet de visualiser le modèle ainsi que les résultats, les courbes de charges, les déformations et les contraintes.

- **Le module sketch :**

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

- **L'arborescence du modèle**

L'arborescence donne une description visuelle de la hiérarchie des objets du modèle. Tous les objets sont indiqués par de petites icônes avec en parenthèses le nombre de ces objets. L'ordre de l'arbre reflète l'ordre classique d'élaboration du modèle. A partir de cet arbre il est possible de retrouver la plupart des fonctionnalités de la barre de menu principale. Par exemple, double cliquer sur « *Part* » permet de créer une nouvelle « *Part* » comme sélectionner : *Part* « *Create* » dans la barre de menu.

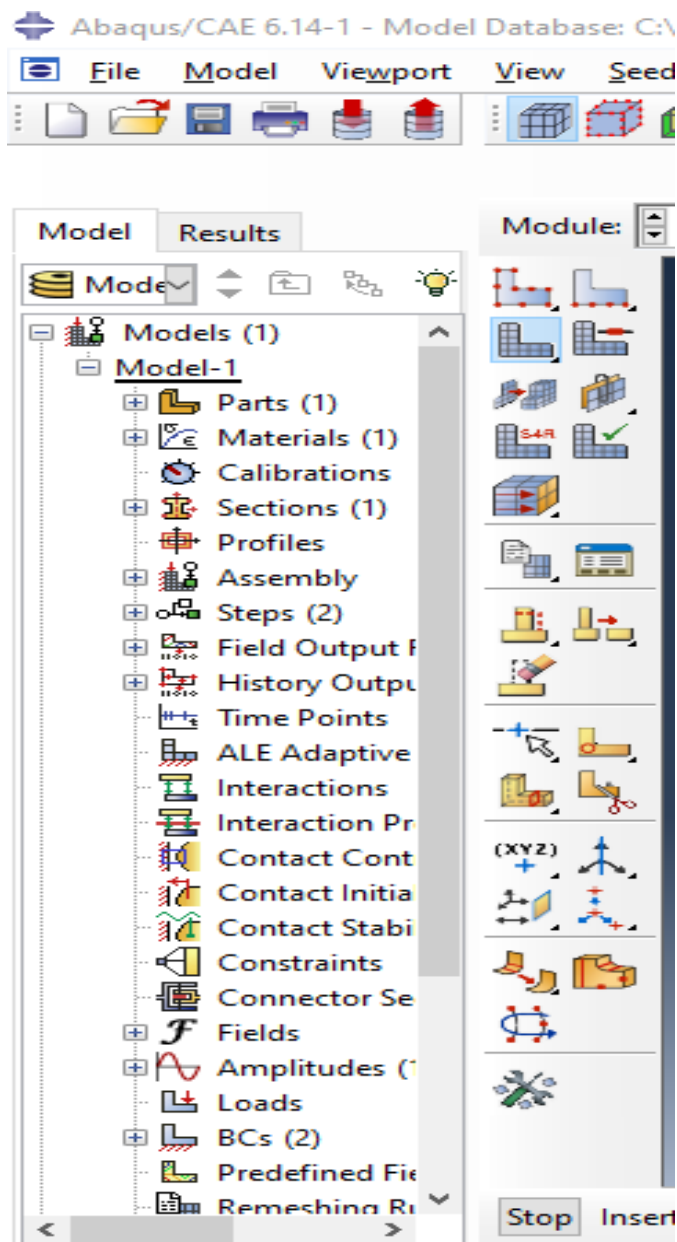


Figure IV.4 : l'arborescence du modèle

IV. 3. Simulation numérique :

IV. 3.1. Présentation du modèle

Le modèle étudié est une éprouvette papillon en PEHD. Son matériau est considéré homogène isotrope, et incompressible. La partie élastique de la déformation est supposée isotrope et le tenseur élastique est complètement défini par l'utilisation du module d'élasticité et le coefficient de poisson. Le module d'élasticité $E=850\text{MPa}$ est déterminé par la tangente de la partie linéaire de la réponse mécanique de l'éprouvette R80 en traction. Le coefficient de poisson $\nu =0,45$ a été déterminé par l'essai de vidéo traction sur une éprouvette lisse par le suivi des taches marquées sur sa surface. La valeur de la limite élastique égale à 8.65 MPa obtenue par la perte de linéarité de la courbe contrainte-vraie déformation-vraie issue de l'essai de traction sur l'éprouvette R80 ayant la plus faible valeur de triaxialité (0,33). La forme de l'éprouvette papillon étant complexe, contenant des arrondis dans deux plans différents, sa représentation sur ABAQUS est compliquée. De ce fait, l'éprouvette a été dessinée sur le logiciel SolidWorks, ensuite importée dans le code de calcul Abaqus (Figure.IV.5).

