

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE DE CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : FABRICATION MECANIQUE ET
PRODUCTIQUE

Thème

**Optimisation du seuil d'élasticité de
PEHD en sollicitations biaxiales**

Présenté par

Khaled BENCHERIF

Mahdi BENTAHAR

Dirigé par :

Mr Kamel HACHOUR

2019/2020



Remerciements

Nous remercions tout d'abord dieu le tout puissant pour la volonté et le courage qu'il nous a donné pour mener à terme ce travail.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à notre encadreur Mr HACHOUR Kamel pour sa disponibilité, son orientation, ses suggestions et sa modestie ; et aux membres de jury pour leur accord d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous tenons à remercier nos enseignants et nos ami(e)s de promotion, pour cette expérience humaine partagée tous ensemble.

Nous remercions nos familles en particulier nos parents qui n'ont eu de cesse de nous encourager et nous accompagner tout au long de nos études.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Mahdi et Khaled.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents à qui je dois tout. Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté,

A mon frère Norddineet ma très chère sœur Imane qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu,

A mes grands-parents à qui je souhaite une longue vie,

A mes oncles Brahim et Abdelkader qui n'ont jamais cessés de m'aider et m'encourager,

A ma chère tante Lynda et ces enfants,

A tous mes ami(e)s en particulier Khaled qui a toujours été à mes côtés tout au long de mon parcours,

A tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail,

A mon binôme Messaouda.

OUISSEM

A decorative border of intricate snowflake patterns surrounds the text. The snowflakes are arranged in a grid-like pattern, with some larger snowflakes at the corners and smaller ones filling the rest of the border.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents qui m'ont soutenu et encouragé pour que je puisse mener à bien mes études et qui attendent ce jour avec impatience,

A mon frère Moussa et mes sœurs Hedjila et Melissa qui sont ma source de motivation,

A mon fiancé Fatah qui était toujours derrière moi,

A ma belle-famille,

A mes grands-parents, mes oncles et mes tantes et toute ma famille,

A mon binôme Ouissem, et mes ami(e)s, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite.

MESSAOUDA

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Rappels bibliographique	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Généralités sur les polymères	4
I.2.1. Définitions.....	4
I.2.1.1. Polymère	4
I.2.1.2. Monomère.....	4
I.2.1.3. La polymérisation.....	5
I.2.1.4. Degré de polymérisation	5
I.3. Transition Vitreuse.....	5
I.4. Classification des polymères.....	6
I.4.1 Selon leur nature chimique.....	6
I.4.2 Selon leur origine	6
I.4.3 Selon leur domaine d'application.....	6
I.4.4 Selon leurs structures des chaînes (dimensionnalité)	7
A. Celle des polymères linéaires (ou monodimensionnels)	7
B. Celle des polymères bidimensionnels.....	7
C. Celle des polymères tridimensionnels	8
I.4.5. Selon leur comportement thermique	8
A. Les thermoplastiques	8
B. Les thermodurcissables.....	9
C. Les élastomères.....	10
D. Les élastomères thermoplastiques	10
I.4.6 Selon les usages technologiques.....	11
I.4.7 Selon l'importance économique	12
I. Propriétés des polymères.....	12
I.5.1. Les Propriétés physiques.....	12
I.5.2 La masse volumique.....	12
I.5.3. Les Propriétés thermiques	12
A. La température.....	12
I.5.4 Propriétés électriques	13
I.5.5 Propriétés mécaniques.....	13
I.6 Applications des polymères	13
I.7 Architecture des polymères.....	15
I.7.1 Polymères linéaire	15
I.7.2 Polymères ramifiés	15
I.7.3 Polymères réticulés.....	16

I.8 Polymères amorphes et polymères cristallisés	16
I.9 Structure des polymères	17
I.9.1 Les homopolymères	17
I.9.2 Les copolymères.....	17
I.10 Synthèse des polymères	17
I.11. Comportement mécanique des polymères	18
I.11.1 Introduction.....	18
I.11.2 Comportement et processus élémentaires	18
I.11.3 Les paramètres influents	19
I.11.3.1 L'architecture du polymère	19
I.11.3.2 La formulation du polymère	20
I.11.3.3 La mise en œuvre	20
I.11.3.4. Les conditions d'utilisation	21
I.12. Types de sollicitation multiaxiale	22
I.13. Essais de traction bi-axial	23
I.13.1 Principe de l'essai traction bi-axial	23
I.13.2 Machine d'essai.....	24
I.14. Essai de traction –torsion	24
I.14.1 Principe de l'essai	25
I.15. Essai de traction-compression.....	25
I.15.1 Principe de l'essai	25
I.16. Essai de traction- cisaillement.....	25
I.16.1 Essai Arcan	25
I.16.2 Principe de l'essai Arcan	26
I.17. Détermination de la limite élastique	26
I.17.1 Méthode de perte de linéarité.....	27
I.17.2 Méthode des deux tangentes	27
I.17.3 Méthode de tangente avec offset.....	28
I.18. Conclusion	29

Chapitre II : Présentation des essais

II.1. Introduction	31
II.2. Essais mécaniques uni-axiaux	31
II.2.1. Traction uniaxiale monotone sur éprouvettes sablier	31
II.2.2. Essai de compression.....	31
II.2.3. Essai de cisaillement.....	32
II.3. Essais mécaniques bi-axiaux	33
II.3.1. Dispositif Arcan.....	33
II.3.2. Mise en place de l'essai	33
II.4. Résultats.....	34

II.4.1. Essais uni-axiaux	34
II.4.1.1. Traction uni-axiale	34
II.4.1.2. Compression uni-axiale et cisaillement simple	35
II.5. Essais bi-axiaux	36
II.6. Conclusion.....	39

Chapitre III : Résultats et discussions

Introduction	41
III.1. Courbe de traction	41
III.1.1 Traction R2.....	41
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	42
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	42
C. Résultat de la courbe en traction R2	43
III.1.2. Traction R4.....	43
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	43
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	44
C. Résultats de la courbe traction R4	44
III.1.3 Traction R10.....	44
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	45
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	45
C. Résultats de la courbe traction R10	45
III.1.4 Traction R80.....	46
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	46
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	47
C. Résultats de la courbe traction R80	47
III.2. Courbe de traction – cisaillement	47
III.2.1. Traction combiné au cisaillement 00°	48
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	48
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	49
C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 00°.....	49
III.2.2. Traction combiné au cisaillement 10°	49
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	50
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	50
C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 10°.....	50
III.2.3. Traction combiné au cisaillement 30°	51
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	51
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	52
C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 30°.....	52
III.2.4. Traction combiné au cisaillement 50°	52
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	53
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	53
C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 50°.....	53

III.2.5. Traction combiné au cisaillement 90°	54
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	54
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	55
C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 90°	55
III.3. courbes de compression.....	55
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	56
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	57
C. Résultats de la courbe de compression	57
III.4. La courbe de cisaillement.....	57
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	58
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	59
C. Résultats de la courbe de cisaillement	59
III.5. courbes compression combiné au cisaillement.....	59
III.5.1. compression-cisaillement 00°	60
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	60
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	61
C. Résultats de la courbe de compression-cisaillement 00°	61
III.5.2. compression-cisaillement 10°	61
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	62
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	62
C. Résultats de la courbe de compression-cisaillement 10°	63
III.5.3. compression-cisaillement 30°	63
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	63
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	64
C. Résultats de la courbe de compression- cisaillement 30°	64
III.5.4. Compression-cisaillement 50°	64
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	65
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	65
C. Résultats de la courbe de compression-cisaillement 50°	66
III.5.5. compression-cisaillement 70°	66
A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)	66
B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset.....	67
C. Résultats de la courbe de compression-cisaillement 70°	67
III .6. Résultat des courbes de traction et compression et cisaillement.....	67
III.6.2 Résultats des courbes compression-cisaillement.....	68
III.6.3 Résultats des courbes traction-cisaillement.....	69
III.7. construction de L'enveloppe de plasticité.....	70
III.8. conclusion.....	71

Listes des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère	5
Figure I.2 : Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire	7
Figure I.3: Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel, ici le Carbone graphite.	7
Figure I.4 : Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel.....	8
Figure I.5 : Représentation schématique d'un polymère thermoplastique	9
Figure I.6 : Thermodurcissables.....	10
Figure I.7 : Élastomères	10
Figure I .8 : Thermoplastiques	11
Figure I.9 : Type de polymère.....	11
Figure I.10 : Polymère linéaire.....	15
Figure I.11 : Polymères ramifiés.....	16
Figure I.12 : Polymères réticulés	16
Figure I.13: Polymère semi-cristallisé	17
Figure I.14 : comportement typique des polymères à faible déformation.....	21
Figure I.15: Eprouvette de traction bi-axiale montée.	24
Figure I.16 : l'ensemble de la machine	24
Figure I.17 : éprouvette tubulairée sollicité traction- torsion.....	25
Figure I.18 : tube à parois minces sollicité en traction-compression	25
Figure I.19: principe de l'essai arcan.....	26
Figure I.20: Courbe de la limite élastique (première méthode)	27
Figure I.21 : Courbe de la limite élastique (ISO R257 méthode).	28
Figure I.22 : Courbe de la limite élastique (offset méthode)	29

Chapitre II :

Figure II.1 : Schématisation de l'éprouvette et du dispositif de compression	32
Figure II.2 : Schématisation de l'éprouvette et du dispositif de cisaillement	33
Figure II.3 : Montage de l'éprouvette papillon sur le Dispositif Arcan.....	34

Figure II.4 : Réponse contrainte vraie- déformation vraie de l'éprouvette de type4	35
Figure II.5 : Réponse en terme de contrainte équivalente - déformation équivalente du PEHD en compression uni-axiale et en cisaillement simple	36
Figure II.6 : Réponse charge-déplacement des éprouvettes papillons pour différent angle de chargement : déplacement vertical positif (traction /cisaillement).....	38
Figure II.7 : Réponse charge-déplacement des éprouvettes papillons pour différent angle de chargement déplacement vertical négatif (compression/cisaillement)	38

Chapitre III

Figure III.1 : courbe de traction R2.	41
Figure III.2 : La méthode des deux tangentes tractions R2.	42
Figure III.3 : La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction R2.....	42
Figure III.4 : courbe de traction R4.	43
Figure III.5 : La méthode des deux tangentes tractions R4.	43
Figure III.6: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction R4.....	44
Figure III.7: courbe de traction R10.	44
Figure III.8: La méthode des deux tangentes tractions R10.	45
Figure III.9 : La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction R10	45
Figure III.10: courbe de traction R80	46
Figure III.11 : La méthode des deux tangentes tractions R80.	46
Figure III.12 : La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction R80.....	47
Figure III.13: la courbe de traction-cisaillement 00°	48
Figure III.14: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 00°.....	48
Figure III.15: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement00°	49
Figure III.16: la courbe de traction-cisaillement 10°	49
Figure III.17: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 10°.....	50
Figure III.18: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement10°.	50
Figure III.19: la courbe de traction-cisaillement 30°	51
Figure III.20: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 30°.....	51
Figure III.21: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement30°.	52
Figure III.22: la courbe de traction-cisaillement 50°.....	52

Figure III.23: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 50°	53
Figure III.24: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement50°.	53
Figure III.25: la courbe de traction-cisaillement 90°	54
Figure III.26: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 90°	54
Figure III.27: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement90°.	55
Figure III.28: la courbe de compression.	56
Figure III.29: La méthode des deux tangentes de la compression.	56
Figure III.30: La méthode de perte de linéarité et d'offset de la compression	57
Figure III.31: la courbe de cisaillement	58
Figure III.32: La méthode des deux tangentes de la cisaillement.....	58
Figure III.33: La méthode de perte de linéarité et d'offset de cisaillement.....	59
Figure III.34: la courbe de compression-cisaillement 00°.....	60
Figure III.35: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement00°.....	60
Figure III.36: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement.00°.	61
Figure III.37: la courbe de compression-cisaillement 10°.....	61
Figure III.38: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement10°.....	62
Figure III.39: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement10°.	62
Figure III.40: la courbe de compression-cisaillement 30°.....	63
Figure III.41: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement 30°.....	63
Figure III.42: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement 30°.	64
Figure III.43: la courbe de compression-cisaillement 50°.....	64
Figure III.44: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement 50°.....	65
Figure III.45: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement 50°.	65
Figure III.46: la courbe de compression-cisaillement 70°.....	66
Figure III.47: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement 70°.....	66
Figure III.48: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement 70°.	67
Figure III.49: Enveloppe de plasticité du PEHD suivant le critère de Raghava pour la méthode de perte de linéarité.	71

Figure III.50: Enveloppe de plasticité du PEHD suivant le critère de Raghava pour les trois méthodes. 72

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 : Différentes phases d'un polymère semi-cristallin en fonction de la température..... 6

Tableau I.2 : Les domaines d'application des polymères.....14

Chapitre III :

Tableau III.1 : Résultats des courbes en traction R2.43

Tableau III.2 : Résultat de la courbe traction R4.....44

Tableau III.3 : Résultat de la courbe traction R10.....45

Tableau III.4 : Résultat de la courbe traction R80.....47

Tableau.III.5 : la courbe de traction- cisaillement.....49

Tableau III.6: Résultat de la courbe traction-cisaillement 10°50

Tableau III.7 : Résultat de la courbe traction-cisaillement 30°52

Tableau III8 : Résultat de la courbe traction-cisaillement 50°53

Tableau III.9 : Résultat de la courbe traction-cisaillement 90°55

Tableau III.10 : Résultat de la courbe de compression.....57

Tableau III.11: Résultat de la courbe de cisaillement.59

Tableau III.12 : Résultat de la courbe de cisaillement 00° 61

Tableau III.13 : Résultat de la courbe de cisaillement 10° 63

Tableau III.14 : Résultat de la courbe de cisaillement 30° 64

Tableau III.15 : Résultat de la courbe de cisaillement 50° 66

Tableau III.16 : Résultat de la courbe de cisaillement 70°67

Tableau III.17 : Les résultats des contraintes des essais uniaxiaux.....67

Tableau III.18 : Calcule de la différence et les moyenne entre le trois méthodes.....67

Tableau III.19 : Les résultats des contraintes des essais compression-cisaillement.....67

Tableau III.20 : Calcule de la différence et les moyenne entre le trois méthodes.....67

Tableau III.21 : Les résultats des contraintes des essais traction-cisaillement.....67

Tableau III.22 : Calcule de la différence et les moyenne entre le trois méthodes.....67

Liste des symboles

PEHD : polyéthylène à haute densité.

DP : degré de polymérisation.

N : indice de polymérisation.

T_g : la température de transition vitreuse de la phase amorphe.

T_f : la température de fusion.

PE : le polyéthylène.

PVC : le poly (chlorure de vinyle).

PS : le polystyrène.

Introduction générale

Aujourd'hui, les polymères jouent un rôle primordial dans tous les domaines de la vie. Ils accompagnent la vie trépidante de la société moderne, ils facilitent la vie quotidienne et sont un élément indissociable de la technologie industriel.

Plus petits, plus performants, plus économiques-sont les slogans familiers des designers, concepteurs et ingénieurs dans ce contexte.

Les matériaux polymères offrent une facilité de transformation et sont donc largement utilisés dans tous les secteurs industriels. Leurs propriétés intrinsèques étant cependant relativement faibles, il est nécessaire de les améliorer grâce à des adjuvants (antistatiques, colorant, charges, renforts, déroulants ...).

L'évolution des matériaux polymères est passée par le développement de composites à matrice organique renforcée par des particules de petites tailles (ex : talc, fibre de verre, copeaux de bois, carbonate de calcium ... etc.), encore appelées charge. L'introduction de charge permet d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques de la matrice (polymère) pour un cout de revient modère.

Aujourd'hui, les enjeux économiques pour le développement de ces matériaux sont multiples et touchent déjà de nombreux domaines d'application comme celui de la construction, des transports, de l'emballage alimentaire, des articles de sport, du textile, etc.

Parmi la diversité des matériaux composites, plusieurs études scientifiques ont traité le seuil de plasticité des polymères par la détermination de la limite élastique de ces matériaux, contrairement au matériaux métallique , il s'avère que la limite élastique des polymères est difficile à détecter, vue les mécanismes de déformation qui se produisent lors du chargement mécanique de ces matériaux .Dans ce contexte , on s'intéresse dans ce travail à déterminer la limite élastique d'un polymère semi cristallin ,qui est le polyéthylène à haute densité (PEHD), par trois méthodes différents : par perte de linéarité, par un offset de 0,3% puis par la méthode de deux tangentes. Les résultats obtenus lors des différents essais de traction, compression, cisaillement et traction/compression combiné au cisaillement réalisés lors d'une étude [1] seront utilisés dans ce travail.

Le manuscrit est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre représente une étude bibliographique introduisant en premier lieu des généralités sur les polymères. En seconde lieu on présentera le comportement mécanique de ces matériaux. Les types de sollicitations multiaxiales, seront aussi présentés dans ce chapitre.

Introduction Générale

- Dans le deuxième chapitre on présentera l'essai de traction/compression combiné au cisaillement, puis les résultats expérimentaux qui en découlent.
- Dans le troisième chapitre on déterminera la limite d'élasticité par différentes méthodes suivi d'une comparaison des résultats.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

Rappels bibliographique

I.1 Introduction

Qu'appelle-t-on polymère ? Plusieurs réponses peuvent être données mais, pour l'instant, seule l'une d'elles est proposée. La définition la plus généralement acceptée est celle d'un système formé par un ensemble de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande dimension, issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitive plus communément appelées unités (ou motifs) monomères. Les édifices macromoléculaires ainsi définis ont des dimensions moléculaires (caractérisées par leur masse molaire) très supérieures à celles des molécules simples.

Le nombre d'unités monomères constitutives d'une chaîne polymère est appelé le degré de polymérisation (DP) ; il est directement proportionnel à la masse molaire du polymère. Si ce degré de polymérisation est élevé, on parle de hauts polymères ; lorsqu'il est faible le composé est un oligomère. Les homopolymères ne sont constitués que d'un seul type de monomère dont le motif se répète dans la molécule ; les copolymères sont constitués de plusieurs types de monomères. On distingue les polymères trouvés à l'état naturel comme la cellulose, des polymères synthétiques entièrement fabriqués par l'homme à partir de monomères réactifs (le nylon, le polyéthylène, le téflon...) et enfin les polymères artificiels ou régénérés, obtenus par modification chimique d'un polymère naturel [2].

I.2 Généralités sur les polymères

I.2.1. Définitions

I.2.1.1 Polymère

C'est une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs Monomères) reliées par des liaisons covalentes [3].

I.2.1.2 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 [3].

Le monomère est constitué de molécules simples, et capables de se combiner à d'autres molécules semblables ou différentes pour former un polymère. Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère.

I.2.1.3. La polymérisation

La réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants, des composés de masse Moléculaire plus élevée : les polymères ou macromolécules. Les noyaux des monomères sont les plus souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques) ou d'un atome de Silicium (polymères siliconés) [3].

La polymérisation, désigne la réaction chimique de fabrication des macromolécules.

Lorsque ce degré de polymérisation (DP) est inférieur à 30, on parle d'oligomère et lorsqu'il est supérieur à 30, c'est un polymère [3].

I.2.1.4. Degré de polymérisation

C'est le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule.

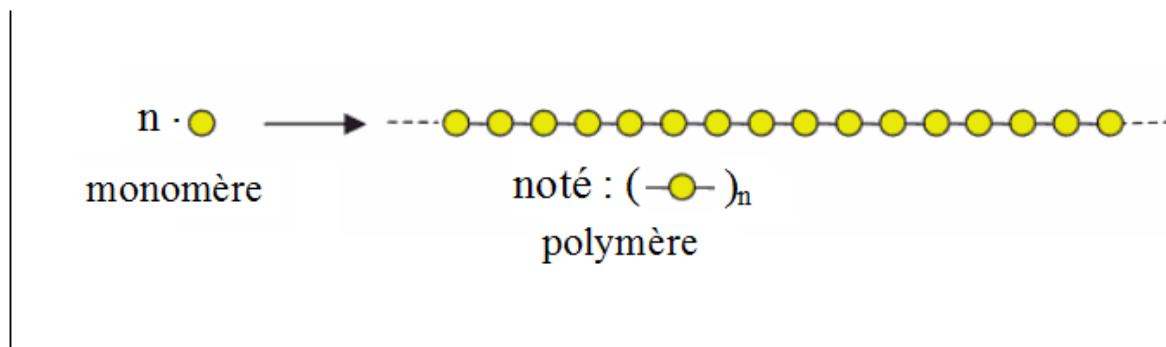


Figure I.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère [4].

Indices : La lettre **n** est appelée «**degré de polymérisation**» ou «**indice de polymérisation**».

I.3. Transition Vitreuse

Au cours du refroidissement depuis l'état liquide, le comportement des polymères semi-cristallins présente deux températures caractéristiques : la température de transition vitreuse de la phase amorphe T_g et la température de fusion T_f de la phase cristalline. On distingue alors trois domaines caractéristiques de température pour ces matériaux.

- En dessous de T_g le polymère est rigide avec un module de Young élevé. Sa phase amorphe est à l'état vitreux car l'agitation thermique est insuffisante pour permettre le mouvement coopératif des molécules dans cette phase.
- Entre T_g et T_f , le polymère est plus souple avec un module du Young modéré. La phase amorphe est caoutchouteuse. Un mouvement interne engendré par l'agitation thermique s'opère au sien de cette phase. Dans cette intervalle de température, les polymères semi-cristallins admettent des déformations importantes.

- Au dessus de T_f , le polymère est à l'état liquide visqueux ou viscoélastique. Les polymères pourraient donc très facilement les déplacer les uns par rapport aux autres.

Tableau I.1 : Différentes phases d'un polymère semi-cristallin en fonction de la température.

Polymères semi-cristallins		
$T < T_g$	$T_g < T < T_f$	$T > T_f$
2 phase solides : -cristalline -vitreuse	2 phase solides : -cristalline -caoutchouteuse	Liquide visqueux

I.4. Classification des polymères

Il existe plusieurs modes de classification des polymères qui peuvent être classés selon divers critères :

I.4.1 Selon leur nature chimique

On distingue :

- Polymères minéraux.
- Polymères organiques.
- Polymères mixtes [5].

I.4.2 Selon leur origine

On peut les classer en trois catégories : les polymères naturels, les polymères artificiels et les polymères synthétiques [6].

- Les polymères naturels.
- Les polymères artificiels (dérivés des polymères naturels).
- Les polymères synthétiques.

I.4.3 Selon leur domaine d'application

Il est difficile de proposer une classification exhaustive tant la variété des propriétés a multiplié les applications des polymères, comme matériaux en particulier. Il est cependant possible de regrouper les polymères en trois grandes catégories :

- Les polymères de grande diffusion.
- Les polymères techniques.
- Les polymères spéciaux (ou polymères de fonction) [7].

I.4.4 Selon leurs structures des chaînes (dimensionnalité)

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories :

A. Celle des polymères linéaires (ou monodimensionnels)

Pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élevé mais fini d'unités monomères ; de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère (figure I.2), un ensemble de chaînes polymères est constitué d'entités de longueur propriété désignée par le terme de poly molarité [6].

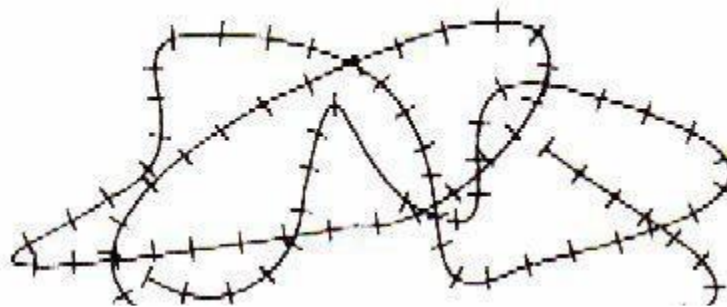


Figure I.2 : Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire [6].

B. Celle des polymères bidimensionnels

Dont certains peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...) dans le domaine des polymères synthétiques ce sont encore des curiosités de laboratoire. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (figure I.3) [6].

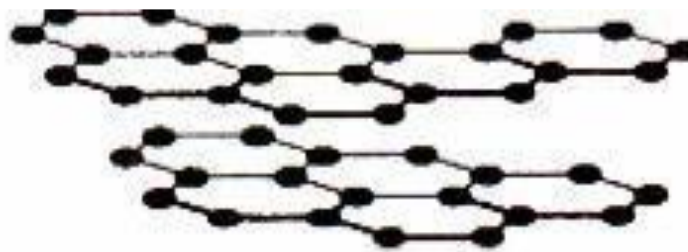


Figure I.3 : Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel, ici le Carbone graphite [6].

C. Celle des polymères tridimensionnels

Qui résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule. Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système peut être représenté comme sur la figure I.4 [6].

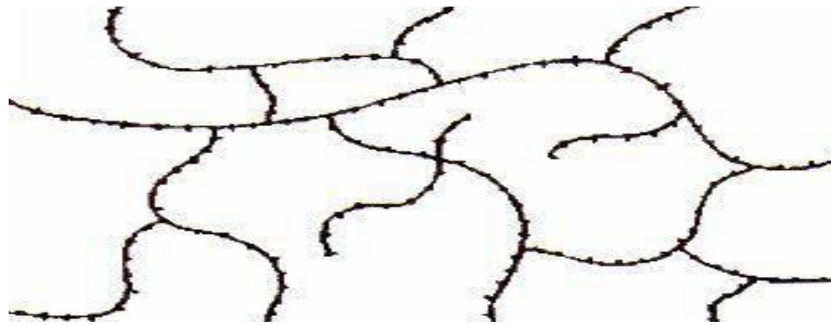


Figure I.4 : Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel [6].

