



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en Électromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électromécanique

Spécialité : Électromécanique Industrielle

Thème

**Comportement mécanique d'un tube en PEHD
renforcé par matériaux composites**

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom : ELkeurti Prénom : Larbi

Nom : Djermouni Prénom : Heythem

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. BOUHAFS. Mohammed	MCA	IMSI-UNIV ORAN2	Président
Mr. ACHACHE Habib	MCA	IMSI-UNIV ORAN2	Encadreur
Mr. ADJELOUA Abdelaziz	MCA	IMSI-UNIV ORAN2	Examineur

Année 2023/2024

Remerciement

Nous exprimons avant tout notre gratitude envers Dieu, qui nous a accordé la force et la détermination nécessaires pour achever ce modeste travail. Nous adressons également nos remerciements à notre encadrant, Mr. Achache Habib, pour avoir accepté d'assister cette étude et pour ses conseils tout au long de ce projet. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr. BOUHAFS. Mohammed et Mr. ADJELLOUA Abdelaziz pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons également à remercier tous les enseignants du département de maintenance en électromécanique, qui ont, de près ou de loin, contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire.

Dédicace

*Je dédie ce travail à : A mes parents.
A mes sœurs et mes frères. A mes
amis et mes proches. Mes très chères
proches qui m'ont beaucoup soutenu
pendant toute ma Formation, ils
trouveront ici ma profonde gratitude.*

الملخص

تستكشف هذه المقالة السلوك الميكانيكي للأنابيب في PEHD المعززة بمواد مركبة مثل البورون/الإيبوكسي، والكربون/الإيبوكسي، والزجاج/الإيبوكسي. من خلال تغيير موضع هذه المركبات (الخارجية والداخلية والمركزية) وتعديل زوايا توجيه الألياف، تقدر الدراسة تأثيرها على توزيع القيود والإزاحات من خلال سيناريوهات الشحن المحاكاة. من خلال اجتياز تحليل تفصيلي للعناصر النهائية (FEA)، تظهر النتائج لتحديد استراتيجية التعزيز الأكثر فعالية لتحسين الخصائص الميكانيكية العالمية وأداء الأنابيب في PEHD. يوفر التحليل المقارن لبيانات الحظر والإزاحة بين تكوينات مختلفة معلومات حول تحسين المفهوم وتطبيق التعزيزات المركبة في هياكل PEHD.

Résumé

Cette recherche explore le comportement mécanique des tubes en PEHD renforcés avec des matériaux composites tels que le Bore/époxy, le Carbone/époxy et le Verre/époxy. En variant le positionnement de ces composites (externe, interne et central) et en modifiant les angles d'orientation des fibres, l'étude évalue leur impact sur la distribution des contraintes et les déplacements sous des scénarios de charge simulés. À travers une analyse détaillée par éléments finis (FEA), les résultats visent à identifier la stratégie de renforcement la plus efficace pour améliorer les propriétés mécaniques globales et les performances des tubes en PEHD. L'analyse comparative des données de contrainte et de déplacement entre différentes configurations fournira des informations sur l'optimisation de la conception et de l'application des renforcements composites dans les structures en PEHD.

Overview

This essay explores the mechanical behavior of HDPE tubes enhanced with composite materials including Boron/epoxy, Carbon/epoxy, and Glass/epoxy. By varying the placement of these composites (externally, internally, and in the middle) and altering fiber orientation angles, the study evaluates their impact on stress distribution and displacement under simulated loading scenarios. Through detailed finite element analysis (FEA), the findings aim to identify the most effective reinforcement strategy to improve the overall mechanical properties and performance of HDPE tubes. The comparative analysis of stress and displacement data across different configurations will provide insights into optimizing the design and application of composite reinforcements in HDPE structures.

Sommaire

Introduction Générale	14
Chapitre I :	16
I.1.Définition d'un matériau composite :	17
I.2.Classification des matériaux composites :	17
I.2.1.Classification en fonction des natures des matrices :	17
I.2.1.1.Les composites à matrices polymère ou organique (CMO) :	17
I.2.1.2.Les composites à matrices céramiques (CMC) :	17
I.2.1.3.Les composites à matrices métalliques (CMM) :	18
I.2.2.Classification selon la forme des constituants :	18
I.2.2.1.Composites à fibres :	18
I.2.2.2.Composite à particules :	19
I.2.3.Classification selon leurs performances et leurs couts :	19
I.2.3.1.Composite de Grande Diffusion GD :	19
I.2.3.2.Composite de Haute Performance HP :	19
I.3.Les constituants des matériaux composites :	20
I.3.1.La matrice :	20
I.3.1.1.Résines thermodurcissables :	21
I.3.1.2.Résines thermoplastiques :	21
I.3.1.3.Les Résines en Céramique :	21
I.3.1.4.Les Résines Métalliques :	22
I.3.2.Les charges et les additifs :	22
I.3.2.1.Les charges :	22
I.3.2.1.1.Charges renforçantes :	22
I.3.2.2.Les additifs :	23
I.3.3.Le renfort :	23

I.3.3.1. Les principales fibres :	24
I.3.3.1.1. Fibre de verre :	24
I.3.3.1.2. Fibre de carbone :	26
I.3.1.3. Fibre d'aramide :	27
I.3.3.1.4. Fibre céramique :	27
I.3.4. L'interface :	28
I.4. Structures des matériaux composites :	28
I.4.1. Les monocouches :	28
I.4.2. Stratifiés :	29
I.4.2.1. Désignation des structures stratifiées :	29
I.4.3. Sandwichs :	30
I.5. La mise en œuvre des matériaux composites :	31
I.5.1. Moulage au contact :	31
I.5.2. Moulage par centrifugation :	32
I.5.3. Moulage par projection simultanée :	33
I.5.4. Moulage sous vide :	34
I.5.5. Moulage par compression :	34
I.5.5.1. Moulage par injection de résine :	34
I.5.5.2. Moulage par compression à froid :	35
I.5.5.3. Moulage par compression à chaud :	36
I.5.6. Moulage par injection :	37
I.5.7. Enroulement filamentaire (ou bobinage) :	38
I.6. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites :	38
Chapitre II :	46
II.1. Matériaux polymères :	47
II.2. Processus d'élaboration des polymères :	47
II.3. LA POLYMERISATION :	48
II.4. Classification des polymères :	48
II.4.1. Selon leur nature chimique :	49
II.4.2. Selon leur origine :	49
II.4.3. Selon leur structure moléculaire :	49
II.4.4. Selon leur Point de vue de la structure physique :	50
II.4.4.1. Polymère amorphe :	50

II.4.4.2.Polymères Semi –Cristallins :	51
II.4.5.Selon leur comportement thermique :	51
II.4.5.1.Les thermoplastiques :	52
II.4.5.2.Les thermodurcissables :	52
II.4.5.3.Les élastomères :	52
II.5.LES DIFFÉRENTS TYPES DE PLASTIQUES :	53
II.6.Polyéthylène :	53
II.6.1.Types de polyéthylène :	53
II.7.POLYÉTHYLÈNE (PEHD/HDPE) :	54
II.7.1.Mise en œuvre du PE :	54
II.7.2.Propriétés Du Polyéthylène À Haute Densité PEHD :	55
II.7.2.1.Propriétés mécaniques :	55
II.7.2.2.Propriétés physiques :	56
II.7.2.3.Propriétés chimiques :	56
II.7.2.4.Propriétés électriques :	56
II.7.3.Avantages et inconvénients du PEHD :	57
II.8.Processus de fabrication des tubes en PE :	57
II.8.1.Application des plastiques en tuyauterie :	59
II.8.2.Classification des tubes en PE :	60
II.8.3.Propriétés du tube en PE :	60
II.8.4.Marquages normalisés :	62
II.9.Comportement mécanique du polyéthylène :	63
II.9.1.Mécanismes d'endommagement du polyéthylène :	65
II.10.Modes de défaillance prédominante dans un tube en HDPE :	69
II.10.1.Rupture ductile (Fig. Zone 1) :	71
II.10.2.Rupture fragile (Fig. Zone 2) :	71
II.10.3.Long terme dégradation chimique (Fig. Zone 3) :	71
II.11.Vieillessement du PE :	71
II.12.Plusieurs travaux ont été faits par des auteurs dans le domaine du renforcement des pipes des différents matériaux. On cite comme exemple :	72
Chapitre III :	74
III.1.Introduction :	75
III.2.Modèle géométrique :	76
III.3.Maillage :	78

III.3.1.Principes théoriques de l'analyse par éléments finis :	79
III.3.2.Configuration de la simulation dans Abaqus :	79
III.3.3.Stratégie de maillage	79
III.4.Résultat et discussions :	80
III.4.1.L'effet de l'orientation des fibres sur la position du renfort.	81
III.4.2.L'effet du Matériau sur la position du renfort :	85
III.4.3.L'effet des matériaux composites sur la variation des contraintes et les déplacements le long de l'épaisseur :	88
III.4.3.1.L'effet des matériaux composites sur la variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} le long de l'épaisseur :	88
III.4.3.2.L'effet des matériaux composites sur la variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} le long de l'épaisseur :	92
III.4.3.3.L'effet des matériaux composites sur la variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} le long de l'épaisseur :	96
III.4.3.4.L'effet des matériaux composites sur la variation de déplacement U_1 le long de l'épaisseur :	99
III.4.3.5.L'effet des matériaux composites sur la variation de déplacement U_3 le long de l'épaisseur :	102
III.4.3. L'effet des meilleurs matériaux composites pour chaque position sur la variation des contraintes et les déplacements le long d'épaisseur :	105
Conclusion Générale	112

Listes des figures

Figure I.1: Représentation schématique d'un matériau composite.....	17
Figure I.2: Différents types de renforts employés dans les matériaux composites.	19
Figure I.3: Constituants de base d'un matériau composite.....	20
Figure I.4: Principaux familles de matrices.....	20
Figure I.5: Différentes familles des renforts	24
Figure I.6: Fibre de verre	25
Figure 7: Fibre de carbone.....	26
Figure I.8: Fibre d'aramide.....	27
Figure I.9: Monocouche unidirectionnelle	28
Figure I.10: Constitution d'un stratifié.....	29
Figure I.11: Désignations du stratifié.....	30
Figure I.12: Composite sandwichs	31
Figure I.13: Principe du moulage au contact.....	31
Figure I.14: Principe de moulage par centrifugation.....	33
Figure I.15: Principe de moulage par projection simultanée.....	33
Figure I.16: Moulage sous vide.....	34
Figure I.17: Moulage par injection de résine.....	35
Figure I.18: Moulage par compression à froid	36
Figure I.19: Moulage par compression à chaud	36
Figure I.20: Moulage par injection	37
Figure I.21: Enroulement filamentaire (ou bobinage).....	38
Figure II.22: des étapes de la fabrication des polymères.....	48
Figure II.23: Structure macromoléculaire du polyéthylène linéaire (PE-HD) a) Schéma de la structure d'une chaîne et disposition spatiale des atomes, b) modèle d'un segment macromoléculaire	50
Figure II.24: a) Aspect microscopique du polyéthylène avec juxtaposition de lamelles cristallines et de régions amorphes (filaments) , b) Sphéroïde, microstructure des polymères semi- cristallins.....	51
Figure II.25: Représentation d'une machine d'extrusion des tubes.....	58
Figure II.26: Les différentes parties d'une ligne d'extrusion des tubes en PE.....	58
Figure II.27: Représentation schématique du développement des propriétés du tube en PE	62
Figure II.28: différentes informations pour la désignation d'un tube	63
Figure II.29: Courbe de comportement contrainte-déformation lors d'un essai de traction.....	64
Figure II.30: Mécanismes de déformation inter-lamellaire, a) Etat non déformé, b) Glissement inter-lamellaire et c) Séparation inter-lamellaire.	66
Figure II.31 : Echantillon de HDPE observé au MEB pour différents états de déformation	68
Figure II.32: Modes de défaillance prédominants dans un tube en HDPE.....	70
Figure III.1: Modele géométrique.....	69

Figure III.2 : Maillage.....	70
Figure III.3: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite bore/époxy et pour différentes positions du renfort.....	72
Figure III.4: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite carbone/époxy et pour différentes positions du renfort.....	73
Figure III.5: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite verre/époxy et pour différentes positions du renfort.....	74
Figure III.6: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe du renfort.....	76
Figure III.7: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne du renfort.....	77
Figure III.8: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux du renfort.....	78
Figure III.9: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.....	79
Figure III.10: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.....	80
Figure III.11: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieu.....	81
Figure III.12: La variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.....	83
Figure III.13: La variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.....	84
Figure III.14: La variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.....	86
Figure III.15: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.....	87
Figure III.16: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.....	88
Figure III.17: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieu.....	89

Figure III.18: La variation du déplacement u_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.....	90
Figure III.19: La variation du déplacement u_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.....	91
Figure III.20: La variation du déplacement u_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.....	92
Figure III.21: La variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.....	93
Figure III.22: La variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.....	94
Figure III.23 : La variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.....	95
Figure III.24: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} avec l'épaisseur révèle des comportements distincts selon la position du Bore dans le tube PEHD.....	96
Figure III.25: La variation de la contrainte de cisaillement moyenne σ_{12} avec l'épaisseur dépend du positionnement du Bore dans le composite.....	98
Figure III.26: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} avec l'épaisseur révèle des comportements distincts selon la position du Verre dans le tube PEHD.....	99
Figure III.27: La variation du déplacement u_1 avec l'épaisseur dépend du positionnement des matériaux composites sur un tube en PEHD (Verre,Bore).....	100
Figure III.28: La variation du déplacement u_3 avec l'épaisseur dépend du positionnement des matériaux composites sur un tube en PEHD (Verre,Carbone).....	101

Introduction Générale

Introduction Générale

Ces dernières années, la demande de matériaux légers mais durables dans diverses applications d'ingénierie a stimulé d'importants progrès dans la recherche sur les matériaux composites. Parmi ces matériaux, le polyéthylène haute densité (PEHD) se distingue par son excellente résistance chimique, sa faible absorption d'humidité et sa facilité de transformation. Cependant, ses propriétés mécaniques, notamment sous contrainte élevée et dans des applications structurales, nécessitent souvent une amélioration au-delà de ses capacités intrinsèques.

Pour relever ce défi, les chercheurs ont exploré le renforcement des tubes en PEHD avec des matériaux composites. Ces composites, généralement composés de fibres à haute résistance telles que le bore, le carbone et le verre incorporées dans une matrice époxy, offrent des performances mécaniques exceptionnelles tout en complétant les propriétés souhaitables du PEHD. Le placement stratégique de ces matériaux composites à l'intérieur du tube - qu'il s'agisse des sections externes, internes ou centrales - permet aux ingénieurs de façonner le comportement mécanique de la structure afin de répondre aux exigences opérationnelles spécifiques.

Les propriétés mécaniques de ces structures hybrides sont influencées par plusieurs facteurs clés, notamment le type de matériau composite utilisé, l'orientation des fibres de renforcement et la position à l'intérieur du tube en PEHD. Chaque facteur joue un rôle crucial dans la détermination de paramètres tels que la rigidité, la résistance, la résistance aux chocs et le comportement en fatigue. Comprendre comment les variations de ces paramètres affectent la performance globale des structures hybrides en PEHD-composites est essentiel pour optimiser leur conception et garantir un fonctionnement fiable dans diverses applications.

Cet essai explore le comportement mécanique des tubes en PEHD renforcés par des matériaux composites à travers une investigation systématique de différentes configurations de stratification. En examinant les effets des types de fibres, des angles d'orientation et de leur position à l'intérieur du tube, cette étude vise à fournir des insights sur la manière dont ces facteurs interagissent et influencent l'intégrité structurelle et les performances du système matériel hybride.

Grâce à une analyse approfondie et à une validation expérimentale, cette recherche contribue à faire progresser la compréhension des structures en PEHD renforcées par

des composites, offrant des implications précieuses pour leur application pratique dans des industries allant de l'aérospatiale et de l'automobile à l'infrastructure et au-delà. En exploitant les synergies entre le PEHD et les matériaux composites avancés, les ingénieurs peuvent ouvrir de nouvelles possibilités pour des structures légères, durables et à haute performance répondant aux exigences rigoureuses des défis d'ingénierie modernes.

Chapitre I :

Généralités sur les

matériaux Composites

I.1. Définition d'un matériau composite :

Un matériau composite est formé par la combinaison de deux matériaux distincts, caractérisés par des propriétés complémentaires, donnant ainsi lieu à un matériau dont les performances dépassent celles des composants individuels. Typiquement, un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues dispersées dans une phase continue. La phase discontinue, connue sous le nom de renfort ou matériau renforçant, présente généralement une dureté et des propriétés mécaniques supérieures à

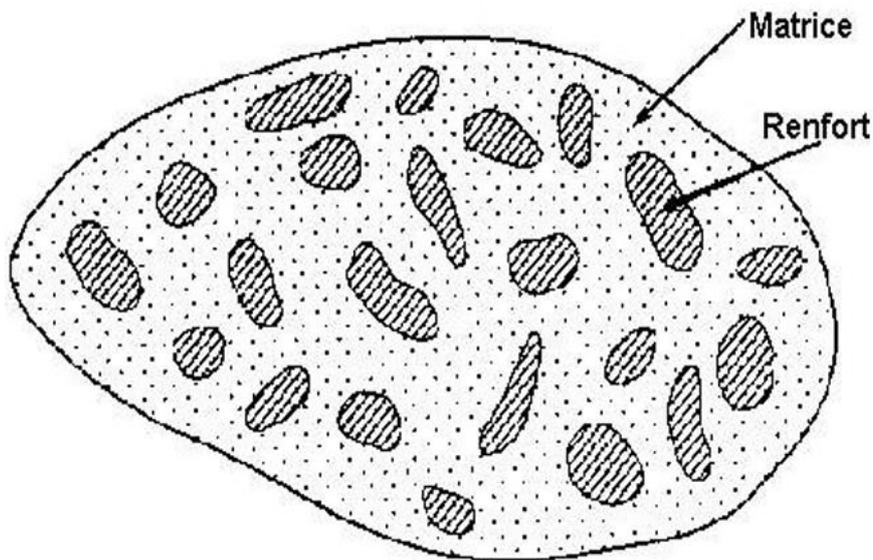


Figure I.1: Représentation schématique d'un matériau composite

celles de la phase continue, appelée matrice. [1]

I.2. Classification des matériaux composites :

I.2.1. Classification en fonction des natures des matrices :

En fonction de la composition de la matrice, trois principales catégories de composites peuvent être distinguées :

I.2.1.1. Les composites à matrices polymère ou organique (CMO) :

Les composites à matrices organiques (CMO) représentent actuellement la majorité des volumes de production à l'échelle industrielle.

I.2.1.2. Les composites à matrices céramiques (CMC) :

Les composites à matrices céramiques (CMC) sont spécifiquement conçus pour des applications à très haute technicité et travaillant à des températures élevées, telles que celles rencontrées dans les domaines spatiaux, nucléaire et militaire.

I.2.1.3. Les composites à matrices métalliques (CMM) :

Les composites à matrices métalliques (CMM) sont une catégorie où la matrice est constituée de métal. Ils sont utilisés dans diverses applications où les propriétés métalliques sont requises, souvent en combinaison avec d'autres matériaux pour améliorer les caractéristiques globales.[2]

I.2.2. Classification selon la forme des constituants :

Selon la configuration des composants, les composites peuvent être regroupés en deux catégories principales :

I.2.2.1. Composites à fibres :

La disposition et l'orientation des fibres dans le renfort déterminent les propriétés mécaniques du matériau composite. Ainsi, le concepteur a la possibilité d'anticiper, de contrôler et d'ajuster leur comportement mécanique et physique en fonction de leur type et de leur quantité. De plus, les fibres se différencient également par leur géométrie, pouvant être longues ou courtes.

- 1. Les Fibres Longues :** Ces résines sont développées pour des applications structurelles où les pièces doivent résister à des contraintes importantes. Ainsi, l'orientation des renforts est ajustée en fonction des charges appliquées. Elles sont principalement utilisées dans les industries aéronautique, aérospatiale, navale et automobile.
- 2. Les Fibres Courtes :** Ces résines sont utilisées pour des applications non structurelles, ce qui signifie qu'elles peuvent être agencées de manière aléatoire sans orientation spécifique. Cela confère au matériau ainsi fabriqué une quasi-isotropie.[3]

I.2.2.2. Composite à particules :

Les renforts se présentent sous forme de particules, qui, contrairement aux fibres, ne possèdent pas de dimensions spécifiques ou privilégiées. Ils sont habituellement employés pour améliorer diverses propriétés des matériaux ou des matrices, telles que la rigidité, la résistance à la chaleur, la résistance à l'abrasion, la réduction du retrait, etc. [4]

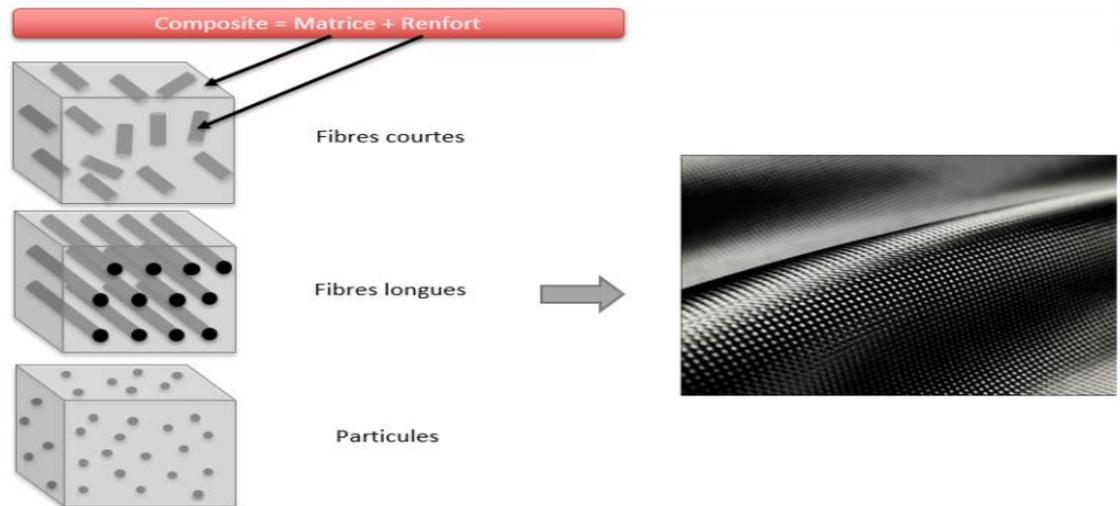


Figure I.2: Différents types de renforts employés dans les matériaux composites.

I.2.3. Classification selon leurs performances et leurs coûts :

I.2.3.1. Composite de Grande Diffusion GD :

Les matériaux composites largement utilisés présentent des avantages significatifs, notamment l'optimisation des coûts grâce à une réduction des coûts de production, leur composition à base de polyester associé à des fibres de verre de différentes longueurs (sous forme de mat ou de tissu), ainsi que la simplicité des procédés de fabrication tels que le moulage par contact, le SMC et l'injection. [5]

I.2.3.2. Composite de Haute Performance HP :

Les matériaux composites à haute performance trouvent leur application dans le domaine de l'aéronautique, où une performance élevée est requise en raison des exigences élevées en termes de valeur ajoutée. Dans ces cas, les renforts sont principalement des fibres longues, avec un taux de renfort dépassant généralement 50%. La fabrication de ces composites implique généralement des procédés tels que le drapage sous autoclave, l'enroulement filamentaire et le RTM, qui sont encore largement manuels dans de nombreux cas. [6]

I.3. Les constituants des matériaux composites :

Les composites se composent essentiellement d'une matrice et de renfort, auxquels peuvent s'ajouter des charges et des additifs dont l'impact est moindre. Leur classification peut se faire en fonction des composants principaux ou de leur configuration. [3]

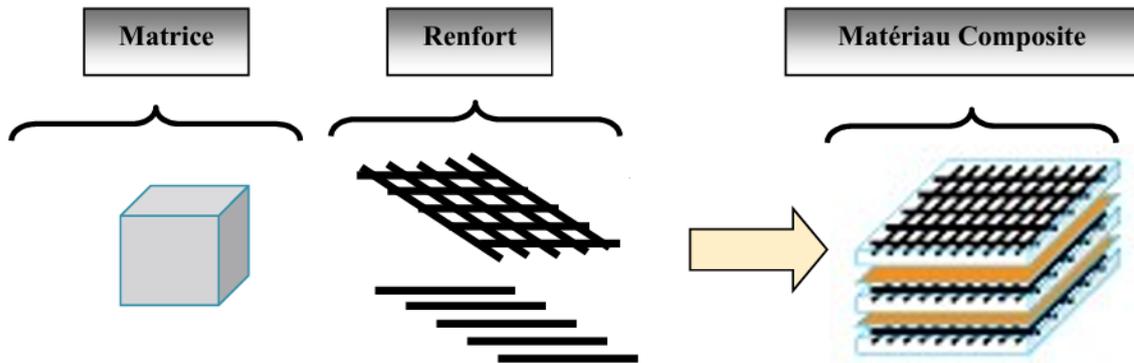


Figure I.3: Constituants de base d'un matériau composite

I.3.1. La matrice :

La fonction principale de la matrice est de consolider les fibres tout en garantissant une distribution uniforme du renfort dans l'espace. Sur le plan mécanique, la matrice transfère et distribue les contraintes externes vers le renfort. D'un autre côté, elle confère à la structure une résistance chimique tout en permettant de façonner le produit selon les exigences désirées. [7]

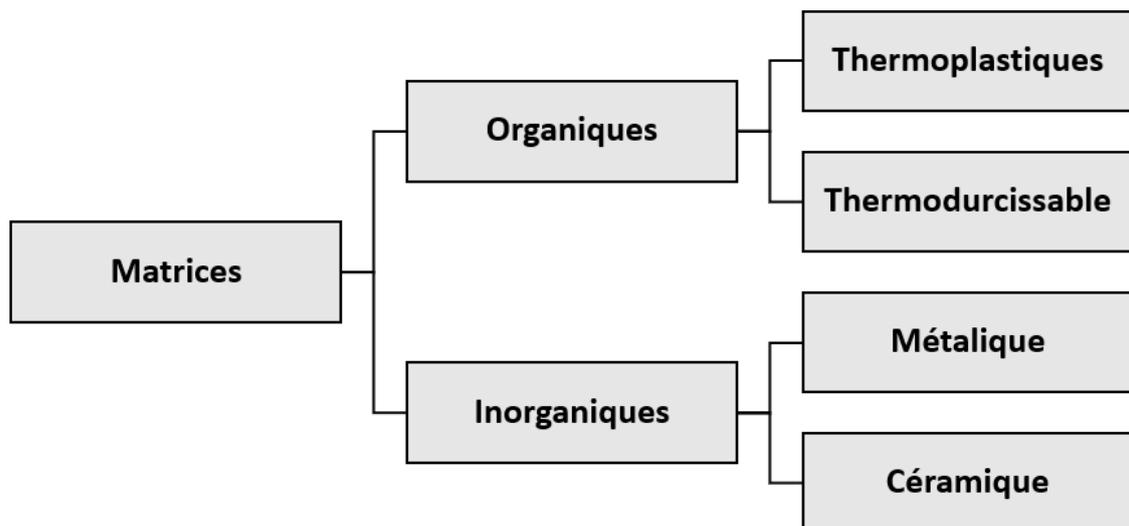


Figure I.4: Principaux familles de matrices

I.3.1.1. Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables présentent des propriétés mécaniques de qualité supérieure. Elles ne sont moulables qu'une seule fois et sont disponibles sous forme de polymères non réticulés en suspension dans un solvant. Les résines polyester insaturées, les résines de condensation et les résines époxy sont des exemples de résines thermodurcissables. [7]

I.3.1.2. Résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques présentent des propriétés mécaniques relativement modestes. Ces résines sont caractérisées par leur dureté et leur solidité, nécessitant un processus de transformation à des températures très élevées. Parmi les exemples de résines thermoplastiques, on trouve le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polycarbonate et le polyamide. De la même manière que pour les résines thermodurcissables, les matériaux thermoplastiques les plus performants présentent des caractéristiques mécaniques élevées et une faible masse volumique. [8]

I.3.1.3. Les Résines en Céramique :

Les matrices céramiques sont constituées d'un ou plusieurs métaux combinés à un élément, le plus courant étant l'oxygène, comme par exemple Al_2O_3 (alumine), SiO_2 (silice) et MgO (magnésie). Moins répandues que leurs homologues à matrice organique en raison de leur coût élevé, les résines en céramique s'adressent aux applications nécessitant des températures très élevées. Elles sont principalement utilisées dans l'industrie spatiale, l'aéronautique militaire et la conception de composants haut de gamme tels que les disques ou les plaquettes de freins [9]. Les céramiques présentent de nombreux avantages pour de telles applications, notamment leur capacité à résister à des températures extrêmement élevées, leur légèreté par rapport à de nombreux métaux et leur bonne stabilité chimique. Cependant, leur grande fragilité limite considérablement leur champ d'application.

I.3.1.4. Les Résines Métalliques :

Les composites à matrice en métal sont des matériaux qui associent la dureté des métaux à la rigidité de la céramique. Ce type de résines est employé comme liant dans des applications nécessitant un matériau aux propriétés spécifiques élevées et présentant une bonne résistance aux températures élevées. À ce jour, ces applications demeurent limitées et sont principalement utilisées dans des secteurs de pointe en raison du coût de mise en œuvre et de la complexité d'imprégnation. Les matrices les plus couramment utilisées sont les alliages d'aluminium, tandis que les fibres employées sont le carbone et les fibres céramiques [10].

I.3.2. Les charges et les additifs :

Les charges et les additifs sont employés afin d'optimiser les propriétés mécaniques et physiques et de favoriser la procédure de mise en œuvre.

I.3.2.1. Les charges :

Les charges, constituées de particules ou de fibres, sont intégrées à la matrice d'un matériau composite dans le dessein de rehausser ou de modifier diverses propriétés spécifiques. Contrairement aux éléments de renfort qui renforcent la résistance mécanique, les charges sont généralement destinées à altérer des caractéristiques telles que la conductivité électrique, la conductivité thermique, la résistance chimique ou la densité. Typiquement, ces charges sont introduites dans la matrice lors de la fabrication du matériau composite, soit directement sous forme de particules, soit après dispersion ou enrobage préalable afin de faciliter leur incorporation. Les proportions et les types de charges employés sont déterminés en fonction des propriétés requises pour le matériau composite final.

Il est important de souligner que l'incorporation de charges peut aussi influencer sur d'autres attributs du matériau, tels que sa résistance à la rupture, sa ductilité et sa résistance aux chocs, en fonction de la quantité, de la forme et des propriétés des charges employées. Il existe deux catégories de charges :

I.3.2.1.1. Charges renforçantes :

Les charges renforçantes, qu'elles soient sous forme de particules ou de fibres, sont introduites dans la matrice d'un matériau composite afin d'accroître sa résistance et ses propriétés mécaniques. Ces charges consolident la matrice en accroissant sa rigidité, sa résistance à la traction, sa résistance à la compression, ou en améliorant d'autres caractéristiques telles que la résistance aux chocs ou à l'usure.