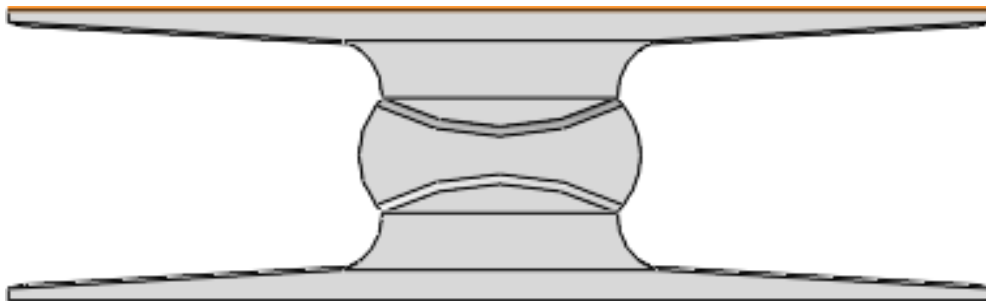


Figure IV.5 : le modèle étudié (éprouvette papillon)

IV.3.2. Problème mécanique

Dans cette partie du travail, on présente les différentes étapes de la simulation de l'essai de cisaillement sur l'éprouvette papillon.

IV.3.3. Introduction des conditions aux limites

Les conditions aux limites imposées à l'éprouvette papillon décrivent les conditions de déroulement de l'essai de cisaillement dans le dispositif Arcan décrit dans le chapitre méthodes expérimentales. La condition d'encastrement est imposée à l'extrémité basse de l'éprouvette (les déplacements suivant les axes x , y et z ainsi que les rotations autour de ces axes sont prohibés). Cette condition décrit la fixation de l'éprouvette sur le mors inférieur fixe à l'aide de la bride. Sur l'extrémité haute on impose un déplacement suivant la direction de chargement x , caractérisant le déplacement du mors mobile sur lequel est fixée cette extrémité (Fig. IV.6).

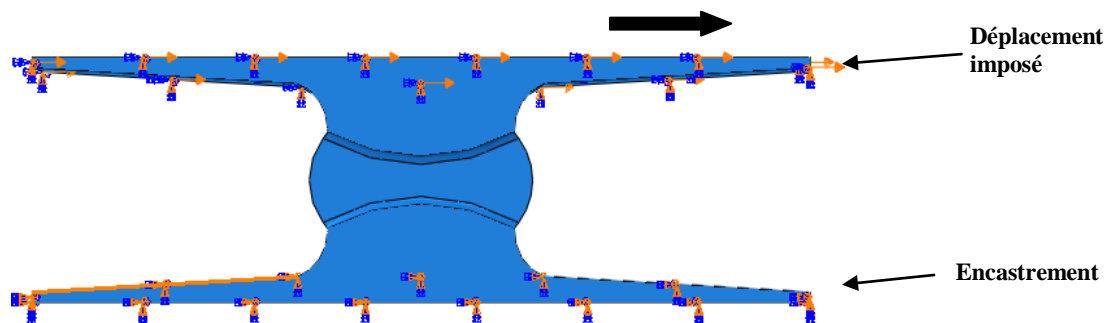


Figure 1 IV.6: conditions aux limites imposées au modèle

IV.3.4. Maillage

Le maillage de l'éprouvette est réalisé sur ABAQUS en utilisant des éléments tétraédriques à six nœuds car ces éléments sont très efficaces pour les géométries complexes. Un raffinement du maillage a été réalisée dans la zone centrale de l'éprouvette où se localisent les déformations lors de l'application de la charge (figureIV.7).

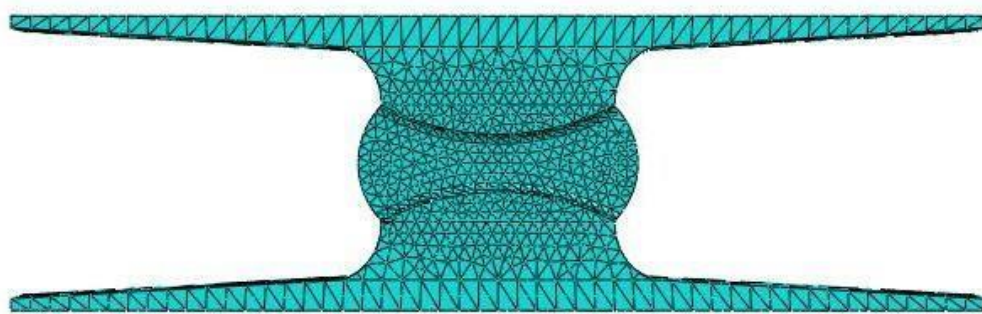


Figure IV.7 : maillage de l'éprouvette papillon

IV.3.5. Résultats de la simulation numérique :

Dans cette partie on présente les résultats de la simulation numérique de l'essai de cisaillement sur l'éprouvette papillon décrit précédemment. Ils sont sous forme d'images montrant les champs de déplacements, des contraintes et des déformations dans l'éprouvette, et sous forme des courbes « Force-Déplacement » et « Contrainte-Déformation » décrivant le comportement du PEHD en cisaillement.