I.4.5. Selon leur comportement thermique

Les propriétés des polymères permettent des usages très variés. On peut ainsi les regrouper dans quatre familles :

- Les thermoplastiques.
- Les thermodurcissables.
- Les élastomères.

A. Les thermoplastiques

Un thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié pouvant être ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique. Ces polymères peuvent cristalliser thermoplastes amorphes ou thermoplastes semi-cristallins comme le polyéthylène (PE), le poly (chlorure de vinyle) (PVC) ou le polystyrène (PS) sont mis en forme par diverses techniques comme l'injection, l'injection-soufflage et l'extrusion. (Figure I.5). Dans la majorité des cas, le polymère ayant la forme désirée récupère son état partiellement cristallin ou amorphe après refroidissement [7].

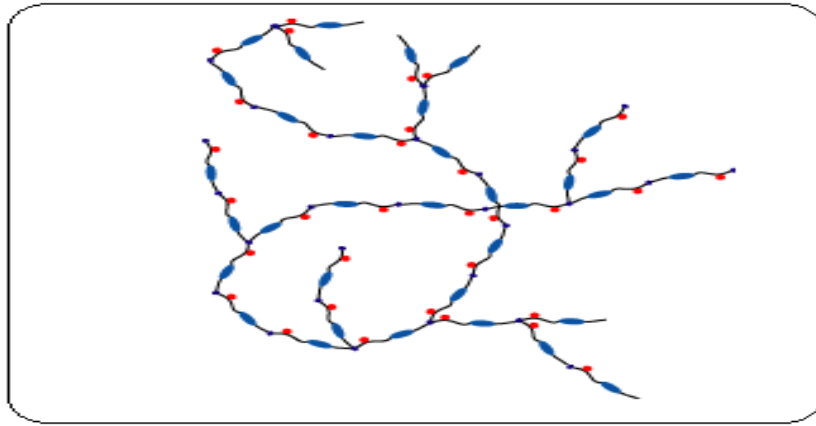


Figure I.5 : Représentation schématique d'un polymère thermoplastique [7].

B. Les thermodurcissables

Un thermodurcissable est un produit (poudre à mouler solide ou résine liquide) transformé irréversiblement par polymérisation en un réseau tridimensionnel infusible et insoluble que l'on qualifie de thermo durci [7].

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]. Le réactif initial peut être composé d'un monomère ou d'un mélange de monomères (résines aminoplastes et phénoplastes, silicone...) ou plus fréquemment d'un mélange de polymère linéaire de faible masse molaire et de monomère (résine époxy, résines polyesters insaturés...) [7].

Dans tous les cas, la réticulation s'effectue sous l'action de la chaleur et / ou de catalyseurs. Ces polymères amorphes ont une température de transition vitreuse élevée (80 °C à + de 150°C) mais, du fait de la réticulation, ne présentent pas d'état caoutchouteux ni d'état liquide. 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 [7].



Figure I.6 : Thermodurcissables [7].

C. Les élastomères

Un élastomère est un polymère linéaire ou ramifiée transformé par vulcanisation en un réseau tridimensionnel faiblement réticulé infusible et insoluble [7].

Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchouteuse, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contrainte mécaniques [7].

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 [7].



Figure I.7 : Élastomères [7].

D. Les élastomères thermoplastiques

Un élastomère thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié présentant les propriétés d'élasticité caoutchouteuse d'un élastomère et de facilité de mise en œuvre d'un Thermoplastique [8].

Les élastomères thermoplastiques sont le souvent des copolymères à blocs (ou des mélanges d'homopolymères et /ou copolymère) dont la structure à l'état solide résulte toujours de l'association d'au moins deux phases distinctes non miscibles :

- Une phase souple (température de transition vitreuse comprise entre 90 °C et 40 °C) Associée à une phase rigide (température de transition vitreuse ou température de Fusion supérieure à 90 °C) ; C'est donc un matériau multi phase ou la phase rigide est dispersée dans la phase souple [7].



Figure I.8 : Thermoplastiques [7].

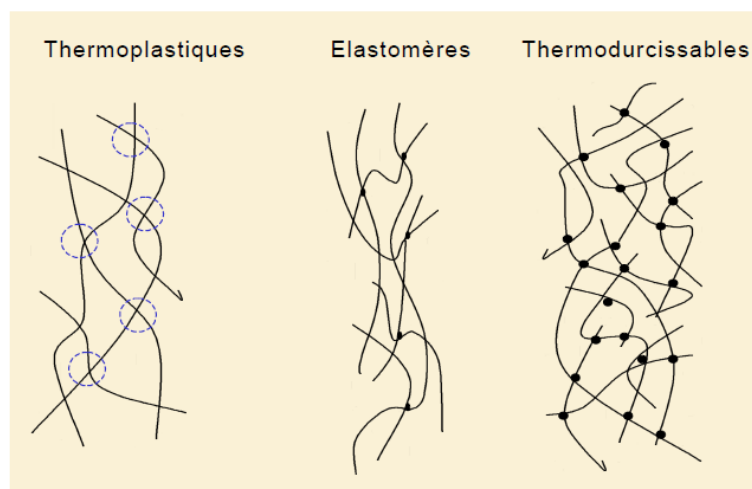


Figure I.9 : Type de polymère.

I.4.6 Selon les usages technologiques

On peut distinguer :

- Les fibres synthétiques (nylon, tergal) ou naturelles (coton, soie).
- Les plastiques : ce sont les plastiques au sens large, regroupant les thermodurcissables et les thermoplastiques.
- Elastomères : Doués de propriétés élastiques et / ou caoutchouteuse.
- Caoutchoucs synthétiques : polymères du butadiène de l'isoprène chloruré.
- Caoutchoucs naturels [8].

I.4.7 Selon l'importance économique

Pour les polymères, comme pour tous produits industriels, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix, ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères

Commerciaux :

- Les polymères de grande diffusion : dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. Comme : PE, PP, PS, PVC ;
- Les polymères à hautes performances : dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés ;
- Les polymères techniques : dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes, comme : polyamides, Polyéthylène [8].

I.5. Propriétés des polymères

I.5.1. Les Propriétés physiques

Les propriétés physiques des matériaux polymères sont une moyenne de celles des composants quand il s'agit de masse volumique ou de la reprise d'humidité. Pour le reste, ces matériaux sont souvent inhomogènes et il n'y a pas de règle d'addition pour prévoir les propriétés à partir de celles des composants [9].

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 :

I.5.2 La masse volumique

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 [10].

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

I.5.3. Les Propriétés thermiques

A. 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 partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment pour les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de

cohésion importante autre que l'enchevêtrement, les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante :

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

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.5.4 Propriétés électriques

De part la nature même des liaisons atomiques qui existent dans les polymères (Liaisons covalentes le long des chaînes, liaisons de Van der Waal 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 constituant 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]. On peut ainsi isoler des câbles électriques de haute fréquence avec ces polymères.

I.5.5 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 correctement les pièces de structures, afin d'assurer leur 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 [10].

I.6 Applications des polymères

Les polymères constituent une des principales révolutions techniques. Ceux-ci sont utilisés pour un nombre extraordinaires d'applications à tous les échelons de la vie.

Tableau I.2 : Les domaines d'application des polymères [6].

Domaines	Exemples
Le secteur de la construction	Les portes, conduites d'eau et l'assainissement, peinture des murs des planchers et des plafonds, revêtement du sol.
Industrie d'emballage	Bouteilles, pots de yaourt, boîtes 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	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, nantisses.
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, boîtes 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.

I.7 Architecture des polymères

Selon Tomalia, les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en trois grandes familles : les polymères linéaires, ramifiés, réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement, cristallisés [12].

I.7.1 Polymères linéaire

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waas. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide.

Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente alors le comportement d'un liquide visqueux.

La température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la température de transition vitreuse.

La transition vitreuse correspond à l'apparition de mouvements de longs segments de chaîne et marque le passage de l'état vitreux à l'état caoutchouteux [13].



Figure I.10 : Polymère linéaire [13].

I.7.2 Polymères ramifiés

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 un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires [13].

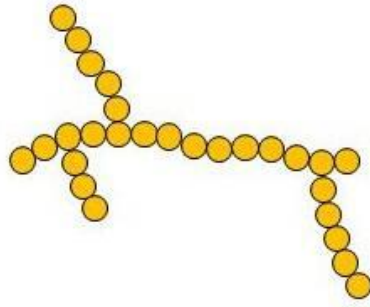


Figure I.11 : Polymères ramifiés [13].

I.7.3 Polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau [13].

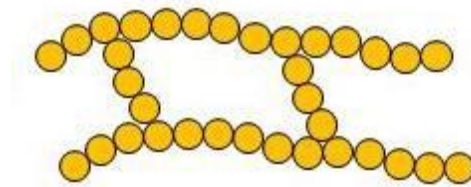


Figure I .12 : Polymères réticulés [13].

I.8 Polymères amorphes et polymères cristallisés

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituer ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide « figé », sans ordre moléculaire à grande distance (voir figure I.13) .Il existe néanmoins des orientations macromoléculaires préférentielles.

Elles peuvent être rangées régulièrement avec la constitution d'un ordre responsable d'une propriété caractéristique de l'état cristallin : l'aptitude du matériau à diffracter les rayons X selon des angles définis. Ces structures peuvent aussi être observées en lumière polarisée. Dans un polymère, les deux états ordonnés et désordonnés peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline [13].

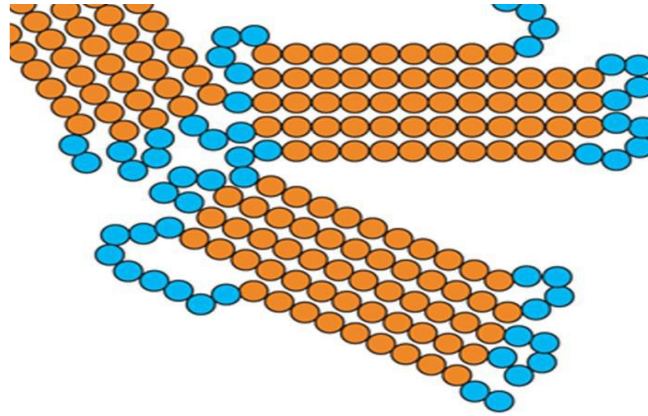


Figure I.13: Polymère semi-cristallisé [12].

I.9 Structure des polymères

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

I.9.1 Les homopolymères

Sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes [14].

Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve: les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

I.9.2 Les copolymères

Sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons: le mode statistique, alterné, séquencé et greffé.

I.10 Synthèse des polymères

Selon le comportement cinétique et le mécanisme de la réaction qui conduit à la formation des composés macromoléculaires, on distingue deux types principaux de réaction de polymérisation.

- La polymérisation en chaîne (ou polymérisation radicalaire).
- La polymérisation par étapes (ou polycondensation).

I.11 Comportement mécanique des polymères

I.11.1 Introduction

Le comportement mécanique des polymères est caractérisé par une très grande diversité apparente. En effet, pour les mêmes conditions d'utilisation, et d'un point de vue technologique, on peut trouver des polymères qui sont, soit rigides fragiles, soit ductiles, soit caoutchouteuse.

Ainsi, dans la famille des polymères, on peut retrouver un grand nombre de types de comportement : visco élastique, visco plastique, hyper élastique, durcissant, endommageable. Cette diversité se retrouve, pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut être rigide fragile, ductile ou élastique etc.

Ceci ne veut pas dire que le comportement d'un polymère est variable, voir incontrôlé. Ce sont les paramètres contrôlant son comportement et les processus élémentaires envisageables qui sont nombreux [15].

I.11.2 Comportement et processus élémentaires

Les propriétés mécaniques des polymères sont traitées avec les outils de la mécanique des milieux continus, comme d'autres classes de matériaux. Les postulats de base de celle-ci - en tout point occupé par le corps il y a un point matériel ; chaque point se déplace de façon continue ; deux points infiniment voisins restent voisins ; les propriétés physiques sont continues – masquent un peu la réalité physique qui est que la réponse du matériau met en jeu des processus élémentaires de déformation, discrets et discontinus, et les perturbations d'énergie interne qu'ils induisent. C'est dans ces processus élémentaires que les polymères et les alliages métalliques se singularisent, induisant des comportements macroscopiques (milieu continu équivalent) fort déformer le polymère signifie, en effet, à un niveau local, déformer et/ou déplacer ses éléments constitutifs, c'est-à-dire ses chaînes.

Chacun de ces niveaux participe à la réponse mécanique du polymère. De ce fait, ce dernier peut être le siège de divers mécanismes et diverses interactions., mais est contrainte par le cristal proche. La chaîne du cristal doit accommoder les interactions qui stabilisent une conformation. Le cristal présente des systèmes de glissement mais certains sont contraints par la structure covalente du motif. Les charges modifient le chargement local etc.

Une autre façon de dire ce qui précède, est de dire que la microstructure d'un matériau polymère industriel mis en œuvre, peut mettre en cause plusieurs niveaux de description et plusieurs processus élémentaires. Au niveau macroscopique, cela se traduira par

un comportement très sensible au mode et aux conditions de sollicitation, car ces dernières amorceront l'un ou l'autre des processus possibles.

Tous les éléments théoriques de compréhension du rôle ou du contrôle de tel ou tel de ces paramètres ne sont pas connus à ce jour. Ce descriptif n'a pour but que d'inciter à la prudence et à la rigueur lorsque l'on s'intéresse aux polymères, comme d'ailleurs à tout autre type de matériaux. Nous resterons ici au niveau macroscopique [15].

I.11.3 Les paramètres influents

La rapide description ci-dessus permet de justifier que les paramètres importants quant aux propriétés mécaniques des polymères peuvent être liés au polymère mais aussi aux conditions de mise en œuvre et aux conditions de sollicitation (sens, vitesse) ou d'environnement (température, pression, milieu environnant).

L'ingénieur doit donc, pour gérer les polymères et leur comportement, prendre l'habitude de s'informer au mieux sur les résines qu'il emploie, à savoir sur :

- L'architecture du polymère ;
- La formulation du polymère ;
- La mise en œuvre du matériau ;
- Les conditions d'utilisation.

De toute évidence tous ces paramètres ne sont pas tous indépendants puisque, dans une certaine mesure, la nature des chaînes conditionne leur organisation et leur comportement.

I.11.3.1 L'architecture du polymère

Bien sûr la nature et le nombre de Co-monomères sont les premiers points à prendre en compte, en effet c'est le choix des monomères qui conditionne la souplesse des enchaînements covalents du squelette des chaînes et en partie leur cohésion, par les interactions physico chimiques inter chaînes que les substituant autorisent, mais il faut aussi prendre en compte la nature des chaînes ; leur tacticité, leur linéarité, le taux et les longueurs de branchements, la nature des enchaînements des monomères (statistique, bloc, alterné) dans le cas des copolymères, la réticulation.

Enfin la longueur des chaînes conditionne leur capacité à développer des interactions « physiques », par exemple les enchevêtrements, qui interviennent dans la tenue mécanique du matériau final.

I.11.3.2 La formulation du polymère

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

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

I.11.3.3 La mise en œuvre

La mise en œuvre peut modifier :

- L'architecture du matériau, c'est-à-dire : la nature des chaînes en provoquant des ramifications ou des réticulations ; la longueur des chaînes par dégradation. De manière très schématique, l'évolution des propriétés des polymères avec la masse molaire présente des seuils. En dessous d'une certaine masse la propriété n'est pas assurée, au-dessus elle évolue lentement. Pour des raisons liées à la synthèse ou à la mise en œuvre à l'état fluide, la masse molaire initiale est le fruit d'un compromis. De fait, elle peut souvent rester proche de l'un de ces seuils. La mise en œuvre peut donc, en réduisant les masses, détériorer gravement une ou l'autre des propriétés du polymère.
- La formulation en consommant des additifs.
- L'organisation des chaînes en induisant la microstructure : extension et orientation moléculaire ; cristallisation et texturation cristalline.
- L'organisation spatiale des constituants : répartition et orientations des charges et hétéro phases.

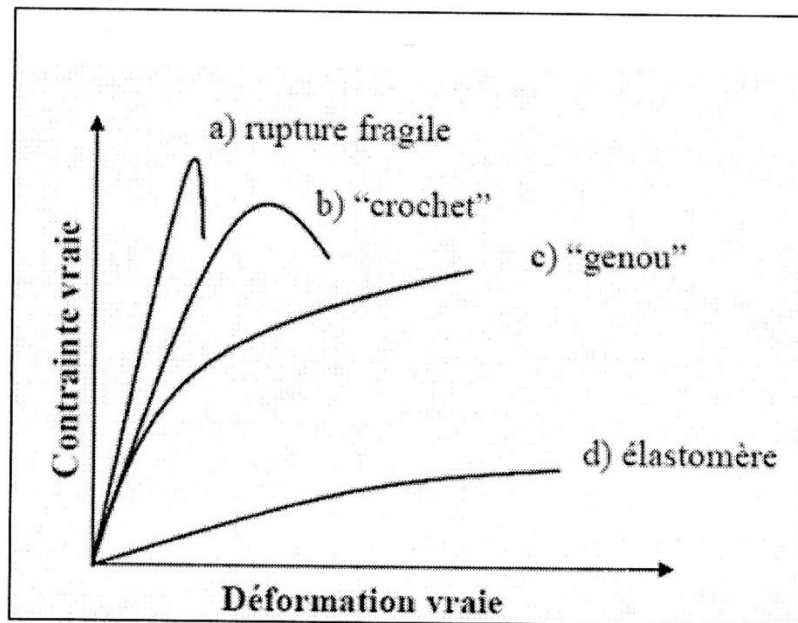


Figure I.14 : comportement typique des polymères à faible déformation [1].

Le comportement mécanique des polymères, au niveau macroscopique est caractérisé par une très grande diversité apparente. En effet, pour les mêmes conditions d'utilisation, et d'un point de vue technologique, on peut trouver des polymères qui sont, soit rigides fragiles, ductiles ou caoutchouteuse. La limite élastique de certains polymères tel que les polymères fragiles qui cassent au cours du stade viscoélastique ou les élastomères qui adoptent un comportement hyperélastique n'est pas évidente. Cette limite élastique est généralement discutable ; elle est identifiable par :

- La variation brusque de la pente de la courbe contrainte vraie – déformation vraie : on dit alors qu'elle prend la forme d'un genou. C'est le cas de la majorité des polymères semi-cristallin et de quelques polymères amorphes.
- Un maximum local de la courbe contrainte vraie – déformation vraie : on parle alors de crochet. Il est caractéristique de la plupart des polymères amorphes [1].

I.11.3.4. Les conditions d'utilisation

En toute généralité la réponse d'un polymère peut dépendre :

- Du type de sollicitation : traction, compression ou cisaillement.
 - De la température qui est un paramètre primordial que nous allons détailler.
 - De la vitesse de sollicitation qui est d'importance équivalente à celle de la température, il est important de le noter dès à présent.
 - De la pression (du moins à haute pression).
- Du taux de déformation, car la déformation se traduit par une évolution structurale et donc une évolution des propriétés.
- Du passé thermomécanique, c'est à dire d'une éventuelle dégradation pendant la mise en œuvre.

- De l'environnement. Dans certains cas le taux d'humidité peut changer le comportement des polymères hydrophiles ; Des hydrocarbures peuvent gonfler le matériau. Tous les polymères ne sont pas sensibles dans les mêmes proportions à chacun de ces paramètres. Il convient donc de les traiter au cas par cas. [15]

I.12 Types de sollicitation multiaxiale

La défaillance d'un matériau polymère ,ou plus exactement de la pièce finie correspondante est caractérisée par l'apparition de divers phénomènes plus ou moins conséquents, par exemple le début d'un écoulement plastique ,une déformation accrue en fluage, la formation de craquelures, voire une rupture fatale .L'importance de ces phénomènes dépend généralement du secteur d'utilisation et des conditions de sollicitation associées .Il est donc important de choisir et de définir précisément les critères adéquats pour expliquer la cause de la rupture du matériau.

Les grandeurs qui permettent de caractériser la charge mécanique maximale admissible des matériaux polymères sont généralement déterminées à partir d'éprouvettes simples, dans des essais uni-axiaux de traction, de compression ou de flexion. La limite de défaillance en cisaillement est rarement mesurée, à cause des difficultés expérimentales comparativement élevées de ce type d'essai (dans le cas d'une déformation radiale, sans rupture, d'un tube après torsion par exemple). Pour des applications techniques en construction, les pièces sont presque exclusivement soumises à des contraintes bi- ou triaxiales. Il est donc indispensable d'avoir à disposition des méthodes permettant d'exprimer les efforts subis par les matériaux quand ils sont soumis à des états de contraintes multiaxiaux. Ceci est possible en déterminant la contrainte équivalente σ_v ou la déformation équivalente ϵ_v . Ces valeurs doivent ensuite être comparées aux résultats des essais uni-axiaux. Une rupture se produit lorsque la valeur de la grandeur équivalente est supérieure ou égale à la valeur mesurée. La description mathématique des différents états de contraintes pouvant conduire à une rupture. Ces critères tiennent compte de la cause de la rupture en fonction des différents comportements du matériau. On peut distinguer les critères suivants:

- ✓ critères de contrainte,
- ✓ critères de déformation,
- ✓ critères énergétiques.

Une série de critères de rupture, basée sur différents concepts concernant les causes de la rupture, a été formulée au fil des années. La sélection du critère qui décrit le mieux le

comportement d'un matériau polymère ne peut être effectuée qu'à partir de mesures expérimentales et de la compréhension des mécanismes d'endommagement. Parce que la définition précise d'un état de contraintes triaxial, indispensable à l'analyse des pièces complexes, requiert un déploiement d'efforts techniques important, on se contente souvent d'une représentation bi-axiale de la rupture [16].

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

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 uni-axiale [1]. Ces essais sont utilisés soit dans des conditions quasi statiques soit dans le cadre d'essais de fatigue multiaxiale.

I.13. Essais de traction bi-axial

Ces essais ont pour but d'élargir les capacités d'identification du comportement plastique sous sollicitation bi-axiale. Ils nécessitent de disposer d'une machine ou d'un dispositif appliquant un système de déplacement orthogonaux sur une éprouvette forme de croix [18].

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

I.13.1 Principe de l'essai traction bi-axial

Les essais de traction bi-axiaux consistent à exercer une contrainte dans deux directions perpendiculaires sur une même éprouvette. Ceci impose d'utiliser des éprouvettes cruciformes. Pour réaliser des états de contrainte uniformes, il faut que les bras de la croix aient des rigidités transversales assez faibles. Les directions principales des contraintes sont fixées et on peut effectuer des chargements dans leur espace (figure I.15.) [17].

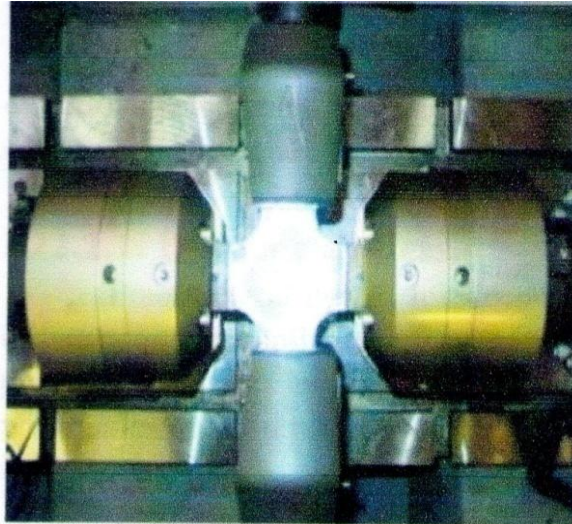
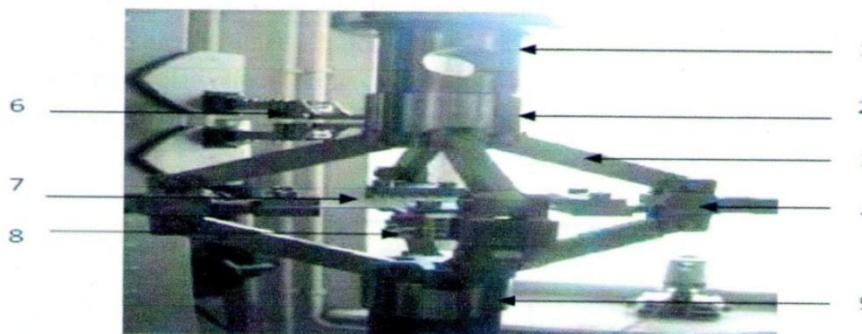


Figure I.15 : Epreuve de traction bi-axiale montée [19].

I.13.2 Machine d'essai

Le dispositif de traction bi-axial 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 [20].



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

Figure I.16 : l'ensemble de la machine [20].

I.14. Essai de traction –torsion

Ce type d'essai permet d'étudier les trajets de chargement avec modification des directions principales des contraintes. La machine utilisée est constituée d'un vérin linéaire et d'un vérin torique avec dispositif de découplage [17].

I.14.1 Principe de l'essai

Pour déterminer la loi de comportement en contraintes bi-axiaux, l'essai le plus utilisé consiste à solliciter un tube mince à la fois en torsion (figure I.17). Ce type d'essai permet d'étudier les trajets de chargement avec des modifications des directions principales des contraintes de découplage [20].

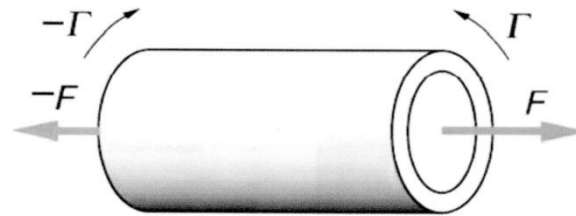


Figure I.17 : éprouvette tubulaire sollicitée traction- torsion [1].