I.3.2.1.2.Charges non renforçantes :

Les charges non renforçantes, parfois désignées sous le terme de charges fonctionnelles, sont des particules incorporées à une matrice de matériau composite dans le but de conférer des propriétés particulières sans nécessairement accroître la résistance du matériau. Ces charges peuvent influencer la conductivité électrique, la conductivité thermique, la résistance chimique, la résistance aux rayons UV, la coloration, la densité, la lubrification, entre autres caractéristiques. [11]

I.3.2.2.Les additifs :

Un additif est une substance incorporée à un mélange dans le but de conférer une propriété spécifique. Ils sont présents en faible quantité, généralement quelques pourcentages ou moins, et agissent en tant que :

- Adjuvants;
- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants;
- Agents anti-retrait;
- Agents anti-ultraviolets. [12]

I.3.3.Le renfort :

Les matériaux de renfort sont responsables des propriétés mécaniques des composites, notamment leur rigidité, leur résistance à la rupture et leur dureté. En outre, ces renforts contribuent à améliorer diverses propriétés physiques telles que le comportement thermique, la résistance à la température élevée, la résistance au feu, la résistance à l'abrasion et les propriétés électriques. Les critères recherchés pour les renforts incluent des caractéristiques mécaniques élevées, une densité faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité d'incorporation, et un coût réduit, entre autres. [13]

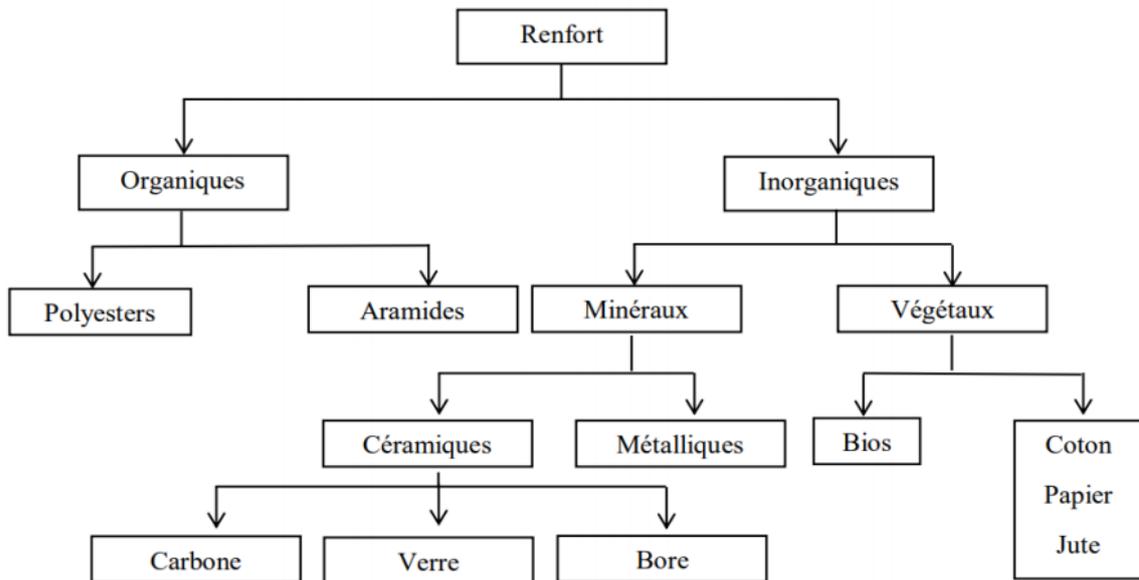


Figure I.5: Différentes familles des renforts

I.3.3.1. Les principales fibres :

I.3.3.1.1. Fibre de verre :

Ces fibres représentent le principal élément de renfort dans les composites largement utilisés. Elles sont fabriquées à partir de sable (silice) et d'additifs tels que l'alumine, le carbonate de calcium, la magnésie et l'oxyde de bore. Trois types de fibres sont distingués : [14]

A : haute teneur en alcali

E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;

R/S : pour les composites de hautes performances ;

D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques) ;



Figure I.6: Fibre de verre

Caractéristiques	Verre E	Verre A	Verre R ou S	Verre D
Masse volumique (kg/m ³)	2540	2460	2550	2160
Module d'Young (GPa)	72000	71000	86000	55000
Contrainte à la rupture (MPa)	3500	3100	4500	2500
Allongement à la rupture (%)	4.4			5.2

Tableau I.1: Différents types de verres

Les avantages et les inconvénients des fibres de verre :

Les avantages :

- Faible coût par rapport à d'autres fibres.
- Haute résistance à la traction et à la compression.
- Haute résistance au feu.
- Haute résistance chimiques.

Les inconvénients :

- Faible résistance à la fatigue
- Sensibilité aux températures élevées.
- Module d'élasticité réduite.
- Sensibilité à l'abrasion.
- Haute densité.

I.3.3.1.2. Fibre de carbone :

Les fibres de carbone sont des filaments minces composés de carbone élémentaire, avec une structure qui évolue de celle du carbone amorphe à celle du graphite cristallin. Elles sont produites à partir d'un polymère de base appelé précurseur, et les propriétés chimiques et physiques des fibres de carbone finales dépendent largement des caractéristiques du précurseur [15].

Les fibres de carbone présentent des propriétés mécaniques extrêmement élevées, avec une résistance pouvant atteindre entre 200 et 300 GPa. Elles sont couramment utilisées



Figure 7: Fibre de carbone

comme renfort dans les composites polymères rigides [16].

Les avantages et les inconvénients des fibres de carbone :

Les avantages :

- Haute résistance et légèreté.
- Rigidité élevée.
- Faible coefficient de dilatation thermique.
- Résistance à la corrosion et aux produits chimiques.
- Conductivité électrique et thermique.
- Durabilité et longévité.

Les inconvénients :

- Coût élevé
- Fragilité en cas de chocs ou d'impacts

- Difficulté de recyclage
- Conductivité électrique

I.3.1.3.Fibre d'aramide :

Les fibres d'aramide sont des polyamides aromatiques contenant des groupes aromatiques à plus de 85%. Le Kevlar est l'une des fibres d'aramide les plus connues. Elles possèdent des propriétés mécaniques élevées en traction, comparables à celles des fibres de carbone, mais leur résistance à la compression est faible. Cette faible résistance à la compression est souvent attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour remédier à ce problème, des traitements chimiques des fibres, tels que des enzymages, peuvent être utilisés.

L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de pallier les faiblesses des composites à fibres aramides [17]. Les renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs, comme dans la

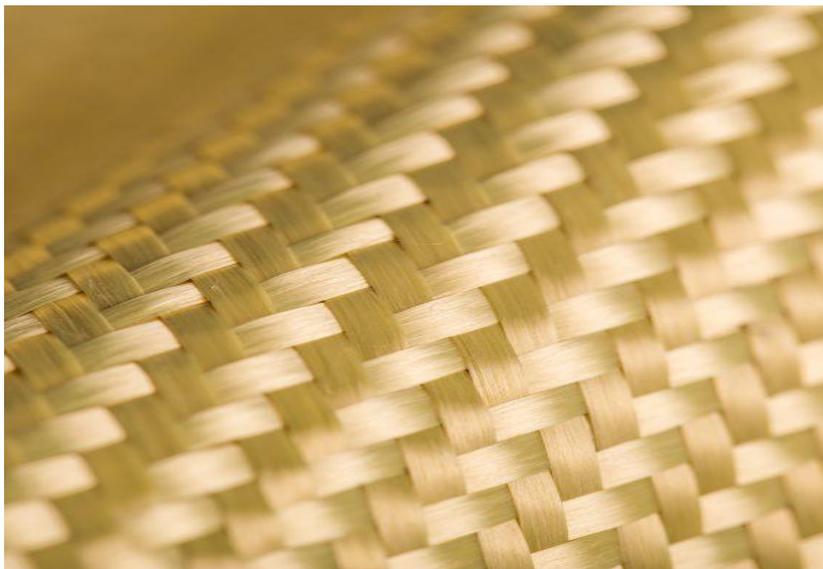


Figure I.8: Fibre d'aramide

fabrication de skis, de raquettes de tennis, etc.

I.3.3.1.4.Fibre céramique :

Les matériaux composites de type céramique sont souvent composés de renforts et de matrices céramiques. Les fibres céramiques sont généralement élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil de support. Elles trouvent leur application dans des environnements où les températures sont extrêmement élevées, généralement entre

500°C et 2000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions.

Les fibres céramiques les plus couramment utilisées comprennent :

- Fibres de Carbure de Silicium.
- Fibres de Bore.
- Fibres de Bore Carbure de Silicium [17].

I.3.4.L'interface :

L'incorporation d'une couche interface vise à garantir la compatibilité entre le renfort et la matrice. Cette couche se forme de manière spontanée lorsque deux phases entrent en contact lors de la fabrication du matériau et persiste entre ces deux phases pendant toute la durée de vie du matériau. L'interface ne se limite pas à une simple discontinuité entre les deux phases du matériau hétérogène ou à leur juxtaposition. [18]

I.4.Structures des matériaux composites :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches.
- Les stratifiés.
- Les sandwichs.

I.4.1.Les monocouches :

Les monocouches constituent l'unité fondamentale de la structure composite. Les divers types de monocouches se distinguent par la configuration du renfort : fibres longues (unidirectionnelles, réparties aléatoirement), fibres tissées, fibres courtes. [19]

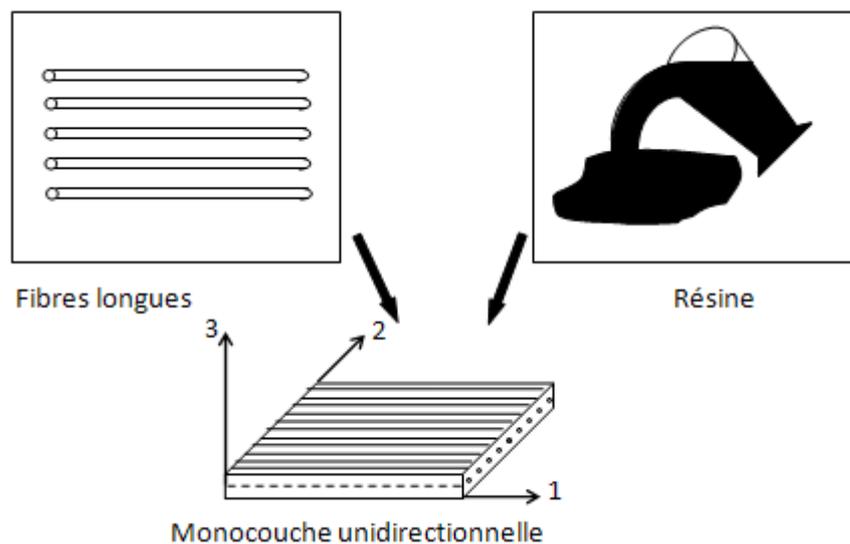


Figure I.9: Monocouche unidirectionnelle

I.4.2.Stratifiés :

Les stratifiés consistent en des couches superposées, chacune ayant une orientation spécifique par rapport à un référentiel commun. En manipulant l'ordre et l'orientation de ces couches, il est possible d'ajuster précisément les propriétés mécaniques du stratifié pour répondre aux sollicitations externes, permettant ainsi une optimisation maximale de la distribution de la matière. [2]

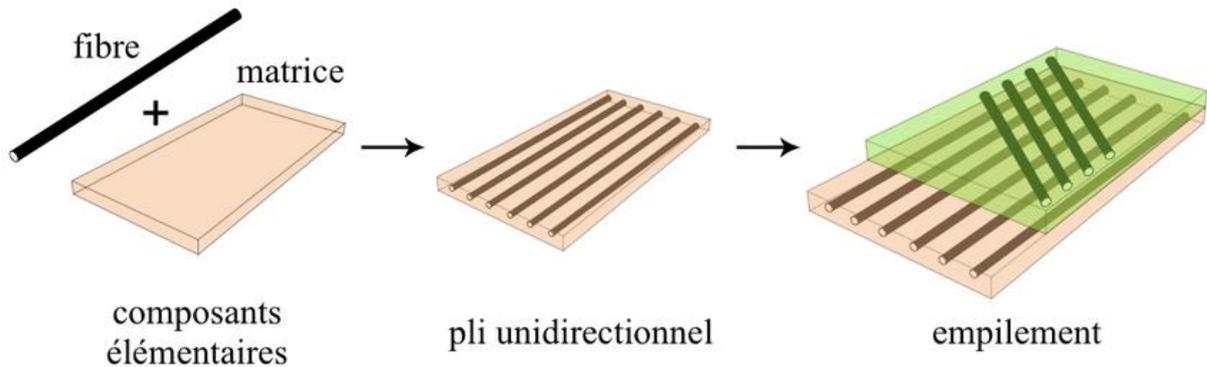


Figure I.10: Constitution d'un stratifié

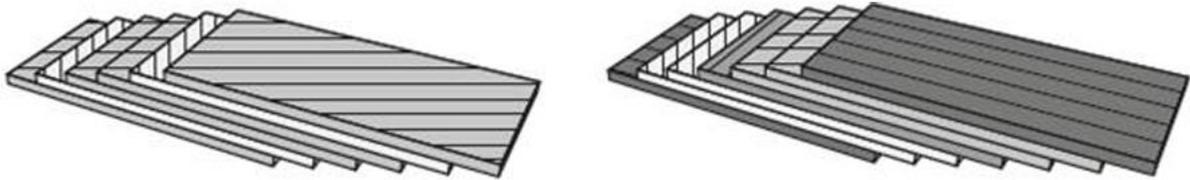
I.4.2.1.Désignation des structures stratifiées :

Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels se composent d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur de chaque couche est déterminée par son grammage. En général, l'épaisseur de chaque couche est très faible, environ 0,125 mm pour un matériau en carbone-époxy de qualité aéronautique, et environ 0,3 mm pour ceux utilisés dans l'industrie nautique. Ces structures stratifiées sont formées de couches unidirectionnelles dont les fibres sont orientées différemment d'une couche à l'autre, afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale. [8]

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence. Un stratifié est codifié de la façon suivante :

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x. Sur les Figures I.12(a) et I.12(b), les couches sont décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut ;
- Les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de la Figure I.12(a) : $[-45/45/ - 45/ - 45/45/ - 45]$;

- Les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme sur la Figure I.12(b) : [0/452/90/ - 452/0] ;
- En cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche ;
- En cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole s indique la symétrie : [-45/45/ -45/ -45/45/ -45] devient [-45/45/-45] s et [0/45/45/90/-45/ - 45/0] devient [0/452/90/ - 452/0].



(a) [-45/45/ - 45/ - 45/45/ - 45]

(b) [0/45/45/90/-45/-45/0]

Figure I.11: Désignations du stratifié

I.4.3. Sandwichs :

Les systèmes composites exposés à des contraintes de flexion ou de torsion sont habituellement construits en matériaux sandwich. Ce type de structure se compose d'une âme et de deux peaux constituées de matériaux composites. L'assemblage se fait par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux employés. Les âmes les plus répandues sont de type nid d'abeille, ondulé ou mousse, tandis que les peaux sont généralement formées de structures multicouches.

Ces configurations offrent une rigidité considérable en flexion et en torsion. L'âme du système sandwich résiste essentiellement aux forces de cisaillement et de compression hors plan, tandis que les peaux inférieure et supérieure supportent les charges dans leur

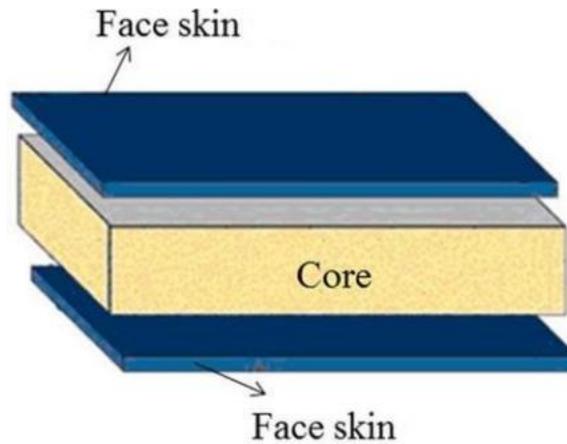


Figure I.12: Composite sandwichs

propre plan. [20]

I.5. La mise en œuvre des matériaux composites :

Les principaux types de mise en œuvre des matériaux composites :

I.5.1. Moulage au contact :

Ce processus manuel est utilisé pour fabriquer des pièces à partir de résines thermodurcissables, sans nécessiter de température élevée ni de pression. Les renforts sont placés sur le moule et imprégnés de résine liquide qui est accélérée et catalysée. Après polymérisation de la résine, la pièce est retirée du moule et subit un processus de

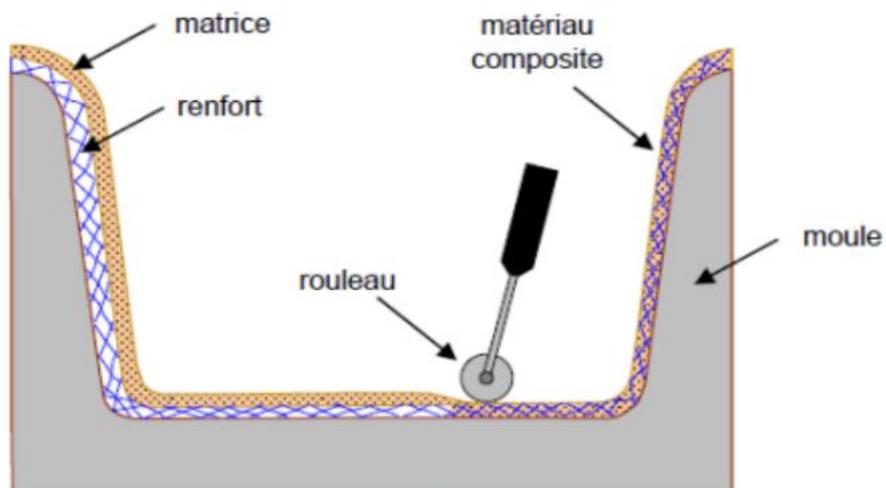


Figure I.13: Principe du moulage au contact

détourage pour obtenir sa forme finale. [21]

I.5.2.Moulage par centrifugation :

Ce procédé est employé pour le moulage d'objets de forme cylindrique tels que des tubes, des tuyaux et des réservoirs. Il représente une évolution de la technique utilisée pour fabriquer des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé. Dans ce processus, le moule de forme cylindrique est mis en rotation, généralement à une vitesse d'environ 2000 tours par minute. Après éventuellement l'application d'un revêtement en gel, les composants nécessaires sont introduits simultanément et de manière continue :

- Renforts : torons ou mèches coupés
- Résines catalysées et accélérées (résines époxydes, polyesters, etc.).

L'imprégnation du renfort par la résine est effectuée par un mouvement centrifuge. Le système de résine et les fibres hachées sont déposés sur la surface du moule à l'aide d'un bras d'alimentation mobile équipé d'un hachoir et d'un pistolet pulvérisateur. Ce bras se déplace en va-et-vient pendant que le moule tourne. La polymérisation est ensuite réalisée à température ambiante, ou éventuellement accélérée en étuve.

Un renfort, tel qu'un mat ou un tissu enroulé, peut être éventuellement ajouté en interrompant la rotation du moule. Ensuite, la résine est introduite pendant que le moule tourne.

Après la polymérisation, le tube cylindrique est retiré du moule, et l'extraction des systèmes de résine permet le démoulage. Cette méthode garantit une finition de surface extérieure de qualité, avec des dimensions de diamètre et d'épaisseur de tuyaux bien définies. Ce processus de fabrication requiert une infrastructure industrielle conséquente ainsi qu'une grande précision dans l'équilibrage du moule. [22]

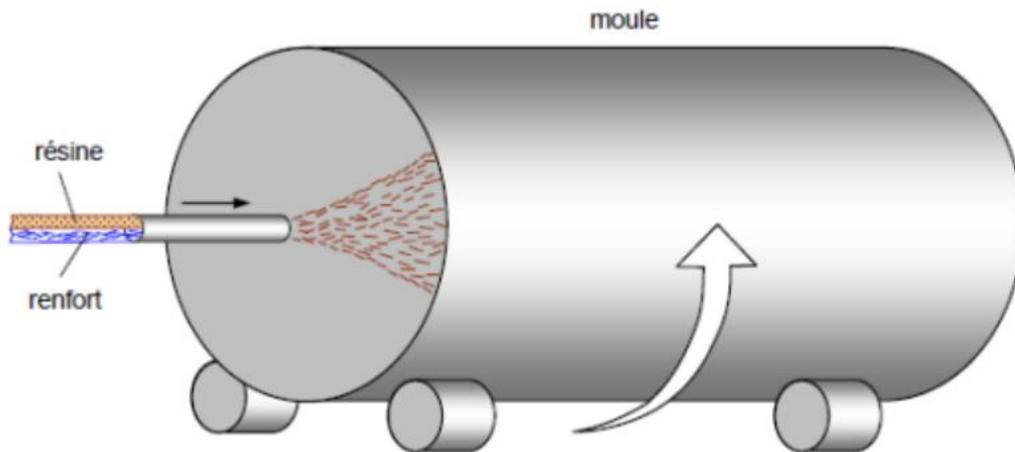


Figure I.14: Principe de moulage par centrifugation

I.5.3. Moulage par projection simultanée :

Le moulage est réalisé en projetant simultanément des fibres coupées et de la résine catalysée sur un moule. L'équipement de projection se compose d'une machine pour couper le stratifil et d'un pistolet pour projeter la résine et les fibres coupées, le tout étant actionné par de l'air comprimé. Ensuite, la couche de fibres imprégnées de résine est compactée et débarrassée des bulles à l'aide d'un rouleau cannelé. [21]

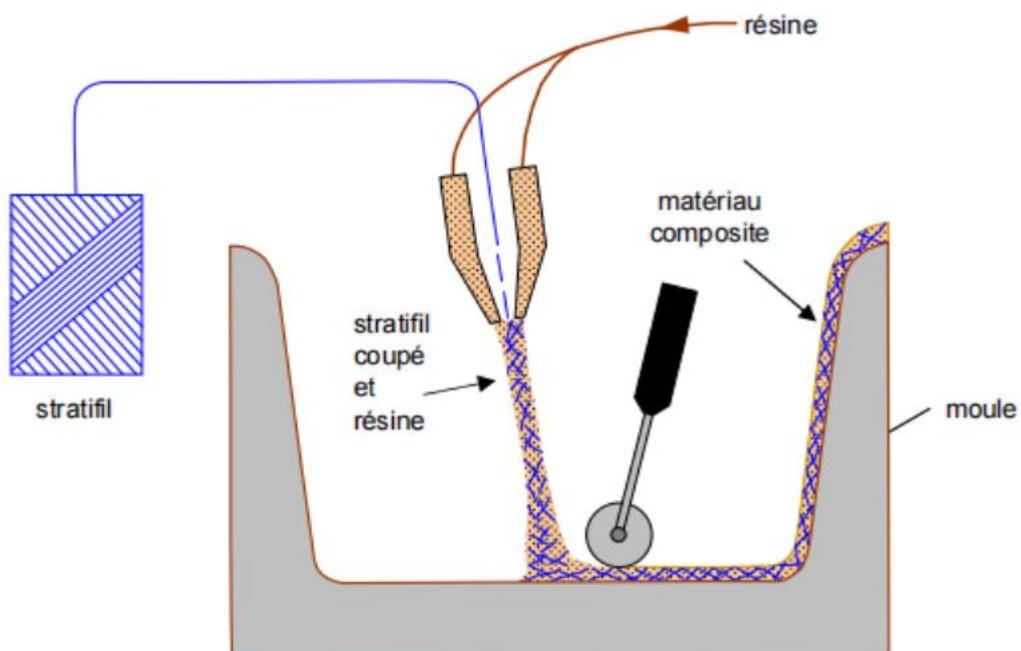


Figure I.15: Principe du moulage par projection simultanée

I.5.4. Moulage sous vide :

Le processus de moulage sous vide est réalisé entre un moule et un contre-moule qui peuvent être rigides, semi-rigides ou souples, en fonction de la technologie de mise en œuvre utilisée.

Le renfort est positionné à l'intérieur du moule, puis la résine catalysée est versée sur le renfort. La pression résultante exercée sur le moule lors de la mise sous vide est exploitée pour uniformiser la répartition de la résine et son imprégnation dans le renfort. [23]

La résine peut également être injectée par aspiration induite par le vide.

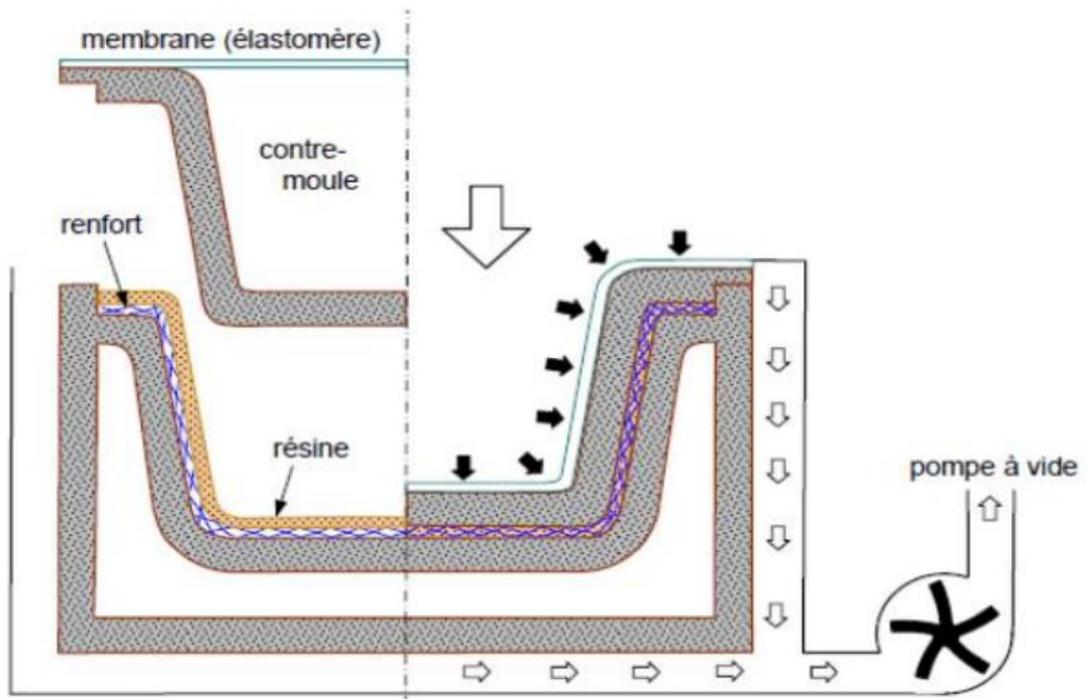


Figure I.16: Moulage sous vide

I.5.5. Moulage par compression :

I.5.5.1. Moulage par injection de résine :

L'injection de résine, ou le moulage par transfert de résine (RTM), implique l'introduction sous pression de résine afin d'imprégner un renfort situé à l'intérieur d'un moule avec une matrice très rigide et fermée. L'injection automatisée du système de résine réduit la manipulation et la libération de styrène. La proportion de renfort peut

être considérable, permettant ainsi d'obtenir des structures composites dotées de propriétés mécaniques élevées. Ce processus de moulage est adapté à la fabrication de structures profondes et de formes complexes. [23]

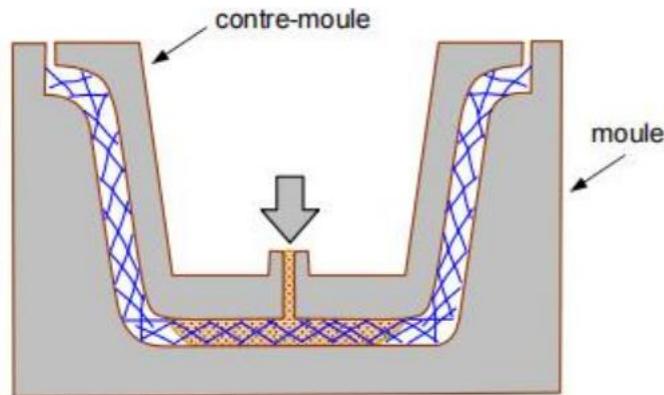


Figure I.17: Moulage par injection de résine

I.5.5.2. Moulage par compression à froid :

Le moulage est réalisé à une pression basse, inférieure à 5 bars, sans chauffage du moule, en exploitant l'exothermicité de la polymérisation de la résine. L'énergie thermique générée lors du moulage des pièces est ensuite suffisante pour maintenir le moule à une température constante de 50 à 70 °C.

Le moule et le contre-moule sont recouverts d'un agent de démoulage et d'un gel-coat. Ensuite, le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. Le moule et le contre-moule sont fermés, puis pressés. La durée de polymérisation dépend du type de résine, du catalyseur et de la température atteinte par le moule lors du fonctionnement continu de la production.

Ce processus de moulage est approprié pour la production de pièces en moyennes séries, avec une capacité de fabrication de 4 à 12 pièces par heure. L'investissement requis, incluant le matériel et les moules, est moins élevé que pour le processus de compression à chaud. La configuration de la presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être fabriqués par le fabricant de matériaux composites. Les pièces présentent une surface esthétique sur chaque face. Cependant, la productivité est inférieure à celle du moulage par compression à chaud. [22]

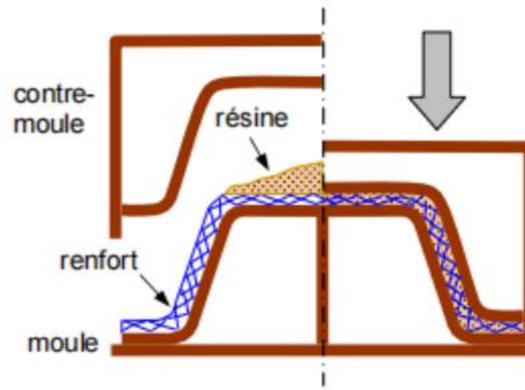


Figure I.18: Moulage par compression à froid

I.5.5.3. Moulage par compression à chaud :

Ce processus de moulage se distingue comme l'une des méthodes les plus rentables pour la production en grande quantité de structures de petite à moyenne taille. Il implique l'utilisation de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffés. Le renforcement, comprenant des torons continus, des tissus ou des préformes, est disposé dans le moule chauffé après avoir été préalablement enduit d'un agent de démoulage. Ensuite, la résine catalysée est versée en vrac sur le renfort. Le moule est ensuite fermé et ouvert avec un contrôle précis de la vitesse, en fonction du temps de polymérisation de la résine, qui est influencé par la réactivité de la résine et l'épaisseur de la structure composite. Ce processus de moulage à chaud permet d'obtenir des proportions significatives de matériau de renforcement, ce qui se traduit par des propriétés mécaniques supérieures pour les structures moulées. Les pressions de moulage varient généralement entre 0,5 et 15 MPa, selon les dimensions de la structure à mouler. Les cadences de production peuvent atteindre entre 15 et 30 articles par heure. Cependant, ce procédé nécessite un

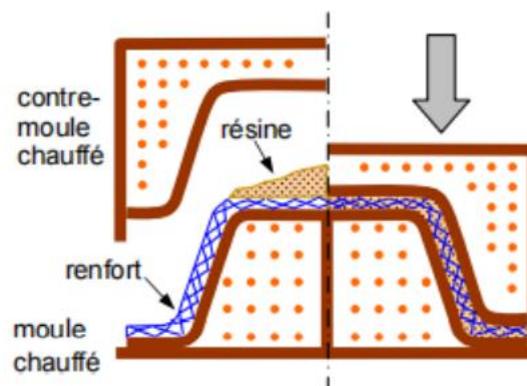


Figure I.19: Moulage par compression à chaud

investissement substantiel dans l'usine, la presse et les moules. [23]

I.5.6. Moulage par injection :

La technique de moulage par injection est la méthode prédominante parmi les méthodes de transformation des thermoplastiques renforcés (d'autres méthodes incluent l'extrusion, le soufflage par extrusion, le thermoformage, etc.).

Le processus de moulage par injection est effectué sur les presses conventionnelles dédiées à l'injection des résines thermoplastiques.

Des granulés contenant à la fois la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont poussés à travers une vis d'Archimède. La matrice est liquéfiée par le chauffage et injectée sous une haute pression dans un moule chauffé, où la polymérisation a lieu.