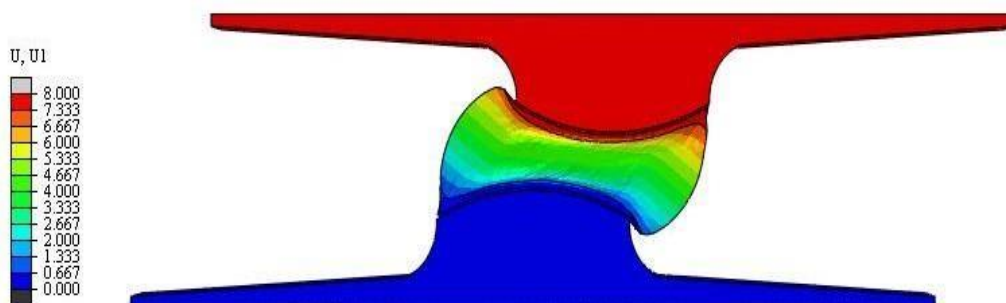
Comme premier résultat les champs des contraintes et des déformations se localisent dans la section centrale de l'éprouvette papillon, justifiant ainsi son intérêt d'être utilisé dans les essais Arcan.

Dans la Figure IV.8.a on montre le déplacement U_1 de la partie supérieure de l'éprouvette alors que dans la Figure IV.8.b, le déplacement U_2 est nul justifiant les conditions aux limites imposées dans la simulation .de même le déplacement U_3 est nul pour la même raison.

Le champ des déformations E_{12} est montré dans la Figure IV.8.c. On observe alors que ces déformations sont localisées au centre de l'éprouvette. Les autres champs de déformations sont nuls, vu qu'il n'y a pas de déplacement dans les autres directions.

Le champ des contraintes tangentielles S_{12} est montré dans la Figure IV.8.d. effectivement les ces contraintes S_{12} sont localisées au centre de l'éprouvette.

Les images de la Figure IV.8, ont montré une localisation des déformations E_{12} et des contraintes tangentielles S_{12} au centre de l'éprouvette papillon ; justifiant ainsi l'utilisation de ce type d'éprouvette dans les essais Arcan, ainsi que les conditions de la simulation numérique utilisées.



(a)