I.15. Essai de traction-compression

I.15.1 Principe de l'essai

L'essai mécanique bi-axial le plus classique et qui donne meilleurs résultats et qui engendre une bonne approximation, un état de contrainte plane homogène, consiste à solliciter un tube à parois minces à la fois à la traction et compression interne (figure I.18). Le tube doit être relativement long pour éviter les efforts d'extrémités et les attaches particulièrement soignées pour éviter toute concentration de contraintes.

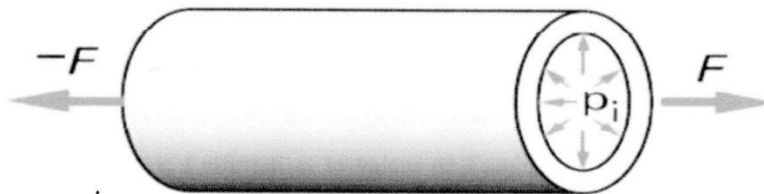


Figure I.18 : tube à parois minces sollicité en traction-compression.

I.16. Essai de traction- cisaillement

I.16.1 Essai Arcan

L'essai arcan a été développé pour l'étude et la caractérisation et l'endommagement des matériaux composites. Elle est également utilisée pour étudier d'autres problèmes tels que l'ouverture et la propagation des fissures [17].

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

I.16.2 Principe de l'essai Arcan

Deux supports angulaires sont liés à deux embases au milieu desquelles se trouve l'échantillon à tester. L'orientation de ces deux secteurs par rapport à l'axe de chargement d'une machine d'essai uni-axiale définit exactement la répartition de (traction perpendiculaire /cisaillement transverse) dans l'axe du chargement. La variation de cette orientation permet d'obtenir plusieurs combinaisons de sollicitation (figure I.19) [1].

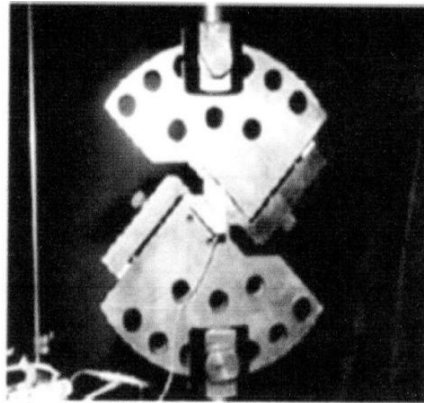


Figure I.19: principe de l'essai arcan [1].

I.17. Détermination de la limite élastique :

Tous les matériaux ont une limite élastique au-delà de cette limite, quelque chose se passe et sa forme originale ne peut jamais être retrouvée. La courbe contrainte-déformation est rectiligne sur toute la plage de déformation jusqu'à la limite élastique, qui est également la limite de déformation de rupture pour matériaux fragiles. Les matériaux ductiles se comportent différemment au-delà de la limite élastique; ils changent de forme en permanence en raison de déformation plastique. Le moment où un matériau passe du comportement élastique au comportement plastique est appelé limite d'élasticité (également connue sous le nom de limite proportionnelle). Avant la limite d'élasticité, un matériau reprend sa forme d'origine lorsque la charge est retirée. Après la limite d'élasticité, le matériau subit une déformation plastique permanente et, lorsque la charge est retirée, il ne peut pas reprendre sa forme d'origine.

Le seuil d'élasticité est le point de la courbe contrainte-déformation où il n'est pas long rectilinéaire. La limite d'élasticité est définie à ce stade comme la quantité de contrainte nécessaire pour démarrer la déformation plastique. Dans les matériaux métalliques, la limite d'élasticité est déterminée par la quantité de contrainte nécessaire pour initier un glissement de dislocation. Les dislocations ne peuvent pas bouger lorsque la contrainte est inférieure à la

limite d'élasticité et commencent à se déplacer lorsque la contrainte appliquée dépasse la limite d'élasticité. Les métaux qui contiennent des dislocations qui peuvent se déplacer facilement ont une faible limite d'élasticité, tandis que les métaux à haute résistance contiennent des sollicitations qui sont très résistantes au glissement.

Dans les matériaux polymères, la limite d'élasticité est déterminée par la contrainte nécessaire pour commencer le démêlage et le glissement permanents des chaînes polymères. L'apparition d'une limite d'élasticité prononcée dépend de l'augmentation soudaine du nombre de luxations mobiles. Cependant, toutes les courbes de contrainte-déformation ne montrent pas un changement brusque du comportement élastique au comportement plastique. La courbe pour les métaux et les polymères montre une transition progressive des régimes élastique aux régimes plastiques, comme indiqué dans Figure I.23 et le point exact où commence la déformation permanente est difficile à localiser. Cette limite est déterminée par trois méthodes [21].

I.17.1 Méthode de perte de linéarité

La limite élastique déterminée par cette méthode et la contrainte qui marque la fin du domaine élastique. Pour les valeurs supérieures, à cette limite le matériau ne se déforme plus élastiquement. Et cette contrainte limite d'élasticité (σ) ne peut être tirée directement de la courbe, car elle n'est pas évidente, comme pour les cas des métaux, ce qui rend difficile sa détermination. Pour la détermination de cette limite on utilise la tangente à l'origine ou la limite est prise à l'endroit de perte de linéarité [22].

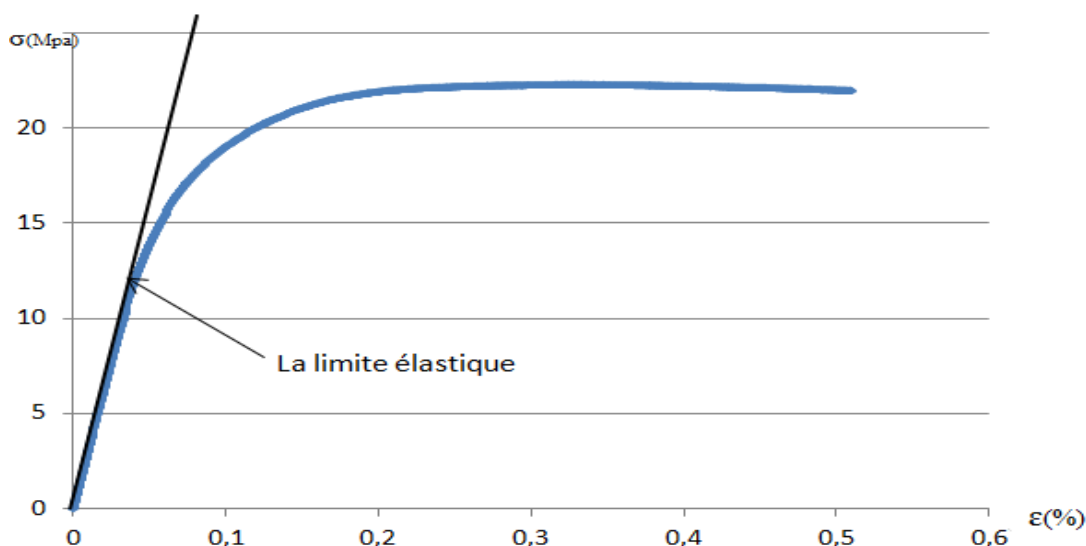


Figure I.20: Courbe de la limite élastique (première méthode)

I.17.2 Méthode des deux tangentes

Les polymères peuvent avoir un comportement fragile ou ductile, on s'intéresse ici aux polymères ductiles. De manière générale et quelque peu arbitraire, on définit la contrainte d'élasticité σ_y comme étant la contrainte nominale au maximum de la courbe $\sigma_n(\epsilon_n)$ (bien avant le durcissement). Si le matériau ne présente pas de maximum, le seuil de plasticité est défini (arbitrairement) comme le point d'intersection des deux tangentes, comme montre la figure I.21 c'est la norme ISO R257 [23].

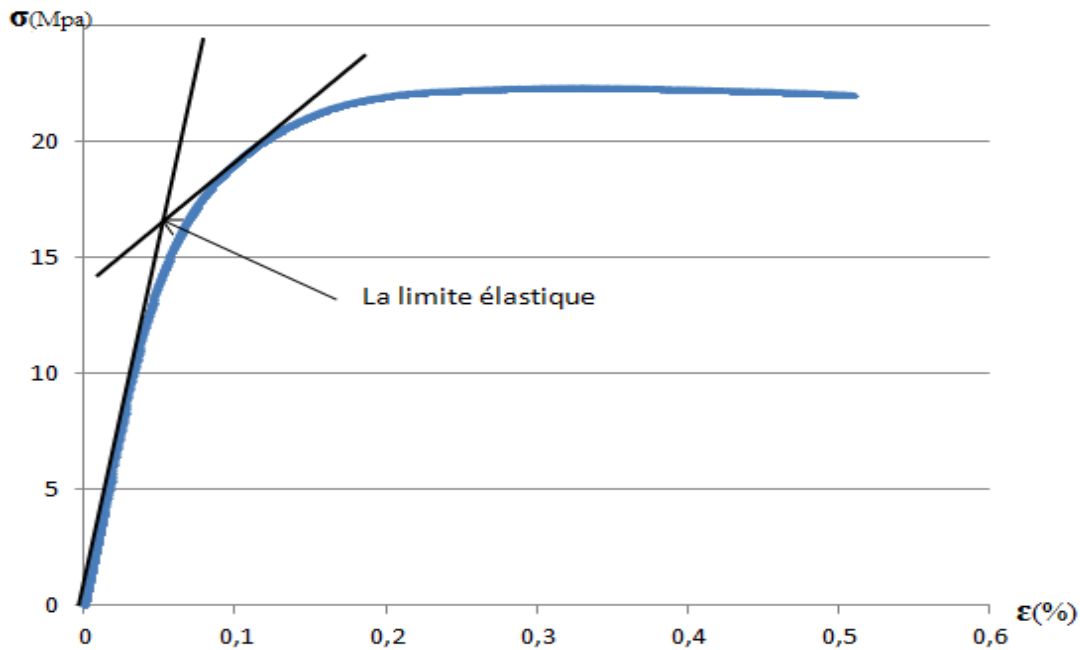


Figure I.21 : Courbe de la limite élastique (ISO R257 méthode).

I.17.3 Méthode de tangente avec un offset

Cette méthode implique de spécifier un pourcentage de déformation de décalage, qui est généralement de 0,2% pour les métaux et 0,3% dans les polymères. Une ligne commençant à partir de la valeur de décalage est dessinée parallèlement à la partie linéaire (élastique) de la courbe. La contrainte correspondant à l'intersection de cette ligne avec la courbe contrainte – déformation est la limite d'élasticité décalée ou (plus communément appelée) la résistance d'épreuve. La résistance à l'épreuve est utilisée pour définir la contrainte requise pour provoquer la déformation plastique des matériaux qui n'ont pas de limite élastique nette sur leur courbe contrainte – déformation [21].

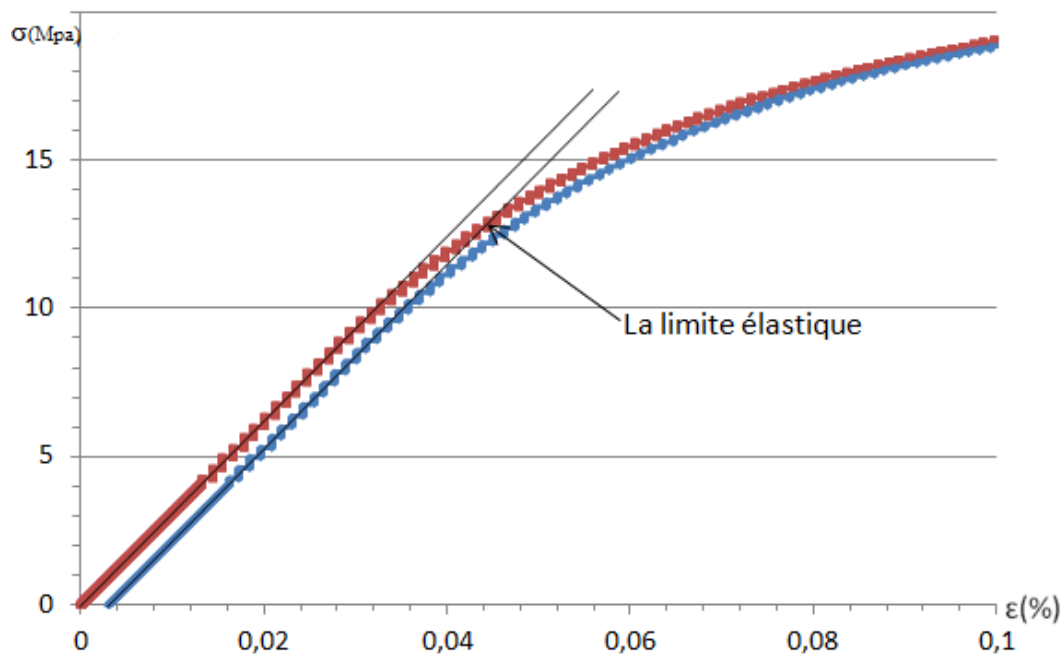


Figure I.22 : Courbe de la limite élastique (offset méthode).

I.18. Conclusion

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

Nous sommes intéressés aussi au comportement mécanique de ces derniers, c'est pour cela que nous avons cités et expliqué les différents types d'essai mécanique multiaxiaux, afin de définir leurs différentes caractéristique mécaniques. A la fin on a présenté les différentes méthodes de détermination de la limite élastique.

Chapitre II :

Présentation des essais

II.1. Introduction

Ce chapitre présente les essais mécaniques réalisés dans le cadre d'une thèse de doctorat [1], dont les résultats expérimentaux en termes de force-déplacement ou contrainte-déformation sont utilisés dans ce présent travail. La réalisation d'essais expérimentaux constitue une étape très importante dans la procédure de détermination la limite élastique. En effet, cette limite dépend du type de chargement, les chargement uniaxiaux et multiaxiaux.

II.2. Essais mécaniques uni-axiaux

II.2.1. Traction uni-axiale monotone sur éprouvettes sablier

L'essai de traction uni-axiale est un essai « simple » à mettre en œuvre. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à une traction et à mesurer l'allongement correspondant à une force F appliquée. Sa simplicité ainsi que l'existence de techniques poussées autorise une instrumentation riche des essais. En raison de son dépouillement simple, il permet d'établir des lois de comportement fiables et par conséquent permet d'accéder aux caractéristiques du matériau telles que le module d'Young, la contrainte au seuil d'écoulement et la contrainte à la rupture. En outre, il présente une reproductibilité remarquable.

II.2.2. Essai de compression

Le comportement mécanique des polymères en compression est différent de celui en 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. Des cylindres de diamètre et de hauteur tous deux égal à 10 mm ont été prélevées du même tube dans le sens axial et sont réalisées par usinage (figure II.1). 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 reliée à une cellule de force de 5 kN 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 Co-axialité 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. Ces essais ont été effectués sur la machine de traction INSTRÖN 5800 pour laquelle le plateau supérieur fixé

sur la traverse mobile, se déplace verticalement vers le bâti de la machine sous les mêmes conditions utilisées pour l'essai de traction. Par contre, dans ce cas la déformation est obtenue par le suivi vidéo métrique des taches déposées sur la surface de l'éprouvette.

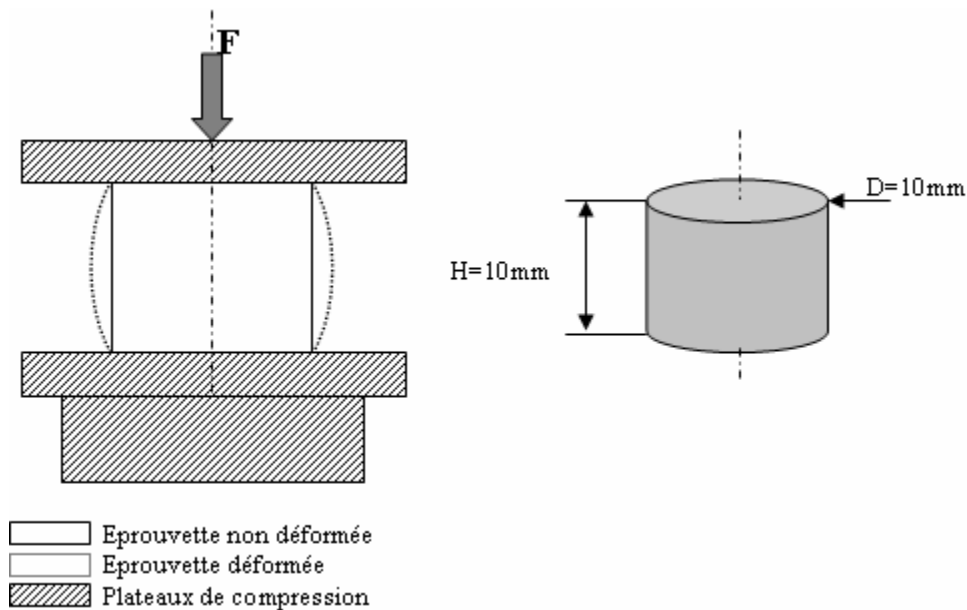


Figure II.1 : Schématisation de l'éprouvette et du dispositif de compression

II.2.3. Essai de cisaillement

Dans le but de comprendre le comportement mécanique du PEHD sous différents chargements, et principalement de déterminer les contraintes au seuil de plasticité, nous avons complété l'étude expérimentale par des essais de cisaillement. Plusieurs méthodes d'essais de cisaillement ont été utilisées dans la littérature. Dans cette étude nous avons mené des essais de cisaillement double à glissement simple sur des éprouvettes de forme parallélépipédique prélevé du même tube dans le sens de l'extrusion. La figure 4 représente schématiquement la forme de ces éprouvettes et le dispositif expérimental utilisé. La branche du milieu du dispositif est entraînée par la traverse mobile alors que les branches extérieures solidaires du bâti sont fixes. Les deux sections ($S=h.e = 5 \times 5 \text{ mm}^2$) de l'éprouvette sont cisailées de la même manière et au même moment. Ces essais sont effectués sur la même machine de traction « INSTRÖN 5800 »

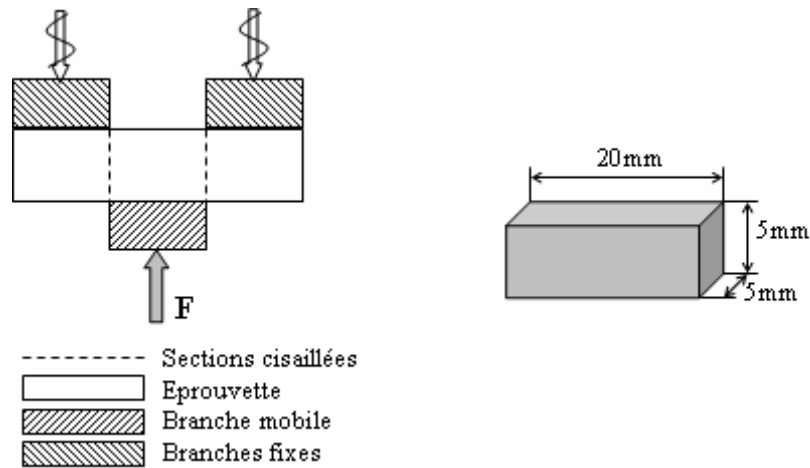


Figure II.2 : Schématisation de l'éprouvette et du dispositif de cisaillement.

II.3. Essais mécaniques bi-axiaux

II.3.1. Dispositif Arcan

Les essais arcan ont été développés particulièrement pour produire un état uniforme de contrainte plane dans des éprouvettes solides. Cette méthode d'essai est initialement conçue pour les essais en chargement bi-axial des matériaux composites renforcés par fibre.

Les développements récents ont montré que ce type d'essai peut être utilisé pour déterminer le comportement au seuil et la rupture des matériaux métalliques tels que les mousses métalliques, l'acier et les alliages d'aluminium. Mae quand à lui, a caractérisé avec succès la ductilité du polymère (PP/EPR/TALC) en utilisant un appareil Arcan.

Dans notre étude, l'application de ce type d'essai a pour objectif la détermination des propriétés du PEHD au seuil de plasticité. Pour ce faire une conception d'un appareil Arcan adaptable à la machine « INSTRÖN 5800 » a été réalisée en utilisant le logiciel SolidWorks. La vérification de la rigidité de ce dernier a été accomplie par le logiciel SolidWorks simulation. La fabrication des différentes pièces constituant cet appareil a été réalisée par usinage sur machines à commande numérique.

II.3.2. Mise en place de l'essai

Les essais sont menés sur une machine de traction électromécanique de marque INSTRÖN 5800. Comme illustrée sur la figure 7, l'éprouvette papillon est montée sur l'appareil Arcan et fixée avec serrage par les deux brides 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, différents états de contrainte peuvent être développés : de la Traction et cisaillement combiné, compression et cisaillement combiné

jusqu'au cisaillement pur. L'angle de chargement est gardé constant durant tout l'essai pour chaque état de contrainte et une vitesse de déplacement de la traverse mobile est imposé constante, égale à 0.5 mm/min. La force de réaction verticale de l'éprouvette est mesurée par une cellule de charge de 5kN.

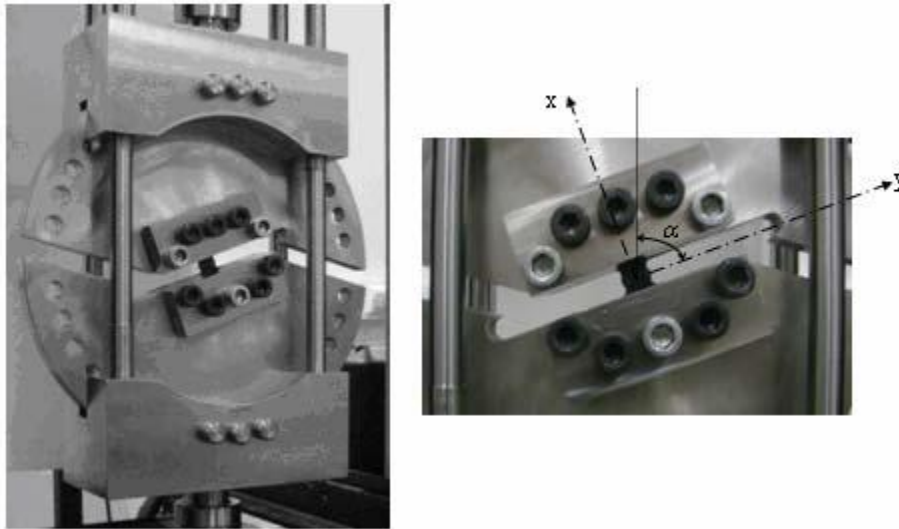


Figure II.3. Montage de l'éprouvette papillon sur le Dispositif Arcan

II.4. Résultats

II.4.1. Essais uni-axiaux

II.4.1.1. Traction uni-axiale

La première série d'essais de traction uni-axiale est réalisée sur les éprouvettes axisymétriques de différents rayons de courbure en pilotage vidéo métrique à vitesse de déformation constante et à la température ambiante.

Les courbes représentant l'évolution de la contrainte vraie en fonction de la déformation vraie pour tous les types d'éprouvettes exhibent la même allure. Afin d'examiner le comportement du PEHD sous traction uni-axial, l'éprouvette axisymétrique avec le plus grand rayon de courbure 80 (type 4) est utilisée. La (Figure 9) représente la réponse de celle-ci en terme de courbes de contrainte vraie déformation vraie. On distingue alors trois (3) stades :

Stade I : le début de la courbe présente une pente élevée, quasi linéaire à l'origine. Cette partie est appelée réponse viscoélastique linéaire qui est dû aux mécanismes successifs et/ou concurrents comportant

- La déformation des bandes de Vander Walls
- Le changement de conformations des chaînes dans la phase amorphe

·La plasticité prématurée dû au processus de glissement dans les lamelles cristallines.

Stade II: une faible chute de contrainte apparaît lorsque la déformation plastique est amorcée qui se propage à travers l'échantillon par génération de la striction (figure II.6). Ce phénomène est associé au déroulement des chaînes sous l'effet de la déformation appliqué. Lors de la stabilisation de la striction, le diamètre minimal de l'éprouvette ne diminue quasiment plus, la déformation qui suit la striction intervient à une contrainte quasi constante.

Stade III : ce troisième stade correspond au durcissement structural global du matériau qui est lié à l'orientation progressive des chaînes dans la direction principale de déformation et la fragmentation des cristallites conduisant à la formation d'une microstructure fibrillaire. L'espace intermoléculaire étant ainsi réduit, la cohésion du système est alors renforcée, alors que l'allongement augment. A la fin de ce stade on assiste à une striction entièrement propagée suivi de la rupture finale de l'éprouvette.

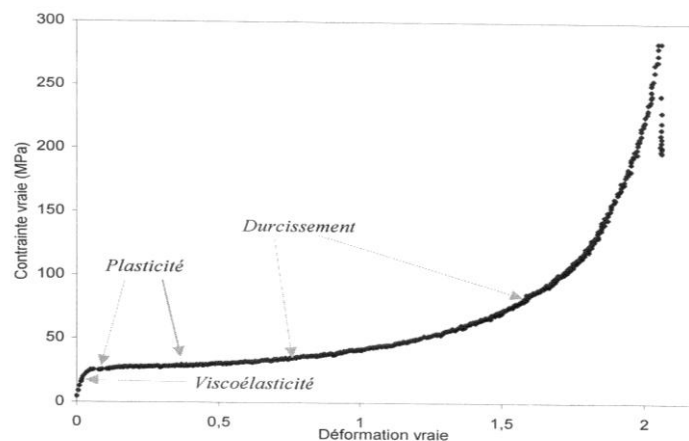


Figure II.4 : Réponse contrainte vraie- déformation vraie de l'éprouvette de type4 [8].