Les produits issus de ce processus sont plus couramment désignés comme des "plastiques renforcés" plutôt que des "matériaux composites". En effet, en raison de la nature des renforts utilisés (fibres courtes, sphères, etc.), les résines voient leur contrainte à la rupture et leur module d'Young augmentés d'un facteur compris entre 2 et 4. Cette méthode est particulièrement adaptée à la fabrication de pièces en très grandes séries. [22]

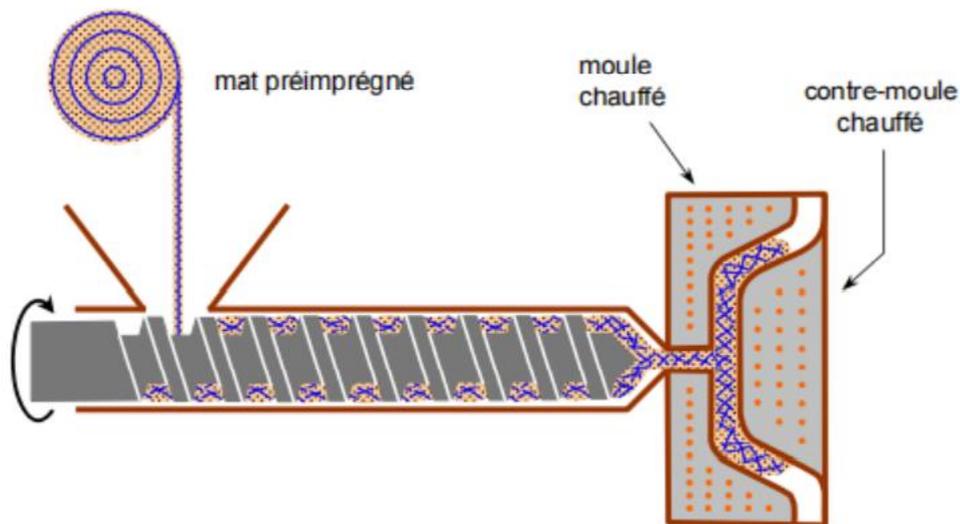


Figure I.20: Moulage par injection

I.5.7. Enroulement filamentaire (ou bobinage) :

Technologie adaptée aux matériaux haute performance. Elle implique un enroulement tendu de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant autour d'un mandrin rotatif. Les avantages comprennent une disposition optimale des renforts, d'excellentes propriétés mécaniques et la capacité à produire des pièces de grande taille avec des

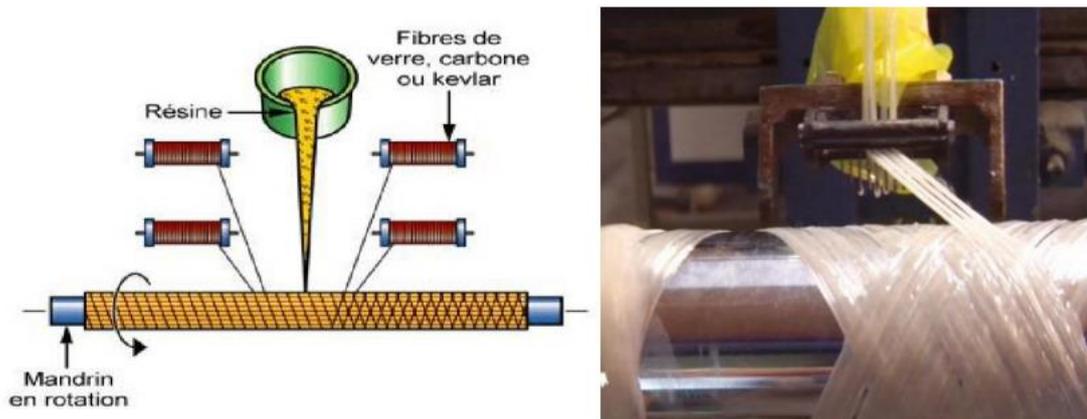


Figure I.21: Enroulement filamentaire (ou bobinage)

surfaces internes lisses.

I.6. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites :

Les avantages :

- Ils ont une meilleure résistance et rigidité
- Meilleure résistance à la fatigue
- Meilleure résistance à la corrosion
- Faible coefficient de frottement et bonne résistance à l'usure
- Capacité d'amortissement des vibrations
- Facilite le dimensionnement des structures complexes à coût réduit.
- Possibilité de construire des structures à propriétés mécaniques élevées spécialement sur les axes de chargement
- Le gain de poids car le remplacement des matériaux classiques par des matériaux composites est motivé par ce facteur là

Les inconvénients :

En dépit de ces nombreux avantages qui plaident en faveur des installations modernes, les matériaux composites présentent quelques inconvénients, énumérés ci-dessous :

- La tenue en chaleur est inférieure à celle des métaux
- La détection des problèmes (fissure) est difficile par rapport aux métaux
- La mise en œuvre des réparations est beaucoup plus complexe.

I.7. Comportement mécanique des matériaux composites:

I.7.1.Introduction:

Les champs des déformations et des contraintes dans un milieu sont liés par des lois appelées lois de comportement, caractérisant le comportement mécanique du milieu. Ces lois sont décrites par des axiomes qui permettent de rendre compte au mieux des phénomènes observés.

I.7.2 Description des contraintes :

Illustration des contraintes par un cube élémentaire (Figure A)

Notation:

Le champ de contraintes à l'un point M d'un solide est un tenseur d'ordre 2, symétrique, représenté par la matrice :

$$\sigma(M) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}$$

Comme $\sigma(M)$ est symétrique, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ pour tout $i \neq j$.

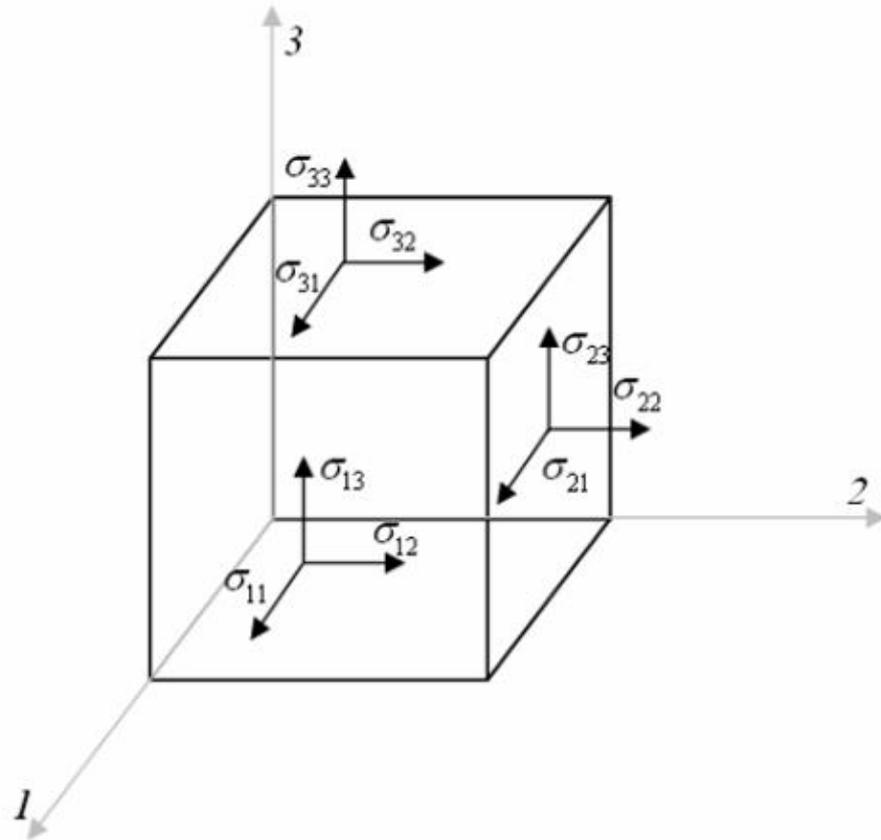


Figure I.23 : Composantes des vecteurs contraintes dans un système d'axes (1, 2,3)

- Contraintes principales :
Il existe un repère dans lequel $\sigma (M)$ est de la forme :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Les contraintes dans ce repère sont les contraintes principales. Elles correspondent aux valeurs propres de la matrice (M).

Notation pour l'ingénieur :

On peut noter les 6 variables du tenseur des contraintes sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}_R = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

I.7.3 Description des déformations :

Comme dans le cas des contraintes, le champ de déformations au point M d'un solide est donc un tenseur d'ordre 2 symétriques notés $\varepsilon(M)$. Il y a donc 6 grandeurs représentant les déformations (3 translations et 3 rotations).

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}_R$$

Avec les composantes du tenseur des déformations se réduisent alors à :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

- Déformations principales :

Il existe un repère dans lequel $\varepsilon(M)$ est de forme :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}_{R_{pri}}$$

Les déformations dans ce repère sont les déformations principales. Elles correspondent aux Valeurs propres de la matrice $\varepsilon(M)$.

Notation pour l'ingénieur:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}_R = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{11} \\ \gamma_{23} = 2\varepsilon_{23} \\ \gamma_{13} = 2\varepsilon_{13} \\ \gamma_{12} = 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} = 2\varepsilon_{yz} \\ \gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz} \\ \gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

I.7.4 Equations de compatibilité :

Les équations traduisent qu'il existe un lien entre déplacements et déformations, et Entre les déformations elles-mêmes.

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{ii}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{jj}}{\partial x_i^2} = 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad i \neq j$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{ii}}{\partial x_j \partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\frac{\partial \epsilon_{jk}}{\partial x_i} + \frac{\partial \epsilon_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x_k} \right) \quad i \neq j \neq k$$

Les équations constituent les six relations de compatibilité.

I.7.5 Relation contrainte – déformation :

I.7.5.1 Matrice de rigidité :

La relation d'élasticité peut s'écrire sous forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

Ou sous forme condensée :

$$\sigma = c \epsilon$$

Cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, introduit la matrice de rigidité c ,

Symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général à l'aide de 21 coefficients indépendants, ici les 21 constantes de rigidité $ij c$.

I.7.5.2 Matrice de flexibilité :

La relation d'élasticité peut être écrite sous forme inverse, suivante :

$$\epsilon = s \sigma$$

En introduisant la matrice inverse de la matrice de rigidité. La matrice s est appelée matricide souplesse, et s'écrit dans le cas général :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Avec : $s = c^{-1}$

Les coefficients s_{ij} sont appelés constants de flexibilité ou constantes de souplesse.

I.7.5.3 Changement de base :

Soit c la matrice de rigidité exprimée dans une base :

$$(\vec{e}) = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3) \text{ et } c' = [c'_{ik}]$$

La matrice de rigidité exprimée dans la base :

$$(\vec{e}') = (\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$$

Ces matrices relient les contraintes et déformations exprimées dans les bases respectives :

$$\sigma = c\varepsilon$$

$$\sigma' = c'\varepsilon'$$

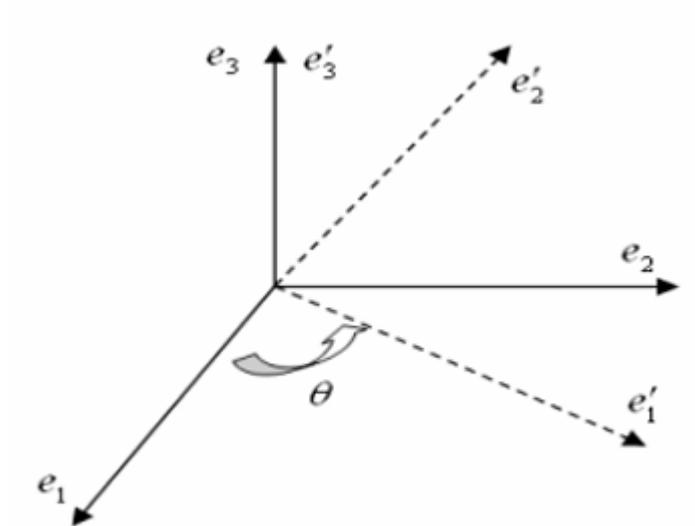


Figure II.24 : Changement de base

La matrice de changement de base pour une rotation d'angle θ de l'axe 3 s'écrit :

$$T = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 0 & 0 & 0 & sc \\ s^2 & c^2 & 0 & 0 & 0 & -sc \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & -s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s & c & 0 \\ -2sc & 2sc & 0 & 0 & 0 & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$

Avec : $s = \sin \theta$ et $c = \cos \theta$

Pour obtenir la relation de passage inverse, remplacer θ par $-\theta$.

La relation de changement de base (1.16), il vient :

$$\sigma' = T\sigma = Tc\varepsilon$$

$$\varepsilon' = T\varepsilon \Rightarrow \varepsilon = T^{-1}\varepsilon'$$

Donc :

$$\sigma' = TcT^{-1}\epsilon'$$

L'identification des expressions (1.15) et (1.19) conduite alors à la relation de changement de bases matrices de rigidité :

$$c = TcT^{-1}$$

Par un raisonnement analogue, on trouve de même la relation de changement de base des matrices souplesse :

$$s' = TsT^{-1}$$

I.7.6. Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites :

L'étude de la mise en œuvre des matériaux composites a montré l'importance des stratifiés et des matériaux sandwiches. L'architecture de ces matériaux nous permet maintenant de dégager les grandes lignes de l'étude de leur comportement mécanique. Cette étude comportera deux phases:

1. L'étude du comportement mécanique de chaque couche, parfois appelé comportement micromécanique ou microscopique du matériau composite. Cette étude est assez souvent désignée par microanalyse du matériau composite.
2. L'étude du comportement global du matériau constitué de plusieurs couches, et désigné généralement par comportement macroscopique du matériau composite ou comportement du stratifié.

Ces deux études étant effectuées, le comportement mécanique global d'une structure en composite sera ensuite analysé en adaptant les outils classiques du calcul des structures au comportement macroscopique des matériaux composites. L'analyse des structures simples (poutres et plaques) peut généralement être abordée par une méthode analytique, alors que l'étude de structures complexes nécessite l'utilisation de la méthode des éléments finis. [70]

Chapitre II :
Généralité sur les Tubes
PEHD

II.1. Matériaux polymères :

Une substance plastique se compose d'un mélange contenant une substance de base, pouvant être modelée ou ayant déjà subi un processus de moulage. Cette substance de base est généralement constituée d'un mélange de macromolécules ou de polymères organiques ou semi-organiques à caractère résineux, résultant souvent d'une réaction de polycondensation ou de polymérisation naturelle ou artificielle. [25]

Les matériaux synthétiques englobent les plastiques, également appelés plastomères, qui sont le plus souvent distribués sous forme de produits moulés, ainsi que les fibres textiles dérivées de polymères et les élastomères, excluant le caoutchouc naturel. Les matières plastiques elles-mêmes comprennent les polymères, composés d'un grand nombre d'unités de base appelées monomères. Ces monomères sont des molécules organiques dont le noyau est principalement constitué de carbone (ou de silicium dans le cas des polymères siliconés). Les polymères se distinguent en polymères d'origine naturelle, tels que le latex, le bois ou le coton, et en polymères obtenus par synthèse organique à partir de matières premières telles que le charbon ou les hydrocarbures gazeux. Les polymères, qui sont des substances organiques macromoléculaires, sont formés par l'assemblage des monomères de base, processus connu sous le nom de polymérisation. [26]

II.2. Processus d'élaboration des polymères :

À l'heure actuelle, les matières plastiques sont principalement fabriquées à partir de la pétrochimie, suivant généralement le cycle décrit ci-dessous.

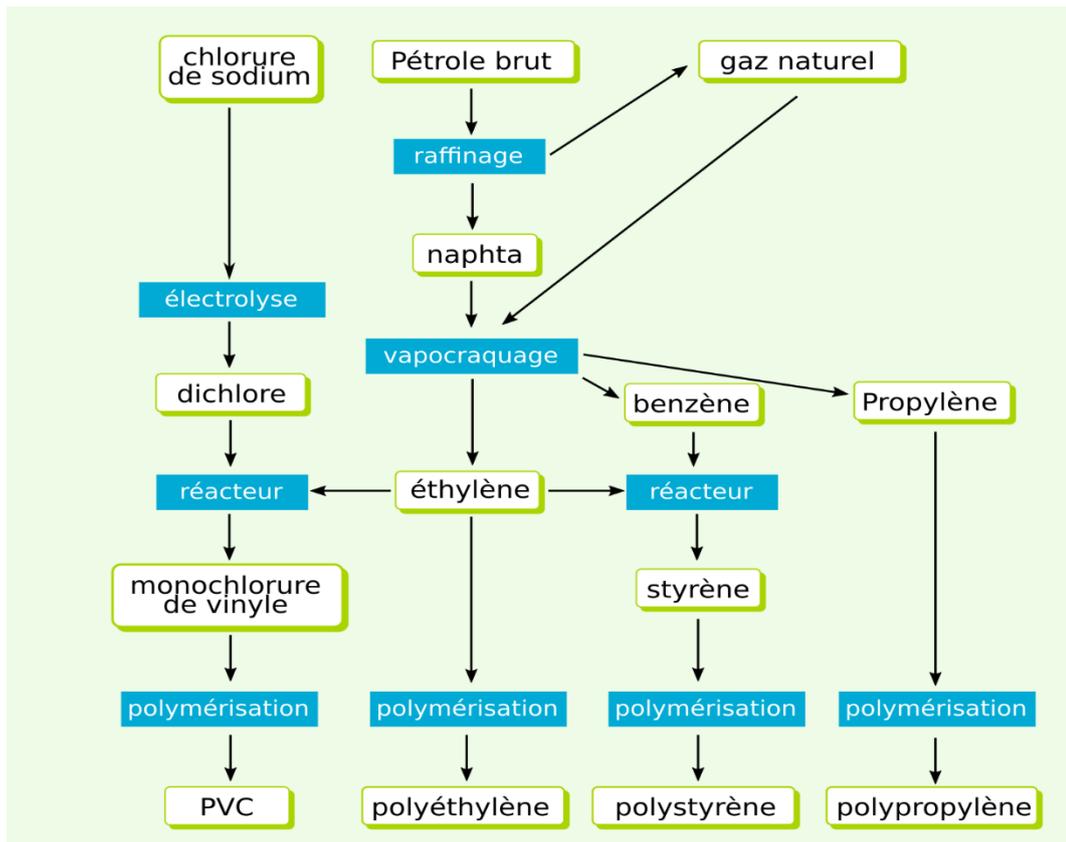


Figure II.1: des étapes de la fabrication des polymères

II.3.LA POLYMERISATION :

La polymérisation désigne le processus chimique permettant d'agencer les divers monomères ensemble à travers des liaisons covalentes (partage d'électrons entre les atomes constitutifs de la molécule) et de convertir les matières premières liquides ou gazeuses en plastomères.

Deux principaux types de polymérisation sont distingués : la polymérisation par étapes et la polymérisation en chaîne. [26]

II.4.Classification des polymères :

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

II.4.1.Selon leur nature chimique :

On distingue :

- a) Polymères minéraux.
- b) Polymères organiques.
- c) Polymères mixtes. [28]

II.4.2.Selon leur origine :

Ces substances peuvent être catégorisées en trois groupes distincts : les polymères naturels, les polymères artificiels et les polymères synthétiques.

- a) **Les polymères naturels** : (protéines fibreuses, cheveux, laine, soie, coton, cellulose...).
- b) **Les polymères artificiels** : polymères naturels ayant subi des modifications chimiques. Exemple : la cellulose sur laquelle les fonctions OH sont remplacées par des fonctions éther ou ester.
- c) **Les polymères synthétiques** : obtenus par des réactions de polymérisation. [29]

II.4.3.Selon leur structure moléculaire :

-Les structures moléculaires peuvent présenter deux configurations principales : linéaire et dense, ce qui confère au produit une rigidité spécifique, ou ramifiée, moins dense et plus souple ;

Les réseaux tridimensionnels représentent essentiellement des chaînes réticulées par pontages, ce qui renforce la stabilité de la structure face aux variations de température. Deux classes distinctes de polymères existent : les polymères amorphes et les polymères cristallins, chacun conférant des caractéristiques uniques voir tableau . [30]

Polymère	Caractéristiques	Molécule	Classe
PS SAN ABS PMM PC PPO PSU PPS PVC	-Faible retrait, stabilité dimensionnelle, tenue au fluage et au choc -Résistance mécanique fonction de T° -Difficile à étirer (peu de fibre ou de film) -Plage de ramollissement, grande fluidité -Cycle rapide	Inorganisées : chaînes très ramifiées, désordonnées ou pelotes	Amorphe
HDPE PP PET PBT PA POM PFE	-Tenue chimique (HDC et solvants) -Résistance à la fatigue dynamique -Bonne propriétés d'écoulement (fibre, film) -Point de fusion franc -Faible coefficient de friction - Moindre déformation sous température	Organisées : alignées, ordonnées, symétriques	Cristalline

Tableau II.1: Caractéristiques des polymères selon l'organisation de la molécule

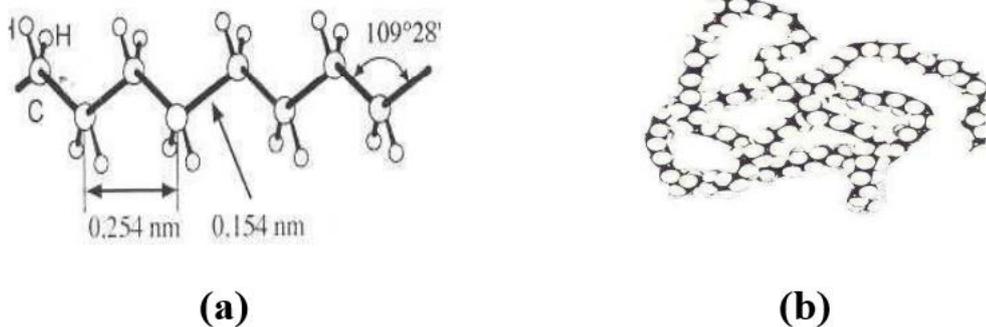


Figure II.22: Structure macromoléculaire du polyéthylène linéaire (PE-HD) a) Schéma de la structure d'une chaîne et disposition spatiale des atomes, b) modèle d'un segment macromoléculaire

II.4.4.Selon leur Point de vue de la structure physique :

II.4.4.1.Polymère amorphe :

Dans les polymères amorphes, les macromolécules adoptent une structure appelée "pelote statistique" aussi bien lorsqu'elles sont dans un état liquide que lorsqu'elles sont refroidies jusqu'à un état vitreux. Peu importe si le matériau est liquide, vitreux ou si les macromolécules sont dissoutes dans un solvant chimiquement inerte, la taille des pelotes reste presque identique. Dans cette conformation de type pelote, la masse

volumique d'une macromolécule individuelle est d'environ un centième de celle du polymère à l'état solide.

II.4.4.2. Polymères Semi –Cristallins :

Les régions amorphes des thermoplastiques semi-cristallins sont constituées de chaînes polymériques en boucles qui s'insinuent dans les cristallites, ainsi que de chaînes qui traversent plusieurs cristallites, avec des extrémités de chaînes libres. Dans ces zones amorphes, l'enthalpie et l'entropie sont considérablement plus élevées que dans les zones cristallines. Ces propriétés dépendent toutes deux de la température, mais leur variation est distincte. Ainsi, l'adoption par un polymère susceptible de cristalliser de l'état correspondant à la plus basse enthalpie libre est conditionnée par la température.

La cristallinité partielle d'un polymère semi-cristallin peut être décrite comme la coexistence de régions amorphes et cristallines, tel qu'illustré dans la Figure II.2 (a). La microstructure des polymères semi-cristallins est représentée dans la Figure II.2 (b). [31]

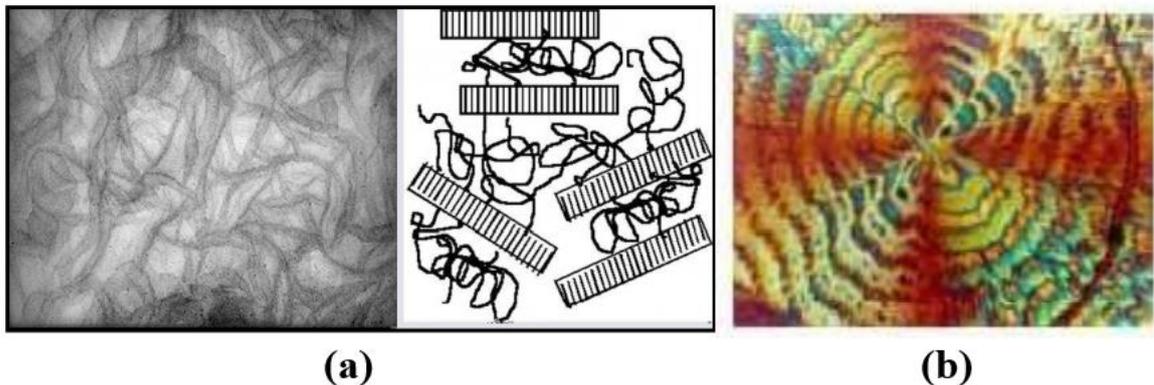


Figure II.2: a) Aspect microscopique du polyéthylène avec juxtaposition de lamelles cristallines et de régions amorphes (filaments), b) Sphéroïde, microstructure des polymères semi-cristallins

II.4.5. Selon leur comportement thermique :

Lorsque chauffé, un corps macromoléculaire à structure linéaire devient mou. En revanche, il conserve sa forme lorsqu'il est refroidi, et cette opération demeure réversible. Par conséquent, le matériau est classé comme thermoplastique ou plastomère. Pour transformer un tel produit, il faut le chauffer et le mettre en forme dans un moule froid pour le fixer, et les déchets produits peuvent être récupérés en raison de la réversibilité du processus. En revanche, si la température d'un corps macromoléculaire, présentant une structure en réseau tridimensionnel, est élevée, il se

fixe de manière irréversible dans sa forme chauffée, car la chaleur rigidifie les liaisons du réseau. Ce matériau est qualifié de thermodurcissable ou de dure-mère. La mise en œuvre se fait dans un moule chauffé, et les rebuts éventuels sont perdus en raison de l'irréversibilité du processus. Les chaînes courtes facilitent la transformation tandis que les chaînes longues améliorent les propriétés mécaniques. [31]

II.4.5.1. Les thermoplastiques :

Un thermoplastique se réfère à un polymère linéaire ou ramifié qui peut être rendu mou par chauffage et durci par refroidissement dans une plage de température définie. Ces polymères, qu'ils soient amorphes ou semi-cristallins, peuvent cristalliser. Des exemples incluent le polyéthylène (PE), le poly (chlorure de vinyle) (PVC) et le polystyrène (PS). Ils sont façonnés à l'aide de diverses techniques telles que l'injection, l'injection-soufflage et l'extrusion. [32]

II.4.5.2. Les thermodurcissables :

Les thermodurcissables, en raison de leur structure, sont généralement rigides, contrairement aux thermoplastiques. Ils conservent leur stabilité même à des températures relativement élevées et résistent généralement bien aux environnements agressifs. Contrairement aux thermoplastiques, ils ne fondent pas, car même si les liaisons physiques peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur, les liaisons chimiques restent intactes, empêchant ainsi le glissement des chaînes polymériques les unes par rapport aux autres.

II.4.5.3. Les élastomères :

Les élastomères sont des polymères dont les propriétés sont intimement liées à leur composition chimique et à la distribution aléatoire des chaînes moléculaires. Ils se caractérisent par de faibles forces d'attraction entre les chaînes et des modules d'élasticité relativement bas à température ambiante, ainsi que par leur capacité élevée à se déformer. Le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques font partie de cette catégorie, qui semble constituer une classe distincte de matériaux polymères. [26,31,33]

II.5.LES DIFFÉRENTS TYPES DE PLASTIQUES :

Diverses catégories de plastiques sont identifiées, totalisant sept grandes familles selon la classification élaborée par la Société de l'Industrie Plastique dans les années 80. Cependant, malgré la clarté qu'offre cette classification pour comprendre la diversité des plastiques, elle demeure largement méconnue en dehors des spécialistes du recyclage. Voici un éclaircissement sur le sujet :

- Le polyéthylène téréphtalate (PET)
- Le polyéthylène haute densité (PEHD)
- Le polychlorure de vinyle (PVC)
- Le polyéthylène basse densité (LDPE)
- Le polypropylène (PP)
- Le polystyrène (PS)
- Les autres. [27]

II.6.Polyéthylène :

Le polymère semi-cristallin principalement employé dans la production des tubes est le polyéthylène à moyenne et haute densité (PEMD et HDPE). Sa cristallinité varie généralement entre 40 et 80% [34], Le tableau suivant illustre les diverses désignations en lien avec la résistance minimale aux contraintes circonférentielles (MSC) à 20°C sur une période de 50 ans, tel que spécifié dans la Norme ISO 4437.

Désignation	CCM (MPa)
PE 32	3,2
PE 40	4
PE 63	6,3
PE 80	8
PE100	10

II.6.1.Types de polyéthylène :

En fonction des méthodes de polymérisation de l'éthylène, on peut distinguer deux types de polyéthylène :

Les procédés à haute pression : fournissant le polyéthylène à basse densité (PEBD)

Les procédés à basse pression : fournissant un polymère légèrement plus dense, le polyéthylène à haute densité (PEHD). [35]

Généralité sur les Tubes PEHD

Les caractéristiques les plus significatives de ces types sont résumées dans le tableau.

Propriétés	PEBD	PEHD
Masse volumique (g/cm^3)	0.91–0.94	0.95–0.98
Module de Young (20°C , 100s) (GPa)	0.15–0.24	0.55–1.00
Résistance à la traction (MPa)	7-17	20-30
Ténacité (20°C) ($\text{MPa m}^{1/2}$)	1-2	2-5
Température de transition vitreuse T_g ($^\circ\text{K}$)	270	300
Température de ramollissement T_s ($^\circ\text{K}$)	355	390
Chaleur massique ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2250	2100
Conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.35	0.52
Coefficient de dilatation thermique (M K^{-1})	160-190	150-300

Tableau II.3: Propriétés mécaniques et thermiques des polyéthylènes

II.7.POLYÉTHYLÈNE (PEHD/HDPE) :

Le HDPE (polyéthylène haute densité) est un membre de la famille des polyéthylènes. Ce terme désigne la structure moléculaire de ce thermoplastique largement utilisé dans diverses industries, notamment dans la production d'articles alimentaires comme le SANALITE, utilisé pour fabriquer des planches à découper. [36]

II.7.1.Mise en œuvre du PE :

Pendant le processus de mise en œuvre, le polymère est combiné avec divers additifs tels que des stabilisants, des lubrifiants, des plastifiants et des charges pour élaborer une formulation, souvent sous forme de poudre ou de granulés. Cette formulation est ensuite fondue, soit par conduction thermique à partir des parois de l'outil de formage pour les polymères semi-cristallins, soit par plastification pour les polymères amorphes, avec une contribution de l'énergie mécanique. La matière thermoplastique hautement visqueuse est ensuite introduite dans un moule pour lui donner une première forme, telle qu'un tube ou un film. Elle est ensuite mise en forme, refroidie, et dans certains cas étirée ou bi-étirée pour obtenir le produit final. La structure cristalline du polymère et l'orientation de la phase amorphe dépendent des paramètres d'étirage et de refroidissement lors de ce processus de mise en forme. En raison de leur faible conductivité thermique et de leur viscosité élevée, les polymères ne peuvent pas être traités de la même manière que les matériaux traditionnels.[33]

II.7.2. Propriétés Du Polyéthylène À Haute Densité PEHD :

II.7.2.1. Propriétés mécaniques :

À 23°C au-dessus de leur température de transition vitreuse, ces matériaux partiellement cristallins présentent une phase amorphe qui se comporte de manière caoutchouteuse, ce qui les rend sensibles à l'eau et influe sur leurs propriétés mécaniques. Cette sensibilité est d'autant plus réduite que la proportion de la phase amorphe est moindre, ce qui rend le matériau plus cristallin. On observe que le PEBD est plus sujet au fluage à température ambiante que le PEHD, ce dernier étant plus cristallin et donc moins soumis à cet effet, ce qui lui permet d'être utilisé pour des gaines de tuyaux souples à température ambiante. Par ailleurs, le module d'élasticité du PEHD est supérieur à celui du PEBD, bien que son allongement à la rupture soit inférieur. Le poids moléculaire exerce également une forte influence sur les propriétés mécaniques. L'orientation des macromolécules joue un rôle crucial dans le comportement mécanique du polyéthylène. Lorsque ces macromolécules sont alignées dans la direction de l'effort, les propriétés mécaniques sont améliorées, ce qui incite les fabricants à les orienter de cette manière. Cela peut être réalisé de deux manières :

- Le premier moyen consiste à orienter les macromolécules lors du processus de mise en forme en extrusion, pendant la phase de fusion. Cela conduit à une augmentation de la cristallinité. Cette orientation peut également être prévue lors de l'injection, en choisissant judicieusement le point d'injection, c'est-à-dire en contrôlant le mode d'alimentation et l'écoulement dans le moule.
- Le deuxième moyen consiste à effectuer un étirage mécanique de fils ou de bandelettes pour les rendre plus résistants. On peut les étirer dans deux directions (biaxiales), ce qui entraîne une orientation des macromolécules enchevêtrées dans la phase amorphe.

Les polyéthylènes refroidis rapidement (trempés), moins cristallins, seront moins sensibles aux chocs. Dans la plupart des essais de chocs, les éprouvettes ne se cassent pas. Cependant, pour ces polymères cristallins, il est important d'éviter les entailles qui pourraient diminuer leur résistance aux chocs, et il est recommandé de prévoir des congés arrondis au fond des rainures et des arêtes internes.