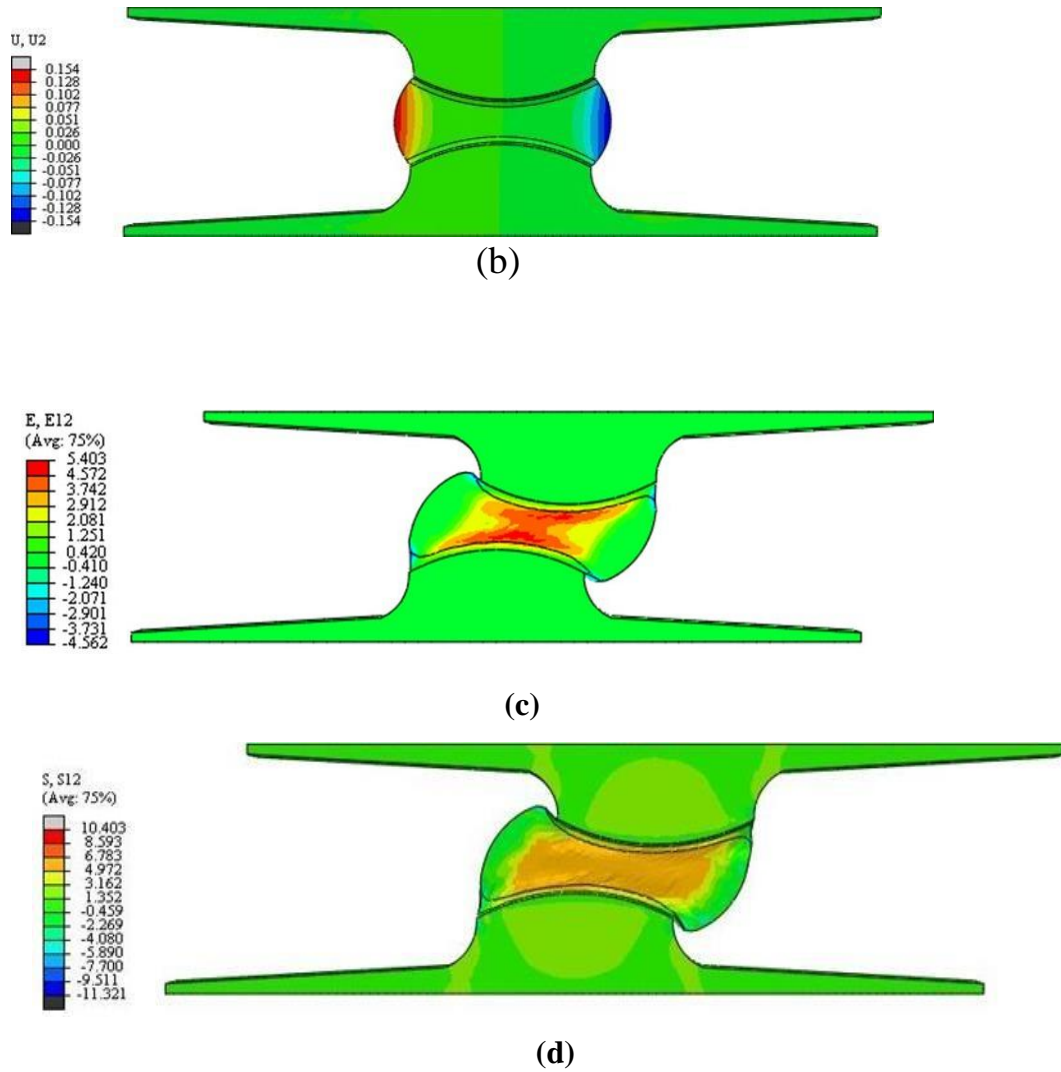


Figure IV.8 : résultats de la Simulation numérique

❖ Courbes force-déplacement et contrainte-déformation

Les Courbes force-déplacement et contrainte-déformation issues de la simulation numérique sont présentées respectivement sur les figure IV.9 et figure. IV.10. L'allure générale de ces courbes ressemble à celle obtenue dans l'essai expérimental de cisaillement. Elle présente une partie linéaire distincte décrivant l'élasticité du matériau.

A partir de la perte de linéarité, le matériau a un comportement plastique où les déformations augmentent fortement pour une faible augmentation de la contrainte. A partir d'un certain seuil de déformation la contrainte chute jusqu'à rupture.