II.4.1.2. Compression uni-axiale et cisaillement simple

Les essais de compression uni-axiale sur les éprouvettes cylindriques effectués sur la machine de traction couplés au système vidéo métrique, ont permis de déterminer la réponse du PEHD en terme de contrainte vraie- déformation vraie par le suivi des taches déposées sur la surface de l'éprouvette. La contrainte axiale vraie Cependant pour les essais de cisaillement, la réponse de PEHD est présentée en termes de force- déplacement. La contrainte de cisaillement.

Ainsi, pour comparer les résultats des deux essais ; la réponse du PEHD en compression uni-axiale et en cisaillement simple est représentée en terme de courbes de contrainte équivalente- déformation équivalente (figure II.8). Elle exhibe la même réponse mécanique qui caractérise les polymères semi-cristallins pour ces types de chargement. Pour les deux types de chargement, un comportement élastique linéaire initial est observé. En cisaillement simple, le matériau présente un comportement proche de zéro écrouissage. En revanche, un durcissement progressif est observé en compression uni-axiale. Ceci peut être lié à la modification de la microstructure lors de la déformation qui est différente dans les deux types de chargement. Le durcissement macroscopique observé en compression est associé au processus d'orientation moléculaire plane qui diffère de celle induite en cisaillement simple.

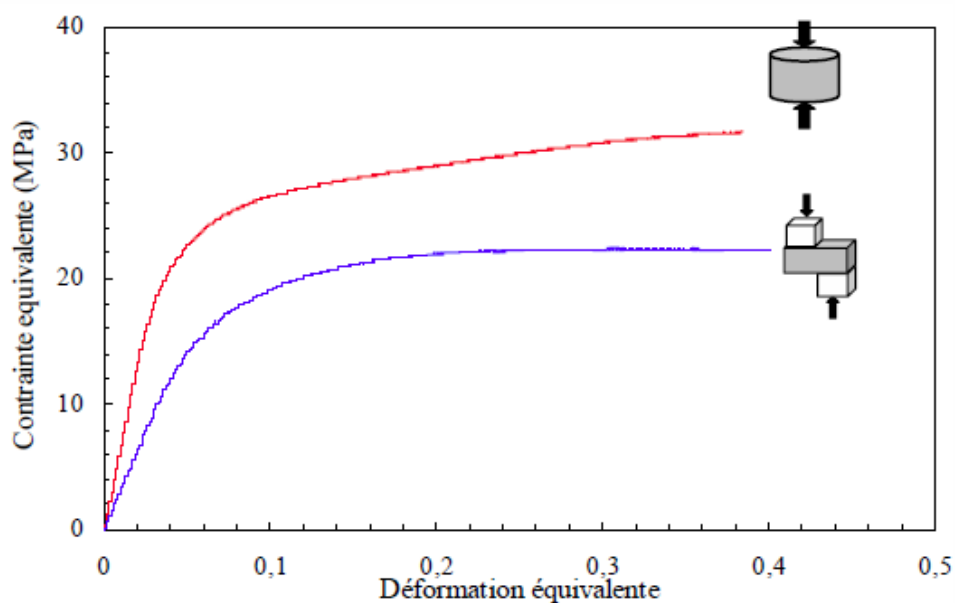


Figure II.5 : Réponse en terme de contrainte équivalente - déformation équivalente du PEHD en compression uni-axiale et en cisaillement simple.

II.5. Essais bi-axiaux

Les résultats présentés dans les Figures III.5 et III.6 montrent que la limite d'élasticité équivalente en cisaillement simple est inférieure à celles en traction et en compression uni-axiale (les valeurs de cette limite d'élasticité pour tous les types de chargement seront présentées dans le paragraphe III.4). Cela démontre qu'un critère de plasticité basé sur le deuxième invariant du tenseur déviatorique des contraintes tel que celui de Von Mises, n'est plus valide pour décrire l'écoulement plastique du PEHD. La limite d'élasticité doit alors être déterminée pour différents types de chargements combinés, ce qui est le cas dans ce travail, où le chargement bi-axial combinant la traction et la compression au cisaillement a été

appliqué aux éprouvettes papillons. Dans ce paragraphe, on présentera les résultats des essais réalisés avec le dispositif Arcan sur les éprouvettes papillons. Des déplacements verticaux positifs et négatifs sont appliqués à ces éprouvettes avec différents angles de chargement pour développer des états de contraintes combinés de traction/cisaillement et compression/cisaillement respectivement. Cinq angles de chargement sont utilisés pour les deux types d'essai. $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ et 90° pour la traction combinée au cisaillement et $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ et 70° pour la compression combinée au cisaillement. Les courbes force- déplacement obtenues de ces essais sont présentées dans la Figure II.9. La figure II.10.a montre les résultats en terme de courbes force déplacement lorsque un déplacement vertical positif est appliqué. Ces courbes ne se croisent pas et plus l'angle de chargement est grand, la force nécessaire à déformer l'éprouvette est importante. Leur forme générale semble être homothétique, excepté pour l'angle 90° .

La réponse élastique linéaire initiale est suivie d'une évolution non linéaire. Cette non-linéarité augmente avec le déplacement appliqué jusqu'à atteindre une valeur presque asymptotique. La seule divergence de cette tendance est observée pour l'angle de chargement de 90° qui présente un adoucissement important de la charge après la zone linéaire élastique et avant la stabilisation de la force. Le maximum de la charge représente l'apparition de la striction dans la section centrale de l'éprouvette parce que l'état de contraintes planes est favorisé pour cet angle de chargement. Pour les autres angles de chargement, combinant la traction et le cisaillement, la réponse mécanique est similaire à celle obtenu dans le cas du cisaillement simple (figure III.6).

En ce qui concerne les résultats des essais de compression combinée au cisaillement, les charges et les déplacements verticaux négatifs ont été convertis en valeurs positives (figure 11). On peut voir clairement que la pente des courbes augmente avec l'angle de chargement. En outre, les courbes atteignent un pic au-delà duquel la charge chute. Le déplacement qui correspond à la chute de la charge est très dépendant de l'angle de chargement. En effet, plus l'angle de chargement est important, plus tôt la charge maximum est atteinte. Ce maximum de charge peut être associé au début gauchissement dans la section centrale.

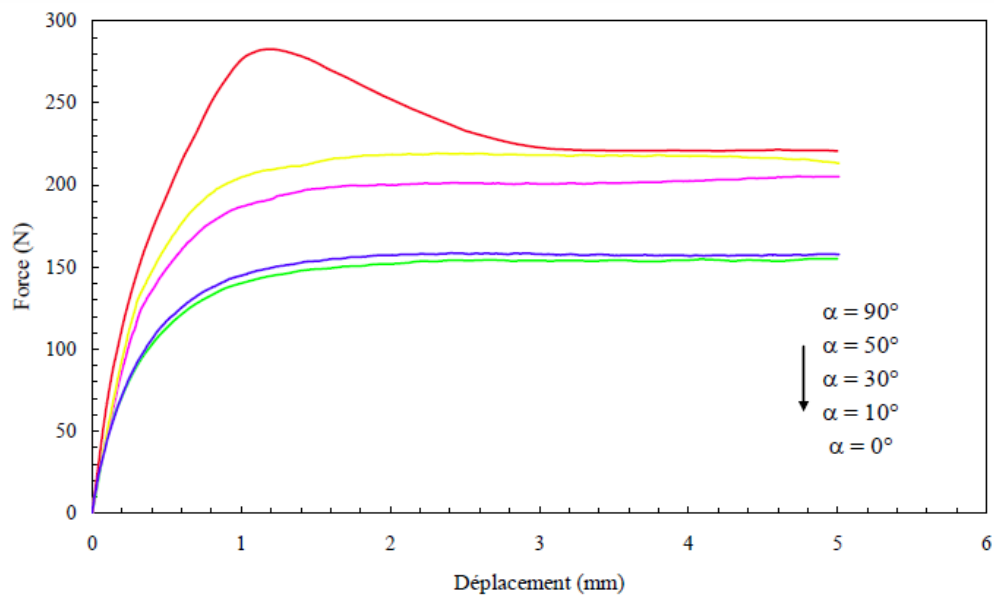


Figure II.6 : Réponse charge-déplacement des éprouvettes papillons pour différent angle de chargement : déplacement vertical positif (traction /cisaillement)

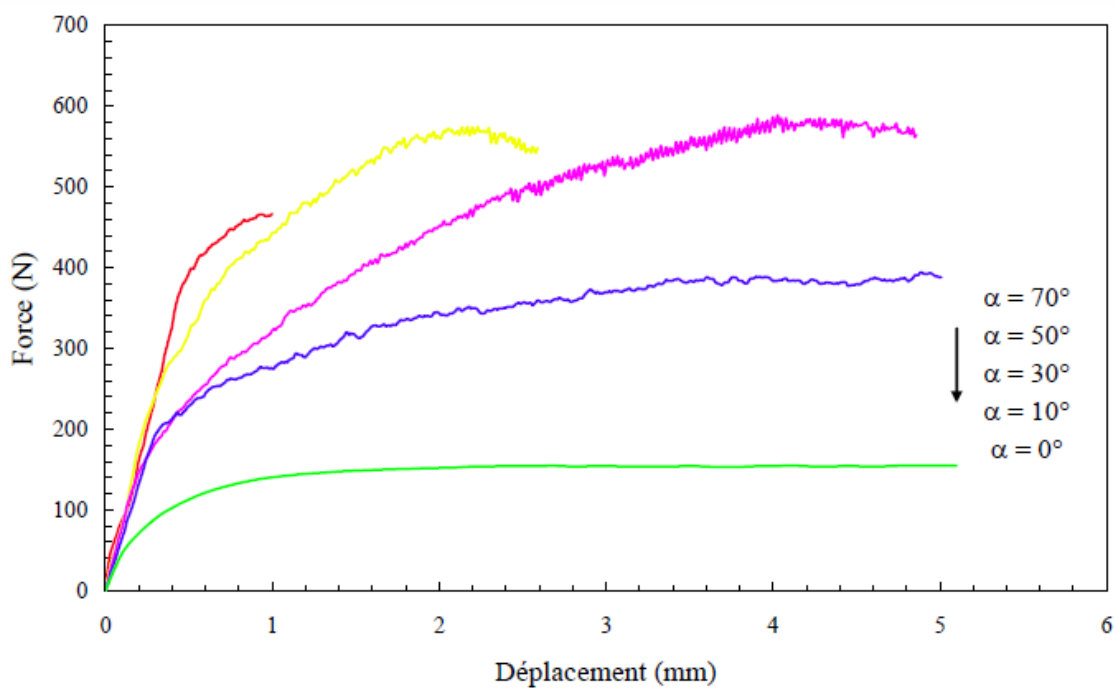


Figure II.7 : Réponse charge-déplacement des éprouvettes papillons pour différent angle de chargement : déplacement vertical négatif (compression/cisaillement)

II.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes techniques expérimentales utilisées dans les essais mécaniques en chargement uni-axial et bi-axial .Les résultats en terme de courbes de déformation sont ainsi présentées. D'une manière général ces courbes présentent une partie élastique au début de chargement, qui consistera la partie sur la quelle est focalisé cette étude.

Chapitre III :

Résultats et discussions

Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais mécaniques réalisés dans le cadre d'une thèse de doctorat [1] et la détermination de la limite élastique par trois différentes méthodes :

- 1-la perte de linéarité
- 2-la méthode des deux tangentes
- 3-la méthode de l'offset

Ensuite, on présentera un critère de plasticité pour tracer l'enveloppe de plasticité correspondante aux résultats expérimentaux et à la méthode utilisée pour la détermination de la limite élastique.

III.1. Courbe de traction

Les courbes contrainte- déformation décrivant le comportement mécanique du PEHD en traction pour les éprouvettes R2, R4, R10 et R80 et la description des méthodes utilisées sont données par les figures III.1-12. Les valeurs de la limite élastique et les déformations correspondantes sont données par les tableaux III.1-4.

III.1.1 Traction R2

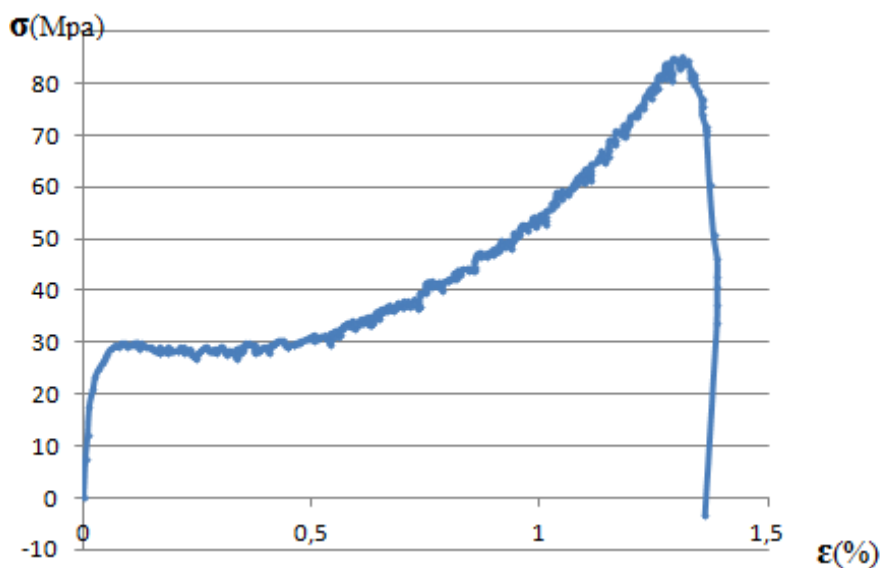


Figure III.1 : courbe de traction R2.

Pour trouver la limite élastique et la déformation correspondante, on applique les trois méthodes suivantes :

- ✓ La première méthode de la tangente.
- ✓ La deuxième méthode des deux tangentes (ISO R257) .
- ✓ La troisième méthode : offset.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

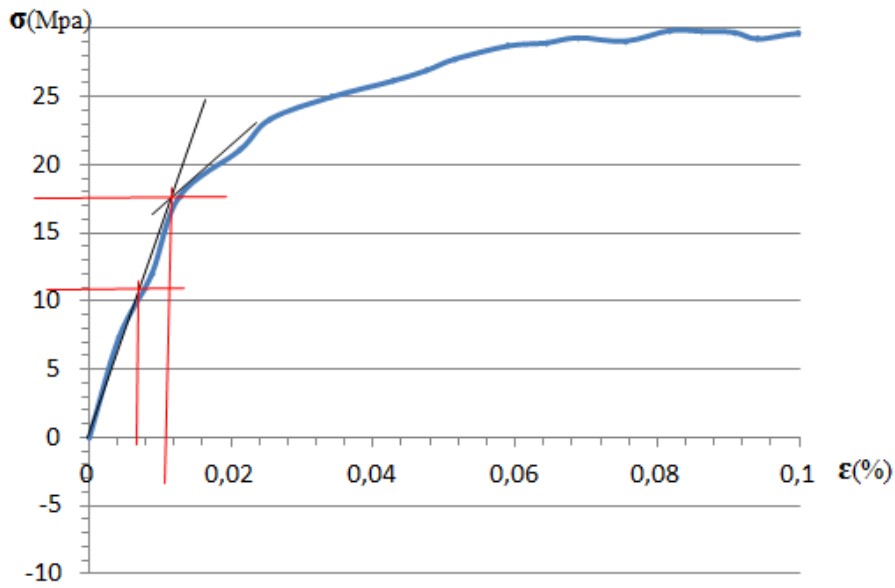


Figure III.2 : La méthode des deux tangentes tractions R2.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

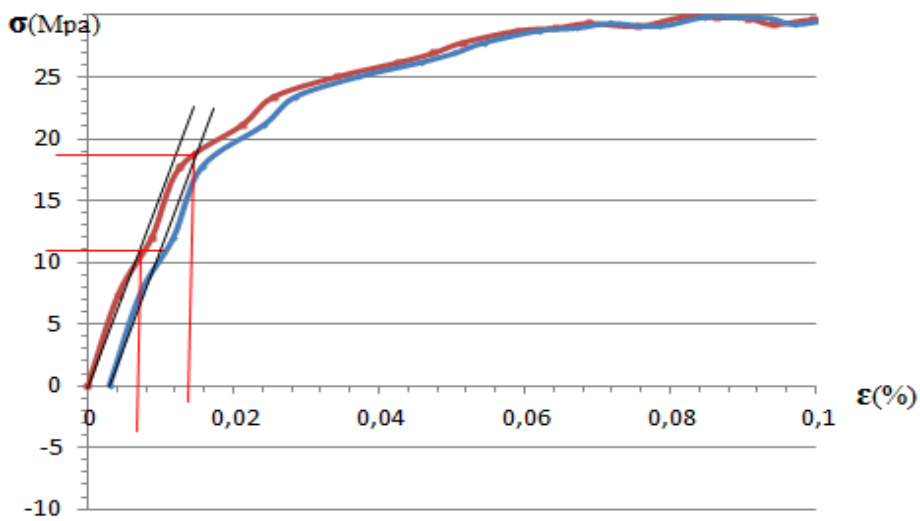


Figure III.3 : La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction R2

C. Résultat de la courbe en traction R2

Tableau III.1 : Résultats des courbes en traction R2.

Les méthodes	Limite élastique (MPa)	Déformations (mm)
méthode de la tangent	11	0,06
méthode d'ISO R257	17,5	0,011
méthode de l'offset	18,8	0,014

III.1.2. Traction R4

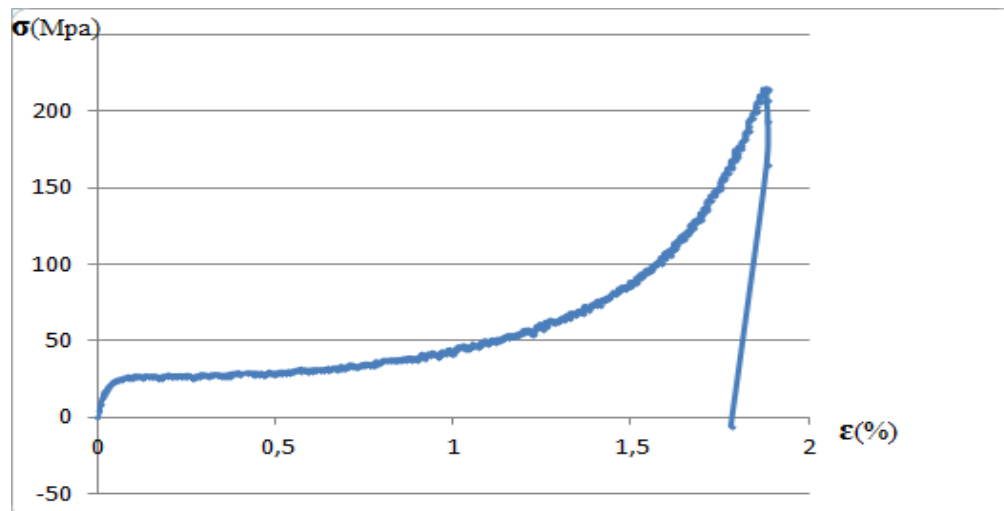


Figure III.4 : courbe de traction R4.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

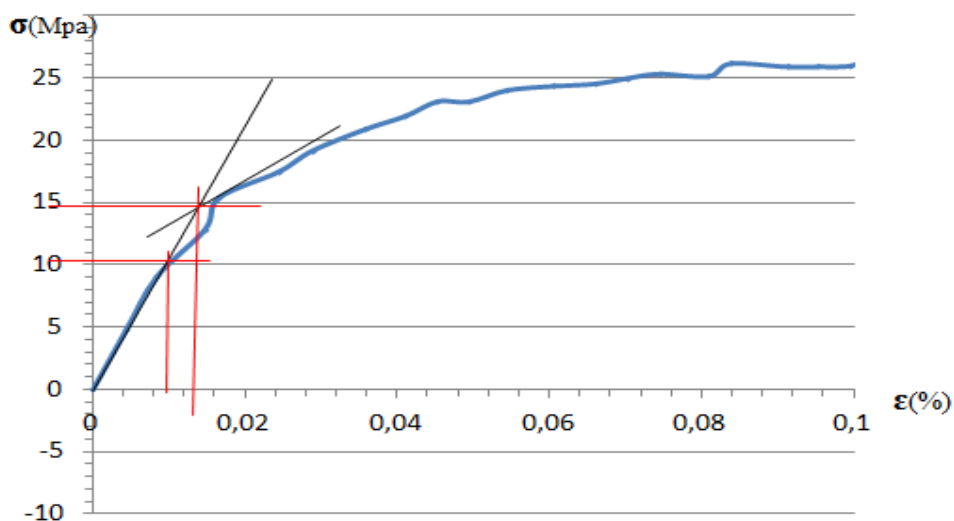


Figure III.5 : La méthode des deux tangentes tractions R4.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

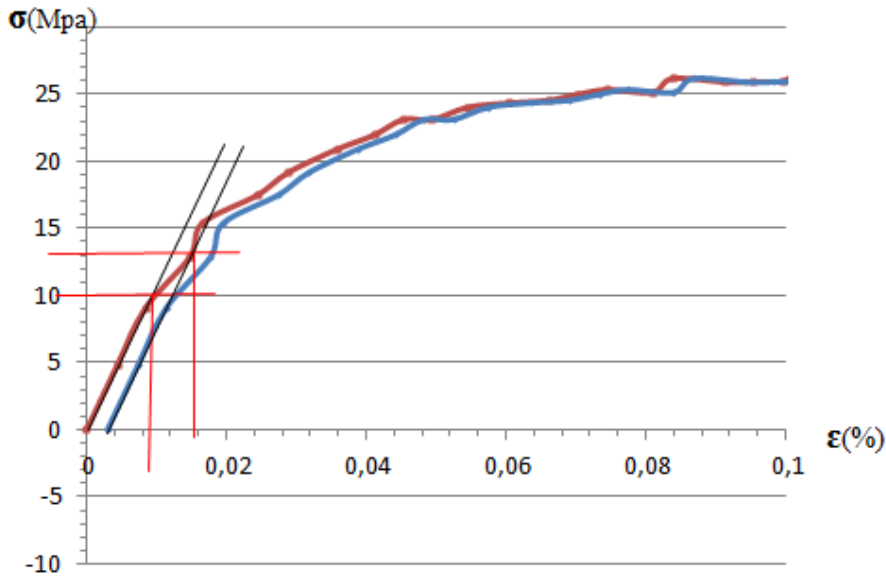


Figure III.6: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction R4.

C. Résultats de la courbe traction R4

Tableau III.2 : Résultat de la courbe traction R4.

Les méthodes	Limite élastique (MPa)	Déformations (mm)
Méthode de la tangente	9,8	0,081
Méthode d'ISO R257	14,9	0,011
Méthode de l'offset	12	0,014

III.1.3 Traction R10

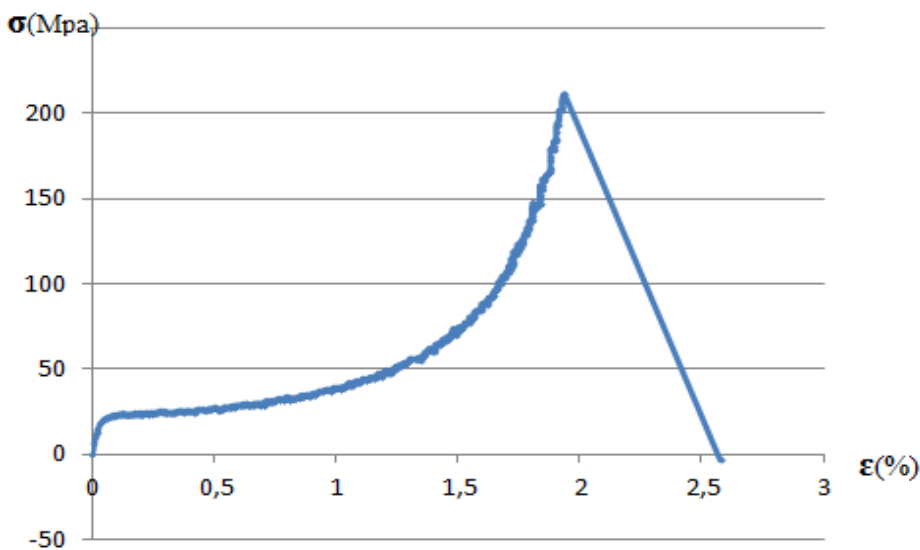


Figure III.7 : courbe de traction R10.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

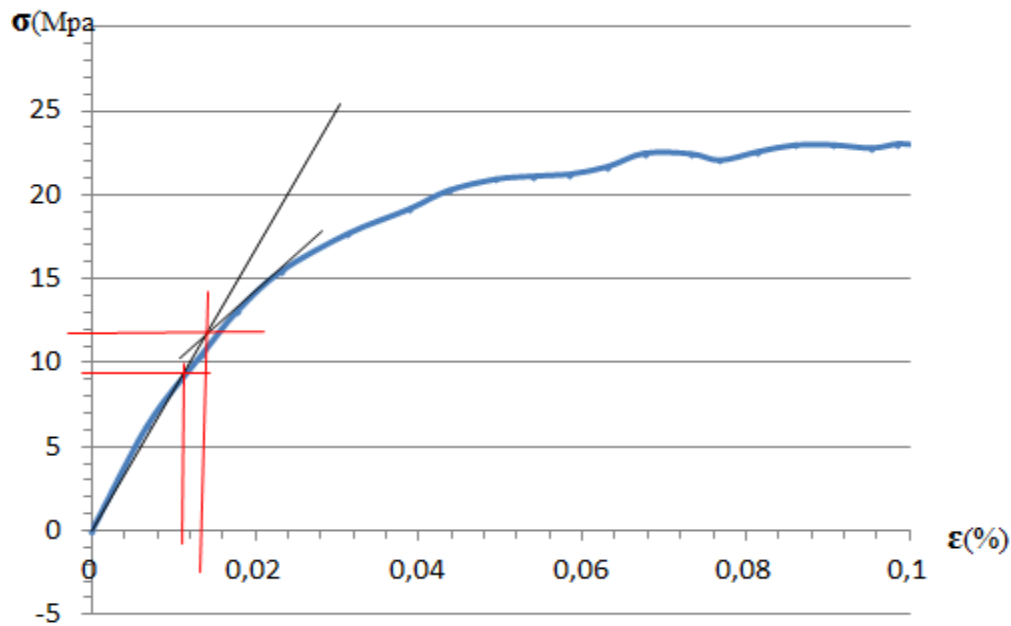


Figure III.8: La méthode des deux tangentes tractions R10.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

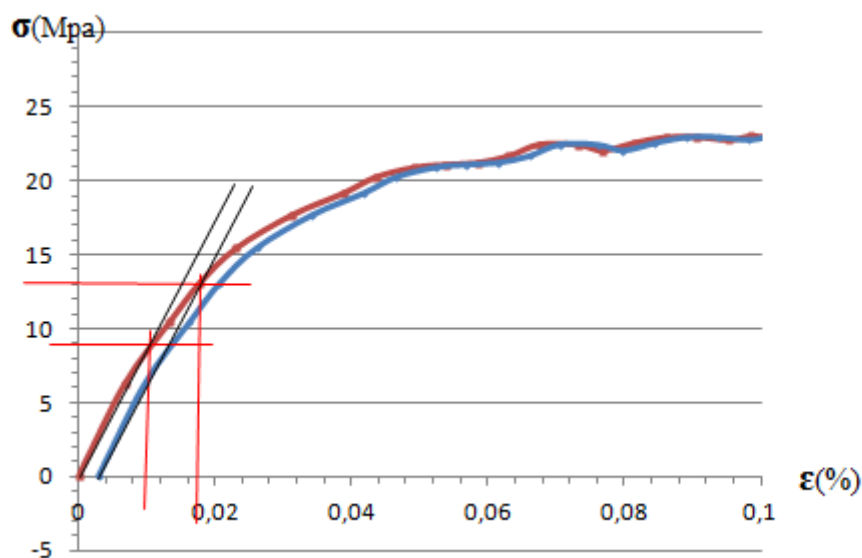


Figure III.9 : La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction R10.