Le polyéthylène est un matériau très résistant à l'abrasion, ce qui lui confère d'excellentes propriétés de frottement, notamment lorsqu'il est sous forme injectée.

II.7.2.2. Propriétés physiques :

Le mode de polymérisation a un impact sur le taux de cristallisation. Les ramifications entravent l'organisation des macromolécules, car leur augmentation réduit la cristallinité du polyéthylène. Les polyéthylènes ayant une apparence blanche et une texture cireuse deviennent opaques à grande épaisseur et transparents en film. Leur perméabilité aux hydrocarbures diminue à mesure que la cristallisation augmente, car le volume libre entre les macromolécules diminue, limitant ainsi la pénétration du diffusant.

II.7.2.3. Propriétés chimiques :

En général, les polyéthylènes présentent une bonne stabilité chimique et sont insolubles à des températures inférieures à 60°C. Ils résistent à l'action des acides, des bases et des solutions salines, ce qui les rend adaptés à une utilisation en vaisselle de laboratoire. Leur insolubilité, même sous forme de film, les rend appropriés pour des applications alimentaires telles que l'emballage et les bouteilles de lait. Cependant, ils sont sensibles aux fissures sous contrainte dans des milieux contenant du savon, de l'alcool et des détergents, ce qui les rend légèrement perméables aux solvants dans leur état naturel. En présence d'oxygène (air), ils peuvent être affectés par les ultraviolets, et pour les protéger de cela, on les charge généralement de 2 à 3% de poudre de carbone. Bien qu'ils soient inflammables, ils peuvent supporter des températures élevées allant jusqu'à 110 à 120°C s'ils ne sont pas chargés. Cependant, leur résistance diminue en présence de contraintes à haute température.

II.7.2.4. Propriétés électriques :

Ces polymères présentent d'excellentes propriétés d'isolation électrique, caractérisées par une rigidité diélectrique élevée, ce qui les rend idéaux pour être utilisés comme isolants dans les câbles et les fils électriques.

Leur constante diélectrique est de 2,3 à 60 Hz. [37]

II.7.3. Avantages et inconvénients du PEHD :

Avantages du PEHD :

Le PEHD/HDPE offre plusieurs avantages similaires à ceux de l'UHMW, comme une bonne résistance chimique et une résistance aux chocs élevée. De plus, il présente :

- Rigide ;
- Solidité ;
- Malléable ;
- Usable facile ;
- Résistant à l'abrasion ;
- Facile à souder ;
- Résistant à la corrosion ; [37,38]

Les Inconvénients du PEHD :

- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène ;
- Sensibilité à la fissure sous contrainte ;
- Mauvaise tenue à la chaleur ;
- Collage important ; [39]

II.8. Processus de fabrication des tubes en PE :

L'extrusion consiste à chauffer et plastifier des granulés de PE en les faisant passer à travers une trémie d'alimentation dans un cylindre chauffé, où ils sont fondus par la chaleur et poussés de manière continue par une vis d'Archimède vers la filière qui déterminera la forme finale du tube. L'ensemble composé de la trémie, du cylindre, de la vis et de la filière constitue l'extrudeuse.[40]

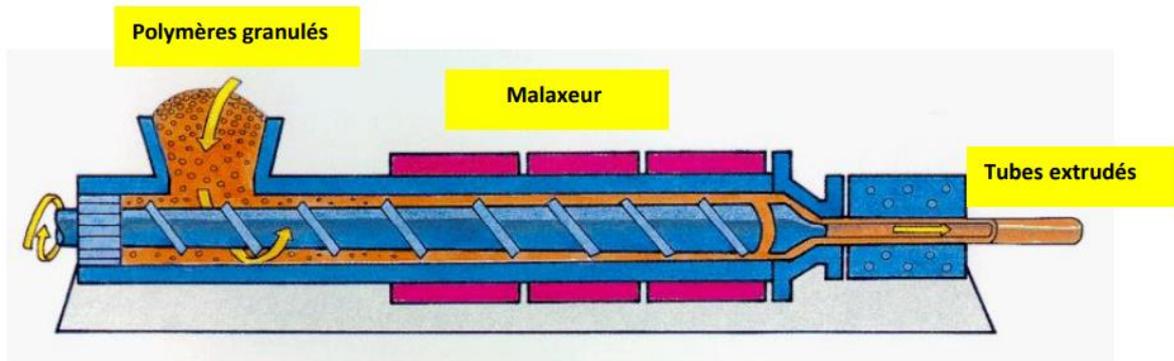


Figure II.3: Représentation d'une machine d'extrusion des tubes

Une fois sorti du moule, le tube subit un étirement isotherme à l'air libre, ce qui entraîne une orientation et une organisation des chaînes moléculaires le long de l'axe d'étirage. Ce changement dans la morphologie cristalline du PE conduit à des propriétés mécaniques différentes selon la direction d'extrusion et la direction verticale, avec une amélioration plus prononcée dans la direction d'étirage.[41]

Le tube est ensuite refroidi en le faisant passer d'abord à travers une cuve d'étalonnage où son diamètre est ajusté à une dimension spécifique, puis dans une série de cuves d'eau pour un refroidissement supplémentaire. La brusque variation de température à laquelle le PE est soumis pendant la trempe entraîne la formation d'un gradient de température dans la paroi du tube. À la fin de la ligne d'extrusion, le tube est coupé à la

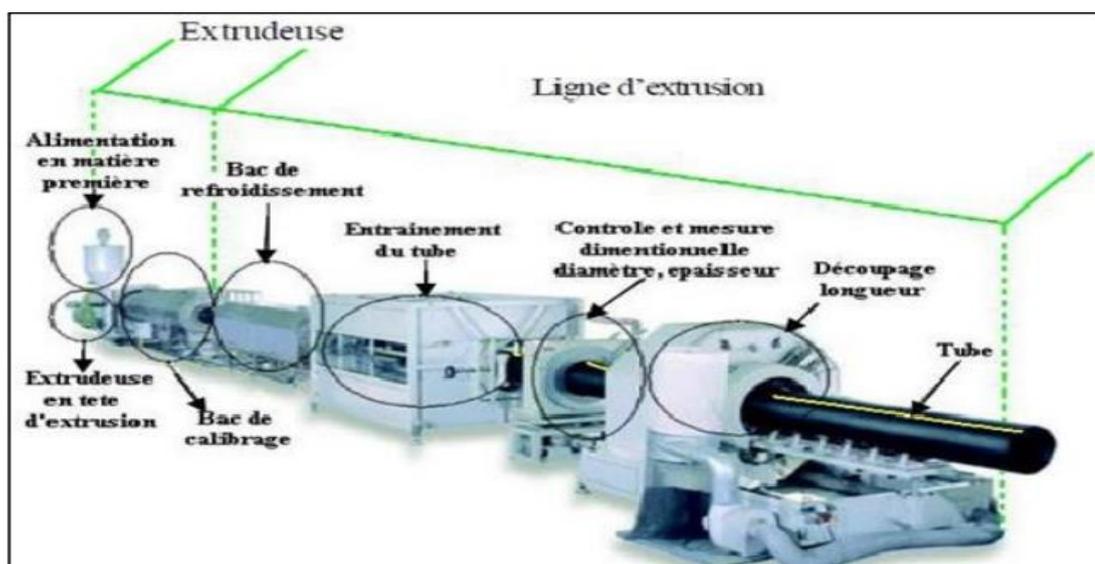


Figure II.4: Les différentes parties d'une ligne d'extrusion des tubes en PE

longueur désirée à l'aide d'une scie circulaire suiveuse.[42]

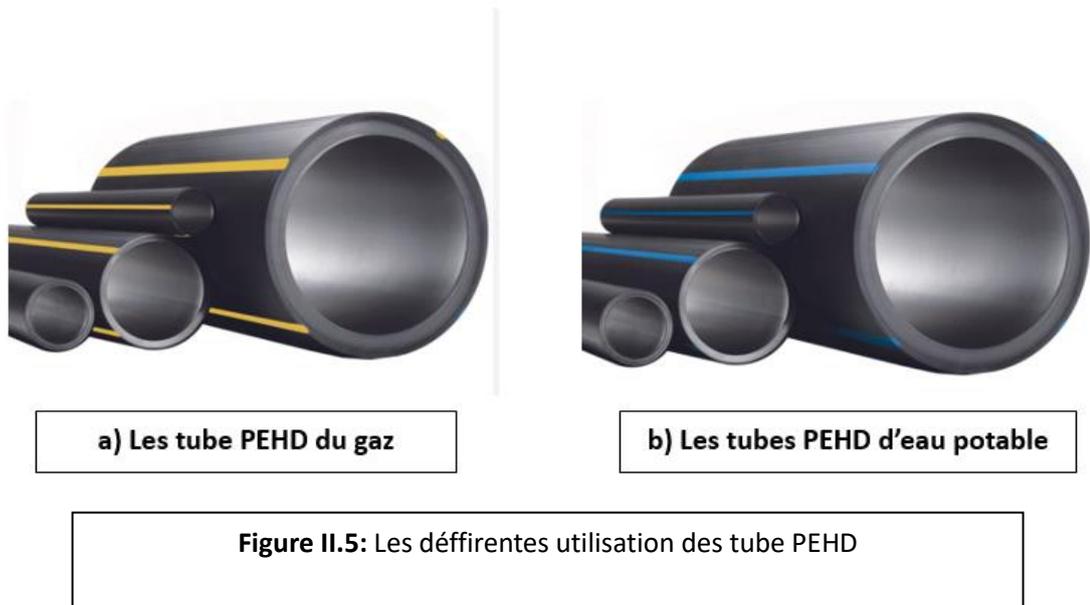
II.8.1.Application des plastiques en tuyauterie :

La progression dans le domaine du développement technologique des canalisations de gaz requiert des améliorations continues sur plusieurs fronts. Les chercheurs envisagent un avenir où les systèmes de gaz seront plus fiables et plus rentables que ceux actuels. Afin de réduire les coûts et d'optimiser l'efficacité de la détection des fuites de gaz naturel, le Gas Research Institute (GRI) a exploré l'utilisation de capteurs à distance et de techniques d'imagerie laser pour détecter les fuites, exploitant les propriétés spectrales infrarouges d'absorption du gaz naturel. Des prototypes de systèmes ont été élaborés et ont démontré leur efficacité. En ce qui concerne la surveillance des réseaux, diverses méthodes de détection ont été développées, notamment l'utilisation de satellites pour détecter les éventuels effondrements dangereux, ainsi que des dispositifs de surveillance de pression fournissant une méthode simple et rapide pour surveiller et enregistrer la pression, le temps et la température dans une section de canalisation. Pour la préparation en temps réel des conduites de gaz à l'intérieur des tuyaux, un système robotique automatisé est en cours de développement et peut être manipulé à distance, ce qui permet de gagner du temps et de garantir la sécurité des opérateurs.[43]

Le HDPE produit des articles avec une rigidité accrue. En mélangeant du LDPE, il est possible d'obtenir des tubes avec une rigidité intermédiaire entre celles des deux types de PE. Le mélange des granulés peut être réalisé dans différentes proportions et l'extrusion ne pose généralement pas de problèmes particuliers.[44]

L'extrusion des granulés est réalisée sur une extrudeuse à vis simple de 20 à 25 fois le diamètre de la vis. Le taux de compression est généralement compris entre 3 et 3,5, et la température d'extrusion varie de 200°C à l'entrée à 240°C à la filière. Les polyéthylènes de moyenne densité sont également utilisés dans des conditions similaires au HDPE. Les applications sont diverses et intéressantes, notamment :

- Conduites pour le transport de pétrole, de fioul, de gaz et d'eau salée ;
- Conduites pour le transport de pâtes cellulosiques ;
- Conduites de ventilation et de dépoussiérage ;
- Systèmes d'irrigation et de drainage dans l'agriculture ;
- Gaines de protection pour câbles téléphoniques.



II.8.2. Classification des tubes en PE :

Chaque tube en plastique est associé à une classification déterminant les propriétés fondamentales du matériau en fonction de sa résine. Conformément à la norme ASTM D-3350, ces tubes sont catégorisés en fonction de leur densité, de leur indice de fusion, de leur module de flexion, de leur résistance à la traction au seuil de l'écoulement plastique, de leur résistance à la fissuration sous contrainte, de leur résistance hydrostatique à 23°C, ainsi que de leurs stabilisateurs de pigments et de leur stabilité face aux rayons ultraviolets.

L'essai hydrostatique de design (HDB) constitue une évaluation cruciale de la propriété la plus significative. Il offre des informations sur les caractéristiques à long terme du matériau. Selon les normes ISO, le polyéthylène est caractérisé par la MRS (Minimum Required Strength), qui représente la résistance minimale que le polyéthylène doit maintenir après 50 ans de service.[45]

II.8.3. Propriétés du tube en PE :

Le développement du polyéthylène (PE) est attribuable à l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques, telles que sa résistance à la pression hydrostatique à long terme (MRS), sa résistance à la croissance lente des fissures (SCG) et sa résistance à la propagation rapide des fissures (RCP). Ces attributs sont largement conditionnés par des

facteurs tels que le type de co-monomère utilisé, la densité, le poids moléculaire et la distribution de ce poids moléculaire. Un meilleur contrôle de ces paramètres permet d'optimiser les propriétés du matériau.

Une densité accrue, aussi synonyme d'un taux de cristallinité élevé, contribue à une rigidité accrue, assurant ainsi une résistance ductile satisfaisante face à la rupture sous pression interne. D'autre part, un poids moléculaire élevé est gage d'une meilleure ténacité. Ces deux variables permettent au tube de maintenir son intégrité face à des pressions plus élevées.

Toutefois, une ramification étendue et une distribution de poids moléculaire à double pic augmentent l'enchevêtrement et la densité de molécules de liaison dans la section amorphe, favorisant ainsi une liaison renforcée entre les lamelles cristallines. Par conséquent, cela conduit à une résistance accrue contre la rupture induite par les phénomènes de fissuration sous contrainte.

Les progrès dans les propriétés du polyéthylène (PE) d'une génération à l'autre sont largement documentés, comme illustré dans la figure (II.6), ce qui a conduit à une augmentation significative de la durabilité des tubes, pouvant atteindre jusqu'à 100 ans. [46,47,48,49,50,51]

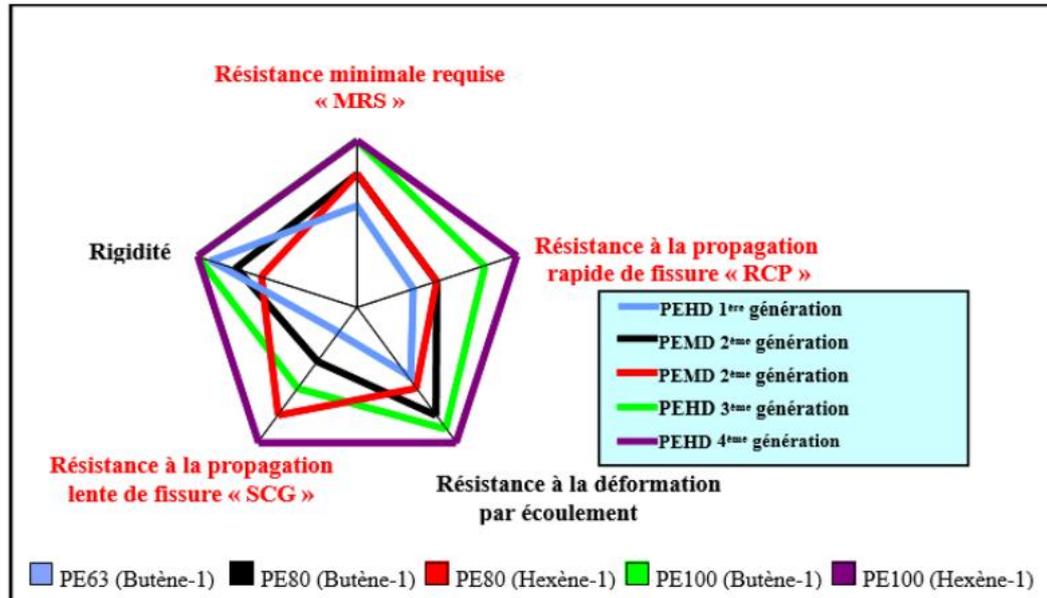


Figure II.6: Représentation schématique du développement des propriétés du tube en PE

II.8.4. Marquages normalisés :

Un tube de qualité présente les éléments suivants :

- L'identification de l'usine, de la marque ou d'un symbole permettant d'identifier le fabricant.
- Les dimensions nominales : diamètre extérieur, épaisseur de paroi et pression applicables, comme illustré dans la figure (II.7).
- La matière plastique utilisée et l'application spécifique, par exemple : PE80 - eau potable.
- La date de fabrication, indiquant l'année et la semaine de production. La désignation est composée d'une série d'informations.[52]

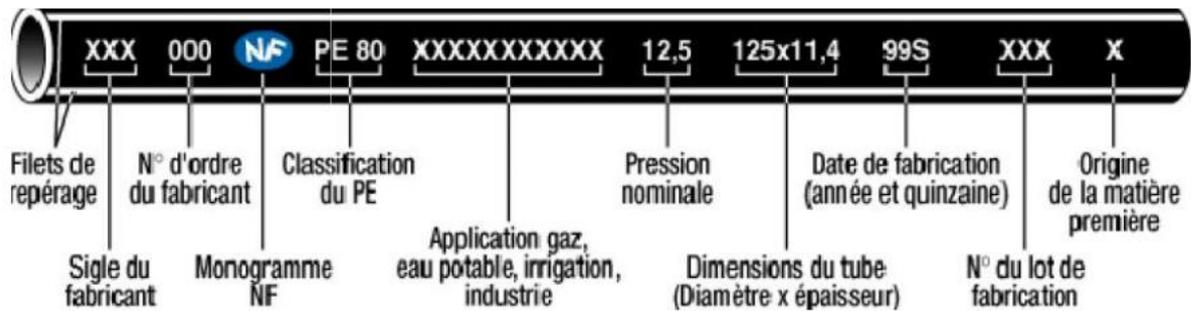


Figure II.7: différentes informations pour la désignation d'un tube

II.9. Comportement mécanique du polyéthylène :

Parmi les divers essais mécaniques, l'essai de traction est sans doute celui le plus largement employé. Il permet de caractériser les matériaux de manière indépendante de la forme de l'objet testé. Les éprouvettes utilisées peuvent être fabriquées par moulage, découpe ou usinage à partir de plaques ou d'objets finis comme les tubes, et elles possèdent des géométries précisément définies.

La courbe de contrainte-déformation représente, pour de faibles allongements, un comportement linéaire élastique sur environ 1% de déformation, caractérisé par une déformation instantanée et réversible. À ce stade, la déformation du polymère résulte principalement de l'étirement des liaisons atomiques et de la distorsion des angles de valence. Lorsque les déformations augmentent légèrement, le matériau entre dans une phase viscoélastique, où la déformation reste réversible mais est influencée par les éléments microstructuraux qui s'opposent à la sollicitation (la récupération de la déformation se produit avec un certain retard). Au-delà du seuil d'écoulement, la déformation devient plastique, et le polymère s'étire, les macromolécules se déplient ou se désentrelacent de l'enchevêtrement amorphe, s'allongeant et s'alignant. Le matériau étiré devient plus rigide dans la direction de l'étirement qu'auparavant. Juste avant la rupture, alors que l'étirement est achevé, la déformation redevient homogène grâce à un durcissement structural induit par l'augmentation de la fraction fibrillaire du matériau et l'orientation des chaînes macromoléculaires dans le sens de l'étirement.

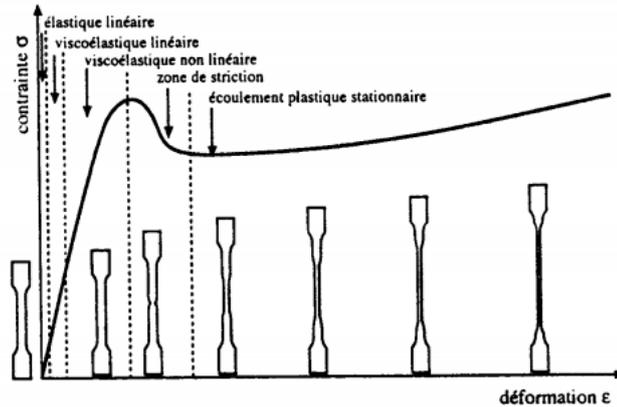


Figure II.8: Courbe de comportement contrainte-déformation lors d'un essai de traction

En général, la modélisation du comportement des polymères demeure complexe en raison de leur nature multifactorielle. Les propriétés mécaniques du polyéthylène haute densité sont particulièrement sensibles à diverses influences externes telles que la température, le type de sollicitation, la vitesse de déformation, les radiations UV et les agents chimiques, comme illustré dans la Figure (II.8). Cette figure met en évidence l'impact de la température et de la vitesse d'essai sur les phénomènes de durcissement plastique et la limite élastique. Ces paramètres tendent à diminuer avec l'augmentation de la température ou la réduction de la vitesse de déformation, comme indiqué dans la Figure (II.8).[53]

II.9.2. contrainte normale équivalente σ_e :

Les contraintes dans le tube sont la contrainte radiale σ_r , la contrainte circonférentielle σ_θ et la contrainte de traction σ_z . Ces contraintes s'expriment par les relations suivantes en fonction de la variable r .

$$\sigma_{rr} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_e^2}{r^2} \right) \quad (\text{II.1})$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_e^2}{r^2} \right) \quad (\text{II.2})$$

$$\sigma_{zz} = \frac{r_i^2 p_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (\text{II.3})$$

Pour le calcul des tubes, il est plus commode d'employer cette théorie en utilisant des coordonnées cylindriques, dont les composantes des efforts sont combinées en un seul effort efficace selon l'équation de la contrainte normale équivalente (Von Mises).

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2} \quad (\text{II.4})$$

II.9.3. Les déformations de cisaillements:

La déformation de cisaillement représente la variation d'angle entre deux directions orthogonales initialement perpendiculaires dans un matériau. En mécanique des solides, le tenseur de déformation est une manière compacte de représenter les déformations tridimensionnelles subies par un matériau. Ce tenseur est une matrice symétrique de rang 2 qui décrit les déformations normales et de cisaillement.

Le tenseur de déformation $\boldsymbol{\epsilon}$ peut être exprimé comme suit dans une base orthogonale :

$$[\boldsymbol{\epsilon}] = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 2\epsilon_{xy} & 2\epsilon_{xz} \\ 2\epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{zx} & 2\epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \epsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} \quad (\text{II.6})$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$$

II.9.4. Mécanismes d'endommagement du polyéthylène :

Pour analyser le comportement et les propriétés mécaniques d'un matériau, une compréhension détaillée des mécanismes de déformation et de dommages est essentielle. Dans les polymères semi-cristallins, les mécanismes de déformation plastique impliquent la phase amorphe, la phase cristalline et les sphérolites.

Les mécanismes de dommage se catégorisent en deux types : le premier implique la fragmentation des lamelles cristallines, tandis que le second concerne la formation et l'expansion de microcavités.

La déformation à grande échelle des polymères semi-cristallins entraîne souvent une transition de la structure sphérolite vers une structure fibreuse orientée, communément appelée transformation fibrillaire.

L'évolution de la structure lors de la déformation implique la présence des deux phases, amorphe et cristalline. Il est observé qu'une partie de la phase amorphe inter-lamellaire adopte un état caoutchouteux. Ainsi, à de faibles déformations, la différence de rigidité entre les phases conduit à une contrainte rapide et conséquente de la phase amorphe inter-lamellaire. Son rôle mécanique consiste principalement à transmettre la contrainte d'une cristallite à une autre via des molécules liantes. Cette phase se déforme principalement selon deux modes.

- **Glissement inter-lamellaire et la séparation inter-lamellaire :**

Le glissement inter-lamellaire se réfère au mouvement parallèle de deux lamelles cristallines l'une par rapport à l'autre sous l'effet d'une contrainte de cisaillement, comme illustré dans la Figure II.9b. La séparation inter-lamellaire se manifeste par l'augmentation de la distance entre deux lamelles lorsque soumises à une contrainte appliquée perpendiculairement à leur plus grande surface, comme indiqué dans la Figure II.9c. Cette déformation entraîne une diminution de la densité de la phase amorphe et la formation de microcavités. Ces deux mécanismes ne concernent que la déformation de la phase amorphe.

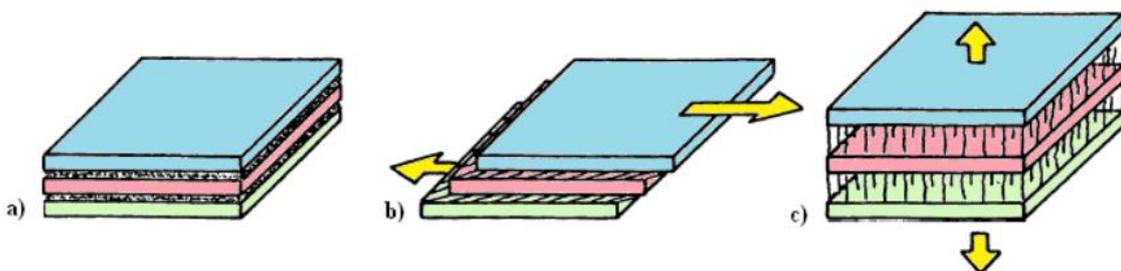


Figure II.9: Mécanismes de déformation inter-lamellaire, a) Etat non déformé, b) Glissement inter-lamellaire et c) Séparation inter-lamellaire.

Dans le cas du HDPE soumis à de faibles déformations, le glissement inter-lamellaire prédomine en tant que mécanisme principal. La contrainte requise pour activer ce processus de séparation est relativement élevée en raison des faibles épaisseurs de la

couche amorphe. En traction, ce phénomène peut entraîner la formation de cavités interlamellaires.

À des niveaux élevés de déformation, les polymères présentent un comportement distinctif. La microstructure initialement lamellaire se métamorphose en une microstructure fibrillaire : les lamelles se fragmentent en de petits blocs cristallins, connectés à la phase amorphe par des macromolécules étirées. Ce modèle, appelé modèle de Peterlin, postule que les cristaux de polymère, ou lamelles, sont constitués de chaînes repliées, unies par des molécules de liaison relativement peu nombreuses. Cette transformation fibrillaire induit une nouvelle structure sans lien direct avec l'orientation de la structure d'origine.

Addiego et ses collègues ont analysé la microstructure d'un échantillon de HDPE à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) pendant un essai de traction uniaxiale à température ambiante, comme illustré dans la Figure II.10. À une déformation vraie de $\epsilon=0.05$, les auteurs ont observé l'apparition de fissures dans les régions équatoriales des sphérolites. Par la suite, ils ont noté des ruptures intersphéroïdiques associées à une transformation microstructurale significative du matériau à $\epsilon=0.71$.

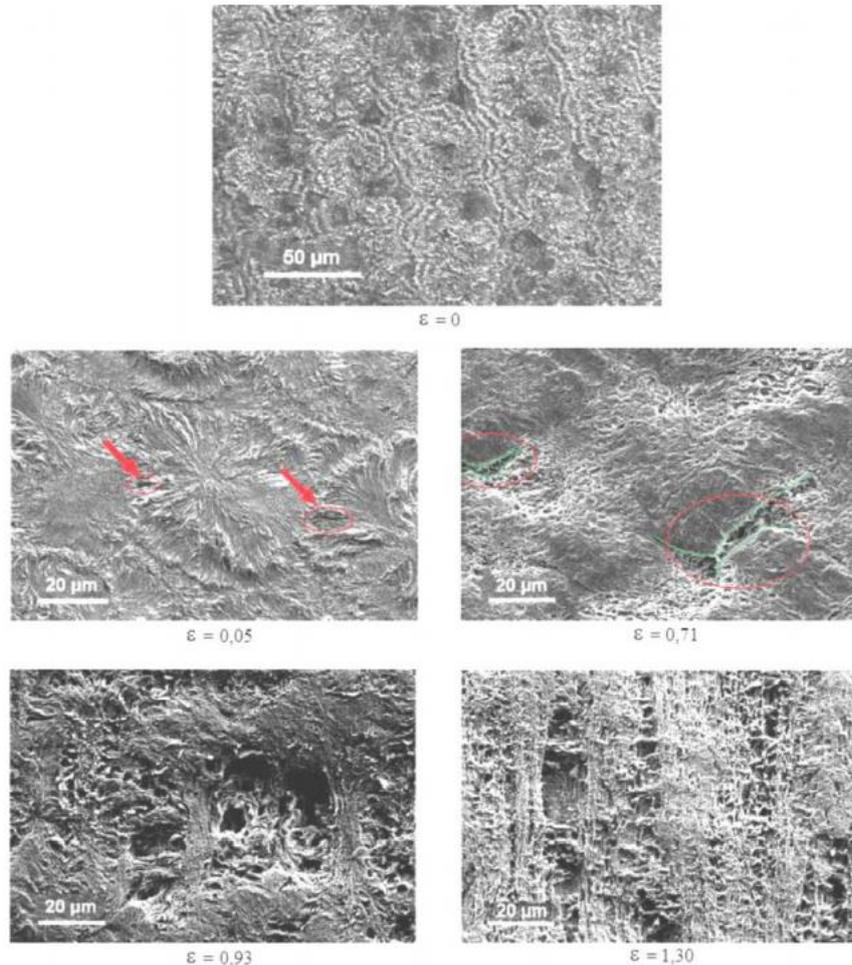


Figure II.10 : Echantillon de HDPE observé au MEB pour différents états de déformation

À une déformation de $\epsilon=0.93$, la structure sphéroïdique semble avoir été remplacée, permettant ainsi l'observation des micro-fibrilles d'une fissure orientées selon l'axe de traction, ainsi que des cavités se développant de part et d'autre, amorçant une anisotropie. L'extension des fibrilles et des cavités de la fissure le long de l'axe de traction devient nettement visible pour $\epsilon=1.30$. [54]

- **Détermination du comportement mécanique instantané :**

L'étude expérimentale du comportement instantané jusqu'à la rupture est généralement réalisée en appliquant une déformation à vitesse constante sur une éprouvette, pour divers types de sollicitations telles que la traction, la flexion, la compression ou le cisaillement, tout en enregistrant la courbe charge-déplacement. Ces quatre comportements peuvent être examinés avec le même équipement expérimental, seul le dispositif de fixation des éprouvettes étant ajusté en fonction de chaque cas. À des vitesses élevées, on qualifie ces essais de choc-traction ou de choc-flexion.

L'objectif des essais instantanés, à court terme, est de mesurer les modules (caractéristiques linéaires ou élastiques) ainsi que les allongements et les résistances correspondant au type de sollicitation (caractéristiques à la rupture). Ces données sont désormais couramment incluses dans les fiches techniques, les catalogues et les bases de données informatisées. Ces essais sont principalement utiles pour le contrôle qualité et la sélection préliminaire des matériaux. [54,55]

- **Détermination du comportement mécanique à long terme :**

Pour obtenir les caractéristiques essentielles nécessaires aux calculs prévisionnels du comportement en service, des essais à long terme sont de plus en plus développés. Ces essais visent à déterminer des caractéristiques de conception véritables telles que le module de fluage, la résistance à la fatigue statique ou dynamique, ainsi que la résistance à la fissuration sous contrainte dans différents environnements. Dans notre étude, la caractérisation des propriétés mécaniques a été réalisée principalement à l'aide de l'essai de traction. [56]

II.10. Modes de défaillance prédominante dans un tube en HDPE :

Les tuyaux en PE présentent trois zones caractéristiques dépendant du niveau de sollicitation mécanique. Dans la première zone, les contraintes appliquées élevées entraînent des déformations importantes dans la paroi, conduisant à une rupture ductile (avec de fortes déformations). Lorsque la charge est modérée, une transition vers une rupture fragile se manifeste, caractérisée par l'apparition de la fissuration lente des fissures (SCG) au niveau des défauts locaux. Enfin, à plus long terme, une nouvelle transition peut se produire, marquée par une dégradation chimique résultant de la fragmentation des chaînes polymériques.