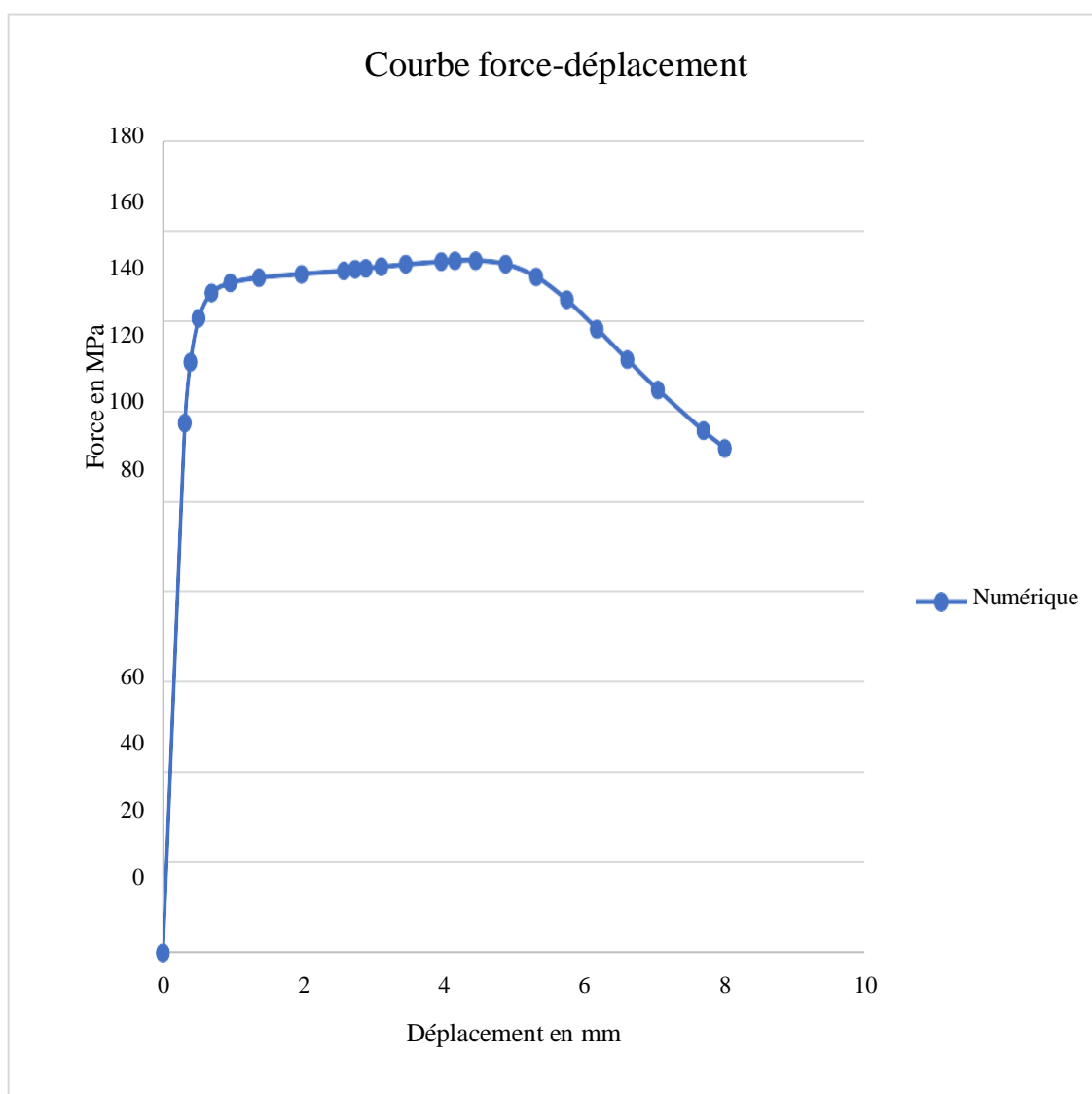


Figure IV.9 : courbe force-déplacement courbe de la simulation numérique

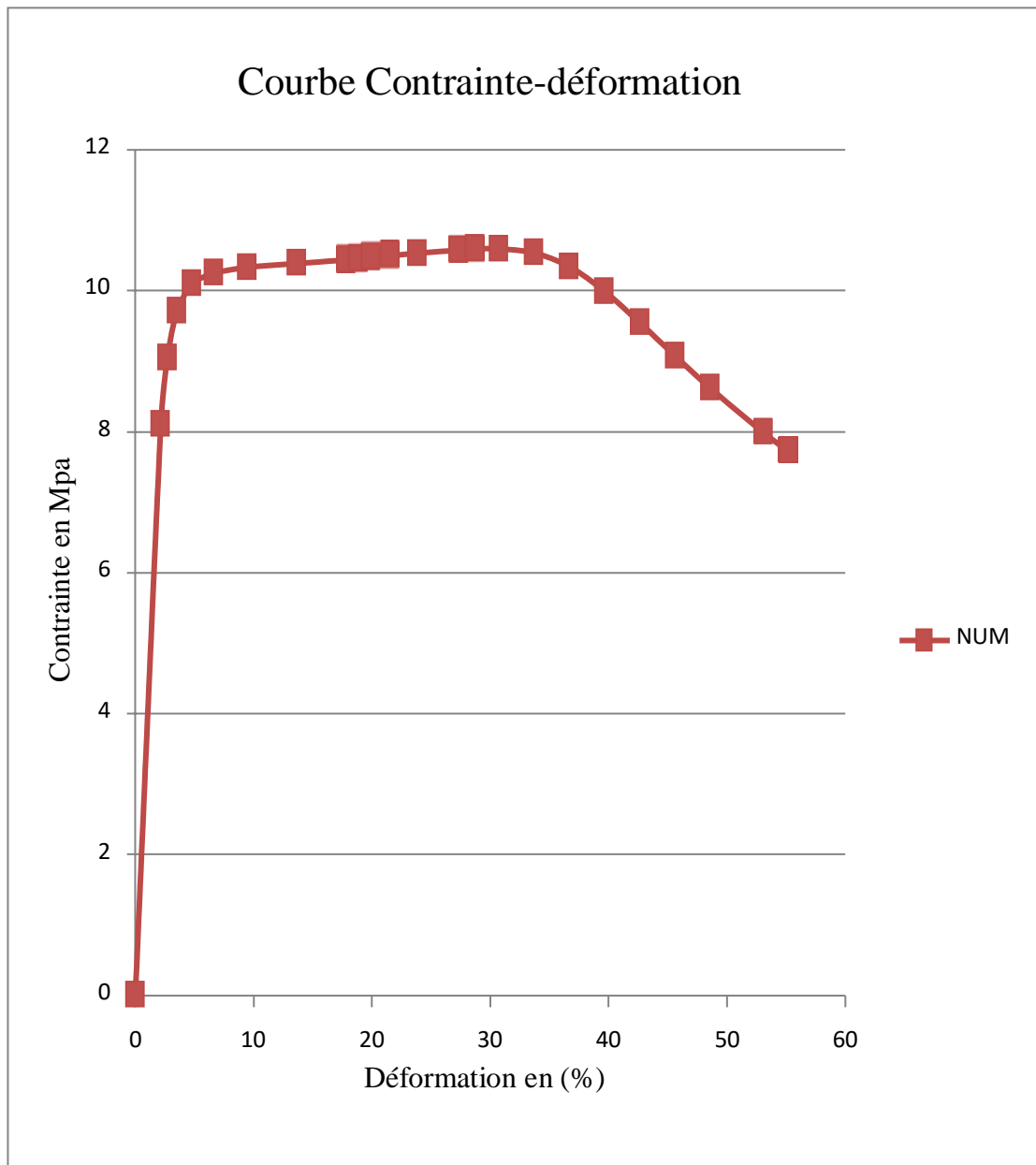


Figure IV.10 : courbe contrainte-déformation courbe de la simulation numérique

IV.4. Confrontation des résultats de la simulation à ceux de l'expérimental

Les résultats de la simulation sont confrontés à ceux obtenus par l'essai de cisaillement. On a comparé en premier lieu les courbes forces-déplacements (Figure IV.11) puis les courbes contrainte-déformation (Figure IV.12). L'allure générale des courbes de simulation et expérimentale dans les deux cas est similaire. Ces courbes présentent une partie élastique suivie d'une plasticité du matériau. Néanmoins, une différence à la fin de la zone élastique et la fin de la zone plastique. Cette différence peut être étudiée afin de déterminer le moyen de la réduire au maximum. la partie plastique par contre semble coïncidente pour les deux courbes. Cependant, on peut conclure que la courbe de simulation se concorde avec celle de l'expérimental.