C. Résultats de la courbe traction R10

Tableau III.3 : Résultat de la courbe traction R10.

Les méthodes	Limite élastique (MPa)	Déformations (mm)
Méthode de la tangente	9	0,01
Méthode d'ISO R257	11,9	0,013
Méthode de l'offset	13,5	0,02

III.1.4 Traction R80

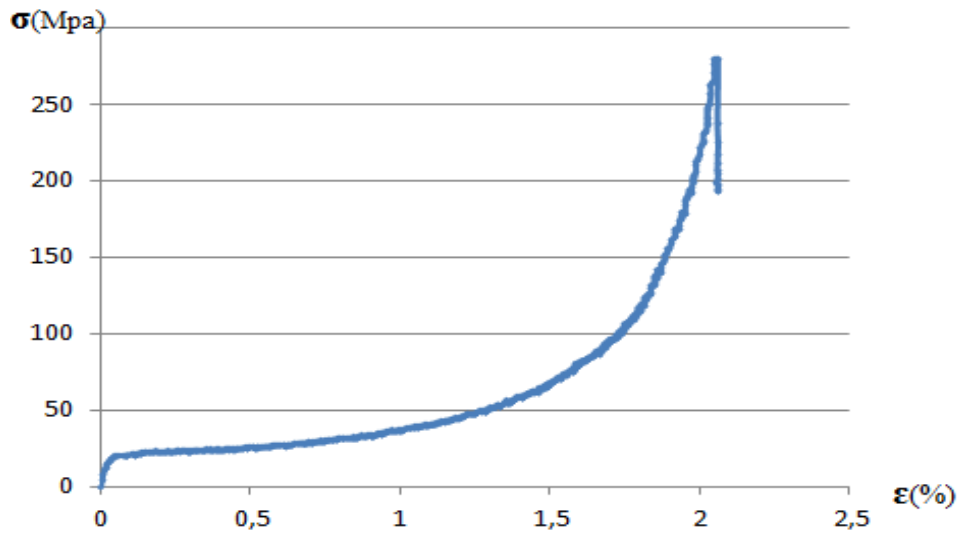


Figure III.10: courbe de traction R80.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

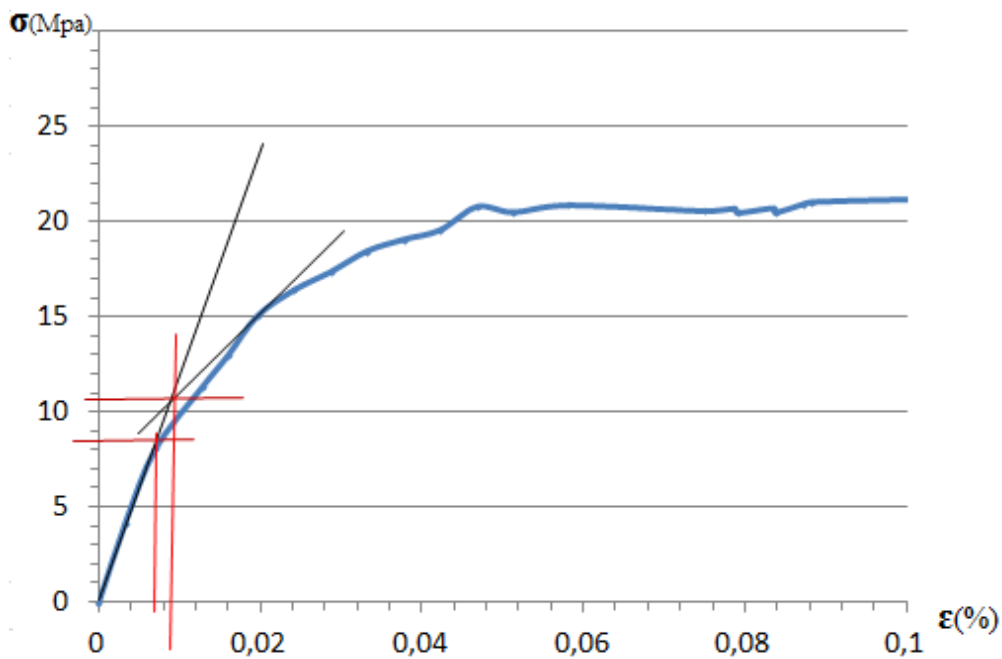


Figure III.11 : La méthode des deux tangentes tractions R80.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

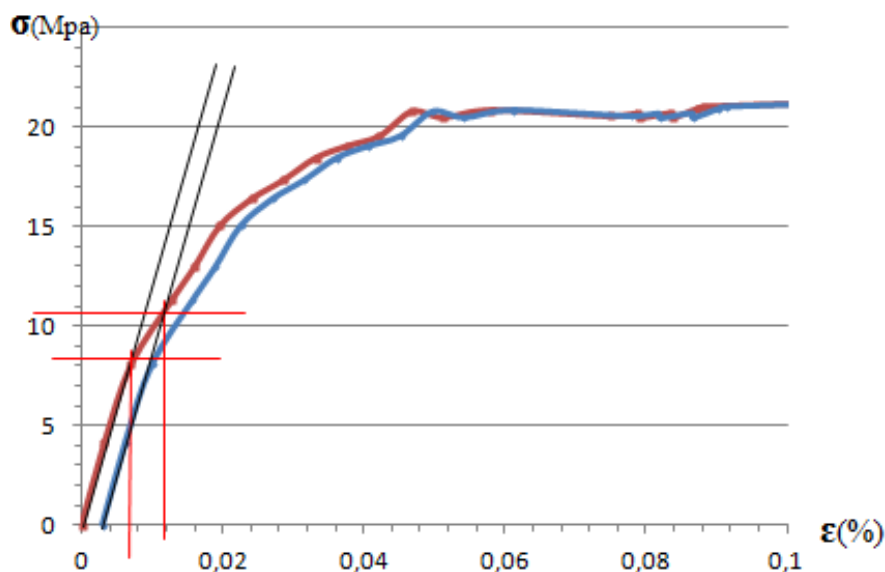


Figure III.12 : La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction R80.

C. Résultats de la courbe traction R80

Tableau III.4 : Résultat de la courbe traction R80.

Les méthodes	Limite élastique	Déformation
Méthode de la tangente	9,2	0,08
Méthode d'ISO R257	10,9	0,013
Méthode de l'offset	11,2	0,014

III.2. Courbe de traction – cisaillement

Les courbes contrainte- déformation décrivant le comportement mécanique du PEHD en traction combiné au cisaillement à différents angles de chargement sur les éprouvettes papillons et la description des méthodes utilisées sont données par les figures III.13-27-. Les valeurs de la limite élastique et les déformations correspondantes sont données par les tableaux III.5-9.

III.2.1. Traction combiné au cisaillement 00°

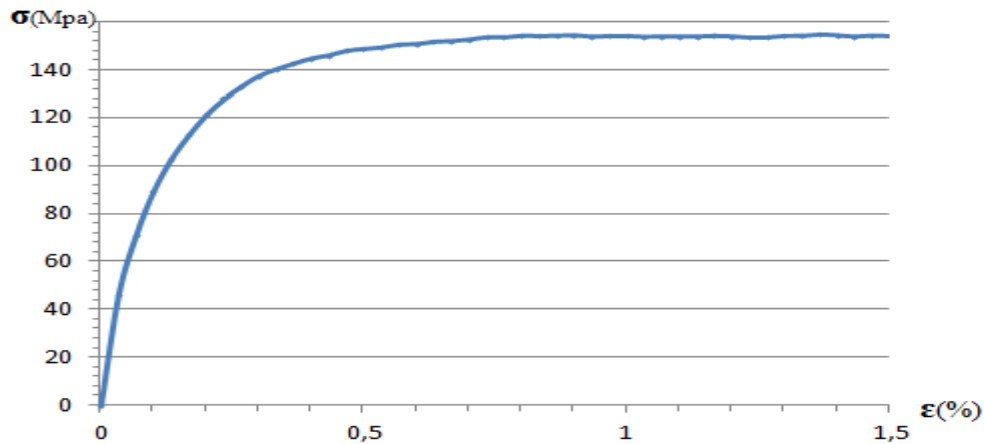


Figure III.13: la courbe de traction-cisaillement 00°

Pour trouver la limite élastique et la déformation on applique les trois méthodes pour la déterminer qui sont :

- ✓ La première méthode : la tangente ;
- ✓ La deuxième méthode : ISO R257 ;
- ✓ La troisième méthode : offset.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

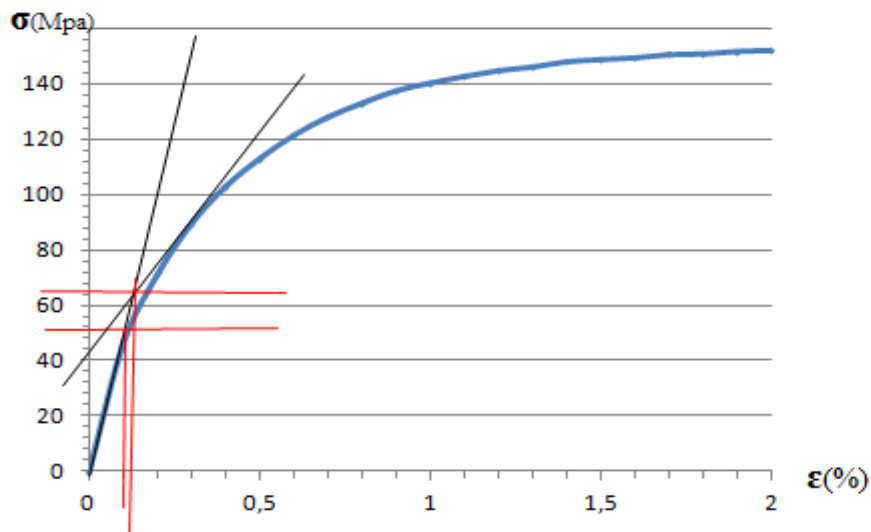


Figure III.14: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 00°

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

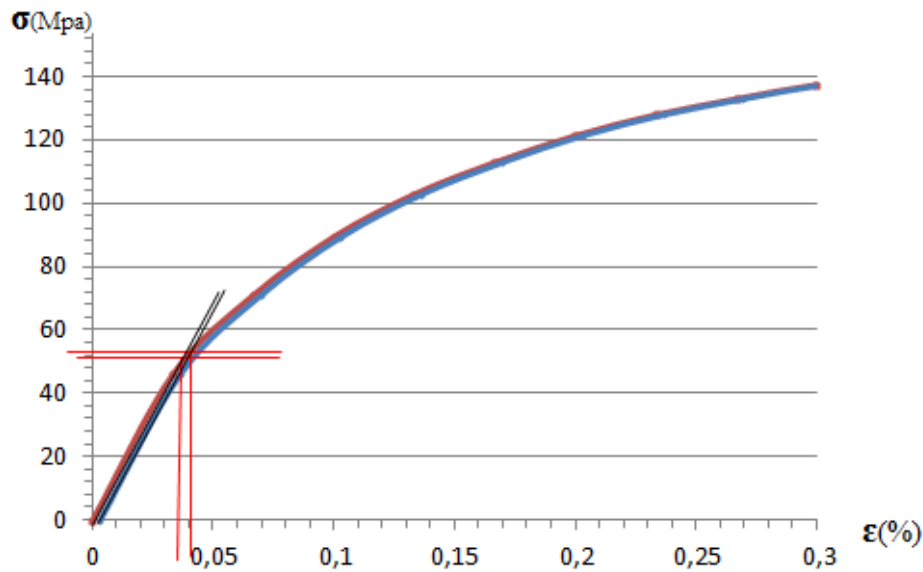


Figure III.15: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement 00°

C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 00°

Tableau.III.5 : la courbe de traction- cisaillement 00°.

	σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
Première méthode	0	3,588	0	0	6,215	0
Deuxième méthode	0	4,485	0	0	7,769	0
Troisième méthode	0	3,657	0	0	6,335	0

III.2.2. Traction combiné au cisaillement 10°

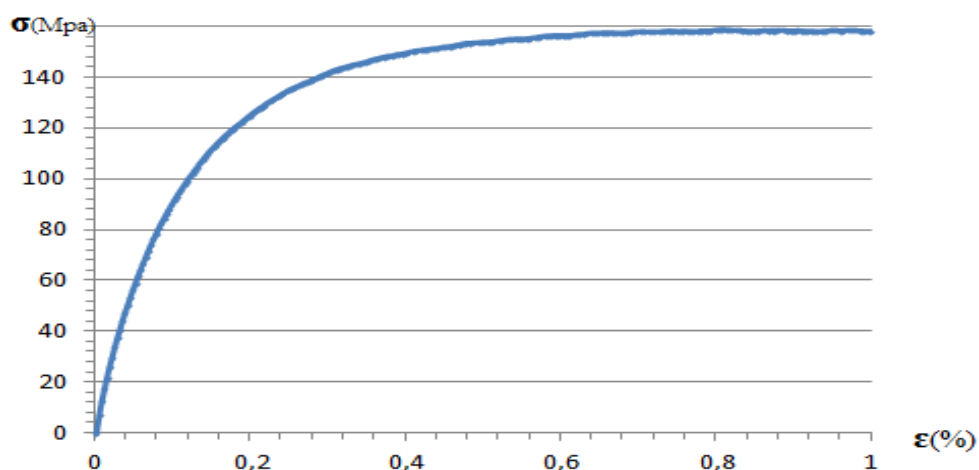


Figure III.16: la courbe de traction-cisaillement 10°

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

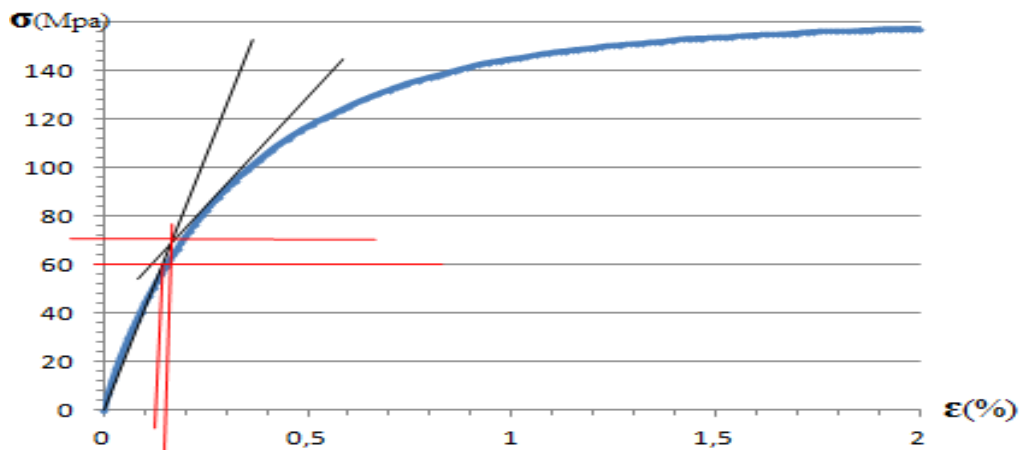


Figure III.17: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 10°

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d’offset

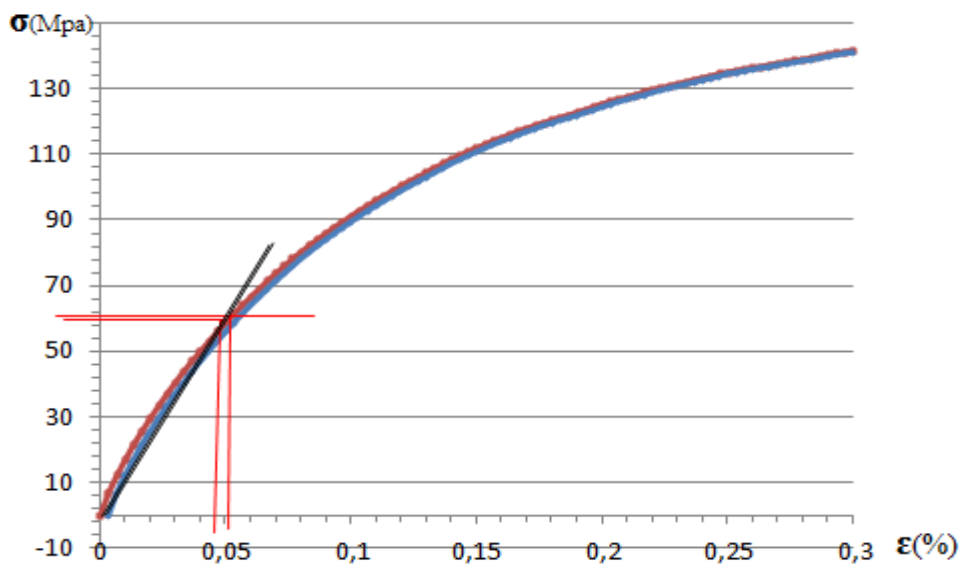


Figure III.18: La méthode de perte de linéarité et d’offset de traction –cisaillement10°.

C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 10°

Tableau III.6 : Résultat de la courbe traction-cisaillement 10°.

	σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
Première méthode	2,422	3,777	1,089	0,17	6,872	1,17
Deuxième méthode	2,785	4,344	1,253	0,17	7,902	1,346
Troisième méthode	2,462	3,84	1,108	0,17	6,986	1,19

III.2.3. Traction combiné au cisaillement 30°

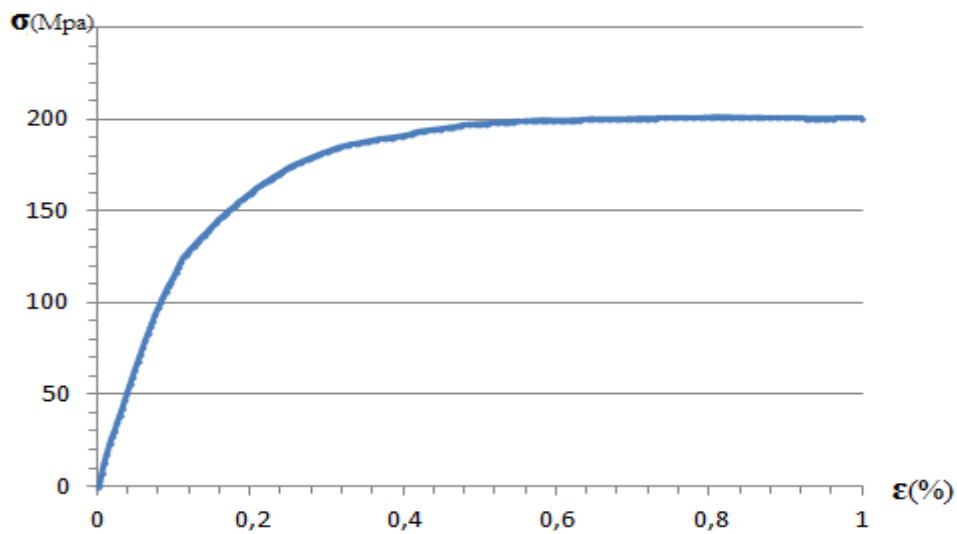


Figure III.19: la courbe de traction-cisaillement 30°.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

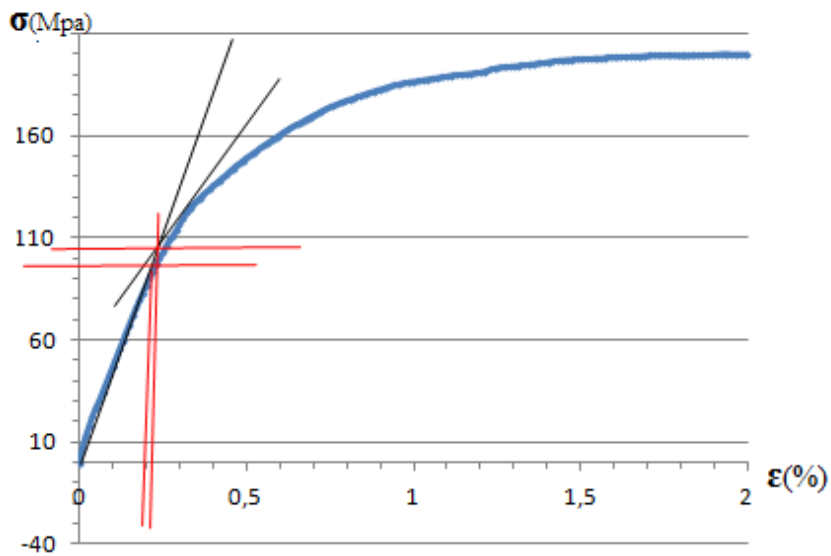


Figure III.20: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 30°

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

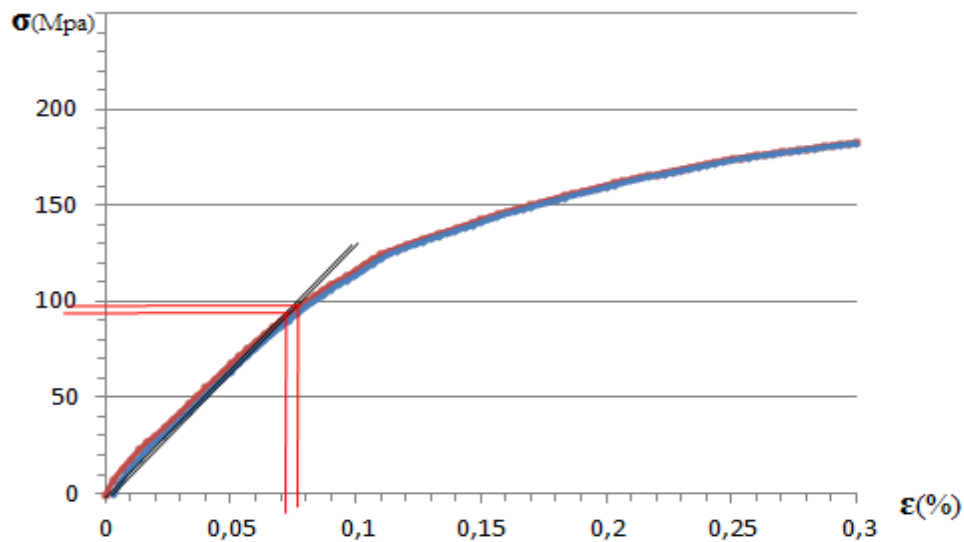


Figure III.21: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement 30°.

C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 30°

Tableau III.7 : Résultat de la courbe traction-cisaillement 30°.

	σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
Première méthode	7,109	3,386	3,199	0,403	8,51	3,436
Deuxième méthode	7,865	3,746	3,539	0,403	9,416	3,801
Troisième méthode	7,411	3,53	3,335	0,403	8,872	3,582

III.2.4. Traction combiné au cisaillement 50°

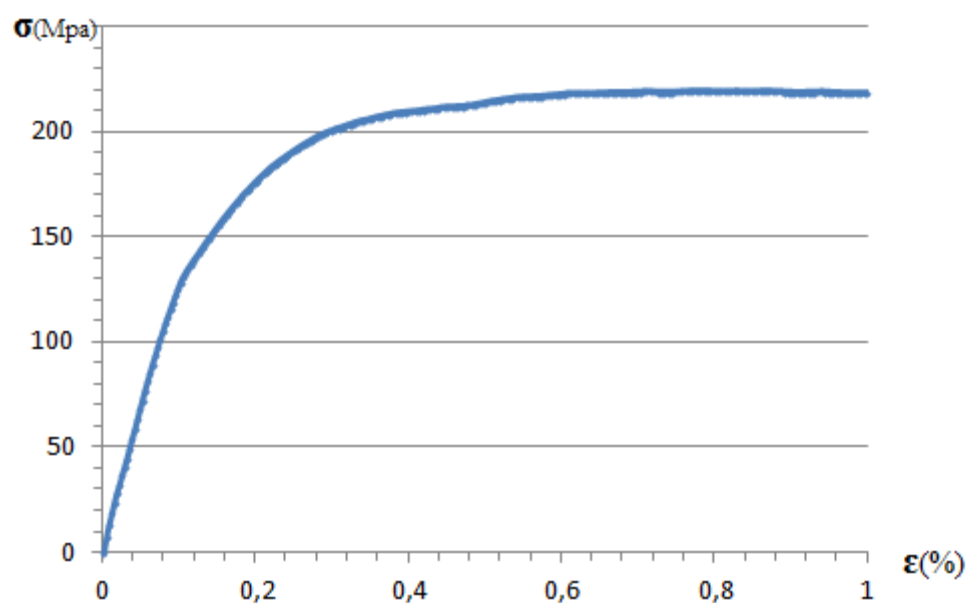


Figure III.22: la courbe de traction-cisaillement 50°.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

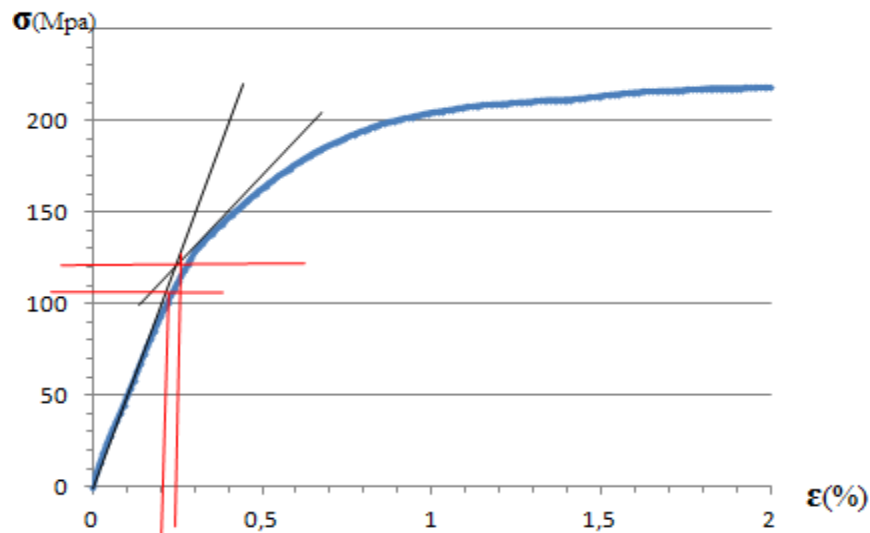


Figure III.23: La méthode des deux tangentes traction –cisaillement 50°

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

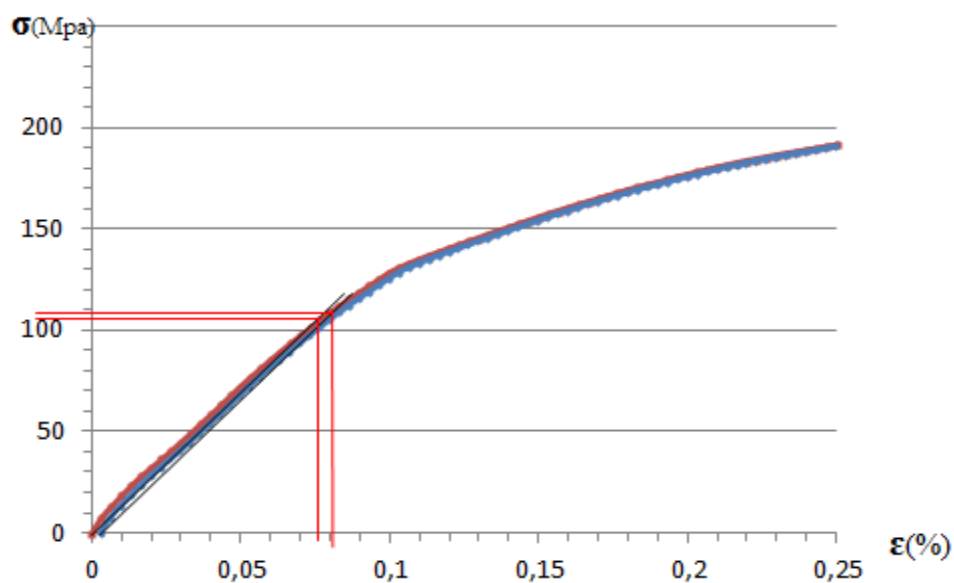


Figure III.24: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement 50°.

C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 50°

Tableau III.8 : Résultat de la courbe traction-cisaillement 50°.

	σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
Première méthode	7,925	1,828	3,566	0,506	7,569	3,83
Deuxième méthode	9,057	2,089	4,075	0,506	8,65	4,377
Troisième méthode	8,264	1,907	3,719	0,506	7,893	3,994

III.2.5. Traction combiné au cisaillement 90°

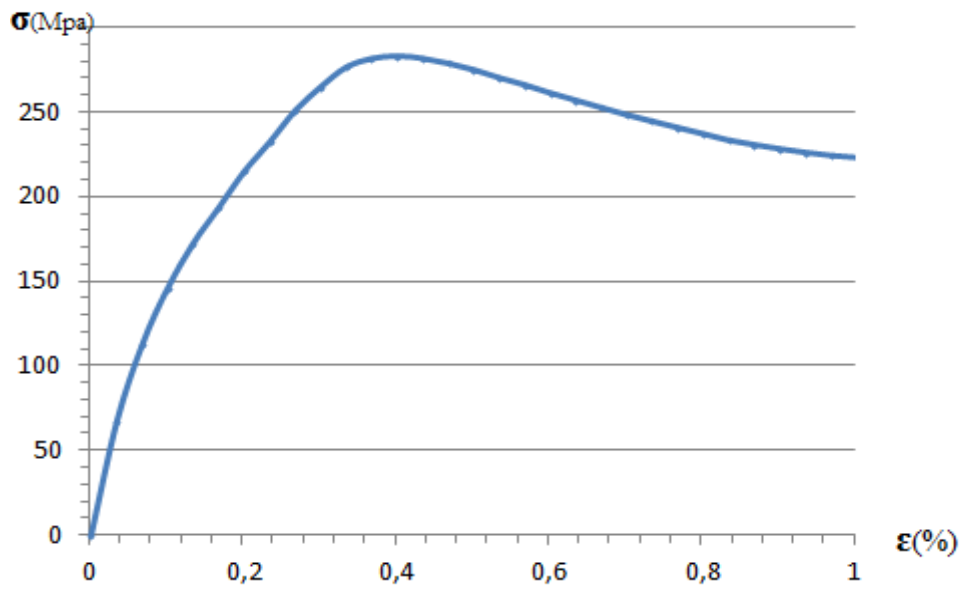


Figure III.25: la courbe de traction-cisaillement 90°.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

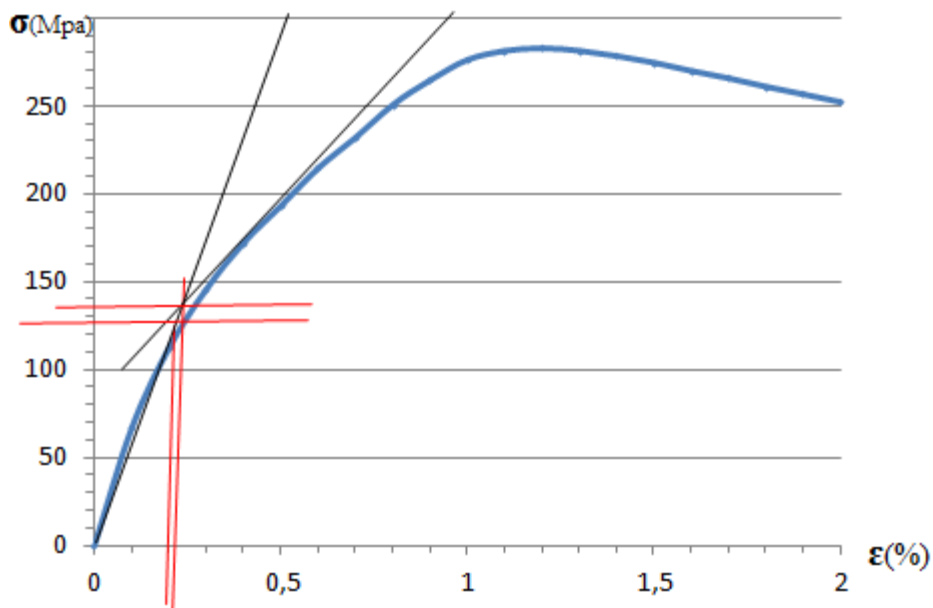


Figure III.26: La méthode des deux tangentes tractions –cisaillement 90°

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

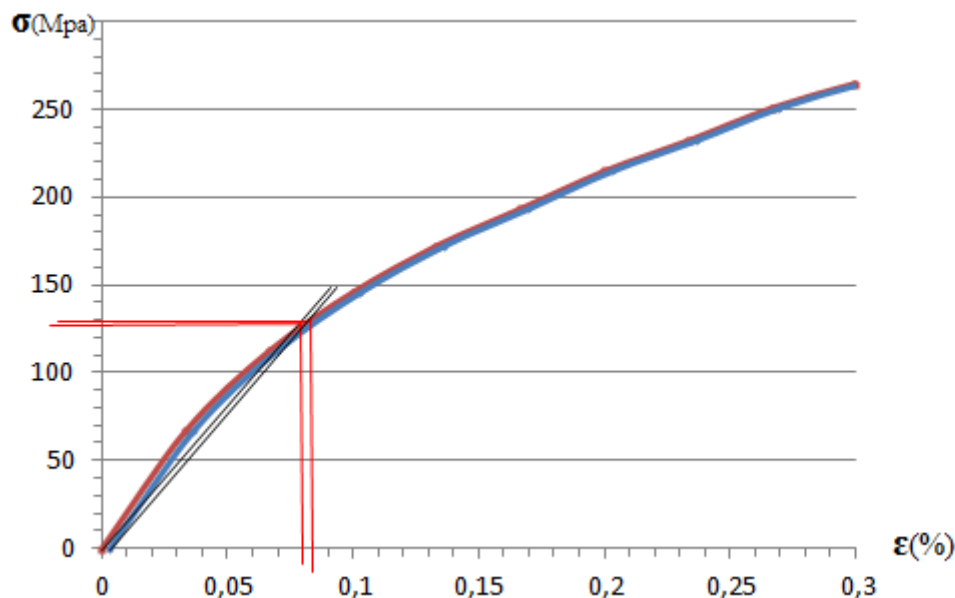


Figure III.27: La méthode de perte de linéarité et d'offset de traction –cisaillement 90°.

C. Résultats de la courbe traction combiné au cisaillement 90°

Tableau III.9 : Résultat de la courbe traction-cisaillement 90°.

	σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
Première méthode	7,833	1,488	3,975	0,557	7,662	4,269
Deuxième méthode	9,109	1,534	4,099	0,557	7,902	4,403
Troisième méthode	8,971	1,511	4,037	0,557	7,782	4,336

III.3. courbes de compression

Les courbes contrainte- déformation décrivant le comportement mécanique du PEHD en traction pour les éprouvettes cylindriques et la description des méthodes utilisées sont données par les figures III.28-30. Les valeurs de la limite élastique et les déformations correspondantes sont données par le tableau III.10.

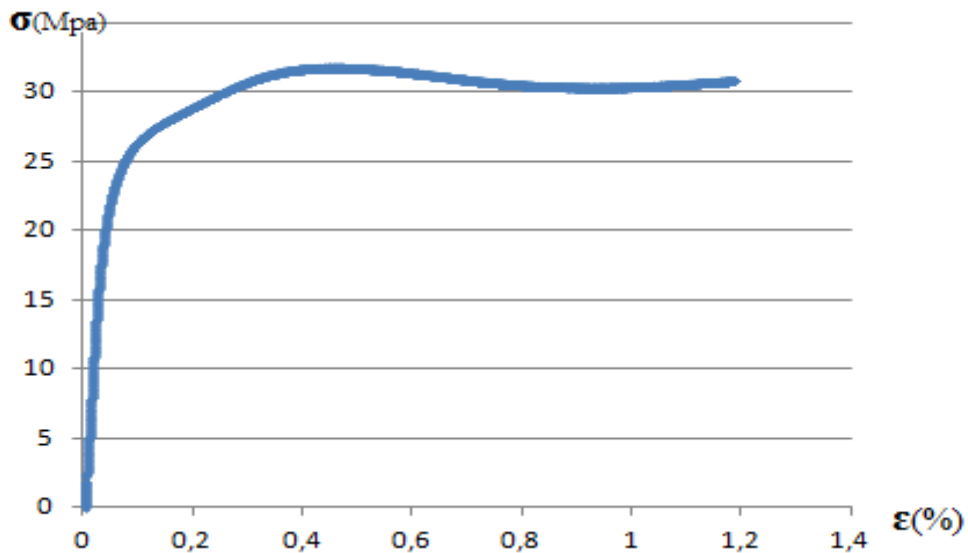


Figure III.28: la courbe de compression.

Pour trouver la limite élastique et la déformation on applique les trois méthodes pour la déterminer qui sont :

- ✓ La première méthode : la tangente ;
- ✓ La deuxième méthode : ISO R257 ;
- ✓ La troisième méthode : offset.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

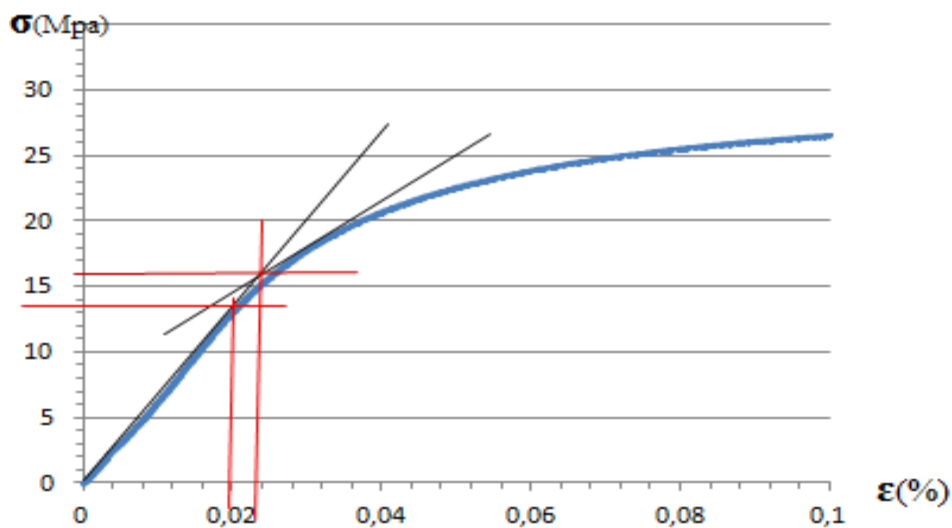


Figure III.29: La méthode des deux tangentes de la compression.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

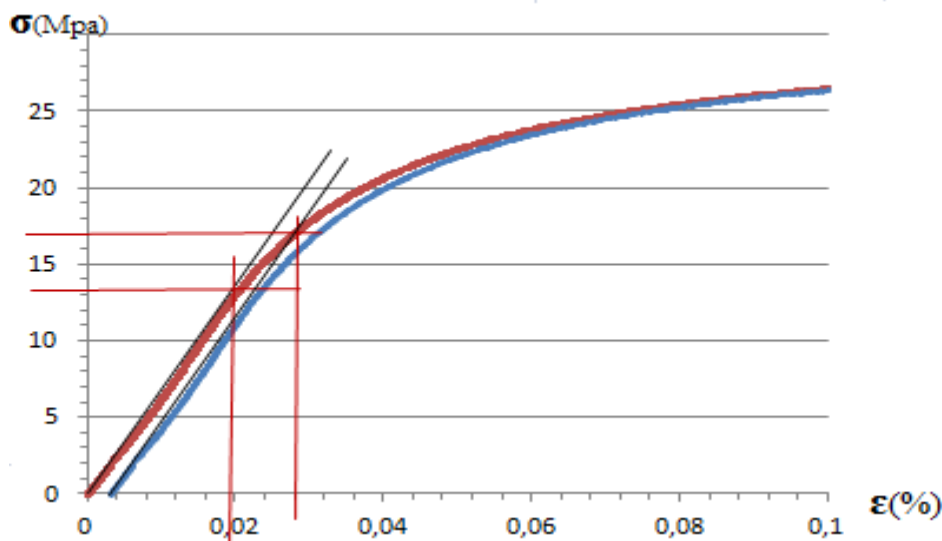


Figure III.30: La méthode de perte de linéarité et d'offset de la compression.

C. Résultats de la courbe de compression

Tableau III.10 : Résultat de la courbe de compression.

Les méthodes	Limite élastique	Déformation
Méthode de la tangente	13,2	0,018
Méthode d'ISO R257	16	0,024
Méthode de l'offset	17	0,028

III.4. La courbe de cisaillement

Les courbes contrainte- déformation décrivant le comportement mécanique du PEHD en traction pour les éprouvettes cylindriques et la description des méthodes utilisées sont données par les figures III.31-33. Les valeurs de la limite élastique et les déformations correspondantes sont données par le tableau III.11.

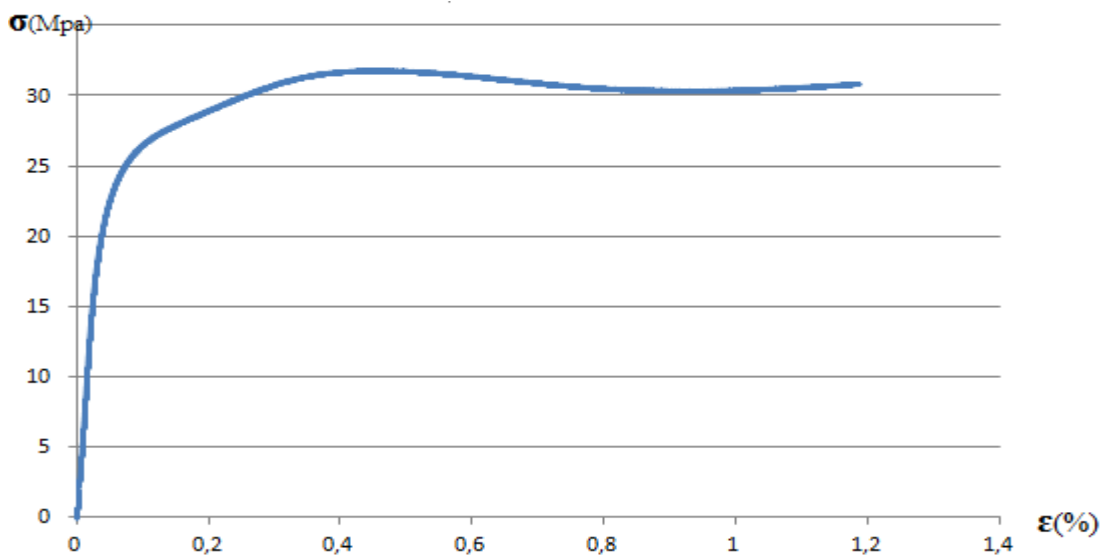


Figure III.31: la courbe de cisaillement.

Pour trouver la limite élastique et la déformation on applique les trois méthodes pour la déterminer qui sont :

- ✓ La première méthode : la tangente ;
- ✓ La deuxième méthode : ISO R257 ;
- ✓ La troisième méthode : offset.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

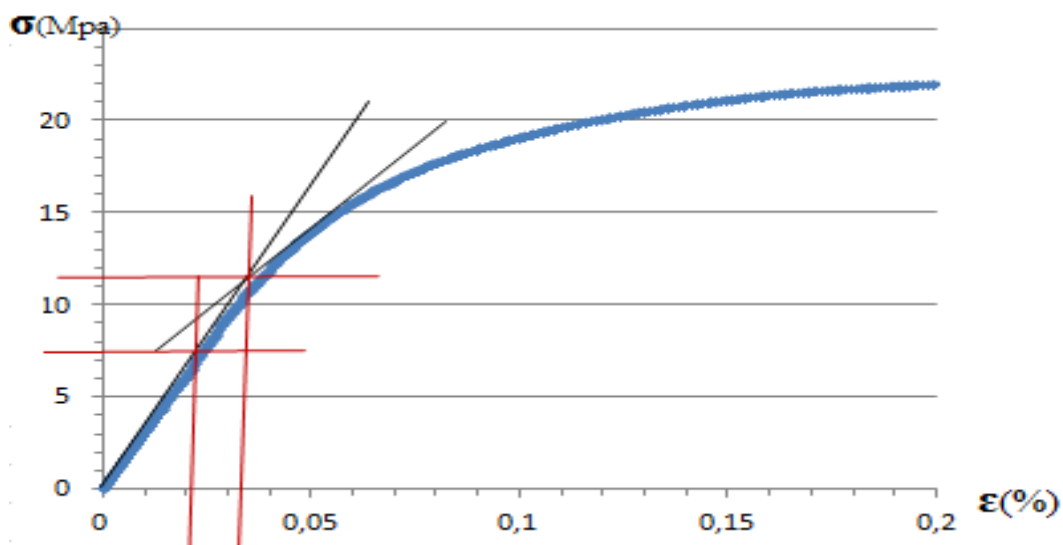


Figure III.32: La méthode des deux tangentes de la cisaillement.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

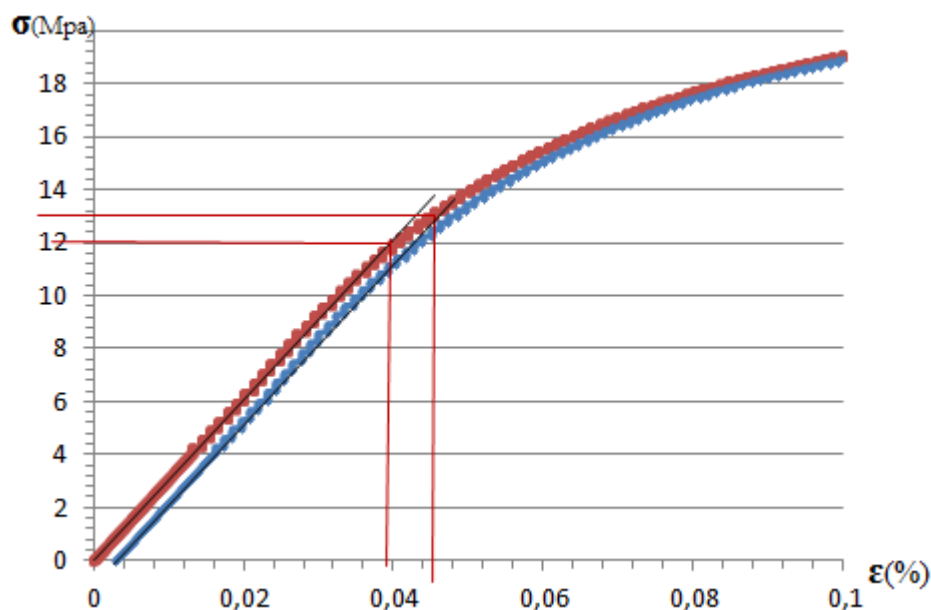


Figure III.33: La méthode de perte de linéarité et d'offset de cisaillement.

C. Résultats de la courbe de cisaillement

Tableau III.11: Résultat de la courbe de cisaillement.

Les méthodes	Limite élastique	Déformation
Méthode de la tangente	12	0,038
Méthode d'ISO R257	11,5	0,013
Méthode de l'offset	13,1	0,041

III.5. courbes compression combiné au cisaillement

Les courbes contrainte- déformation décrivant le comportement mécanique du PEHD en compression combiné au cisaillement à différents angles de chargement sur les éprouvettes papillons et la description des méthodes utilisées sont données par les figures III.34-48. Les valeurs de la limite élastique et les déformations correspondantes sont données par les tableaux III.12-16.

III.5.1. compression-cisaillement 00°

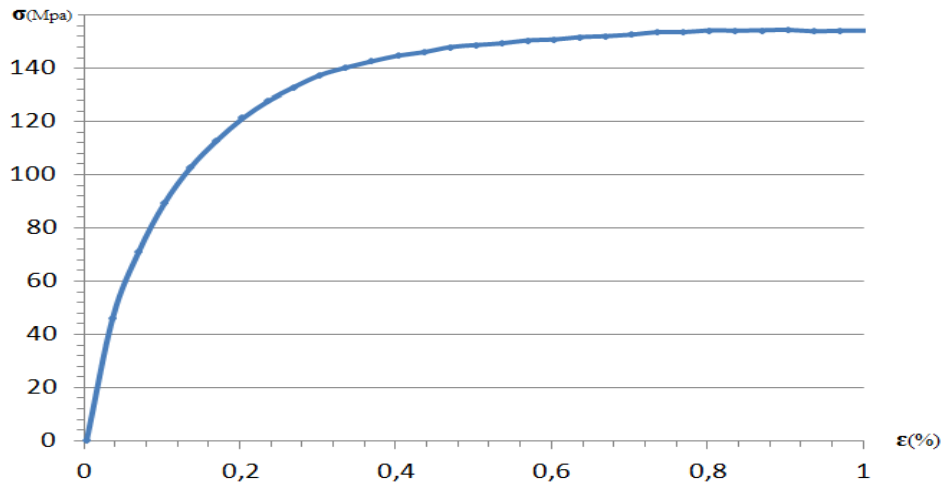


Figure III.34: la courbe de compression-cisaillement 00° .