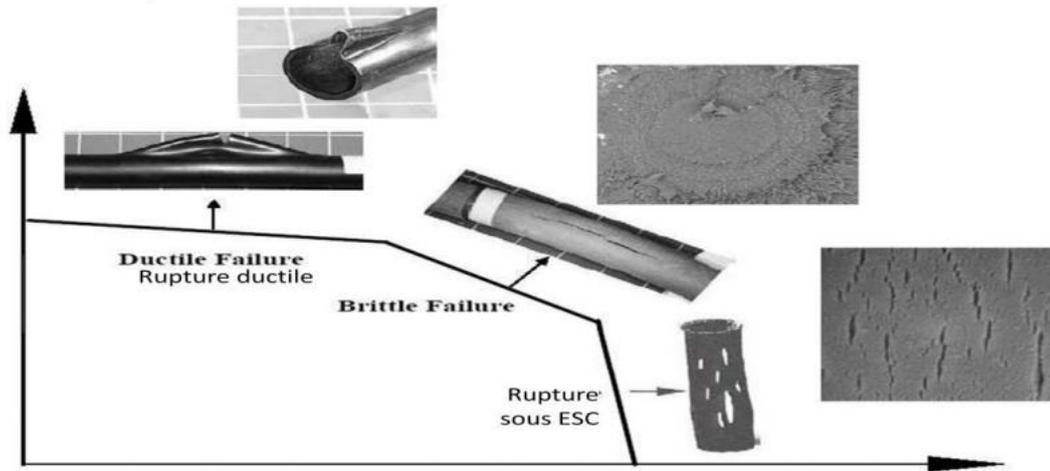


Figure II.11: Modes de défaillance prédominants dans un tube en HDPE

Les polymères présentent une gamme étendue de comportements mécaniques. Ils peuvent être fragiles à basse température, puis devenir plastiques, viscoplastiques, caoutchouteux et enfin visqueux. Avec l'augmentation de la température, qui se situe généralement entre -20°C et $+20^{\circ}\text{C}$, un polymère peut traverser tous ces états mécaniques. Son module et sa résistance à la traction peuvent varier d'un facteur supérieur à 10^3 . L'état mécanique d'un polymère est influencé par sa masse moléculaire et la température, en particulier la différence entre sa température et sa température de transition vitreuse (T_g).

La relation entre la contrainte et le temps de rupture est représentée de manière schématique dans la Figure (II.11), illustrant les trois principaux modes de défaillance observés dans un tube en HDPE (rupture ductile, fragile et due à la fissuration sous contrainte dans un environnement contrôlé : ESC). À proximité de la température ambiante, la courbe présente deux régions de rupture distinctes : la première, à contrainte élevée où la durée de vie est fortement influencée par la contrainte, correspond au domaine ductile. La seconde région représente le domaine fragile, pour lequel la durée de vie est beaucoup moins sensible à la contrainte.[30]

Les polymères peuvent exhiber divers types de dégradations géométriques, telles que des piqûres, des ondulations, des écailles, des éraflures, des dépressions, des dômes, des

rainures et des stries. Ces défauts peuvent entraîner des défaillances catastrophiques se terminant par des ruptures fragiles ou ductiles.[57]

II.10.1.Rupture ductile (Fig. Zone 1) :

Avant la rupture, ce sont les déformations plastiques étendues qui caractérisent les matériaux présentant une haute ténacité et des déformations à grande échelle. Les surfaces de fracture présentent des fibrilles de grande longueur (supérieure à 10 μm). Le comportement ductile est principalement observé chez les thermoplastiques tels que le PE et le PP. Sous des contraintes normales, la rupture survient par la formation de fissures associées à l'étirement des chaînes moléculaires dans la direction de la contrainte. Les micro-vides qui se forment pendant ce processus sont responsables du blanchiment des fibres.

II.10.2.Rupture fragile (Fig. Zone 2) :

La fragilisation se réfère à la tendance à se rompre sous une charge, une propriété qui est distincte de la résistance. Le comportement fragile se manifeste par une rupture qui absorbe très peu d'énergie et qui présente peu, voire pas du tout, de déformation plastique pendant sa propagation, donnant ainsi un aspect de rupture relativement lisse.

II.10.3.Long terme dégradation chimique (Fig. Zone 3) :

Ces matériaux se distinguent par leur capacité variable à se déformer en fonction de la configuration de leur arrangement macromoléculaire. Les thermoplastiques, constitués de longues chaînes indépendantes non liées entre elles, peuvent être étirés et orientés dans la direction de la contrainte appliquée. La nature amorphe ou semi-cristalline des polymères thermoplastiques dépend des conditions de production, de transformation et des sollicitations appliquées, telles que la température, le niveau et la vitesse de chargement. Les niveaux de déformation des chaînes macromoléculaires avant la rupture varieront en conséquence, entraînant des mécanismes de rupture plus ou moins ductiles. [43,58]

II.11.Vieillessement du PE :

Dans de nombreux domaines industriels, la maîtrise du vieillissement des matériaux polyéthylène est cruciale, car il peut constituer un obstacle majeur à leur utilisation. Le vieillissement des polyéthylènes n'est pas uniforme, mais plutôt multiple, pouvant être

causé par des facteurs physiques, chimiques, et souvent, ces divers mécanismes sont interdépendants ou induits les uns par les autres. La conception d'un produit en matériau polyéthylène doit donc tenir compte des effets du vieillissement sur ses fonctions primaires.[59]

II.12.Plusieurs travaux ont été faits par des auteurs dans le domaine du renforcement des pipes des différents matériaux. On cite comme exemple :

K. C. Lee et *al* ont examiné les propriétés de traction et de flexion des tubes en HDPE renforcés avec des composites en fibres de verre. Les résultats ont montré des améliorations significatives de la résistance mécanique et de la rigidité, rendant ces composites adaptés aux applications à haute pression [60]. A. I. Ismail et *al* ont concentrée sur l'incorporation de nanotubes de carbone (CNT) dans une matrice de HDPE. Les résultats ont indiqué une résistance à la traction et une résistance aux chocs améliorées, attribuant ces améliorations au transfert de contraintes efficace entre la matrice de HDPE et les CNT [61]. J. H. Zhang et *al* ont présenté la stabilité thermique et les propriétés mécaniques du HDPE renforcé avec des fibres de Kevlar. Le composite a montré une résistance thermique supérieure et des propriétés mécaniques améliorées, en particulier sous des conditions de chargement dynamique [62]. M. S. Zafar et *al* ont exploré les effets synergiques du renforcement hybride utilisant des fibres de basalte et de verre dans le HDPE. Les composites hybrides ont démontré des propriétés de traction, de flexion et d'impact améliorées par rapport au HDPE renforcé par une seule fibre [63]. D. P. Bajracharya et *al* ont concentrée sur l'utilisation de fibres naturelles, telles que le jute et le sisal, pour renforcer le HDPE. L'étude a révélé que le renforcement en fibres naturelles a conduit à une augmentation de la rigidité et de la résistance à la traction, bien que l'absorption d'humidité reste un défi [64]. F. R. Jones et *al* ont examiné l'impact de l'incorporation de nanoplaquettes de graphène dans le HDPE. Les composites ont montré des améliorations marquées de la résistance à la traction et du module, ainsi qu'une conductivité thermique améliorée [65]. H. M. Kim et *al* ont étudié les propriétés de fatigue des tubes en HDPE renforcés par des fibres de carbone. Les résultats ont montré des améliorations significatives de la durée de vie en fatigue et de la résistance à la propagation des fissures, les rendant adaptés aux applications de chargement cyclique [66]. L. F. Ross et *al* ont évalué les effets des traitements de surface sur les fibres naturelles avant de renforcer le HDPE. Les résultats ont suggéré

que les traitements chimiques ont amélioré l'adhésion fibre-matrice, entraînant de meilleures propriétés mécaniques des composites [67]. P. Q. Li et *al* ont analysé la performance mécanique et le comportement à l'absorption d'eau des composites en HDPE renforcés de fibres de bambou. Les résultats ont indiqué une augmentation de la résistance à la traction et du module, bien que l'absorption d'eau soit un facteur limitant [68]. G. B. Kim et *al* ont concentré sur les propriétés mécaniques dynamiques des composites en HDPE avec un renforcement par des nanoparticules de silice. Les composites ont démontré une amélioration du module de stockage et une réduction de l'amortissement, indiquant une meilleure performance sous des conditions de chargement dynamique [69].

Chapitre III :
Comportement mécanique d'un
tube en PEHD renforcé par
matériaux composites

III.1.Introduction :

La compréhension du comportement mécanique des tubes en polyéthylène haute densité (HDPE) renforcés par des matériaux composites tels que le carbon/époxy, le verre/époxy et le bore/époxy est essentielle pour améliorer leurs performances dans diverses applications en ingénierie. Des recherches antérieures, telles que celles de Smith et ses collègues (2018), ont montré que les renforts composites peuvent considérablement augmenter la résistance et la durabilité des tubes en HDPE sous des charges mécaniques élevées. De même, les travaux de Zhang et Li (2020) ont mis en avant l'utilité de la modélisation par éléments finis pour prévoir les comportements complexes de ces structures composites sous différentes conditions de charge. Ces études illustrent l'importance de la simulation numérique pour optimiser la conception et les performances des matériaux composites.

En s'inspirant de ces recherches, ce chapitre se concentre sur l'utilisation de l'analyse par éléments finis (AEF) pour étudier les tubes en HDPE renforcés à l'aide d'Abaqus, un logiciel puissant pour la modélisation et la simulation. Ce chapitre est organisé de manière à couvrir l'ensemble du processus de simulation, depuis les principes théoriques de l'AEF, en passant par le processus détaillé de maillage, jusqu'à une discussion approfondie des résultats et des graphiques associés.

	Module de Young [MPa]	Coefficient de Poisson
PEHD	1000	0.45

Tbleau .III.1: Propriétés de PEHD

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

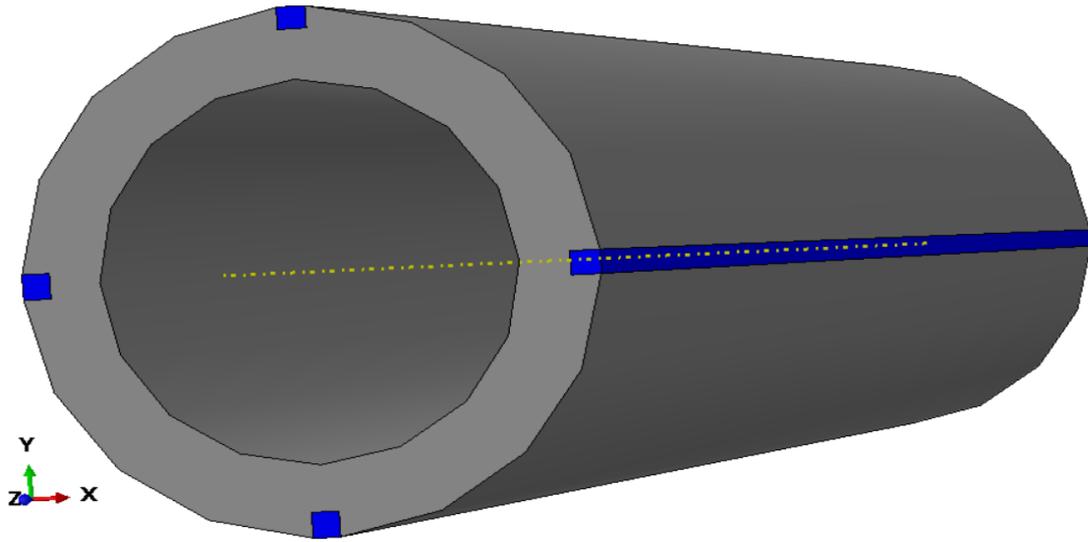
		Carbon/époxy	Verre/époxy	Boron/époxy
Module de Young [GPa]	E11	121	45	200
	E22	8.6	10	19.6
	E33	8.6	10	19.6
Module de cisaillement [GPa]	G12	4.7	5	7.2
	G13	4.7	5	5.5
	G23	3.1	3.8462	5.5
Coefficient de Poisson	ν_{12}	0.27	0.3	0.3
	ν_{13}	0.27	0.3	0.28
	ν_{23}	0.4	0.4	0.28

Tableau III.2: Propriétés des matériaux de renforcement

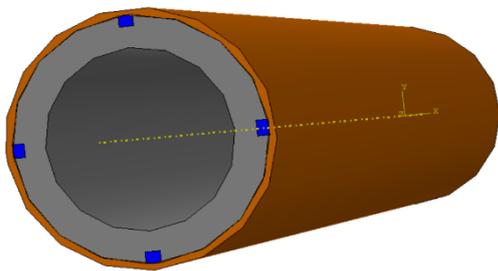
III.2.Modèle géométrique :

Notre modèle géométrique est un tube PEHD renforcé par un tube en matériaux composites en trois positions (externe, milieu et interne), et de dimensions :

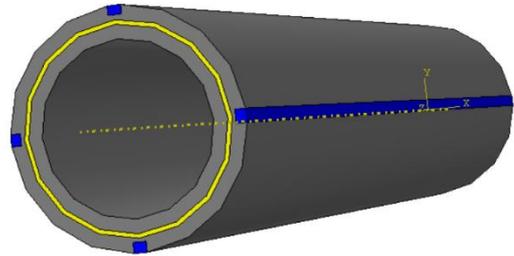
Longueur de $L = 1200$ mm, diamètre de $D_{\text{ext}} = 110$ mm, $D_{\text{int}} = 79.8$ mm et d'épaisseur de $t = 15.1$ mm. Le tube de renforcement en matériaux composite de dimension : longueur de $L = 1200$ mm, de diamètres variables et d'épaisseur de $t = 1$ mm.



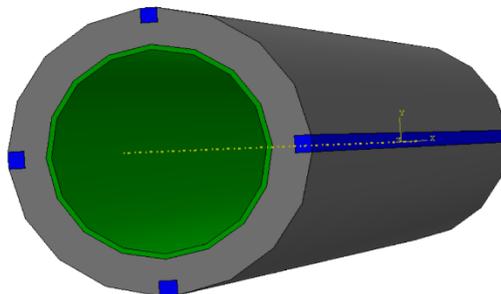
a) Tube PEHD



b) Tube PEHD renforcé **extérieurement**



c) Tube PEHD renforcé au **milieu**



d) Tube PEHD renforcé **intérieurement**

Figure III.1: Modele géometrique

III.3. Maillage :

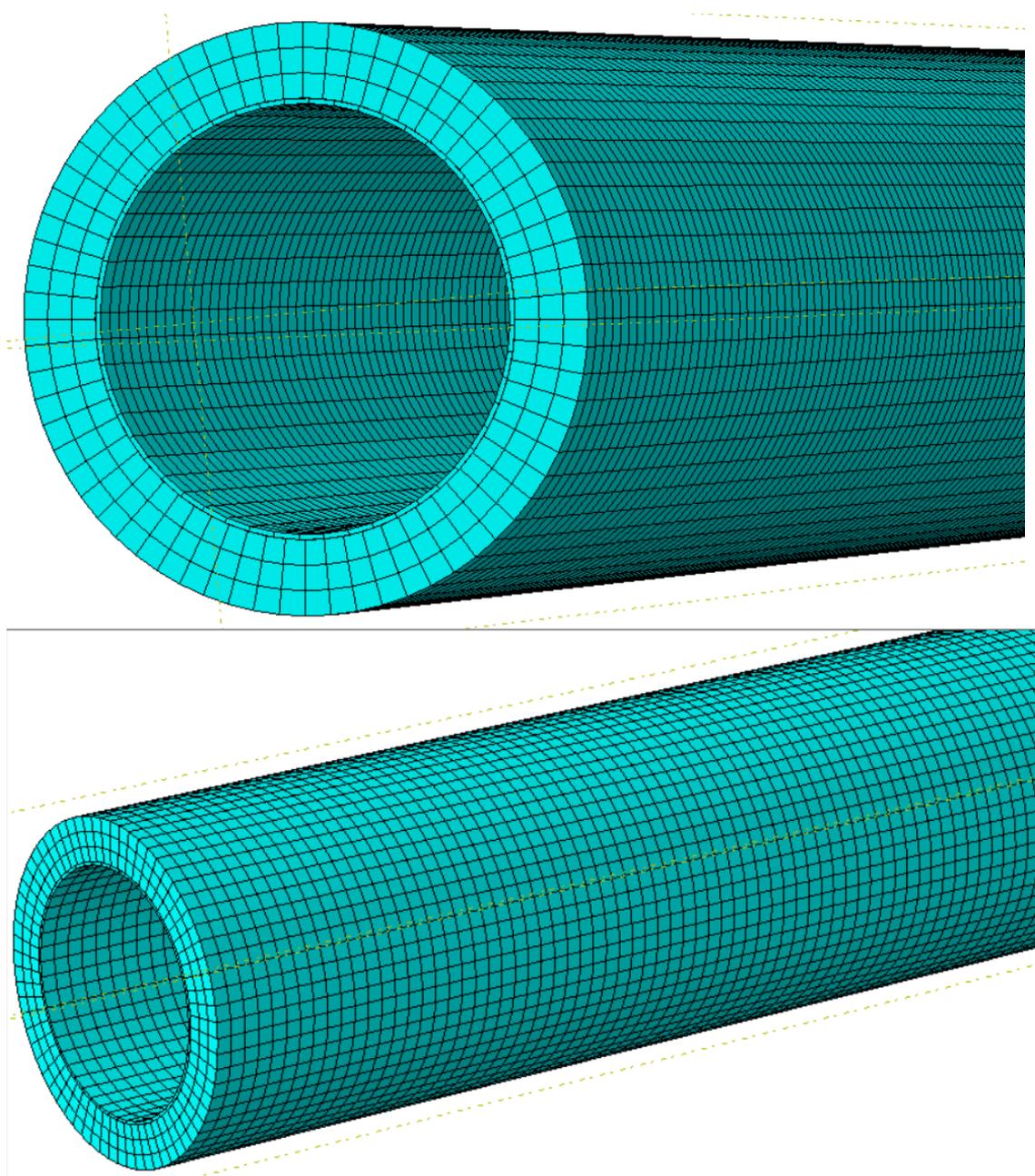


Figure III.2 : Maillage

III.3.1.Principes théoriques de l'analyse par éléments finis :

L'analyse par éléments finis (AEF) est une méthode de calcul permettant de prédire le comportement des matériaux et des structures sous diverses conditions. En subdivisant une structure complexe en éléments finis plus petits et plus gérables, l'AEF permet de calculer précisément les contraintes, les déformations et d'autres paramètres essentiels. Cette section offrira un aperçu des concepts fondamentaux de l'AEF, y compris la formulation du problème, le choix des éléments appropriés, et l'importance des conditions aux limites et des propriétés des matériaux dans le processus de simulation.

III.3.2.Configuration de la simulation dans Abaqus :

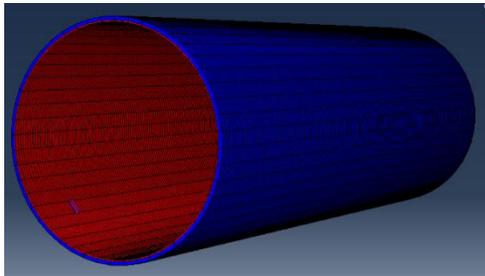
Abaqus est sélectionné pour ses capacités robustes à traiter des modèles de matériaux complexes et des conditions aux limites variées. Cette section décrit le processus de configuration de la simulation étape par étape. Elle comprend la définition de la géométrie des tubes en HDPE et du renforcement composite, les propriétés des matériaux, et l'application des charges et des conditions aux limites. Une attention particulière est accordée au choix des modèles de matériaux appropriés pour représenter avec précision le comportement du HDPE et des matériaux composites.

III.3.3.Stratégie de maillage

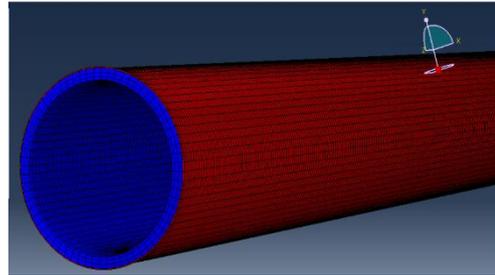
Le maillage est une étape cruciale dans le processus de l'AEF, car il influence fortement la précision et la convergence de la simulation. Cette section traite de la stratégie de maillage utilisée pour les tubes en HDPE et les matériaux composites, y compris le choix des types d'éléments, la densité du maillage, et les techniques pour garantir la qualité du maillage et la convergence. Les défis liés au maillage des structures composites, qui peuvent impliquer plusieurs matériaux et interfaces, sont également abordés.

III.4.Résultat et discussions :

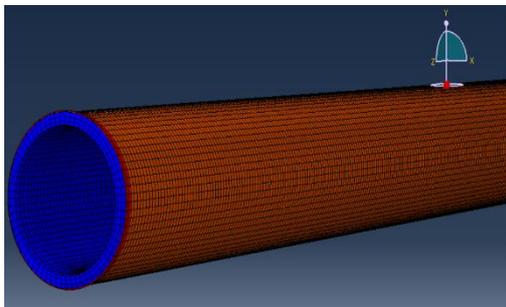
Résultat du PEHD :



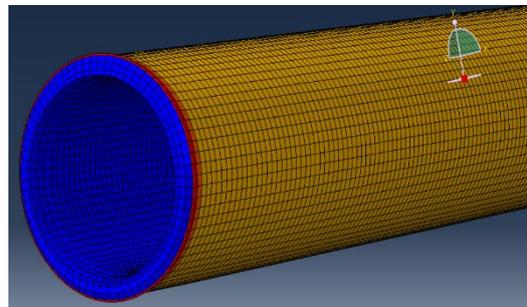
a) PEHD sans renforcement



b) PEHD renforcé par le verre



c) PEHD renforcé par le carbone



d) PEHD renforcé par le bore

Figure III.3: des défférente résultat du tube PEHD

III.4.1.L'effet de l'orientation des fibres sur la position du renfort.

a) Bore/époxy :

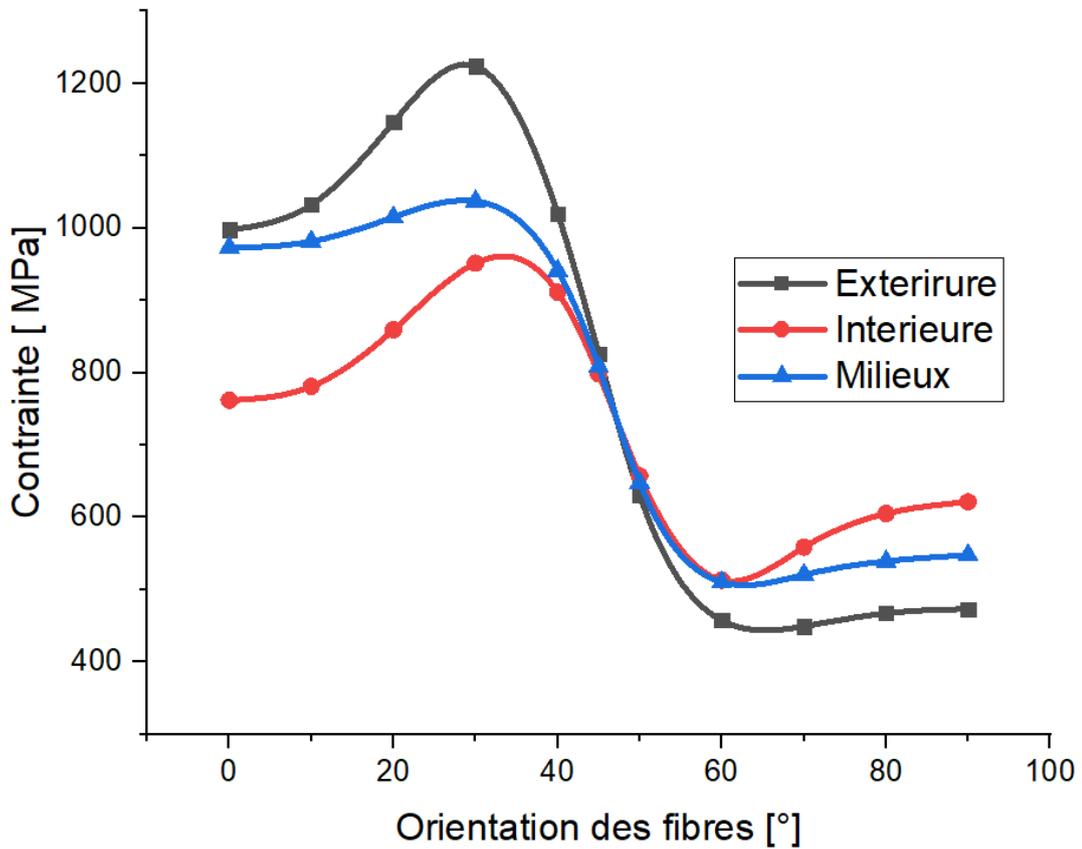


Figure III.4: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite bore/époxy et pour différentes positions du renfort.

La figure III.4. Montre la variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite bore/époxy et pour différentes positions du renfort. Les fibres orientées à de petits angles (proches de 0°) sont alignées avec la direction principale des contraintes, offrant un renforcement maximal. À mesure que l'angle augmente, les fibres commencent à dévier de la direction des contraintes, réduisant leur efficacité. Le pic à 30° suggère qu'il existe un angle optimal où les fibres,

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

bien que n'étant pas parfaitement alignées, interagissent de manière optimale avec le matériau matriciel (PEHD) pour distribuer la charge efficacement. Au-delà de cet angle, les fibres sont moins efficaces pour renforcer le composite.

b) Carbone/époxy :

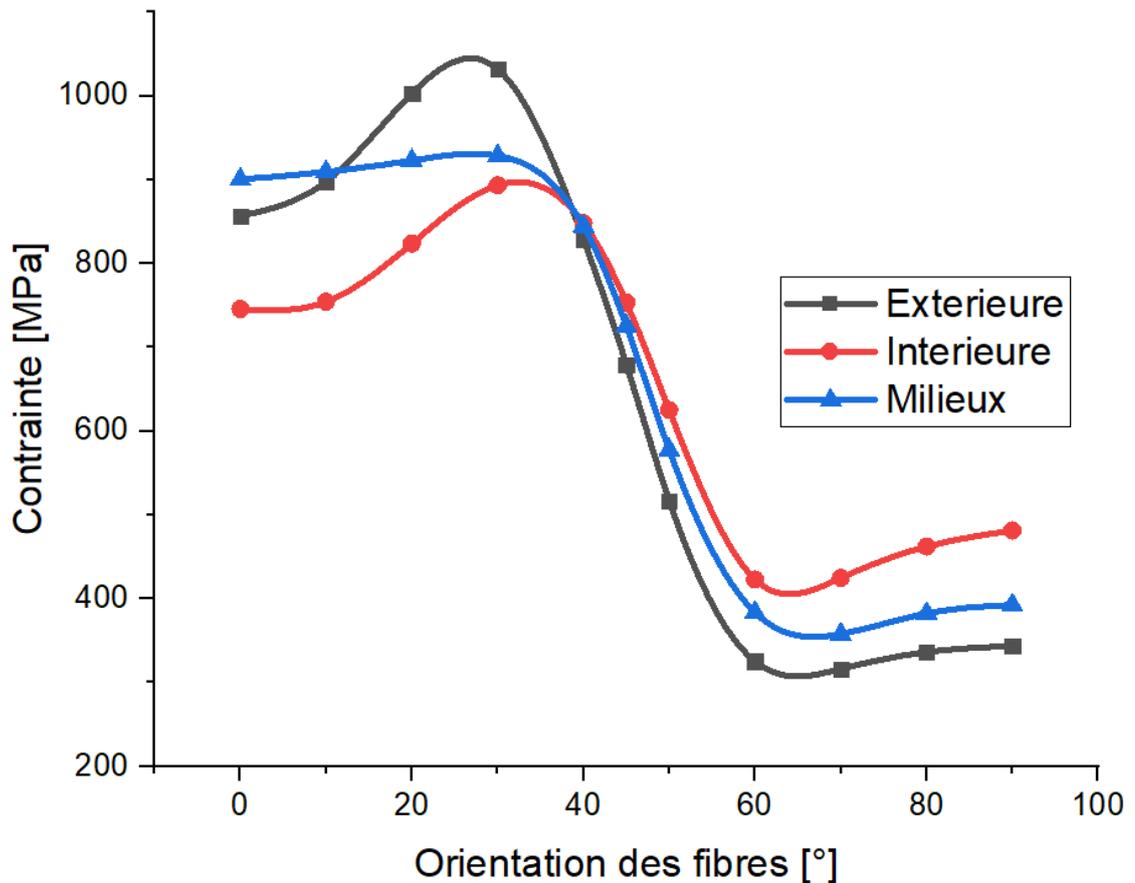


Figure III.5: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite carbone/époxy et pour différentes positions du renfort.

La figure III.5. Montre la variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite carbone/époxy et pour différentes positions du renfort. Pour une résistance maximale à la contrainte, l'orientation des fibres doit être maintenue entre 20° et 30°, et la position externe du matériau composite

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

est la plus efficace pour résister aux contraintes appliquées, indépendamment de l'orientation des fibres. La position du matériau composite affecte significativement la répartition des contraintes, la position externe montrant constamment de meilleures performances, probablement en raison de l'exposition directe aux forces appliquées. Les positions, interne et milieu sont moins efficaces, mais elles contribuent tout de même à la capacité globale de support de la charge de la superposition.

c) Verre/époxy :

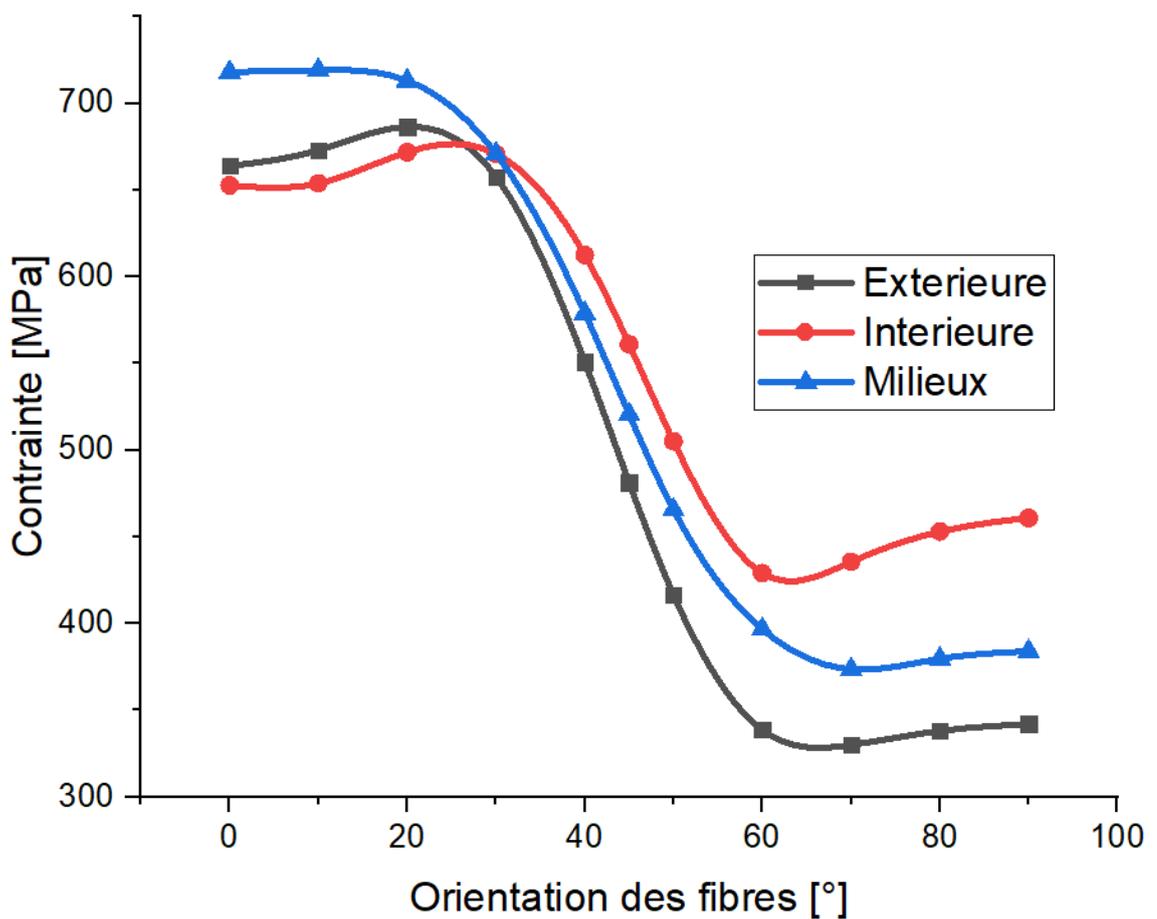


Figure III.6: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite verre/époxy et pour différentes positions du renfort.