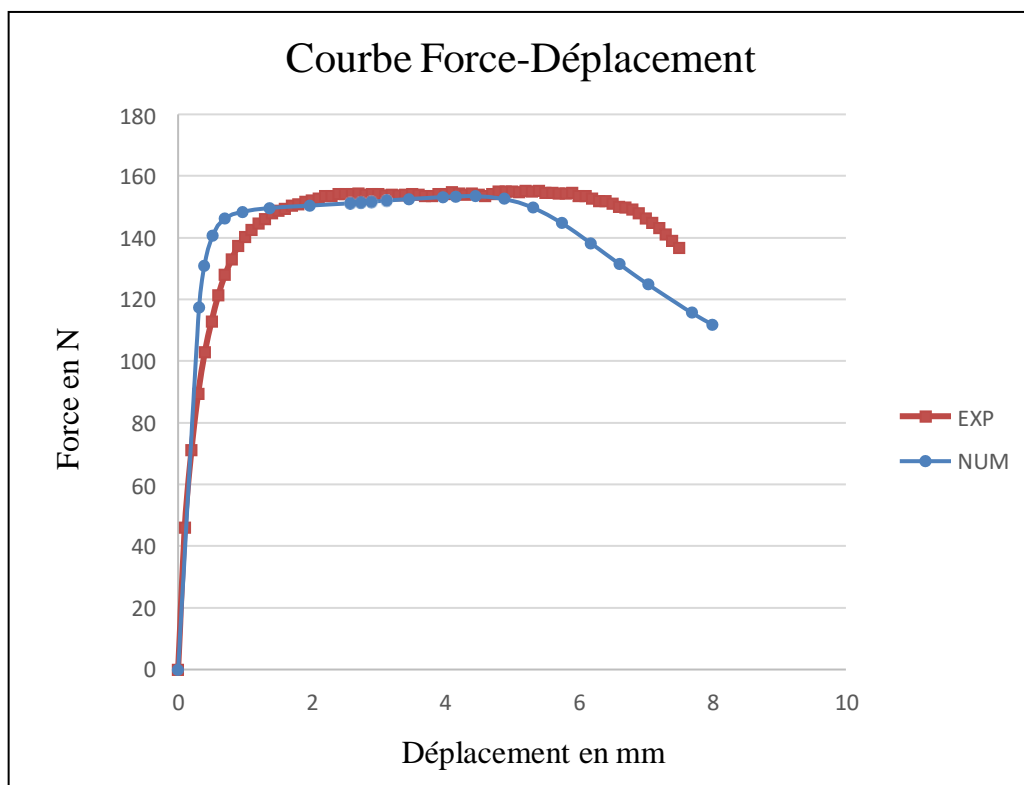


Figure IV. 11. comparaison courbes forces-déplacements

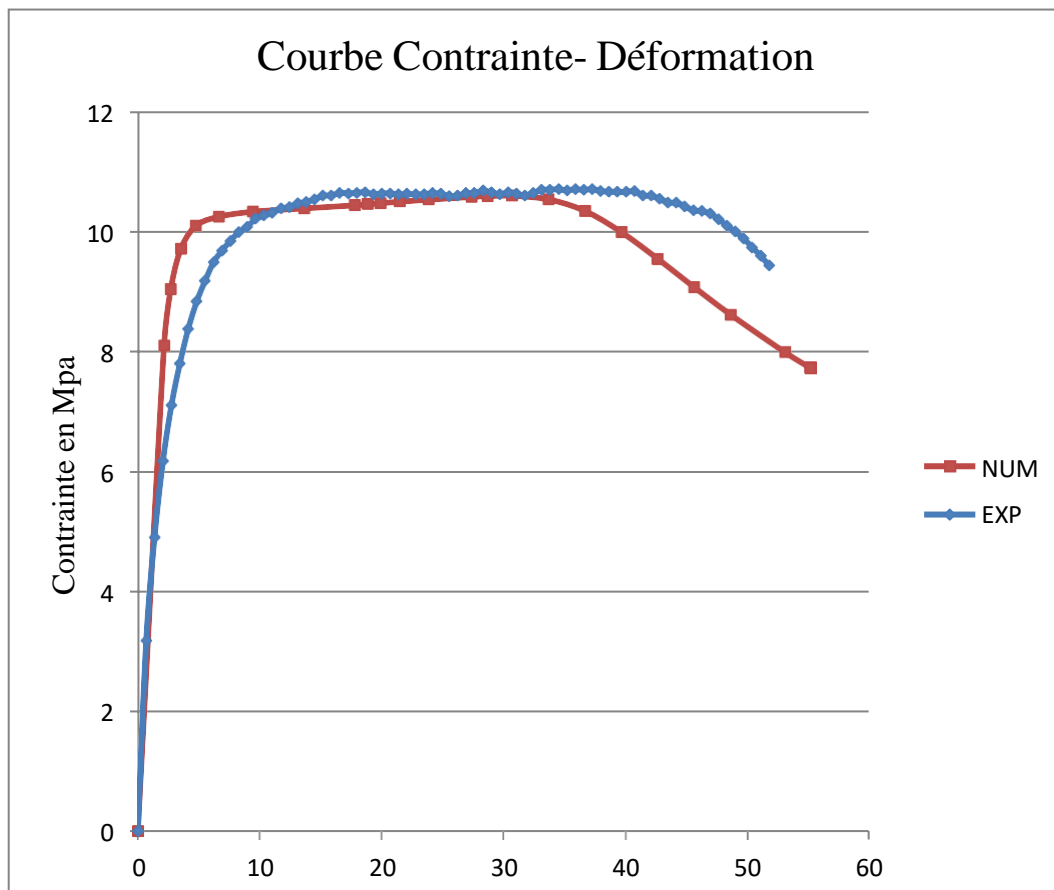


Figure IV.12 : Comparaison courbes contrainte-déformation

IV.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté la simulation numérique en élastoplastique de l'essai de cisaillement sur une éprouvette papillon. Les champs de contrainte et de déformation sont localisés au centre de l'éprouvette. La comparaison des courbes force-déplacement et contrainte-déformation obtenues par la simulation numérique à celles de l'expérimentale ont montré une concordance acceptable concernant le comportement du matériau. Pour mieux décrire ce dernier un modèle numérique doit être développé en tenant compte du fait que le matériau est semi cristallin, composé d'une phase amorphe et d'une phase cristalline.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de simuler le comportement de l'éprouvette papillon en cisaillement. Pour atteindre cet objectif, on a commencé par une étude bibliographique détaillée des polymères. De même un aperçu sur les essais mécaniques uni axiaux et multiaxiaux ont été présentés dans le deuxième chapitre.

Le protocole expérimental de l'essai de cisaillement d'une éprouvette papillon en PEHD sur un dispositif Arcan a été discuté et le résultat obtenu en termes de courbes « Force-Déplacement » et « Contrainte-Déformation » est présenté.

La simulation numérique de l'essai de cisaillement a été réalisée à l'aide du code de calcul ABAQUS en élastoplastique. Elle a montré une localisation des champs de contraintes et des déformations et des contraintes au centre de l'éprouvette, ce qui justifie l'utilisation de ce type d'éprouvette dans les essais Arcan.

Finalement, la confrontation des résultats de la simulation numérique à ceux obtenus par l'expérimental, a montré une adéquate concordance, en termes de localisation des déformations au centre des éprouvettes ainsi qu'en terme de valeurs de ces déformations

En perspective, ce travail peut être développé en utilisant dans la simulation numérique un modèle de loi de comportement adapté pour les polymères semi-cristallins, ou de faire une étude paramétrique afin de réduire l'écart des valeurs des déformations et des contraintes dans la partie seuil de plasticité et fin de la zone plastique.