Pour trouver la limite élastique et la déformation on applique les trois méthodes pour la déterminer qui sont :

- ✓ La première méthode : la tangente ;
- ✓ La deuxième méthode : ISO R257 ;
- ✓ La troisième méthode : offset.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

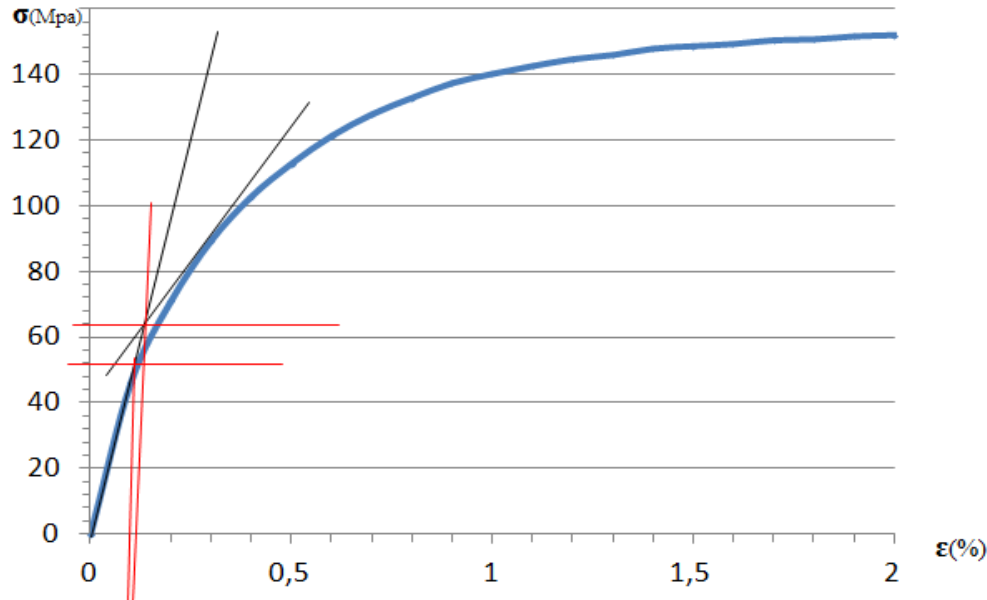


Figure III.35: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement 00° .

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

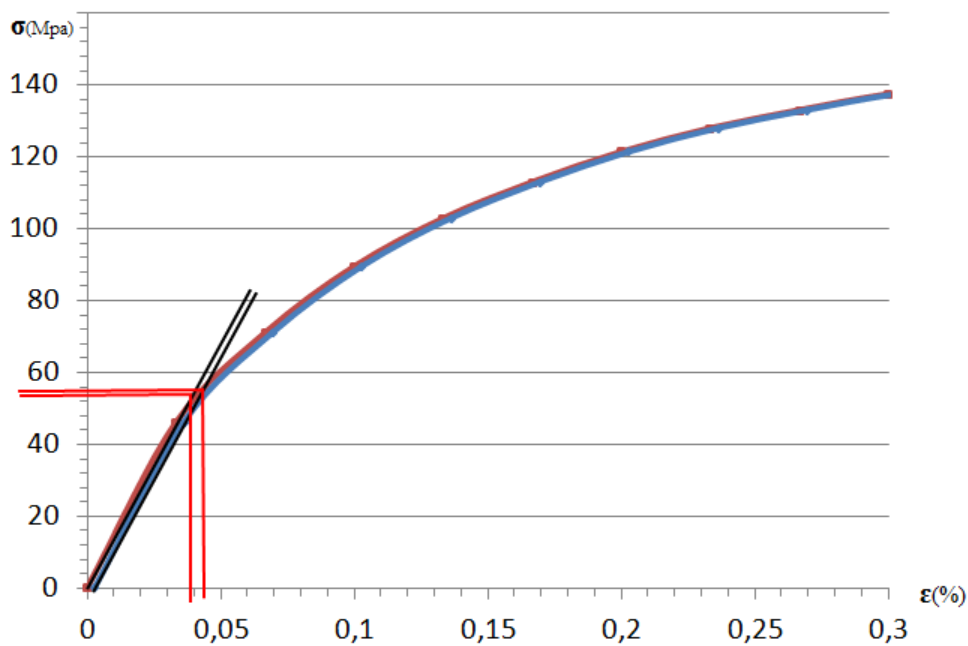


Figure III.36: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement.00°.

C. Résultats de la courbe de compression-cisaillement 00°

Tableau III.12 : Résultat de la courbe de cisaillement 00°.

	σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
Première méthode	0	-3,657	0	0	6,335	0
Deuxième méthode	0	-4,416	0	0	7,65	0
Troisième méthode	0	-3,726	0	0	6,454	0

III.5.2. compression-cisaillement 10°

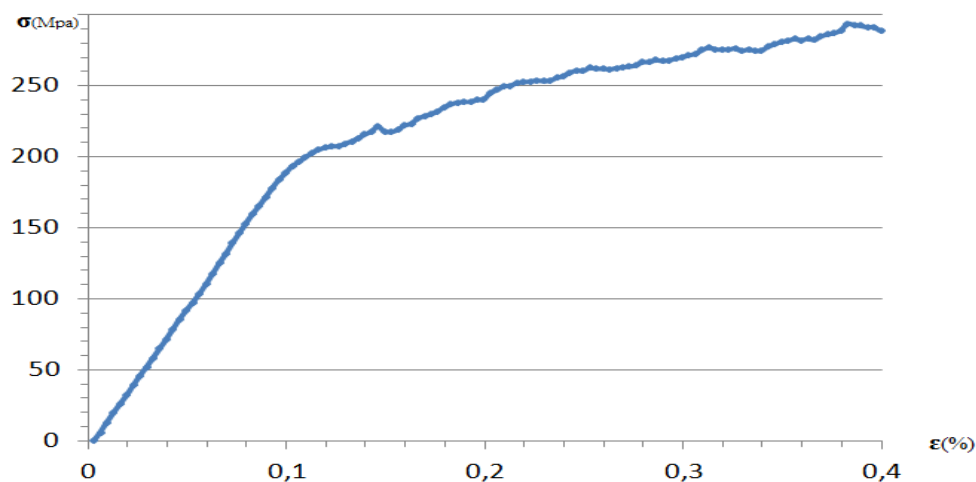


Figure III.37: la courbe de compression-cisaillement 10°.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

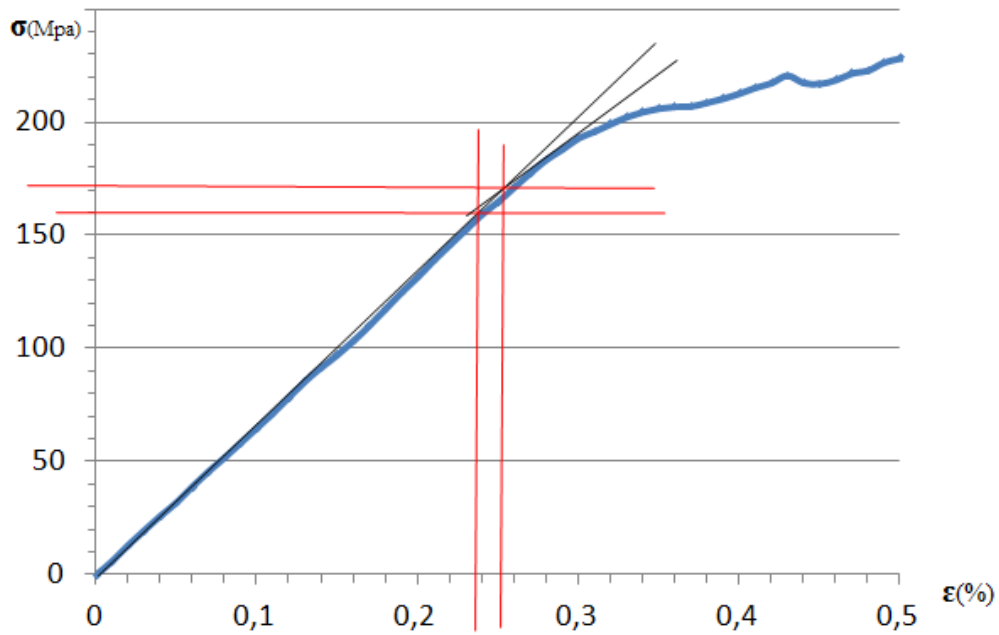


Figure III.38: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement 10° .

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

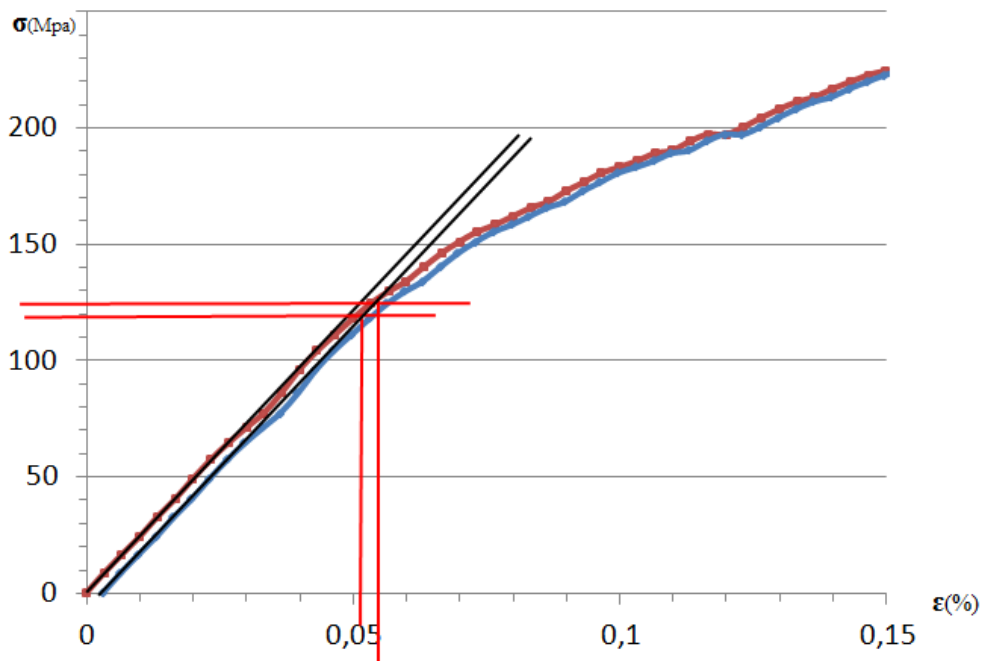


Figure III.39: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement 10° .

C. Résultats de la courbe de compression-cisaillement 10°

Tableau III.13 : Résultat de la courbe de cisaillement 10°.

	Σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	Σ_{eq}	σ_m
première méthode	-6,499	-10,136	-2,924	-0,17	18,439	-3,141
deuxième méthode	-6,943	-10,82	-3,124	-0,17	19,699	-3,356
troisième méthode	-6,822	-10,64	-3,07	-0,17	19,356	-3,29

III.5.3. compression-cisaillement 30°

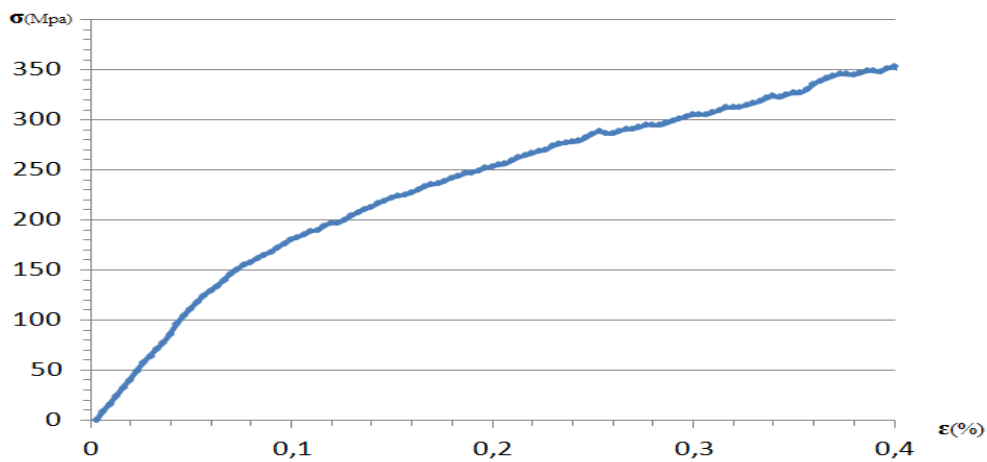


Figure III.40: la courbe de compression-cisaillement 30°.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

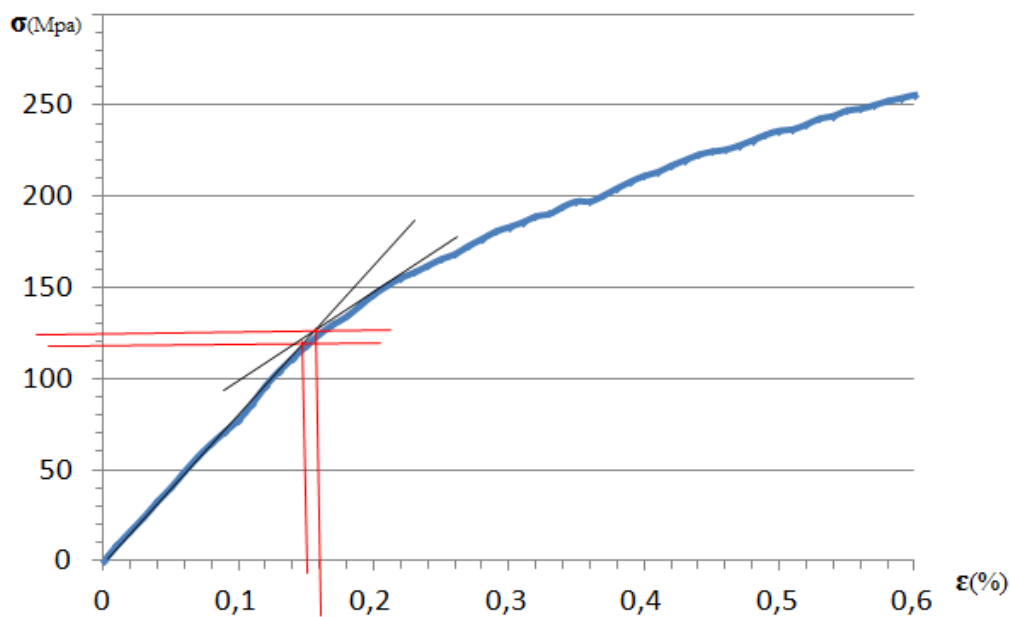


Figure III.41: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement 30°.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

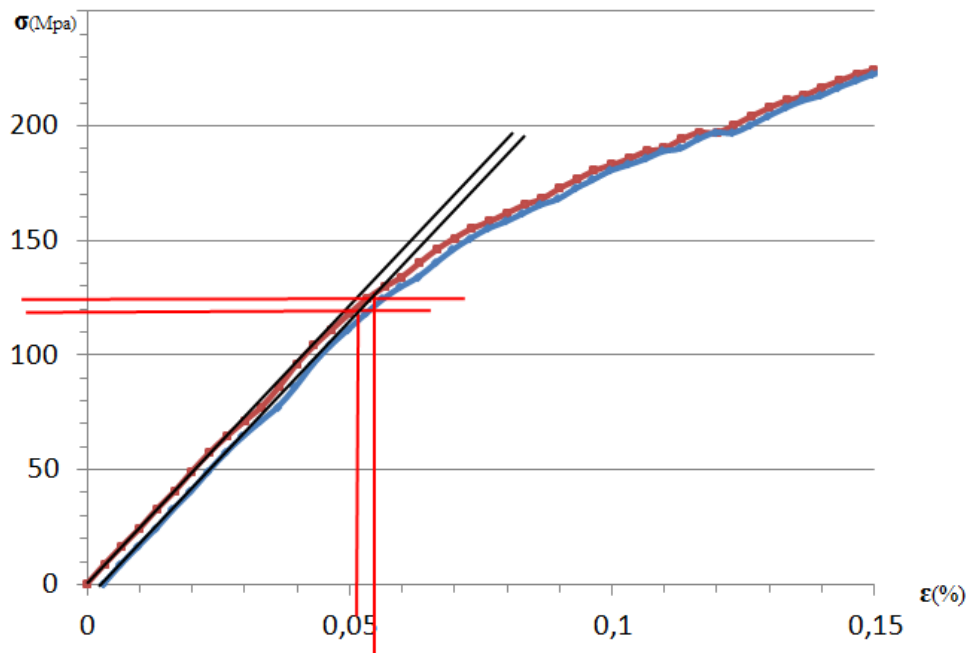


Figure III.42: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement 30°.

C. Résultats de la courbe de compression- cisaillement 30°

Tableau III.14 : Résultat de la courbe de cisaillement 30°.

	σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
Première méthode	-8,924	-4,25	-4,015	-0,403	10,683	-4,313
Deuxième méthode	-9,453	-4,503	-4,254	-0,403	11,317	-4,569
Troisième méthode	-9,302	-4,43	-4,186	-4,403	11,136	-4,496

III.5.4. Compression-cisaillement 50°

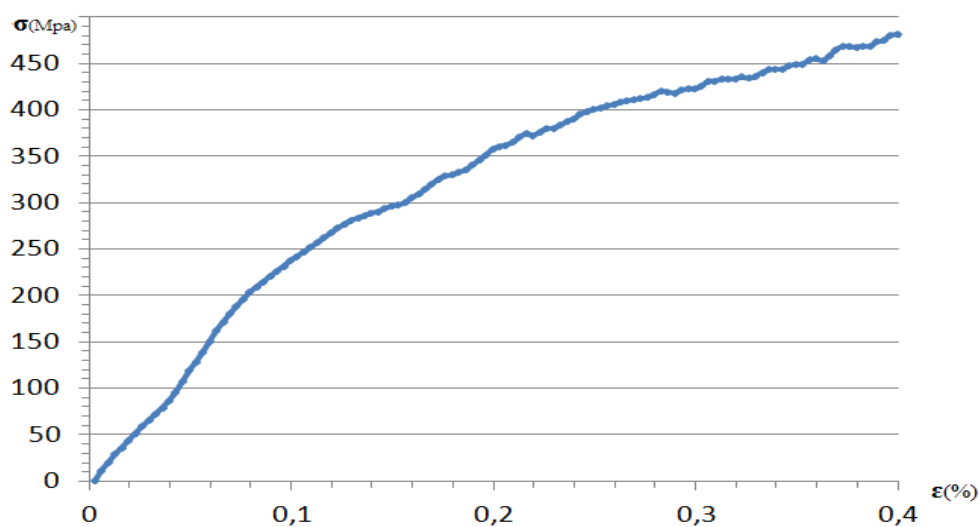


Figure III.43: la courbe de compression-cisaillement 50°.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

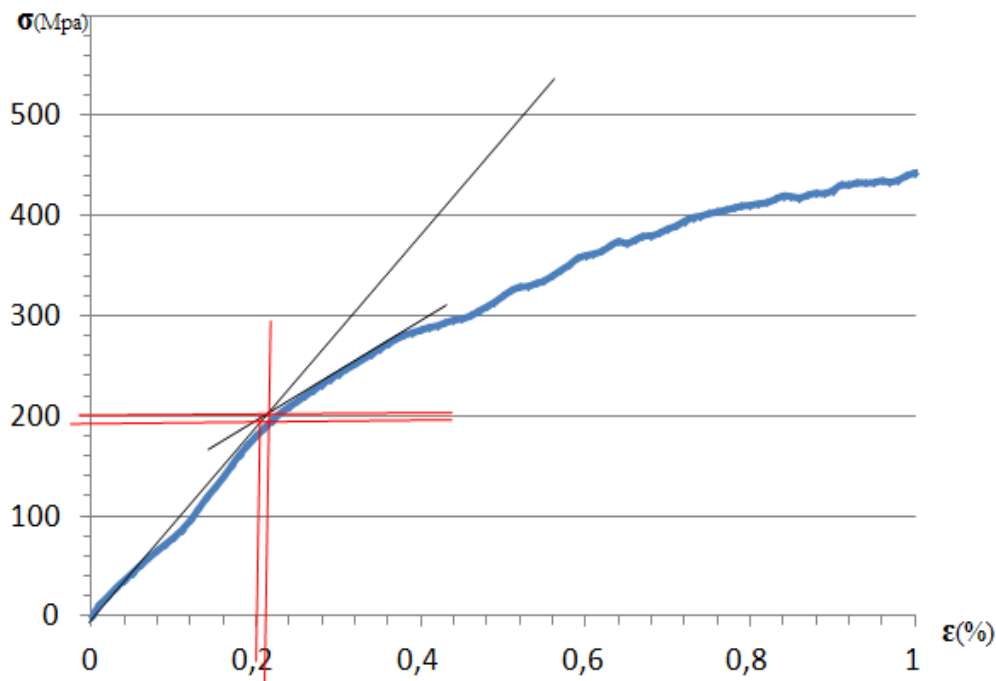


Figure III.44: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement 50°.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

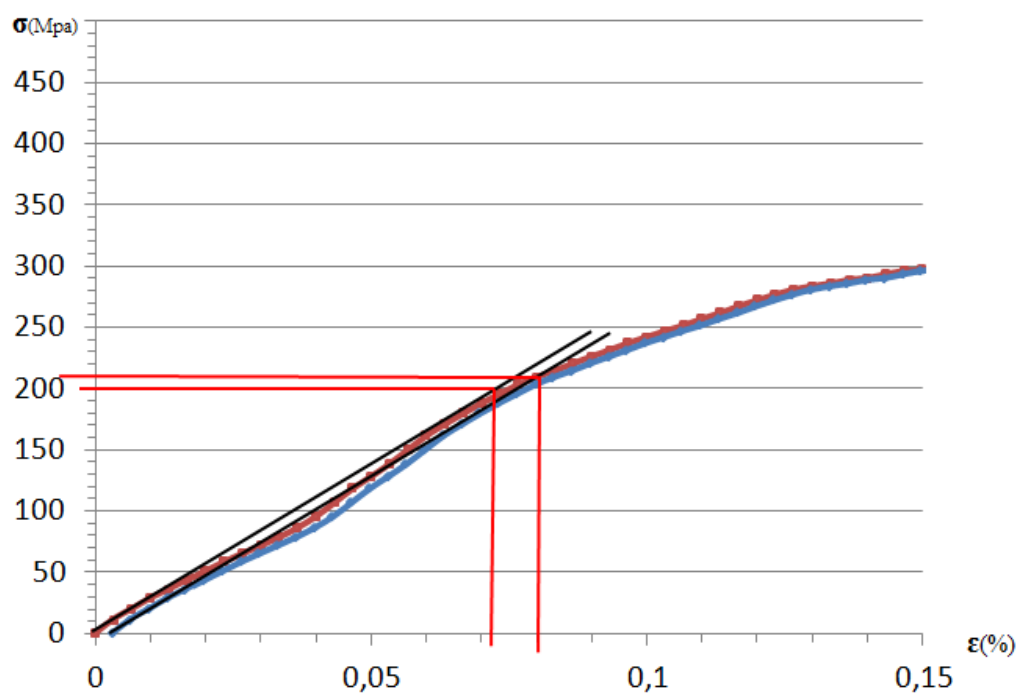


Figure III.45: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement 50°.

C. Résultats de la courbe de compression-cisaillement 50°

Tableau III.15 : Résultat de la courbe de cisaillement 50°.

	σ_{xx}	σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
Première méthode	15,095	-3,483	-6,792	-0,506	14,417	-7,296
Deuxième méthode	-15,095	-3,483	-6,792	-0,506	14,41	-7,296
Troisième méthode	-15,85	-3,657	-7,132	-0,506	15,138	-7,66

III.5.5. compression-cisaillement 70°

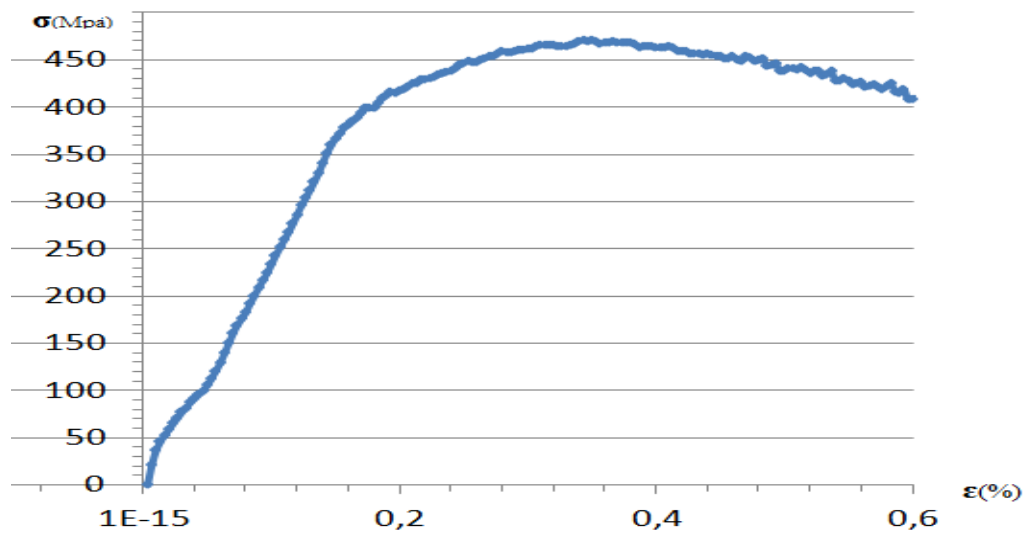


Figure III.46: la courbe de compression-cisaillement 70°.