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

La figure III.6. Montre la variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite verre/époxy et pour différentes positions du renfort. La meilleure résistance au stress est obtenue lorsque les fibres sont alignées avec la direction de la charge (0° à 20°), avec la position centrale bénéficiant le plus des capacités globales de transfert de charge du composite. Les orientations à 40° à 70° montrent une réduction significative de la résistance au stress, indiquant un support de charge moins efficace et un stress accru sur la matrice de PEHD. À 90° , les fibres contribuent le moins à la résistance à la traction, entraînant une redistribution de la charge et une stabilisation des valeurs de stress.

III.4.2.L'effet du Matériau sur la position du renfort :

a) Extérieure :

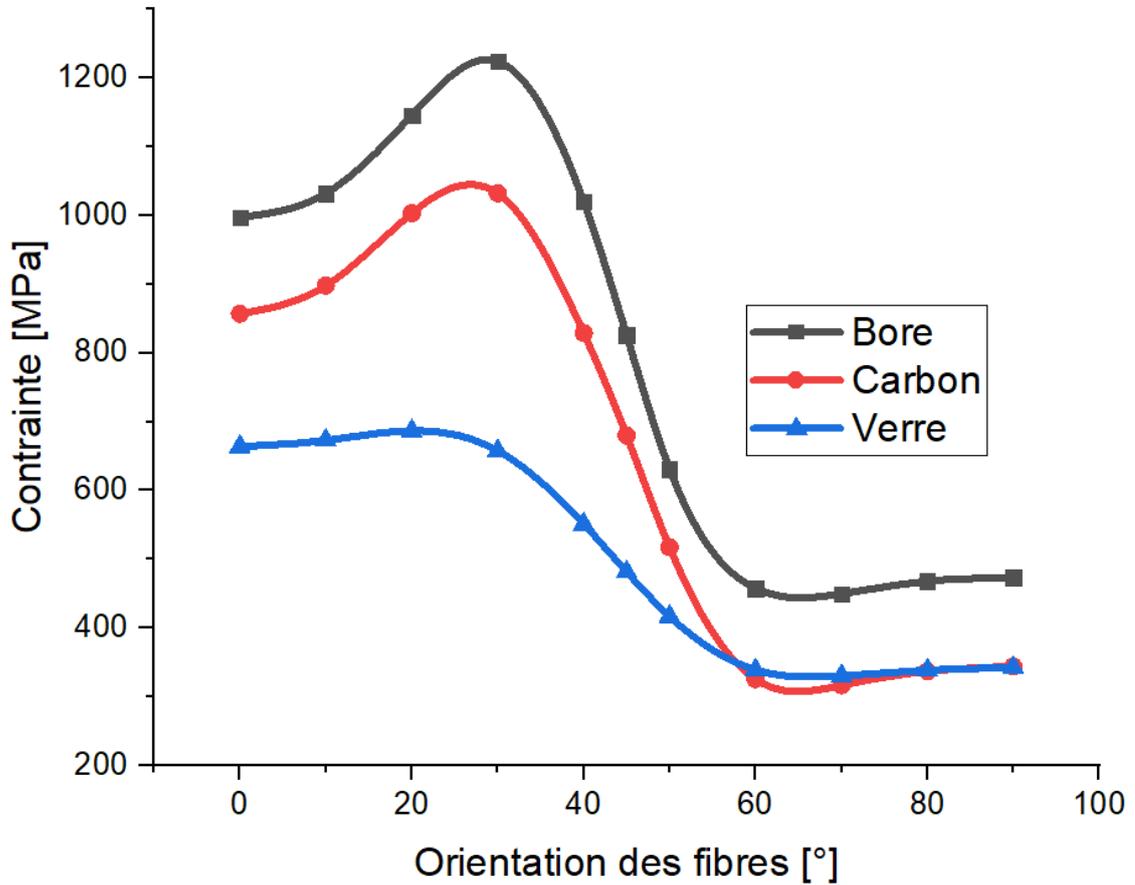


Figure III.7: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe du renfort.

La figure III.7. Montre la variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe du renfort. Le Bore offre la meilleure résistance à des angles proches de 0° à 30°, avec une efficacité maximale à 30°, mais sa performance diminue rapidement au-delà de cet angle. Le Carbone montre une résistance similaire au Bore jusqu'à 30°, bien que légèrement inférieure, et sa performance diminue plus graduellement, restant plus stable à des angles plus élevés. Le Verre, quant à lui, offre une résistance modérée et stable à des angles proches de 0° à

30°, mais il est moins efficace que le Bore et le Carbone. Cependant, sa performance, bien que diminuant au-delà de 30°, reste plus stable que celle du Carbone.

b) Intérieure :

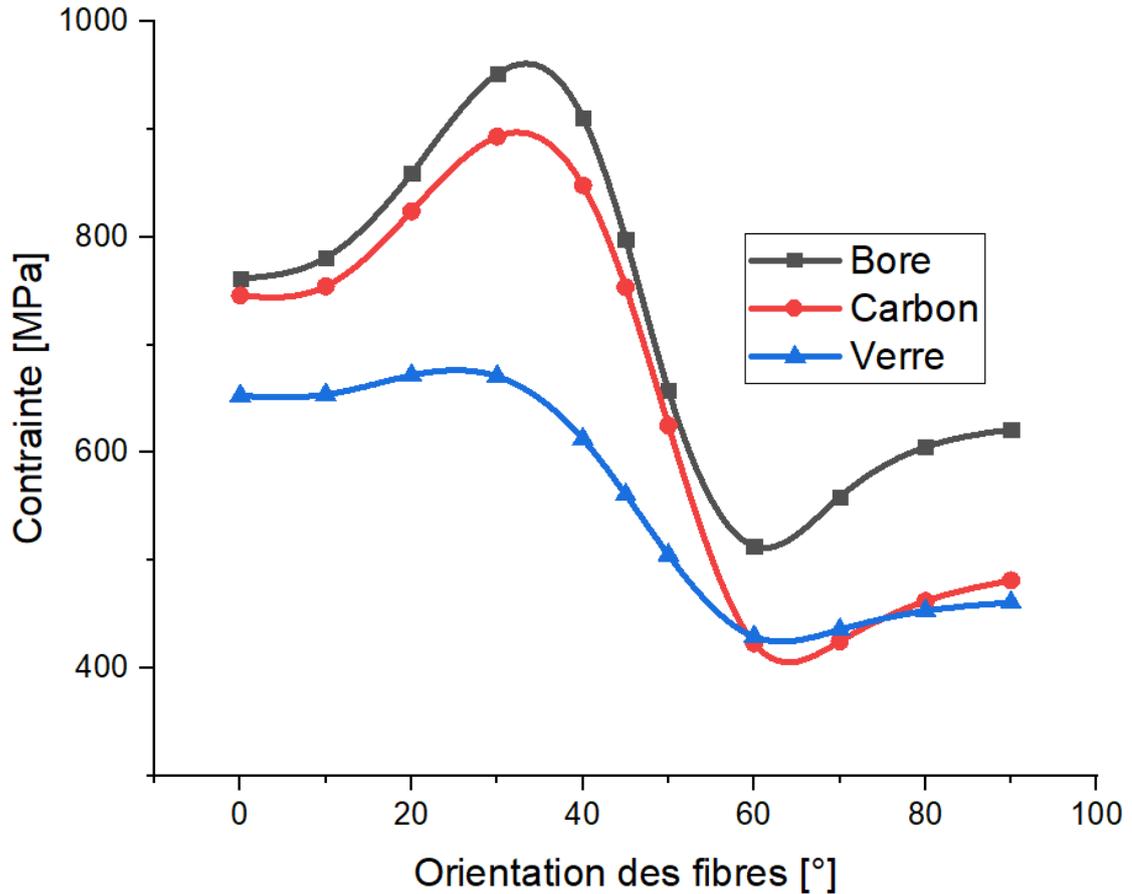


Figure III.8: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne du renfort

La figure III.8. Montre la variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy pour la position interne du renfort. Pour maximiser la résistance à la contrainte, l'orientation des fibres doit être maintenue entre 20° et 30°, en particulier pour le Bore et le Carbone. Parmi les matériaux composites, le Bore est le plus performant pour renforcer le PEHD, offrant les meilleures valeurs de contrainte. Le Carbone suit de près, avec une performance légèrement inférieure à celle du Bore. Le

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

Verre, cependant, est le moins performant des trois matériaux, offrant la plus faible résistance à la contrainte dans ce contexte.

c) Milieux :

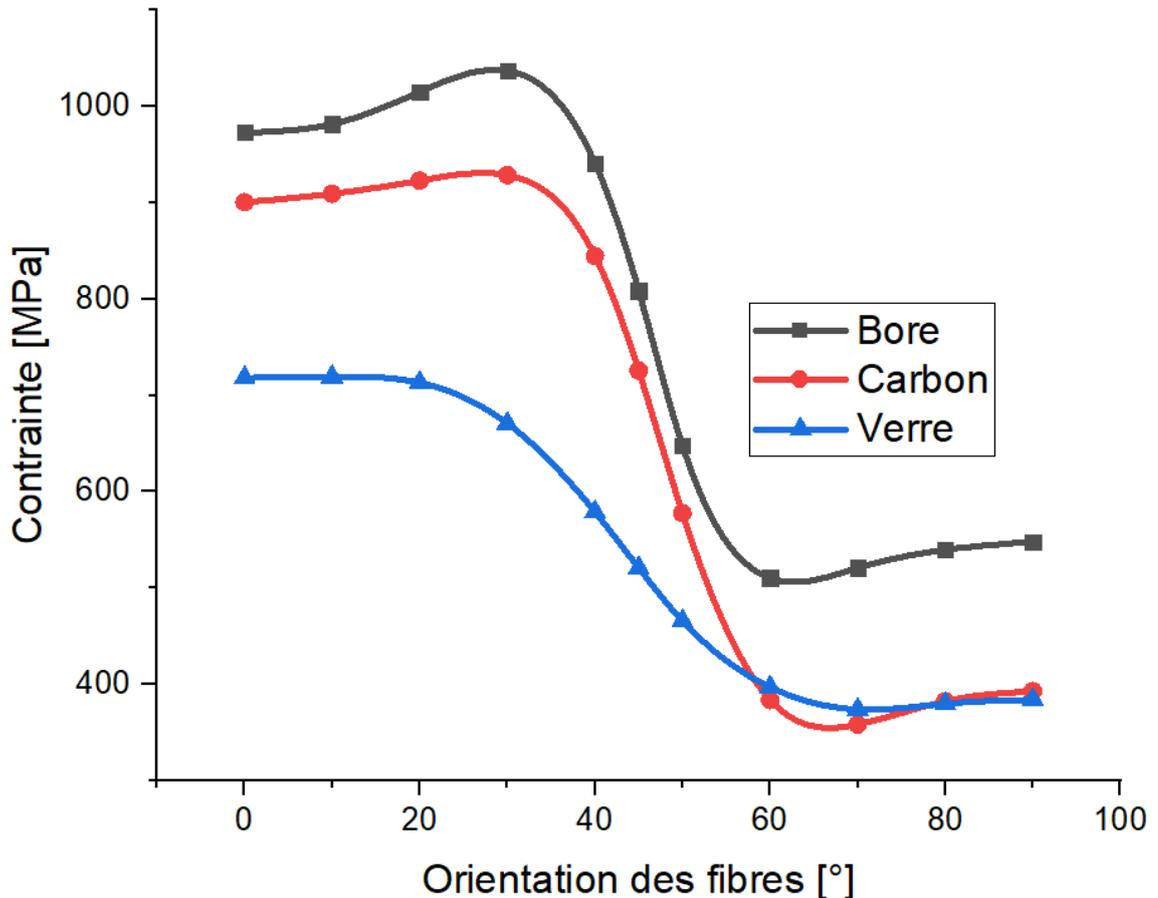


Figure III.9: La variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux du renfort

La figure III.9. Montre la variation de la contrainte normale équivalente σ_{eq} en fonction de l'orientation des fibres pour les matériaux composite bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy pour la position aux milieux du renfort. Pour maximiser la résistance à la contrainte, l'orientation des fibres doit être maintenue entre 20° et 30°, en particulier pour le Bore et le Carbone. Parmi les matériaux composites, le Bore est le plus performant pour renforcer le PEHD, offrant les meilleures valeurs de contrainte. Le Carbone suit de près, avec une performance légèrement inférieure à celle du Bore. En

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

revanche, le Verre est le moins performant des trois matériaux, offrant la plus faible résistance à la contrainte dans ce contexte.

III.4.3.L'effet des matériaux composites sur la variation des contraintes et les déplacements le long de l'épaisseur :

On va pris on considération juste les résultats pour orientation des fibres de 30° parce qu'elle a donné le meilleur résultat pour les trois matériaux pour chaque position

III.4.3.1.L'effet des matériaux composites sur la variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} le long de l'épaisseur :

a) Extérieure :

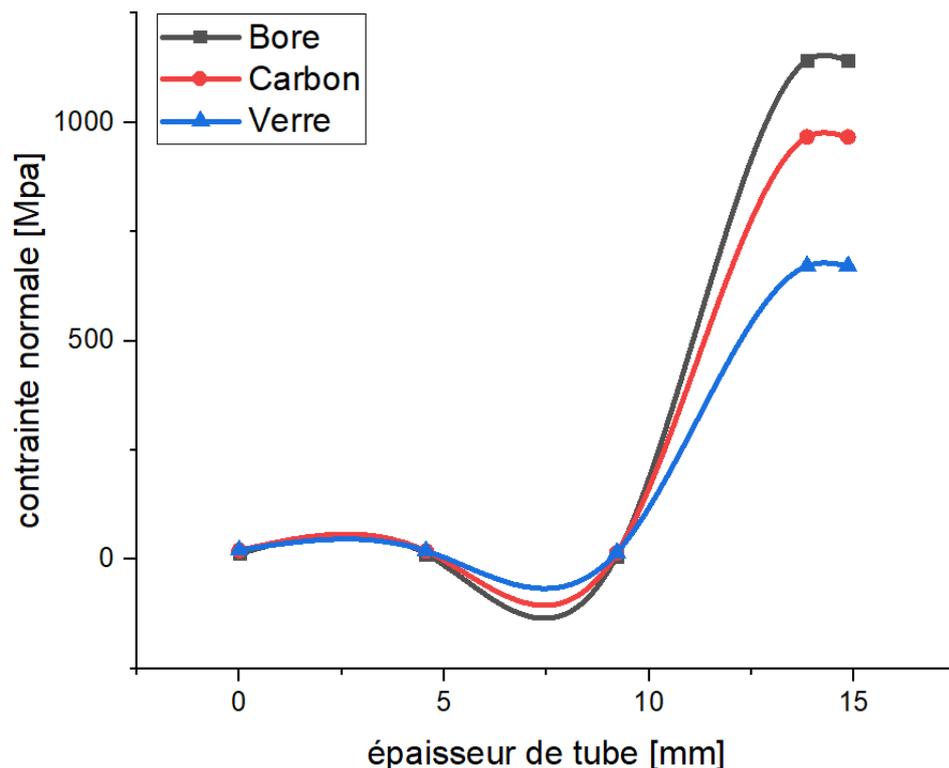


Figure III.10: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

La figure III.10. Montre la variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

verre/époxy et pour la position externe. Pour les épaisseurs inférieures (jusqu'à 9.21624 mm), le bore montre des contraintes normales σ_{11} moindres, mais à partir de 13.85686 mm, sa contrainte normale augmente de manière exponentielle, atteignant la valeur la plus élevée. Le carbone montre une contrainte normale σ_{11} initialement élevée, qui subit également une augmentation drastique à des épaisseurs élevées, bien que moindre que celle du bore. Le verre présente les contraintes normales σ_{11} les plus élevées à des épaisseurs faibles et modérées, avec une augmentation significative à 13.85686 mm, la plus faible comparée au bore et au carbone.

b) Intérieure :

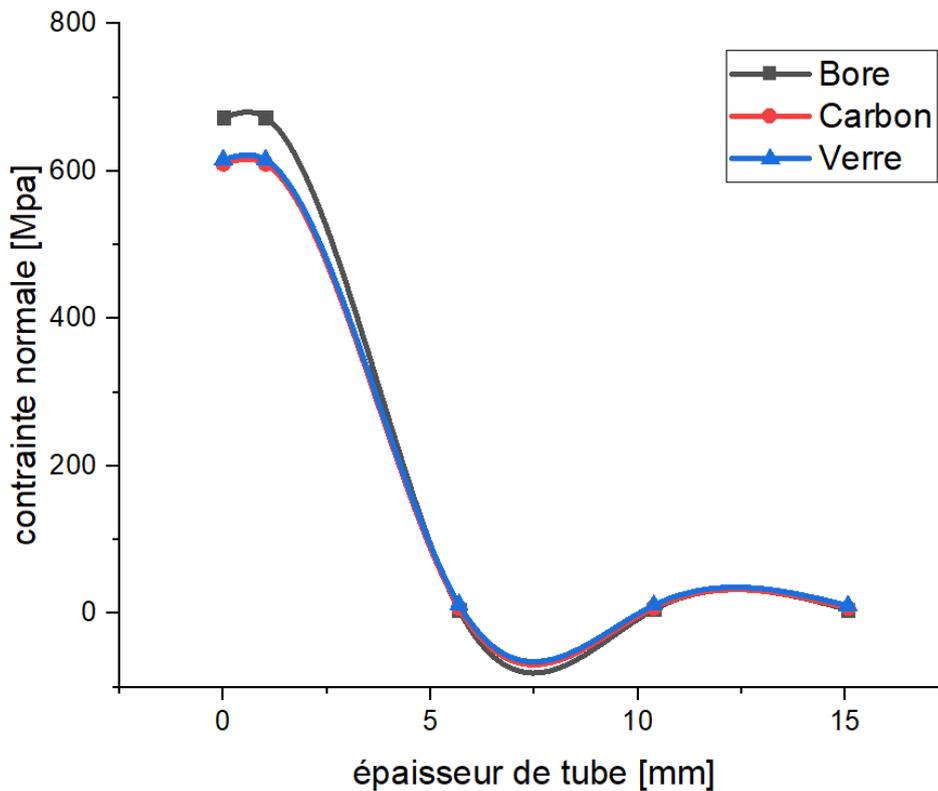


Figure III.11: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.

La figure III.11. Montre la variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

verre/époxy et pour la position interne. Le bore montre une chute drastique de la contrainte normale σ_{11} de la surface à l'intérieur et maintient la plus basse contrainte interne. Le carbone affiche une réponse intermédiaire, avec des valeurs de contrainte plus élevées que le bore mais inférieures au verre à chaque profondeur. Le verre, quant à lui, montre la plus forte contrainte résiduelle interne, indiquant une capacité de maintien de contrainte plus élevée.

c) Milieux :

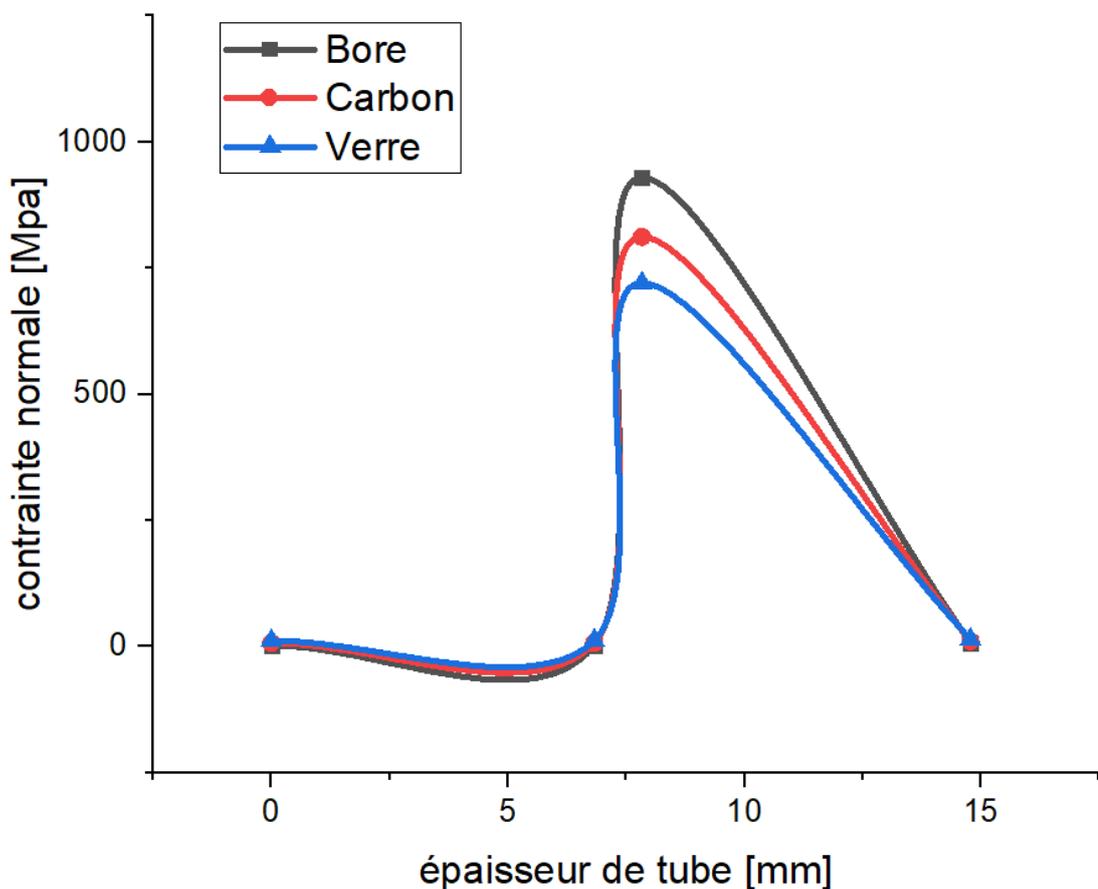


Figure III.12: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.

La figure III.12. Montre la variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

verre/époxy et pour la position aux milieux .Le bore montre initialement une faible contrainte normale σ_{11} qui reste constante jusqu'à 6.82506 mm, avant d'augmenter extrêmement à 7.83088 mm, atteignant 929.10693, puis de diminuer à 7.19644 à 14.7782 mm, fluctuation due aux propriétés spécifiques du bore influençant la distribution des contraintes normales internes dans la partie médiane du PEHD. Le carbone présente une contrainte normale σ_{11} initiale modérée de 7.37668, stable jusqu'à 6.82506 mm, avec une augmentation marquée à 811.59875 à 7.83088 mm, suivie d'une diminution à 10.71157 à 14.7782 mm, montrant une rigidité plus grande et une capacité à accumuler plus de contraintes normales internes. Le verre affiche les contraintes normales σ_{11} initiales les plus élevées avec 11.39346, stable jusqu'à 6.82506 mm, une augmentation significative à 720.32526 à 7.83088 mm, suivie d'une diminution à 14.03843 à 14.7782 mm, indiquant une réponse intermédiaire entre le bore et le carbone.

III.4.3.2. L'effet des matériaux composites sur la variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} le long de l'épaisseur :

a) Extérieure :

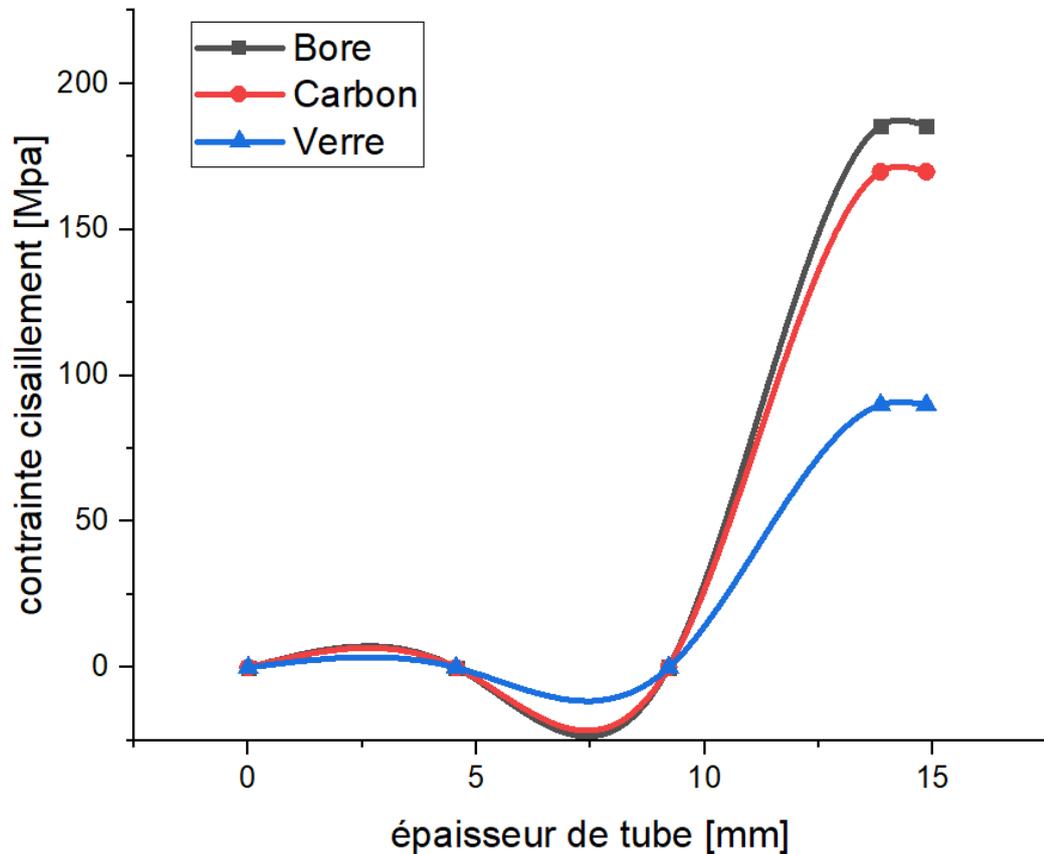


Figure III.13: La variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

La figure III.13. Montre la variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

À des épaisseurs inférieures, le bore montre des contraintes de cisaillement σ_{12} modérées, tandis que le carbone présente des contraintes initiales comparables au bore

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

mais supérieures à celles du verre, qui a les contraintes les plus faibles, y compris une légère valeur négative à 4.559 mm. À partir de 13.85686 mm, la contrainte de cisaillement σ_{12} pour le bore augmente de manière exponentielle, atteignant la valeur la plus élevée, alors que le carbone subit également une augmentation drastique de la contrainte σ_{12} à des épaisseurs élevées, mais cette augmentation reste moindre par rapport au bore. Le verre, quant à lui, montre une augmentation significative de la contrainte de cisaillement σ_{12} à cette épaisseur, bien que cette augmentation soit la plus faible comparée au bore et au carbone.

b) Intérieure :

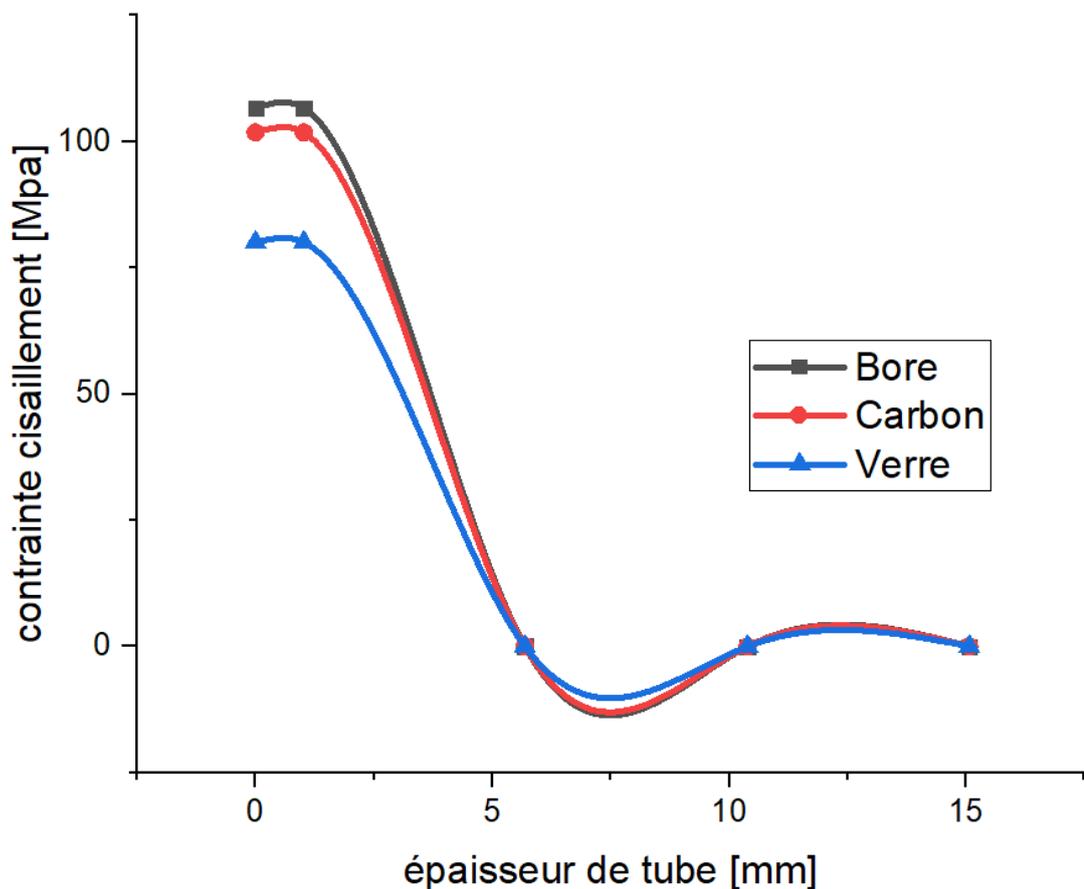


Figure III.14: La variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

La figure III.14. Montre la variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.

Le bore montre une chute drastique de la contrainte de cisaillement de la surface à l'intérieur et maintient une très faible contrainte interne parmi les trois matériaux étudiés. Cette caractéristique suggère que le bore est particulièrement efficace pour réduire les tensions internes, ce qui peut être bénéfique dans des applications où la stabilité structurelle est cruciale. Le carbone, en revanche, affiche une réponse légèrement supérieure à celle du bore en termes de maintien des contraintes internes. Cela indique que, bien qu'il conserve un certain degré de rigidité, il parvient tout de même à modérer les tensions internes, ce qui pourrait le rendre utile dans des situations où un équilibre entre flexibilité et rigidité est nécessaire. Le verre, quant à lui, présente une faible contrainte résiduelle interne, ce qui indique une relaxation rapide des contraintes internes par rapport au bore et au carbone. Cette caractéristique du verre peut être particulièrement avantageuse dans des contextes où la déformation sous contrainte doit être minimisée rapidement pour préserver l'intégrité du matériau. En résumé, chacun de ces matériaux présente des avantages spécifiques en termes de gestion des contraintes internes, ce qui peut influencer leur sélection en fonction des exigences particulières des applications envisagées.

c) Milieux :

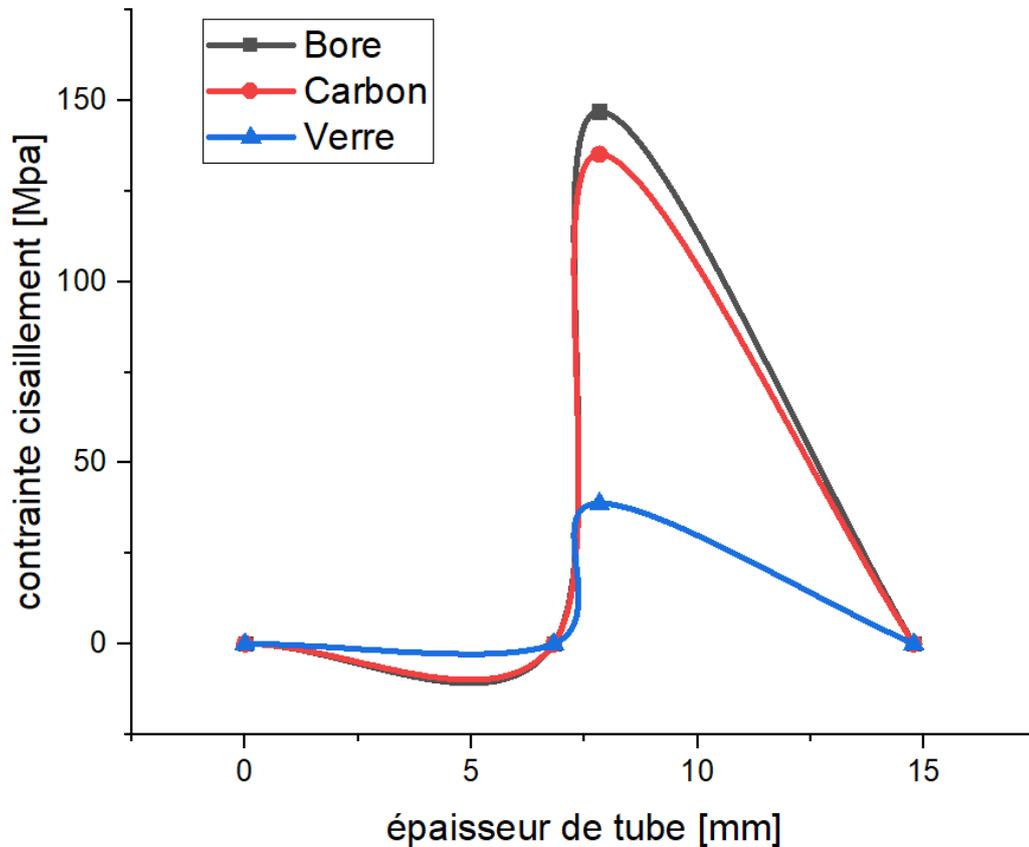


Figure III.15: La variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.