Références bibliographiques

- [1] HACHOUR Kamel « Contribution à l'élaboration d'un Critère de Plasticité pour le PEHD » thèse de doctorat, UMMTO, Algérie
- [2] Michel Fontanille -Yves Gnanou, livre chimie et physico-chimie des polymères, Edition Dunod janvier 2010.
- [3] Reniers F.- Lickes J.P.-GeertsY., Cours de chimie des polymères, 2002-2003.
- [4] Weiss P., La chimie des polymères, Université Médicale Virtuelle Francophone, 2009-2010.
- [5] Combette P. et Ernoult I., physique de polymère, Ed. Hermann, Tom.I, 2005.
- [6] "Vieillesse chimique des plastiques." Techniques de l'ingénieur (AM3152)
- [7] M. Dupeux, Aide-mémoire Science des matériaux, Editions Dunod, (2004).
- [8] M. Chavannes, G. j. Beaudou, chimie-organique expérimental p. 358.
- [9] Fontanille M.-Gnanou Y., Chimie et physico-chimie des polymères, Dunod, Paris, 2013.
- [10] Vêtement et revêtement, les polymères, Physico-chimie STIDD-STL, myth3 Fairouz M., Etude des polymères et de leurs mélanges (état fondu) additionnés de composés d'origine minérale, mémoire de master, Université Mohamed Khider-Biskra, 2014.
- [11] Gottfried W. Ehrenstein, Fabienne Montagne matériaux polymères: structure, propriétés et application; Hermès Science publication, 2000.
- [12] M. Reyne. Technologie des plastiques, HERMES, Paris, 1998.
- [13] P. Combette, I. Ernoult, Physique des polymères : Tome I Structure, fabrication, emploi. Collection enseignement des sciences (2005).
- [14] Weiss P, la chimie des polymères, Université Médicale Virtuelle Francophone, (2010).
- [15] Dr. Gilles Olive, chimie des matériaux, Ecole industrielle et commerciale de la ville de Namur; 3^{ème} édition, 07 /01/2005.
- [16] myth16 Lecomte J.-Beckers, Physique des matériaux, polymères, université de Liège, 2009.
- [17] Hervé A. Dou et Kouwelton P. Kone, Caractéristiques physicochimiques des polymères et leurs températures de mise en forme, l'influence sur la température de fusion, mémoire ; université de Côte d'Ivoire, 2009.

- [18] J. P. TROTIGNE, J. VERDU, A. DOBRACZ et M. PIPERAND, « Matières plastiques, structures, propriétés, mise en œuvre, normalisation », Nathan, Paris, (1996), pp : 53-156.
- [19] « Lepolyéthylène », [en ligne]. Disponible sur : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Polyéthylène> (consulté le : 12/02/2011) »
- [20] « Connaissance de polyéthylène », Documentation technique de la société ELFATCHEM, octobre 1995.
- [21] E. POSTAIRE, « Les matières plastiques à usage pharmaceutique », Edition médicales internationales, Paris, (2000), pp: 145.
- [22] Q. Fu, Y. Men et G. Strobl, "A molar mass induced transition in the yield properties of linear polyethylene, Polymer", 44(6), 2003.
- [23] Atrica Krawczak ; "Essai plastique renforcé traité plastique et composite", technique d'ingénieurs, AM5405 année 1997.
- [24] Société francophone des biomatériaux dentaire (SFBD)-Dr-JACQUOT
- [25] U.S.A : ASTM E8 : "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials" Norme ISO 6892 : Matériaux métalliques – Essai de traction.
- [26] Essai de traction, M1-phy-Matériaux.
- [27] H.H. Kausch, R Gensler, C. Grein, C.JG Plummer, P. Scaramuzzino, "Crazing in Semi crystalline thermoplastics", Journal of macromolecules science, part B-Physics, 1999.
- [28] R. Itterbeek Résistance des Matériaux - Introduction à la résistance des matériaux
- [29] BOUKARAA.F, MEZIANE.A.E.K, « Etude, conception, et réalisation d'une machine de torsion-flexion » PFE.INGM, juin 1990
- [30] M. CHERIFI. Karim « Etude, Conception et Fabrication d'un Dispositif d'essai enbiaxial Traction-Torsion », Mémoire de fin d'études ; UMMTO, Algérie, 2015/2016.
- [31] Bertrand LANGRAND " comportement et modélisation des assemblages ponctuels"

technique de l'ingénieur Bm7805, 2005.

[32] H. Seibert, T. Scheffer, S. Deibels « Biaxiale Testing of Elastomers, Experimental Setup, Measurement and Experimental Optimisation of Specimen ' S Shape. July 15, 2013

[33] M. Doyoyo, T. Wierzbicki. (2003) *Inte. Jour. Plas.* 19, 1195-1214.