A. La méthode des deux tangentes (ISO R257)

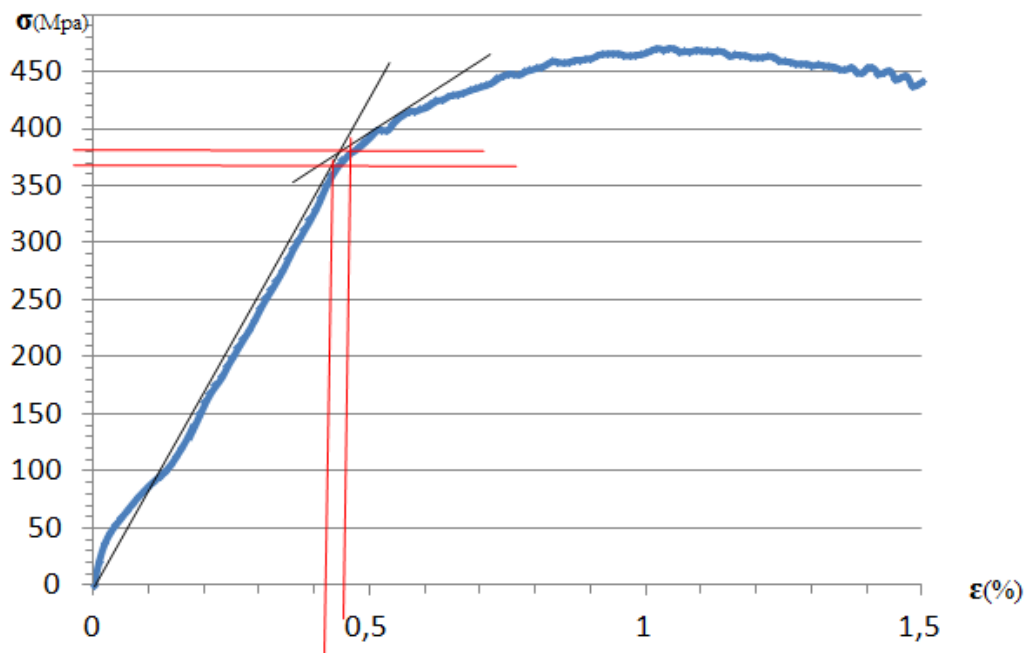


Figure III.47: La méthode des deux tangentes de la compression-cisaillement 70°.

B. La méthode de perte de linéarité et méthode d'offset

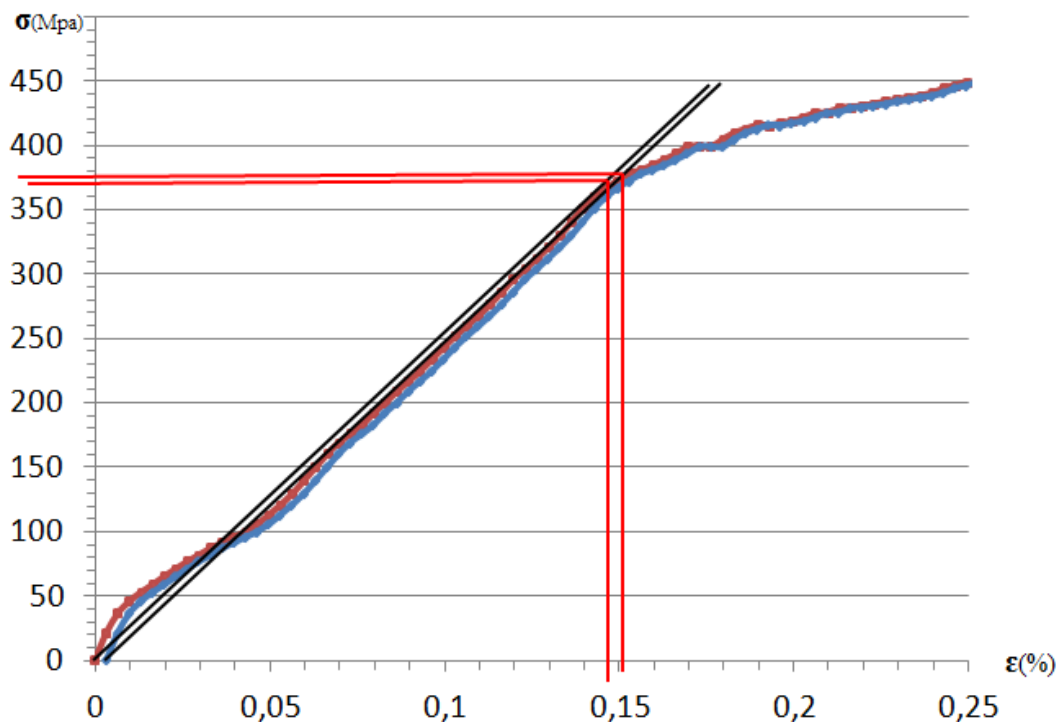


Figure III.48: La méthode de perte de linéarité et d'offset de compression- cisaillement 70°.

C. Résultats de la courbe de compression-cisaillement 70°

Tableau III.16 : Résultat de la courbe de cisaillement 70°.

	σ_{xx}	Σ_{xy}	σ_{yy}	T	σ_{eq}	σ_m
première méthode	-26,218	-2,624	-11,798	-0,546	23,193	-12,672
deuxième méthode	-26,927	-2,695	-12,117	-0,546	23,82	-13,014
troisième méthode	-26,785	-2,68	-12,053	-0,546	23,694	-12,946

III.6. Résultat des courbes de traction et compression et cisaillement

On présente dans le tableau III.17 les valeurs de la limite élastique déterminée sur les courbes de comportement mécanique par les trois méthodes pour les essais uniaxiaux.

Tableau III.17 : Les résultats des contraintes des essais uniaxiaux.

Type de l'essais	contrainte (MPA)	contrainte (MPA)	contrainte (MPA)
	méthode 1	méthode 2	méthode 3
Traction R2	11	17,5	18,5
Traction R4	10	14,5	13,2
Traction R10	9	11,9	13
Traction R80	8,4	10,9	10,9
cisaillement	7,5	11,5	13,1
compression	13,2	16	17

La comparaison des résultats de la deuxième et la troisième méthode par rapport à la première méthode est résumé dans le tableau III.18. Elle est donnée en pourcent.

Tableau III.18 : Calcule de la différence et les moyenne entre le trois méthodes.

types de l'essais	la différence entre la 1 ^{ère} et les 2 ^{ème} méthodes	la différence entre la 1 ^{ère} et la 3 ^{ème} méthode
traction R2	37,14285714	40,54054054
traction R4	31,03448276	24,24242424
traction R10	24,3697479	30,76923077
traction R80	22,93577982	22,93577982
cisaillement	34,7826087	42,7480916
compression	17,5	22,35294118
moyenne	27,96091272	30,59816802

On constate que les valeurs de la contrainte limite trouvée par la première méthode (perte de linéarité) sont inférieure par rapport aux valeurs trouvées par les deux autres méthodes et les valeurs de la troisième méthode sont les plus supérieur avec une différence moyenne de 30,5%. La différence de 27,9% et 30,5% sur les valeurs de la limite élastique est cependant importante, ce qui impose le bon choix de la méthode de détermination de la limite élastique sur les courbes de comportement mécanique des polymères semi cristallins. Ce constat sera mieux éclairé dans le paragraphe III.7.

III.6.2 Résultats des courbes compression-cisaillement

On présente dans le tableau III.19 les valeurs de la limite élastique déterminée sur les courbes de comportement mécanique par les trois méthodes pour les biaxiaux compression – cisaillement.

Tableau III.19 : Les résultats des contraintes des essais compression-cisaillement.

Type de l'essais	contrainte (MPA)	contrainte (MPA)	contrainte (MPA)
	méthode 1	méthode 2	méthode 3
comp-cisai 00°	6,335	7,65	6,454
comp-cisai 10°	18,469	19,699	19,356
comp-cisai 30°	10,683	11,317	11,136
comp-cisai 50°	14,417	14,41	15,138
comp-cisai 90°	23,193	23,82	23,694

La comparaison des résultats de la deuxième et la troisième méthode par rapport à la première méthode est résumé dans le tableau III.20. Elle est donnée en pourcent.

Tableau III.20 : Calcule de la différence et les moyenne entre les trois méthodes.

types de l'essais	la différence entre la 1 ^{ère} et la 2 ^{ème} méthode	la différence entre la 1 ^{ère} et la 3 ^{ème} méthode
compression- cisaillement 00°	17,18954248	1,843817787
compression- cisaillement 10°	6,243971775	4,58255838
compression- cisaillement 30°	5,602191393	4,067887931
compression- cisaillement 50°	-0,048577377	4,762848461
compression- cisaillement 90°	2,632241814	2,114459357
moyenne	6,323874018	3,474314383

Contrairement aux essais uniaxiaux, la différence des valeurs de la limite élastique déterminée par la première méthode par rapport à celles déterminées par les deux autres méthodes est faible. En effet, les valeurs de la contrainte trouvée par la première méthode (perte de linéarité) sont inférieures par rapport aux valeurs des deux autres méthodes et sont de 6,3 et 3,4 respectivement. Toutefois, les valeurs de la limite élastique pour les méthodes 2 et 3 restent plus grandes par rapport à celles de la méthode 1.

III.6.3 Résultats des courbes traction-cisaillement

On présente dans le tableau III.21 les valeurs de la limite élastique déterminée sur les courbes de comportement mécanique par les trois méthodes pour les biaxiaux traction – cisaillement.

Tableau III.21 : Les résultats des contraintes des essais traction-cisaillement.

Type de l'essais	contrainte (MPA)		
	méthode 1	méthode 2	méthode 3
traction-cisai 00°	6,215	7,769	6,335
traction-cisai 10°	6,872	7,902	6,986
traction-cisai 30°	8,51	9,416	8,872
traction-cisai 50°	7,569	8,65	7,893
traction-cisai 90°	7,662	7,902	7,782

La comparaison des résultats de la deuxième et la troisième méthode par rapport à la première méthode est résumé dans le tableau III.22. Elle est donnée en pourcent.

Tableau III.22 : Calcule de la différence et les moyenne entre le trois méthodes.

types de l'essai	la différence entre la 1 ^{ère} et les 2 ^{ème} méthodes	la différence entre la 1 ^{ère} et les 3 ^{ème} méthodes
traction- cisaillement 00°	20,00257433	1,894238358
traction- cisaillement 10°	13,03467477	1,631835099
traction- cisaillement 30°	9,621920136	4,08025248
traction- cisaillement 50°	12,49710983	4,104903079
traction- cisaillement 70°	3,037205771	1,542020046
moyenne	11,63869697	2,650649812

Dans ce type d'essais, i.e. essais biaxiaux de traction-cisaillement, on constate que la différence entre les valeurs de la limite élastique de la méthode 3 par rapport à celles de la méthode 1 est très faible, avec une moyenne de 2.6%. Par contre, les valeurs de la limite élastique obtenues par la méthode 2 restent supérieur à celles obtenues par la méthode 1, avec une moyenne de 11,6%.

III.7.Construction de l'enveloppe de plasticité

Dans le paragraphe précédent, on a comparé les valeurs de la limite élastique déterminée sur les courbes contrainte-déformation et force-déplacement obtenues pour les différents types d'essai, par la différence en pourcentage des valeurs expérimentales déterminées par la deuxième et la troisième méthode par rapport à celles déterminées par la méthode de perte de linéarité.

Afin de mieux montrer l'effet de la méthode de détermination de la limite élastique, et d'exploiter davantage cette étude, on s'est orienté vers la construction de l'enveloppe de plasticité en se basant sur les résultats expérimentaux. Cependant, les valeurs de la contrainte au seuil d'écoulement sont les limites d'élasticité déterminées précédemment par les trois méthodes citées dans le paragraphe I.9.

On utilise dans ce cas le critère de Raghava qui décrit bien le comportement au seuil de plasticité des polymères semi cristallins [24] qui est donné par la relation :

$$f = 6J_2 + 2(\sigma_{yc} - \sigma_{yt})I_1 - 2\sigma_{yc}\sigma_{yt} = 0$$

$$f = (\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2 + 2(\sigma_{yc} - \sigma_{yt})I_1 - 2\sigma_{yc}\sigma_{yt} = 0$$

Où :

- σ_{yc} et σ_{yt} sont la limite d'élasticité en compression et la limite d'élasticité en traction respectivement.
- $I_1 = \text{trace}(\underline{\underline{\sigma}}) = \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}$ dans le repère principal
- σ_I, σ_{II} et σ_{III} représentent les contraintes principales.
- $J_2 = (1/2)\text{trace}(\underline{\underline{s}}^2) = (1/2)(s_{ij}s_{ji})$
- $\underline{\underline{s}} = \underline{\underline{\sigma}} - (I_1/3)$: le déviateur du tenseur des contraintes

On portera en premier lieu, dans un plan de contraintes principales en terme de contraintes principales maximales en fonction des contraintes principales minimales, l'enveloppe de plasticité du PEHD en se basant sur les valeurs déterminées par la méthode de perte de linéarité (figure III.49). On peut bien voir que le PEHD présente une asymétrie importante en contraintes entre la traction et la compression. Le comportement au seuil en compression est donc différent par rapport à celui en traction pour ce type de matériau. Contrairement aux matériaux métalliques, où le comportement en traction est le même qu'en compression, le comportement mécanique des polymères semi cristallins est affectée par la pression hydrostatique.

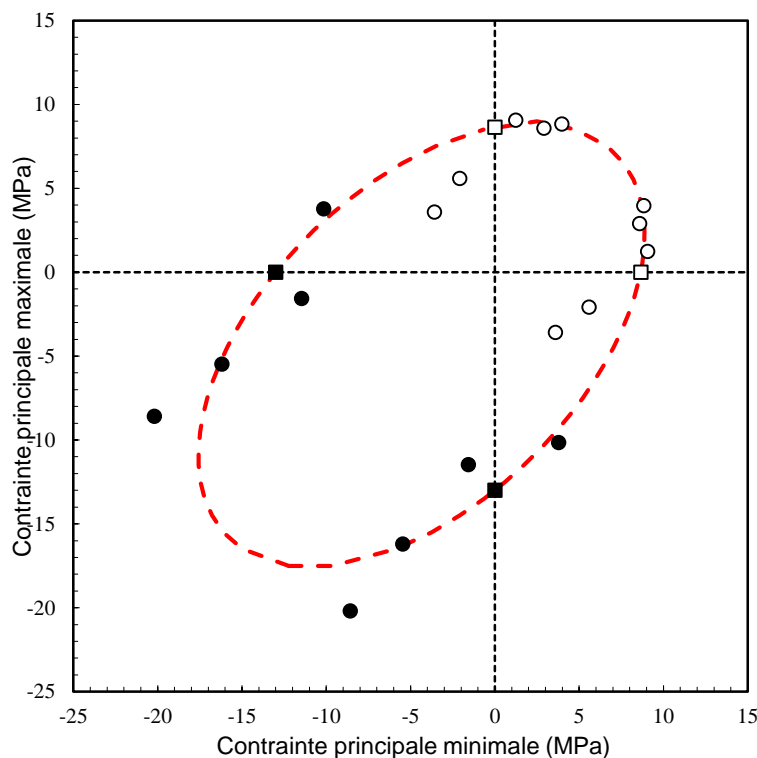


Figure III.49 : Enveloppe de plasticité du PEHD suivant le critère de Raghava pour la méthode de perte de linéarité.

On a porté sur un même graphe les enveloppes de plasticité tracées pour les valeurs de la limite élastique déterminée par les trois méthodes dans la figure III.49. La forme de ces enveloppes suivant le même critère de Raghava, est elliptique dont l'axe principal est suivant la diagonale dans le repère : contrainte principale maximale en fonction de la contrainte principale minimale.

Dans le premier cadran du graphe, pour les deux méthodes ; par offset et par deux tangentes, les enveloppes de plasticité coïncident et présente une différence apparente par rapport à l'enveloppe tracée pour les données déterminées par perte de linéarité. En suivant la diagonale vers le troisième cadran, la différence entre les seuils tracés à partir des trois méthodes croît continuellement et devient importante. Par conséquent, dans l'étude à la résistance des pièces mécaniques en PEHD, ou en polymère semi cristallin, on propose d'utiliser l'enveloppe de plasticité issue de la méthode de perte de linéarité avec l'utilisation d'un coefficient de sécurité. En revanche, pour les travaux de mise en forme par déformation, l'enveloppe de plasticité issue de la méthode des deux tangentes est recommandée.

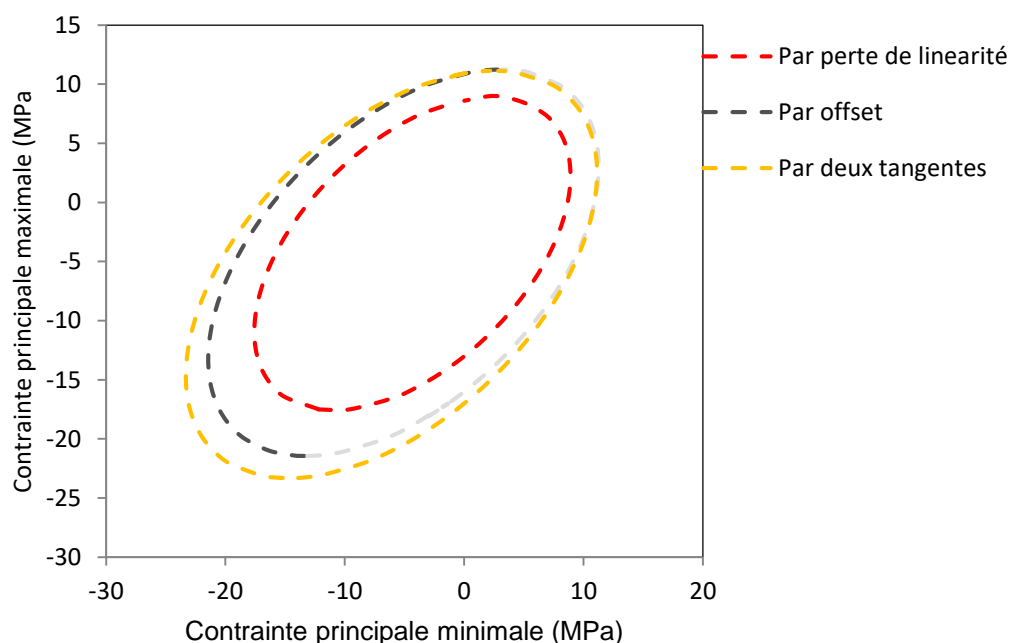


Figure III.50 : Enveloppe de plasticité du PEHD suivant le critère de Raghava pour les trois méthodes.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté les résultats des essais mécaniques effectués sur le PEHD par les différents types de sollicitations, on a déterminé la limite élastique sur les courbes contrainte-déformation et force-déplacement par les trois méthodes citées précédemment. On a constaté que les valeurs de cette limite élastique pour un même essai dépendent de la méthode utilisée pour sa détermination sur les courbes d'essais. Pour mettre en évidence l'influence de la méthode de détermination de la limite élastique sur les valeurs de cette dernière, on a comparé les résultats de la méthode 2 et 3 par rapport à ceux de la méthode 1. On a constaté que pour les essais uniaxiaux, la différence des valeurs de la limite élastiques des méthodes 2 et 3 par rapport à celles de la méthode 1 est importante comparé à celle obtenue pour les essais biaxiaux. En effet cette différence a atteint pour les essais uniaxiaux 27,9% et 30,5% respectivement, tandis que pour les essais de compression-cisaillement cette différence est de 6,3% et 4,5% et pour les essais de traction –cisaillement elle est 11,6% de 2,6% respectivement.

Conclusion générale :

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution aux études déjà menées sur les polymères semi-cristallins, en particulier le PEHD, et on s'est intéressé principalement à la l'optimisation de la limite d'élasticité.

La recherche bibliographique présentée dans le chapitre I, a permis de montrer les généralité et les propriétés des polymères semi-cristallins ainsi que les différents mécanismes qui régissent la déformation plastique de ces matériaux. En seconde lieu on a présenté le comportement mécanique de ces matériaux. Les types de sollicitations multiaxiales, sont aussi présentés dans ce chapitre. Au finale on a présenté les trois méthodes pour déterminer la limite élastique qui sont :

- La méthode de perte de linéarité.
- La méthode des deux tangentes.
- La méthode de l'offset 0,3%.

Dans le deuxième chapitre on a présenté les essais uniaxiaux et biaxiaux et les résultats expérimentaux qui en découlent.

Dans le troisième chapitre on a déterminé la limite d'élasticité par les trois méthodes suivi d'une comparaison des valeurs de cette limite.

Vu que les résultats de comparaison des valeurs de la limite élastique montrent une dépendance du type d'essai, où la différence des valeurs de la limite élastiques des méthodes 2 et 3 par rapport à celles de la méthode 1, est importante pour les essais uniaxiaux et qui atteint 30,5% comparé à celle obtenue pour les essais biaxiaux. On s'est orienté alors vers une comparaison sur l'enveloppe de plasticité en utilisant le critère de Raghava qui décrit bien le comportement au seuil de plasticité du PEHD. Par conséquent, on propose dans l'étude à la résistance des pièces mécaniques en PEHD, ou en polymère semi cristallin, d'utiliser l'enveloppe de plasticité issue de la méthode de perte de linéarité avec l'utilisation d'un coefficient de sécurité. En revanche, pour les travaux de mise en forme par déformation, l'enveloppe de plasticité issue de la méthode des deux tangentes est recommandée.

- [1] M. HACHOUR. KAMEL "Contribution à l'élaboration d'un Critère de plasticité pour le PEHD" TH/DOC, UMMTO, Algérie.2014.
- [2] : MICHEL FONTANILLE, YVES GNANOU, Chimie et Physico-chimie Des Polymères (Cours), 2e et 3e cycles. Dunod, Paris, 4-8, 2005.
- [3] : Pr. BENRABAA Rafik cours (IAP : institut algérien du pétrole), 2015.
- [4] : CERCLÉ Claire, optimisation du phénomène d'émulsion dans les Mélanges Amidon.
- [5] : cours .Glossaire des matériaux composites-carma-actualisation octobre 2006.
- [6] : Tomalia, J. M .J. Fréchet Documentation d' [4] D.A.. Dendrimers and other Dendritic Polymers; Wiley, New York, 2001.
- [7] : BOULECHFAR Chérifa, Synthèse et caractérisation des nano composites polyéthylène Haute densité / Montmorillonite, Université Mentouri Constantine, magister en chimie Analytique, physique et environnement, 2007, 46-51.
- [8] : [Behrens et coll., 1995], Behrens G., Kuhn L.T., Uvic R., Heuer A.H., Raman Spectra of Vateritic Calcium Carbonate, Spectroscopy Letters 28 (6) (1995), pp 983-995.
- [9]: A; SAEEDI Mojtaba*1, Poostforush Mohammad2 and Jiriyaie Salman1, Thermal Degradation mechanism of HDPE Nano composites containing NanoCaCO₃, Research Journal Of Engineering Sciences, Vol. 3(6), 15-28, June (2014).
- [10] : CARREGA Marc, Aide-mémoire, Matières plastiques, 2ème édition, ©Dunod, Paris, 54-62, 2005, 2009.
- [11] : CERCLÉ Claire, optimisation du phénomène d'émulsion dans les Mélanges Amidon thermoplastique/polyéthylène, Université de Montréal École Polytechnique de Montréal, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées, génie Chimique, octobre 2009, 33-40.
- [12] P. Combette, I. Ernoult, « Physique des polymères, I. Structure, Fabrication, E [4] D.A. Tomalia, J. M .J. Fréchet. Dendrimers and other Dendritic Polymers; Wiley, New.
- [13] G.W. Ehrenstein et F. Montagne, Matériaux polymères. Structure, propriétés et Applications, Hermès, Paris, 2000
- [14] S. Jouenne, Thèse de Doctorat ; Option chimie et physicochimie des Polymères; Université Pierre et Marie Curie, 2005.
- [15] matériaux d'ingénieur chapitre17 (comportement mécanique des polymères) N.BILLON.
- [16] Ehrenstein, Gottfried w. montagne, fabienne matériaux polymères- structure, propriété et applications paris, hermès science publications, Paris 2000.

[17] M.CHERIFI. Karim "Etude, conception et fabrication d'un dispositif d'essai en biaxial traction-torsion", Mémoire de fin d'études ; UMMTO, Algérie, 2015/2016.

[18] Patrica Krawczak ; Essai plastique renforcé traité plastique et composite, technique d'ingénieurs, AM5405 année 1997.

[19] Dominique FRANÇOIS " essais mécaniques des métaux-Détermination des lois de comportement" M 120.

[20] Bertrand LANGRAND " comportement et modélisation des assemblages ponctuels" technique de l'ingénieur Bm7805, 2005.

[21] copyright ISTE press ltd. Published by Elsevierb LTD. All rights reserved.2018.

[22] M. SAADI Djamal et MOUABOU Atman « Etude Du Comportement Du PEHD En Traction-Torsion.2018

[23] Jacques RAULT. Les polymères solides rue Nicolas-Vauquelin 31100 TOULOUSE-France.

[24] Raghava, R.S., Caddell, R.M., Yeh, G.S.Y. The macroscopic yield behaviour of polymers. Journal of Materials Science 8, 225–232, 1973.