La figure III.15. Montre la variation de la contrainte de cisaillement σ_{12} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux. Initialement, le bore montre une faible contrainte de cisaillement S_{12} qui reste stable jusqu'à 6.82506 mm, puis augmente drastiquement à 147.06633 à 7.83088 mm avant de diminuer à 0.03224 à 14.7782 mm, indiquant une réponse significativement critique à une profondeur spécifique avec une capacité de relaxation après le pic. Le carbone, avec une contrainte initiale légèrement supérieure de 0.03705, reste stable jusqu'à 6.82506 mm, puis augmente à 135.24203 à 7.83088 mm et diminue à 0.03823 à 14.7782 mm, montrant une augmentation critique similaire mais une relaxation plus contrôlée. Le verre affiche les contraintes initiales les plus basses

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

avec 0.00676, stable jusqu'à 6.82506 mm, puis augmente à 38.79914 à 7.83088 mm et diminue à 0.01265 à 14.7782 mm, présentant une réponse intermédiaire avec une augmentation de contrainte à la profondeur critique, mais avec une amplitude plus faible que les autres matériaux.

III.4.3.3.L'effet des matériaux composites sur la variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} le long de l'épaisseur :

a) Extérieure :

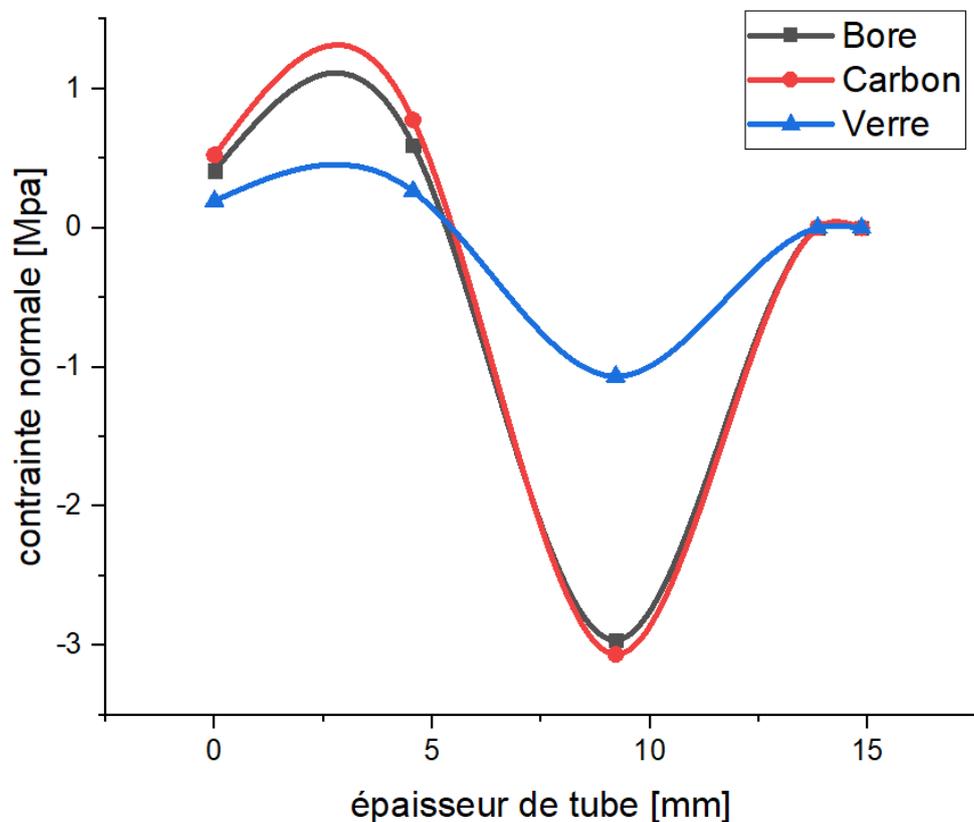


Figure III.16: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

La figure III.16. Montre la variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

Le bore montre une augmentation initiale de la contrainte normale suivie d'une chute drastique à une épaisseur de 9.21624 mm, puis une annulation à des épaisseurs plus élevées. Le carbone affiche une augmentation initiale de la contrainte normale similaire au bore, mais avec des valeurs légèrement plus élevées. La chute à 9.21624 mm est également plus marquée, avec une annulation à des épaisseurs plus élevées. Le verre présente des contraintes normales initiales plus faibles que le bore et le carbone, avec une augmentation initiale suivie d'une inversion de signe à 9.21624 mm. La contrainte est également nulle à des épaisseurs plus élevées.

b) Intérieure:

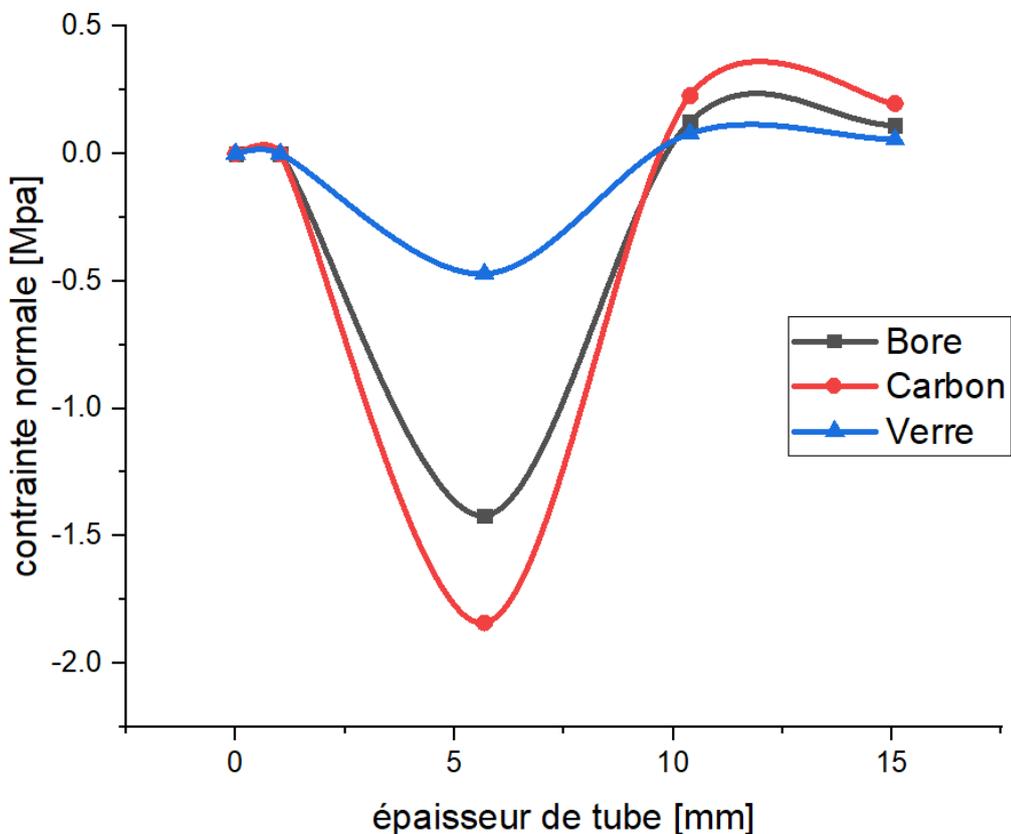


Figure III.17: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.

La figure III.17. Montre la variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne. Le bore montre une variation de la contrainte

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

normale σ_{33} passant de nulle à la surface, à une compression maximale à environ 5.68331 mm, puis à une traction au-delà de cette profondeur. Le carbone présente des variations similaires à celles du bore mais avec des amplitudes de contrainte de compression et de traction plus élevées. Le verre, quant à lui, montre les variations de contrainte de cisaillement les plus faibles parmi les trois matériaux, avec des valeurs de compression et de traction relativement basses.

c) Milieux :

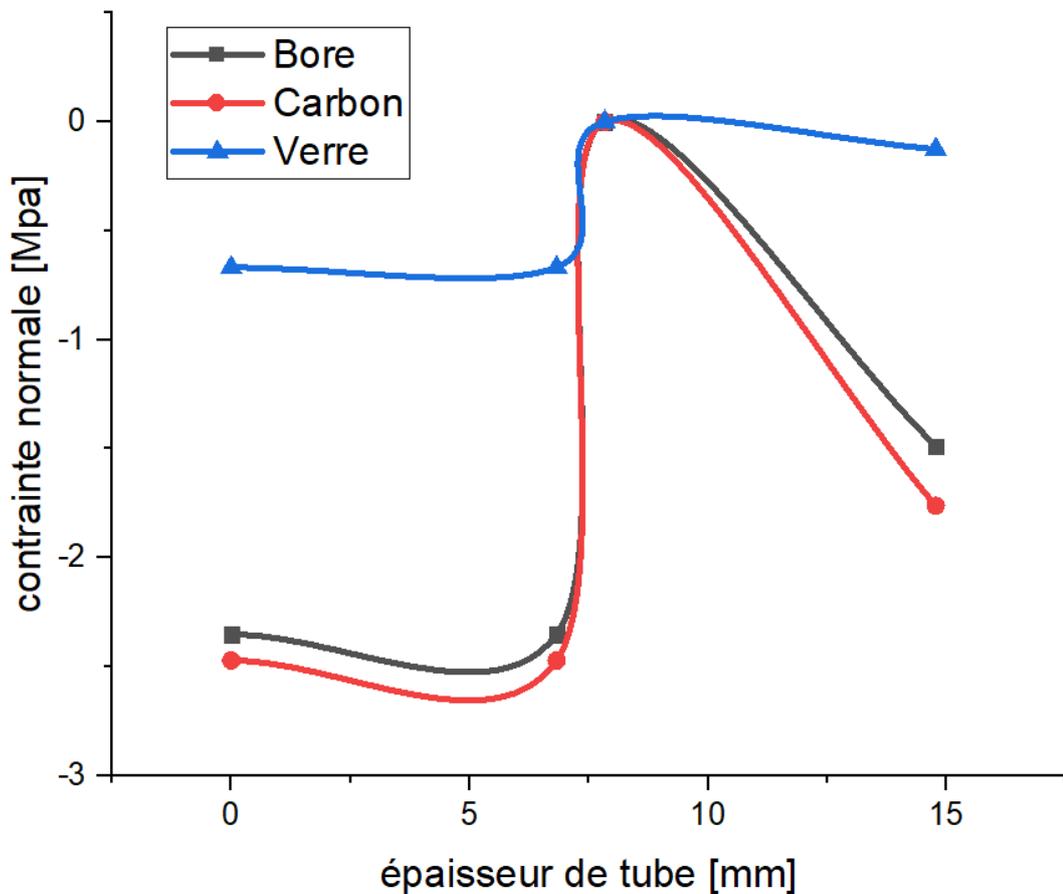


Figure III.18: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.

La figure III.18. Montre la variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux. Le bore affiche une contrainte normale σ_{33}

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

initialement négative qui reste constante jusqu'à 6.82506 mm, puis tombe à zéro à 7.83088 mm, indiquant une neutralité dans cette zone. À 14.7782 mm, la contrainte est réduite mais reste négative (-1.48845), montrant une relaxation partielle. Le carbone présente une contrainte normale σ_{33} initialement négative et légèrement supérieure à celle du bore, stable jusqu'à 6.82506 mm, et tombe également à zéro à 7.83088 mm, montrant une neutralité. À 14.7782 mm, la contrainte est réduite mais reste négative (-1.76197), suggérant une relaxation partielle avec une plus grande rigidité résiduelle par rapport au bore. Le verre affiche la contrainte initiale négative la plus faible, stable jusqu'à 6.82506 mm, tombe à zéro à 7.83088 mm, indiquant une neutralité, et à 14.7782 mm, la contrainte est réduite mais reste la plus proche de zéro (-0.126) parmi les trois matériaux, montrant une relaxation presque complète.

III.4.3.4. L'effet des matériaux composites sur la variation de déplacement U_1 le long de l'épaisseur :

a) Extérieure :

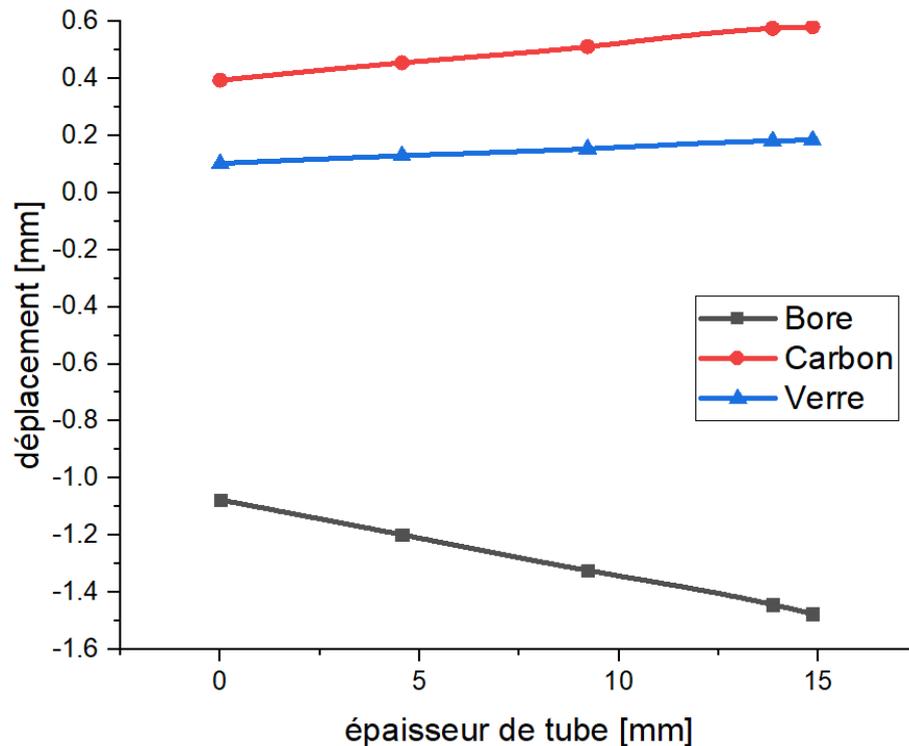


Figure III.19: La variation du déplacement U_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

La figure III.19. Montre la variation du déplacement u_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

Le matériau Bore montre un déplacement négatif, ce qui pourrait être attribué à une rigidité plus élevée ou à une réponse différente sous charge, provoquant un déplacement compressif plus important avec l'augmentation de l'épaisseur. Le matériau Carbone affiche un déplacement positif plus important que le verre, suggérant une expansion ou une flexibilité supérieure sous charge, augmentant progressivement avec l'épaisseur. Le matériau Verre montre également un déplacement positif, mais les valeurs sont inférieures à celles du carbone, indiquant une moindre expansion ou flexibilité sous charge.

b) Intieure :

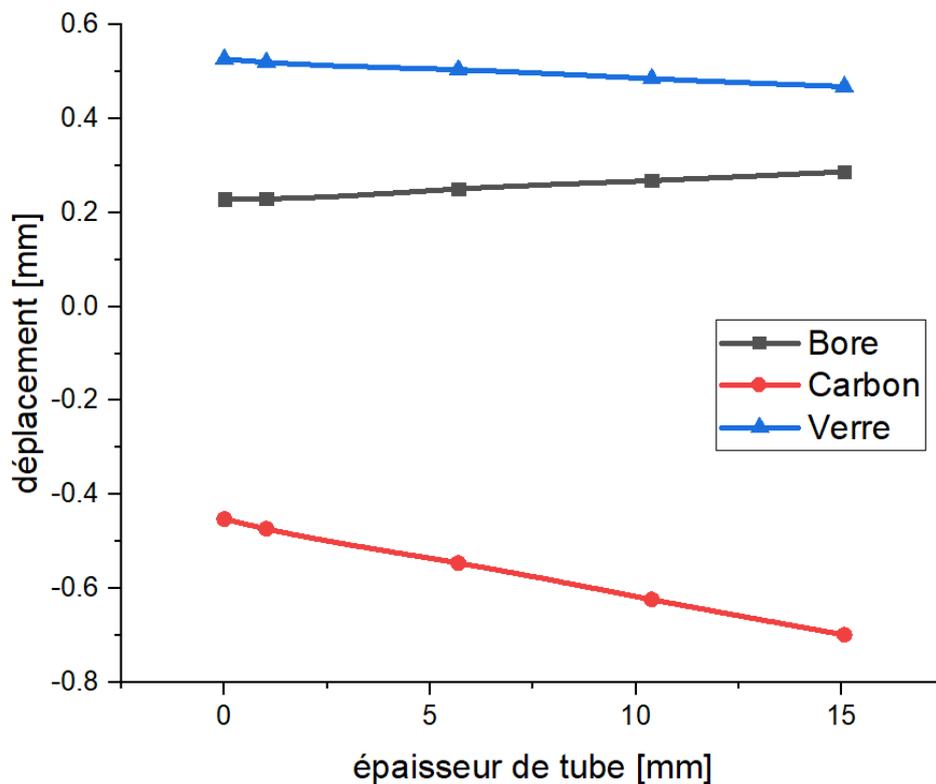


Figure III.20: La variation du déplacement u_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

La figure III.20. Montre la variation du déplacement u_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.

Le matériau Bore montre un déplacement u_1 qui augmente régulièrement avec la profondeur, suggérant une expansion graduelle vers l'intérieur avec des valeurs positives indiquant une déformation dans le sens positif de l'axe u_1 . En revanche, le Carbone affiche un déplacement u_1 négatif qui diminue encore avec la profondeur, indiquant une contraction de plus en plus importante vers l'intérieur, avec des valeurs négatives croissantes montrant une contraction significative sous contrainte. Quant au Verre, le déplacement u_1 diminue régulièrement, suggérant une légère contraction, avec des valeurs positives mais décroissantes indiquant une déformation initiale suivie d'une contraction légère.

c) Milieux

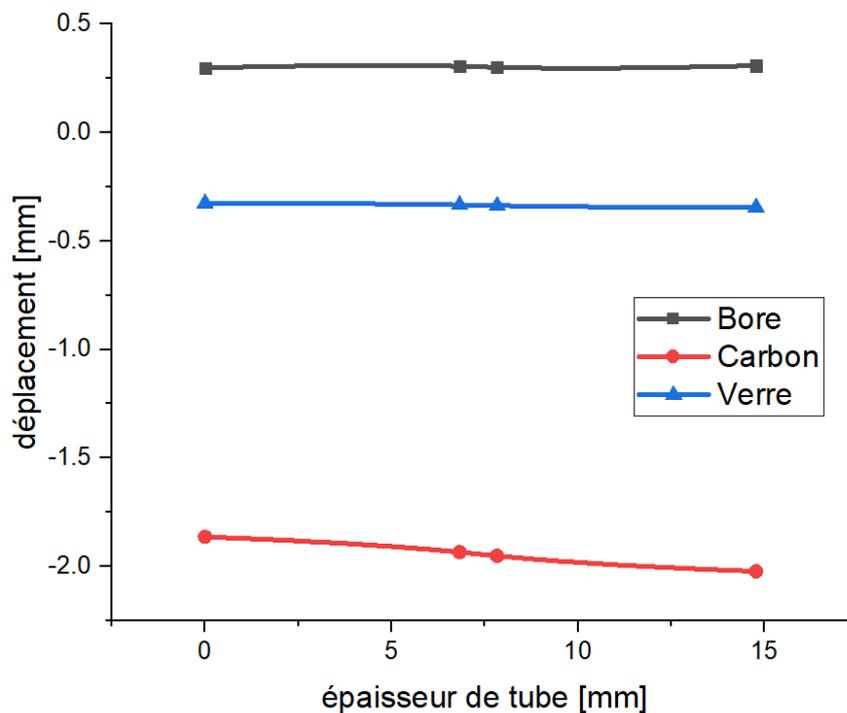


Figure III.21: La variation du déplacement u_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.

La figure III.21. Montre la variation du déplacement u_1 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.

Le matériau Bore affiche un déplacement positif (extension), suggérant une tendance à s'étirer sous la charge, avec une légère augmentation du déplacement avec l'épaisseur indiquant une faible déformation élastique. Le Carbone présente le déplacement le plus négatif, indiquant une contraction significative, et l'augmentation progressive de la contraction avec l'épaisseur montre une rigidité élevée et une forte réponse à la déformation élastique. Le Verre, quant à lui, montre un déplacement négatif modéré, indiquant une contraction, avec une augmentation légère de la contraction avec l'épaisseur, suggérant une rigidité inférieure à celle du Carbone mais supérieure à celle du Bore.

III.4.3.5.L'effet des matériaux composites sur la variation de déplacement U_3 le long de l'épaisseur :

a) Extérieure :

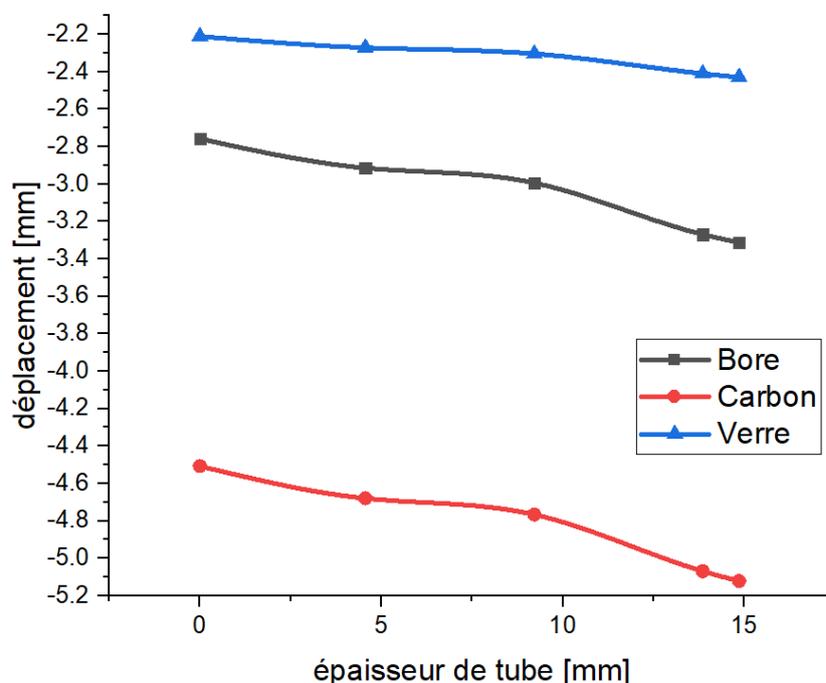


Figure III.22: La variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

La figure III.22. Montre la variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position externe.

Le matériau Bore affiche une contraction significative, mais moindre par rapport au Carbone, avec une tendance à l'augmentation progressive de la contraction avec l'épaisseur. Le Carbone présente la plus grande contraction parmi les trois matériaux, avec des valeurs croissantes en valeur absolue indiquant une contraction continue et marquée avec l'épaisseur. Le Verre montre la plus faible contraction parmi les trois matériaux, avec une augmentation de la contraction en valeur absolue, mais à un rythme moindre que le Bore et le Carbone.

b) Intérieure :

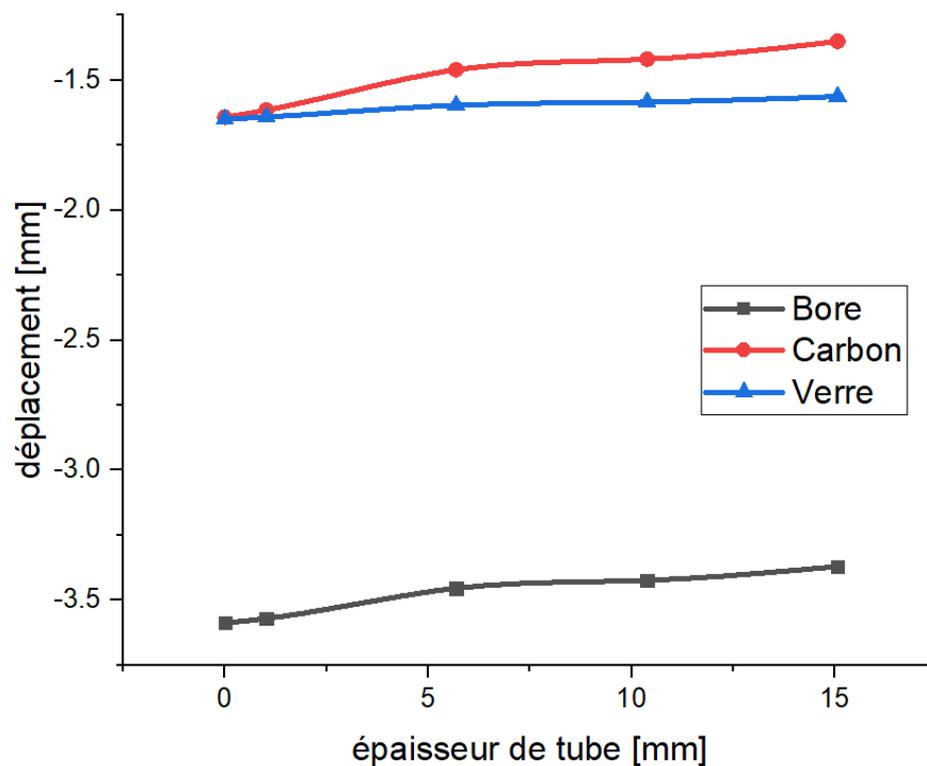


Figure III.23: La variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.

La figure III.23. Montre la variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position interne.

Le matériau Bore montre une réduction progressive de la compression du déplacement u_3 avec l'augmentation de l'épaisseur, indiquant une déformation compressive initiale plus importante qui diminue à mesure que l'épaisseur augmente, avec des valeurs de déplacement restant les plus négatives, signalant une compression initiale plus marquée. Le Carbone, de son côté, présente également une réduction progressive de la compression avec l'augmentation de l'épaisseur, mais les valeurs de déplacement sont moins négatives que celles du Bore, ce qui indique une compression initiale moins importante. Le Verre montre la plus faible réduction de la compression avec l'augmentation de l'épaisseur, avec des valeurs de déplacement comparables à celles du Carbone mais légèrement plus négatives, indiquant une compression initiale similaire mais légèrement plus élevée.

c) Milieux :

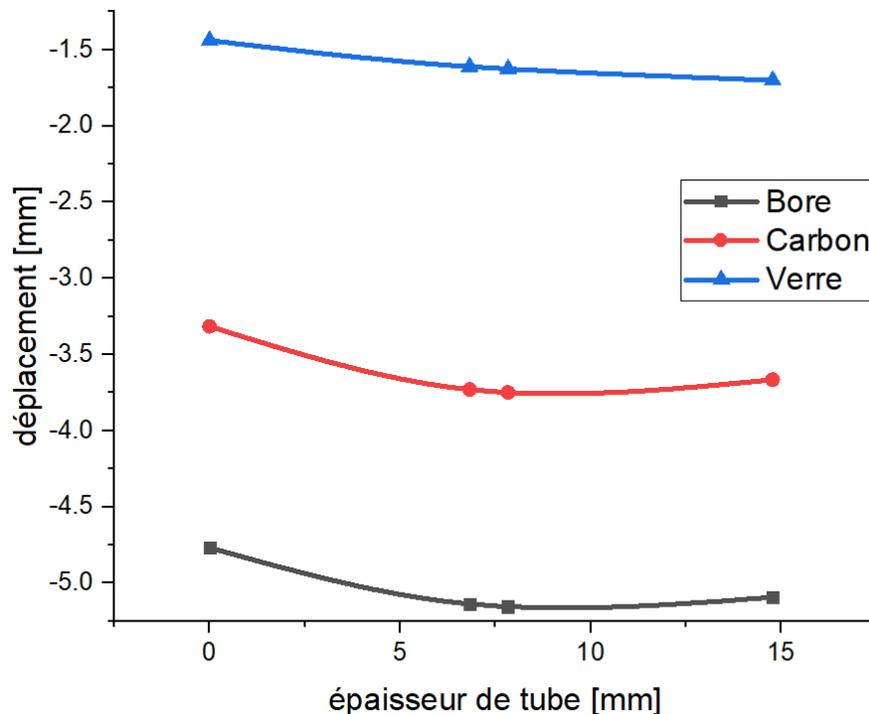


Figure III.24 : La variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

La figure III.24. Montre la variation du déplacement u_3 en fonction de l'épaisseur pour les trois matériaux du renfort bore/époxy, carbone/époxy et verre/époxy et pour la position aux milieux.

Le Bore affiche la plus grande valeur de déplacement négatif, indiquant une déformation importante sous la charge, avec une variation continue en fonction de l'épaisseur montrant une réponse élastique notable. Le Carbone présente une déformation significative mais moins importante que le Bore, avec une variation en fonction de l'épaisseur indiquant également une réponse élastique, mais plus modérée. Le Verre montre la plus petite valeur de déplacement négatif, suggérant une rigidité plus élevée ou une plus faible réponse à la déformation, avec une légère augmentation en fonction de l'épaisseur indiquant une déformation minimale sous la charge.

III.4.3. L'effet des meilleurs matériaux composites pour chaque position sur la variation des contraintes et les déplacements le long d'épaisseur :

Maintenant on va pris le résultat de meilleur matériau composite à chaque position pour toutes cas des contraintes et déplacements :

a) La contrainte normale moyenne σ_{11} :

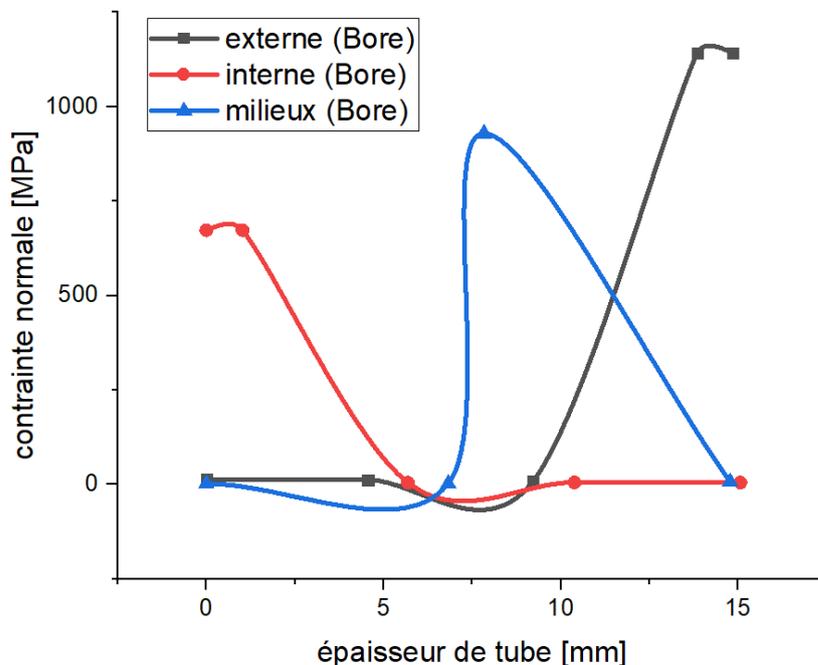


Figure III.25: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} avec l'épaisseur révèle des comportements distincts selon la position du Bore dans le tube PEHD

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

La figure III.25. Montre la variation de la contrainte normale moyenne σ_{11} avec l'épaisseur révèle des comportements distincts selon la position du Bore dans le tube PEHD. En position externe, la contrainte augmente considérablement avec l'épaisseur, indiquant une contribution significative de la couche externe de Bore à la capacité de charge accrue. En position interne, le Bore maintient initialement des contraintes élevées, montrant son efficacité dans la couche interne à l'épaisseur initiale, mais la contrainte diminue à des épaisseurs intermédiaires et augmente légèrement à des épaisseurs plus élevées. En position médiane, la contrainte varie notablement, avec des augmentations marquées à certaines épaisseurs, suggérant une relation non linéaire avec l'épaisseur dans cette configuration. Concernant l'efficacité du matériau dans différentes positions, le Bore démontre les contraintes les plus élevées en position externe à des épaisseurs accrues, le rendant optimal pour le renforcement externe. En position interne, bien que les contraintes soient élevées initialement, leur efficacité diminue à certaines épaisseurs. La position médiane montre une efficacité variable, adaptable aux exigences spécifiques de l'application. Enfin, pour optimiser l'intégrité structurelle du tube PEHD, placer le Bore en position externe à des épaisseurs plus élevées semble être la stratégie la plus efficace. Le renforcement interne avec le Bore est initialement efficace mais moins stable, tandis que la position médiane offre des résultats variés nécessitant une optimisation selon les exigences spécifiques de chaque application.

b) La contrainte de cisaillement moyenne σ_{12} :

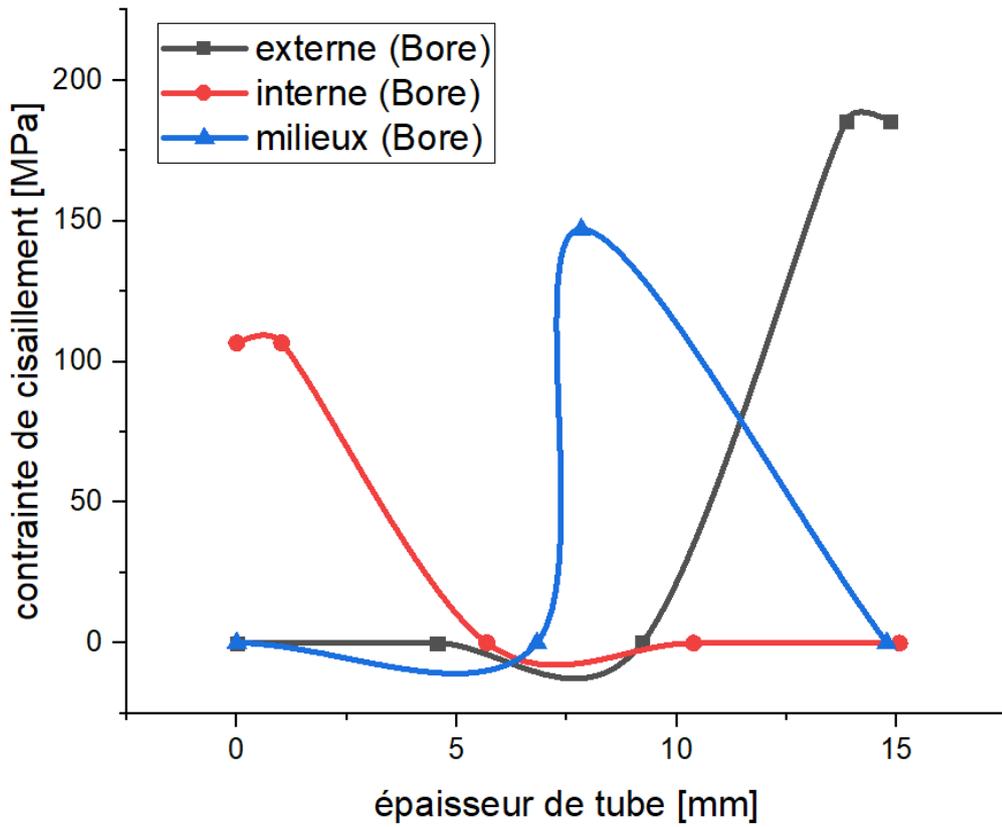


Figure III.26: La variation de la contrainte de cisaillement moyenne σ_{12} avec l'épaisseur dépend du positionnement du Bore dans le composite

La figure III.26. Montre la variation de la contrainte de cisaillement moyenne σ_{12} avec l'épaisseur dépend du positionnement du Bore dans le composite. En position externe, le Bore présente des valeurs de contrainte de cisaillement variables sur différentes épaisseurs, avec des pics significatifs à certains points, suggérant une amélioration de la capacité de la couche externe à résister aux forces de cisaillement, cruciale pour l'intégrité structurelle. En effet, le placement externe montre des valeurs généralement plus élevées et constantes de contrainte de cisaillement, indiquant son efficacité principale pour renforcer la résistance au cisaillement sur la surface extérieure. À l'inverse, en position interne, le Bore présente des valeurs modérées de contrainte de cisaillement, contribuant à la stabilité structurelle interne avec moins d'impact qu'en position externe. Dans la couche intermédiaire, les valeurs de contrainte de cisaillement sont variables, soulignant l'efficacité du Bore pour renforcer la résistance au cisaillement à l'intérieur de la structure, essentiel pour la stabilité globale. Ainsi, une

stratégie de renforcement composite basée sur l'optimisation du placement du Bore en positions externe et intermédiaire pourrait considérablement améliorer la capacité du tube PEHD à résister aux forces de cisaillement, tandis que le placement interne devrait tenir compte de son impact modéré sur les niveaux de contrainte de cisaillement comparé aux autres positions.

c) **La contrainte normale moyenne σ_{33} :**

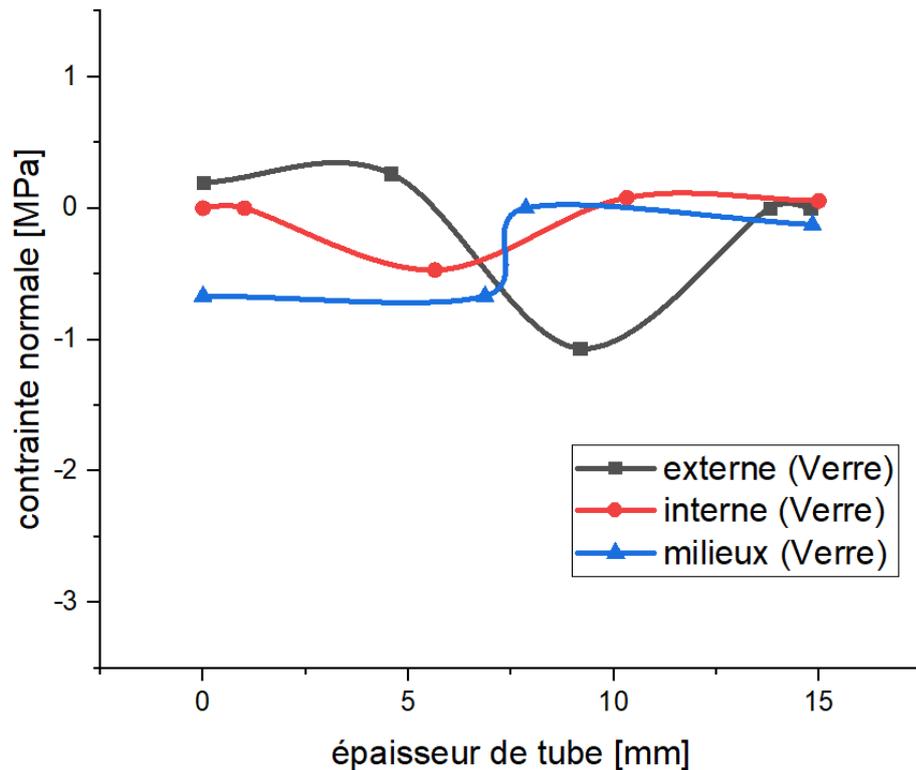


Figure III.27: La variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} avec l'épaisseur révèle des comportements distincts selon la position du Verre dans le tube PEHD

La figure III.27. Montre la variation de la contrainte normale moyenne σ_{33} avec l'épaisseur dans le tube PEHD révèle que le Verre présente différentes réactions selon sa position. En position externe, il résiste principalement à des contraintes de traction, assurant une bonne résistance à la tension sur la surface externe. En position interne, les contraintes sont généralement faibles ou nulles, indiquant une contribution minimale au renforcement structurel. En position milieu, le Verre résiste à des contraintes compressives, renforçant ainsi la stabilité structurelle à l'intérieur du tube. Cette

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

efficacité positionnelle montre que le Verre est optimal pour renforcer la couche extérieure contre la traction, tandis que d'autres matériaux pourraient être plus appropriés pour le renforcement interne où le Verre montre moins d'impact sur les contraintes. En conséquence, optimiser le placement du Verre en position externe et milieu pourrait significativement améliorer les performances mécaniques globales du tube PEHD, tout en explorant des alternatives pour le renforcement interne là où cela est nécessaire.

d) Le déplacement u_1 :

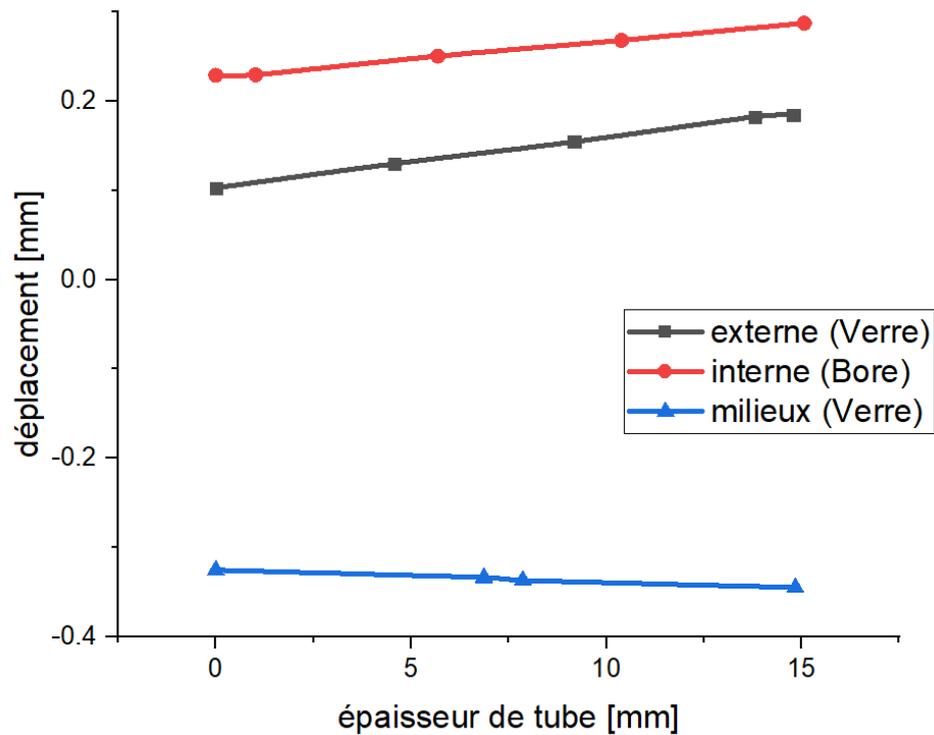


Figure III.28: La variation du déplacement u_1 avec l'épaisseur dépend du positionnement des matériaux composites sur un tube en PEHD (Verre, Bore)

La figure III.28. Monte la variation du déplacement u_1 avec l'épaisseur dépend du positionnement des matériaux composites sur un tube en PEHD. En position externe, le Verre montre des déplacements variables sur différentes épaisseurs avec des déformations notables, suggérant son rôle dans l'absorption des contraintes externes et potentiellement dans l'amélioration des propriétés mécaniques de la couche extérieure. À l'opposé, en position interne, le Bore présente des déplacements modérés, contribuant

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

à la stabilité structurale interne et à la déformation. Dans la couche intermédiaire, le Verre montre des déplacements négatifs, indiquant sa capacité à résister ou à comprimer sous charge, cruciale pour maintenir l'intégrité structurale. Ainsi, pour renforcer efficacement le tube PEHD, l'optimisation du placement du Verre en positions externe et intermédiaire est recommandée pour gérer les contraintes externes et internes, tandis que le placement interne du Bore doit être considéré pour son impact modéré mais significatif sur la déformation interne et la stabilité globale.

e) Le déplacement u_3 :

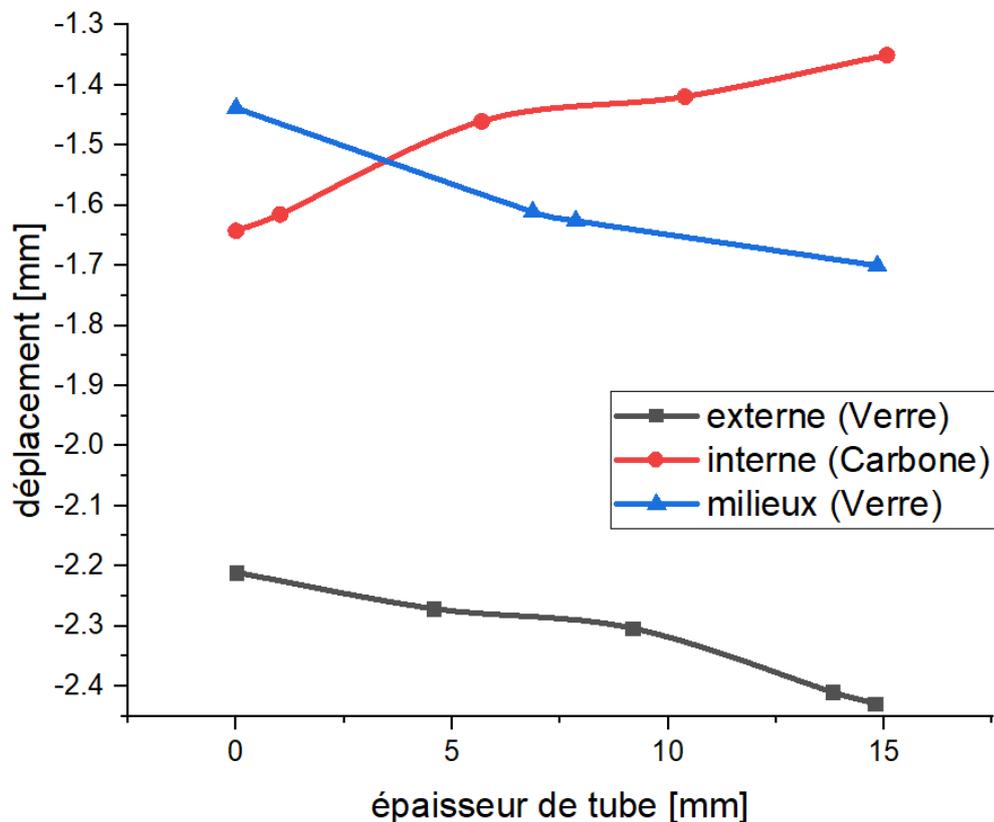


Figure III.29: La variation du déplacement u_3 avec l'épaisseur dépend du positionnement des matériaux composites sur un tube en PEHD (Verre, Carbone)

La figure III.29. Montre la variation du déplacement u_3 avec l'épaisseur dépend du positionnement des matériaux composites sur un tube en PEHD. Le Verre en position externe montre des déplacements significativement négatifs sur différentes épaisseurs, ce qui indique sa capacité à s'étirer ou se déformer sous charge, essentielle pour

Comportement mécanique d'un tube en PEHD renforcé par matériaux composites

absorber les impacts externes sur la surface extérieure du tube. Le placement externe du Verre démontre des déplacements cohérents et notables, soulignant son rôle dans l'absorption des contraintes externes et potentiellement dans l'amélioration des propriétés mécaniques globales de la couche externe du tube. À l'intérieur, le Carbone présente des déplacements modérés, contribuant au contrôle de la déformation interne et à la résilience structurale du tube. Le Verre positionné en intermédiaire montre des déplacements négatifs, indiquant sa capacité à résister à la compression ou à la déformation interne, crucial pour maintenir l'intégrité structurale de la couche intermédiaire du tube en PEHD. Ainsi, optimiser le placement du Verre en positions externe et intermédiaire sur le tube en PEHD peut efficacement gérer les forces externes et internes, tandis que le placement du Carbone interne doit être considéré pour sa contribution à la flexibilité structurale et à la gestion de la déformation interne du tube.

Conclusion Générale

En conclusion, après avoir analysé le comportement mécanique de tubes en polyéthylène haute densité (PEHD) renforcés par différentes couches composites (bore/époxy, carbone/époxy, et verre/époxy), il apparaît que chaque matériau et positionnement offrent des performances variées. Voici les principales observations et recommandations basées sur l'interprétation des résultats :

1. Bore/Époxy

- **Position Externe** : Le bore/époxy offre la meilleure résistance à des angles proches de 0° à 30° , avec une efficacité maximale à 30° , mais sa performance diminue rapidement au-delà de cet angle. Sa capacité à supporter des contraintes normales σ_{11} et de cisaillement σ_{12} est notable, surtout pour des épaisseurs plus élevées.
- **Position Interne** : Il maintient initialement des contraintes élevées, montrant son efficacité dans la couche interne à l'épaisseur initiale, mais la contrainte diminue à des épaisseurs intermédiaires.
- **Position Médiane** : La contrainte varie notablement, avec des augmentations marquées à certaines épaisseurs, suggérant une relation non linéaire avec l'épaisseur.

2. Carbone/Époxy

- **Position Externe** : Le carbone/époxy montre une résistance stable et efficace à des angles plus élevés que le bore/époxy, et bien qu'il subisse des augmentations drastiques de contraintes σ_{11} et σ_{12} à des épaisseurs élevées, il reste performant.
- **Position Interne** : Affiche une réponse intermédiaire, avec des valeurs de contrainte plus élevées que le bore mais inférieures au verre.
- **Position Médiane** : Montre une rigidité plus grande et une capacité à accumuler plus de contraintes normales internes, bien que sa réponse élastique soit notable.

3. Verre/Époxy

- **Position Externe** : Offre une résistance modérée et stable à des angles proches de 0° à 30°, mais est moins efficace que le boron et le carbone. Sa contrainte σ_{11} reste stable à des épaisseurs plus faibles.
- **Position Interne** : Présente les plus fortes contraintes résiduelles internes, indiquant une capacité de maintien de contrainte plus élevée.
- **Position Médiane** : Affiche une réponse intermédiaire avec une augmentation de contrainte à la profondeur critique, mais avec une amplitude plus faible que les autres matériaux.

Coût et Fabrication

Lors de l'évaluation des performances par rapport au coût de fabrication, voici les détails des coûts pour chaque matériau :

1. Bore/Époxy

- ❖ **Coût** : Très élevé, en raison de la complexité et du coût des matériaux de bore.
- ❖ **Avantages** : Offre des performances mécaniques supérieures, particulièrement en position externe, mais peut être prohibitif en termes de coût pour certaines applications.

2. Carbone/Époxy

- ❖ **Coût** : Modéré à élevé, dépendant de la qualité des fibres de carbone utilisées.
- ❖ **Avantages** : Un bon compromis entre performance et coût, le carbone/époxy est adapté pour des applications nécessitant une rigidité et une résistance élevées, surtout en position externe.

3. Verre/Époxy

- ❖ **Coût** : Le plus bas parmi les trois matériaux.
- ❖ **Avantages** : Bien qu'il offre une performance mécanique inférieure, son coût réduit le rend attrayant pour des applications où le budget est une contrainte majeure.

Conclusion

Pour optimiser la performance globale et le coût de fabrication, le carbone/époxy semble être le matériau le plus approprié, en particulier pour des applications nécessitant un renforcement externe. Son coût, bien que modéré, est justifiable par les performances élevées qu'il offre. Cependant, pour des applications où le coût est une contrainte majeure, le verre/époxy peut être une alternative viable en position externe, malgré ses performances inférieures. Le bore/époxy, bien que performant, est souvent prohibitif en termes de coût et devrait être réservé à des applications spécifiques où les performances mécaniques sont d'une importance critique

Bibliographie

- [1] : K.G. Satyanarayana, GGC. Arizaga, F. Wypych , « Biodégradable composites based on lignocellulosic fibers »; Progress in Polymère Science, 34, 982–1021 (2009).
- [2] : Mlle BOUDJEMA Hayet Latifa “Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables” Université d’Oran 2 Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle 2016.
- [3] : Belgacem Leila “Contribution à l’étude de l’endommagement des pipes en matériaux composites hybrides sollicités au flambement” Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem Faculté des Sciences et de la Technologie.
- [4] : Guesmi Abdelhamid . « Caractérisation d’un matériau composite stratifié à fibres de verre mat et tresse en flexion trois points statique» ,mémoire de master. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA ,2016.
- [5] : Jean-M Berthelot comportement mécanique et analyse des structure 5^e édition 2012 Lavoisier Paris IBBN : 978-2-7430-14507.
- [6] : Nadia Bahlouli « Cours Matériaux composites /DES Mécanique avancée et stratégie industrielle » IOST-ULP.
- [7] : Laurent gormet, « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes -,2008.
- [8] : Laurent Gornet , Généralités sur les Matériaux Composites, École Centrale de Nantes- 2011
- [9] : Avérous, L., Fringant, C., Moro, L. (2001). plasticized starch- cellulose interactions in polysaccharides composites. Polymer, 426565-6572.
- [10] : Sanchez-Garcia, M.D., Gimenez, E., Lagaron, J.M. (2008). Morphology and barrier properties of solvent cast composites of thermoplastic biopolymers and purified cellulose fibers. Carbohydrate Polymers, 71 235–244.
- [11] : Maurice REYNE Technologie des composites. Edition HERMES. Paris 1990.
- [12] : ZAKNOUN Kheir Eddine “L’effet de la distribution des fibres de chaque couche sur la résistance des matériaux composites” Université d’Oran 2 Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle 2023.
- [13] : Guerroum, C. E. (2020). L’effet de traitement Corona des fibres Naturelles sur les propriétés mécaniques (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [14] : GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES – CARMA –Actualisation octobre 2006.
- [15] : Carmen, M.O., Joao, B.L., Fabio, Y. (2009). Effect of cellulose fibers addition on the mechanical properties and water vapor barrier of starch based films. Food Hydrocolloids, 23 1328–1333.

Bibliographie

- [16] : Nattakan, S., Nittaya, L., Atitaya, N., Natthawut, Y. and Tawee, T. (2012). Reinforcing potential of micro- and nano-sized fibers in the starch-based biocomposites. *Composites Science and Technology*, 72 845–852.
- [17] : Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T., Cardona, F. and Aravinthan, T. (2012). Mechanical properties of chemically-treated hemp fibre reinforced sandwich composites. *Composites: Part B*, 43 159–169.
- [18] : BERTHELOT, J.-M., « Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse Des structures », 1999.
- [19] : Haddadi Manel, « étude numérique avec comparaison expérimental des propriétés thermoplastique des matériaux composites à matrice polymère », mémoire master, université Al Hadj Lakhdar, Batna, 2011
- [20] : REYNE M. - Technologies des composites (3ème édition revue et augmentée). - Paris : HERMES, 1998. - 222 p.
- [21] : CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006.
- [22] : Jean-M Berthelot comportement mécanique et analyse des structure 5^e édition 2012 Lavoisier Paris IBBN : 978-2-7430-14507.
- [23] : BELKACEMI Youcef “Analyse numérique du comportement mécanique des matériaux composite sandwich sollicité à diffère charges” Université d’Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle 2022.
- [24] : Jean Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et structures composites, le Mans, Novembre 2010.
- [25] : R. Dekiok, Etude et relation de l’influence de la vitesse de déformation sur la dimension fractale et sur la ténacité dans le cas d’un Polycarbonate, Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, juillet 1997.
- [26] : M. Reyne, Technologie des plastiques, HERMES, Paris, 1998.
- [27] : CHAMPETIER, Georges et SEKIGUCHI, Hikaru. Mécanisme réactionnel de la polymérisation anionique des lactames. *Journal of Polymer Science*, 1960, vol. 48, no 150, p. 309-319.
- [28] : Glossaire des matériaux composites-carma-actualisation octobre 2006.
- [29] : CHAI, F., RAOUL, G., WISS, A., et al. Les biomatériaux de substitution osseuse: classification et intérêt. *Revue de Stomatologie et de Chirurgie Maxillo-faciale*, 2011, vol. 112, no 4, p. 212-221.
- [30] : R. Khelif, Etude et analyse de la rupture des tubes en polyéthylène pour le transport de gaz : optimisation par la fiabilité, Thèse de Doctorat, université de Annaba, avril 2006.

Bibliographie

- [31] : W Gottfried, F. B. Ehvenstein, Matériaux polymères, Structure, propriétés et application, Hermès, Paris 2000
- [32] : MICHEL FONTANILLE, YVES GNANOU, Chimie et Physico-chimie Des Polymères (cours), 2e et 3e cycles. Dunod, Paris, 4-8, 2005. Références bibliographiques
- [33] : H. H. Kausch, N. Heymans, C. J. Plummer, P. Decroly, Matériaux polymères : Propriétés mécaniques et physiques Principe de mise en œuvre. Lausanne 2001.
- [34] : Hehn O. (2006) "Analyse expérimentale et simulation thermomécanique du Soudage bout à bout de tubes de polyéthylène". Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- [35] : J. Bost., Matières plastiques II, Technologie-plasturgie, Technique et documentation, Paris, 1982.
- [36] : SANGAM, Henri P. et ROWE, R. Kerry. Effects of exposure conditions on the depletion of antioxidants from high-density polyethylene (HDPE) geomembranes. Canadian Geotechnical Journal, 2002, vol. 39, no 6, p. 1221-1230.
- [37] : Peacock A.J. Handbook of polyéthylène : Structure, Propretés, and application, New York : Marcel Dekker, 534, 2001.
- [38] : BAILLEUL, J. L., GUYONVARCH, G., GARNIER, B., et al. Identification des propriétés thermiques de composites fibres de verre/résines thermodurcissables : Application à l'optimisation des procédés de moulage. Revue Générale de Thermique, 1996, vol. 35, no 409, p. 65-76.
- [39] : CARREGA Marc, Aide-mémoire, Matières plastiques, 2ème édition, ©Dunod, Paris, 54-62, 2005, 2009.
- [40] : Frank A., Pinter G., Lang R. W., Prediction of the remaining life time of polyethylene pipes after up to 30 years in use, Polymer Testing, Vol.28, 2009.
- [41] : Puissant S., Lignes d'extrusion de tubes - Étapes de fabrication, Techniques de l'ingénieur AM3642, 2009.
- [42] : Trifonova D., Drouillon P., Ghanem A., Vancso1 G. J., Morphology of extruded high density polyethylene pipes studied by Atomic Force Microscopy, Journal of Applied Polymer Science, Vol.66, 1997.
- [43] : Gas Research Institute, Pipeline Statistics, Distribution and Transmission, Annual Mileage Totals, Chicago 2002.
- [44] : F. Akermi, Etude de la relation entre les propriétés mécaniques et l'hétérogénéité des tubes extrudés en HDPE-100 de transport de gaz naturel par des essais de traction et d'impact mécanique, Thèse de Magister, Annaba 2005.
- [45] : F. Ashby et D.RH. Jones., Matériaux 2, Microstructure et mise en œuvre, Dunod, Paris 1991.
- [46] : Fina Chemicals, Bimodal polyethylene pipe resin with hexene comonomer, Document Technique, 1998.

Bibliographie

- [47] : Solvay Polyolefins, Eltex PE100, Document Technique, 1998.
- [48] : Hubert L., David L., Séguéla R., Vigier G., Degoulet C., Germain Y., Physical and mechanical properties of polyethylene for pipes in relation to molecular architecture, I. Microstructure and crystallization kinetics, *Polymer*, Vol.42, 2001
- [49] : Kitao K., Effect of entanglement on brittle-ductile transition in polyethylene, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 41, July 2001.
- [50] : Krishnaswamy R.K., Lamborn M. J., The Influence of process history on the ductile failure of polyethylene pipes subject to continuous hydrostatic pressure, *Advances in Polymer Technology*, Vol.24, 2005.
- [51] : Sun X., Shen H., Xie B., Yang W., Yang M., Fracture behavior of bimodal polyethylene: Effect of molecular weight distribution characteristics, *Polymer*, Vol. 52, 2011.
- [52] : McMILLAN P.F., HOFMEISTER A.M., Infrared and Raman Spectroscopy. In *Spectroscopic methods in mineralogy and geology. Reviews in Mineralogy*, Mineralogical Society of America, 1988, vol. 18, p. 99-160
- [53] : BEDDIAF HACENE “Etude des propriétés mécaniques de filaments en HDPE : Effets de quelques milieux agressifs.” UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA Faculté Sciences de l’Ingéniorat
- [54] : A. Chabbi, « Etude de la résistance des matériaux polymériques et composites en interaction avec des fluides », Mémoire de Magistère, Département Génie Mécanique, Université Larbi Ben M’hidi d’Oum El-Bouaghi, 2012, 114 p.
- [55] : S. Niou, K. Chaoui, S. Azzouz, N. Hamlaoui, L. Alimi, A method for mechanical property assessment across butt fusion welded polyethylene pipes, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 97, N° 1-4, pp 543–561. Springer-Verlag London Ltd., 2018.
- [56] : N. Kiass, R. Khelif, L. Boulanouar, K. Chaoui, Experimental Approach to Mechanical Property Variability through a High-Density Polyethylene Gas Pipe Wall, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 97, pp. 272–281, 2005, (Wiley Periodicals, Inc.).
- [57] : J. Blunt, *Matières plastiques*, Extrait de la Revue DIM avril 1990
- [58] : W. Ghabeche, « Etude de l’effet des agents oxydants et réducteurs (ESC) sur le comportement mécanique des résines HDPE 100+ à court et long termes », Département de Physique, Thèse de Doctorat, Option : Physique des Matériaux, Université Badji Mokhtar d’Annaba, 2019, 156 p.
- [59] : HADDAD NOUREDDINE “CHARACTERISATION MECANIQUE ET THERMIQUE DU POLYMER PEHD100” FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE
- [60] : Lee, K. C., Chan, H. L., & Tam, T. T. (2019). Mechanical Behavior of HDPE Composite Pipes Under Various Loading Conditions. *Journal of Composite Materials*, 53(4), 512-525.

Bibliographie

- [61] : Ismail, A. I., Hussein, M. I., & Taha, S. M. (2020). Evaluation of HDPE Reinforced with Carbon Nanotubes. *Materials Science and Engineering*, 67(2), 234-245.
- [62] : Zhang, J. H., Liu, X. Y., & Wang, Q. (2018). Thermal and Mechanical Analysis of HDPE Reinforced with Kevlar Fibers. *Polymer Engineering & Science*, 59(1), 145-157.
- [63] : Zafar, M. S., Haq, A. A., & Razak, N. A. (2021). Hybrid Reinforcement of HDPE with Basalt and Glass Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(6), 672-683.
- [64] : Bajracharya, D. P., Langford, R. W., & Wade, G. T. (2017). Mechanical Performance of HDPE Composites with Natural Fiber Reinforcement. *Journal of Natural Fibers*, 14(3), 190-202.
- [65] : Jones, F. R., Wang, L. T., & Li, Y. (2019). Effects of Graphene Nanoplatelets on the Mechanical Properties of HDPE Composites. *Composites Science and Technology*, 158(5), 211-222.
- [66] : Kim, H. M., Kim, J. S., & Lee, K. H. (2016). Fatigue Behavior of HDPE Tubes Reinforced with Carbon Fiber. *International Journal of Fatigue*, 92(7), 123-132.
- [67] : Ross, L. F., Harris, A. G., & Marshall, E. P. (2022). Impact of Surface Treatment on the Mechanical Properties of HDPE/Natural Fiber Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 102(4), 45-56.
- [68] : Li, P. Q., Huang, T. S., & Chao, R. C. (2018). Mechanical Properties and Water Absorption Behavior of HDPE/Bamboo Fiber Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(9), 644-654.
- [69] : Kim, G. B., Park, M. S., & Lee, C. H. (2017). Dynamic Mechanical Analysis of HDPE Reinforced with Silica Nanoparticles. *Polymer Testing*, 60(1), 27-35.
- [70] : BERTHELOT.J.-M, « Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse Des structures »,1999.