



République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abdelhamid IBN BADIS DE MOSTAGANEM



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie des Procédés

N° D'ORDRE : .../2024

THESE

Présentée par

Mme MOKHTAR Djamila

Pour l'obtention du

Diplôme de DOCTORAT en SCIENCES

Spécialité : génie des procédés des matériaux

**Synthèse et caractérisation d'un matériau composite à base
de fibre de verre**

Date de soutenance...../2024

Devant le jury

Président	CHOUAIIH Abdelkader	Pr	Université de Mostaganem
Examineur	CHOUGUI Abdelkader	Pr	Université de Tiaret
Examineur	HADJEL Mohamed	Pr	Université des Sciences et Technologies - Oran
Examineur	BENZEKRI BENALLOU Mokhtar	MCA	Université de Mostaganem
Invitée	ZERHOUNI Anissa	MCB	Université de Mostaganem,
Directrice de thèse	MEDJAHDI Malika	MCA	Université de Sidi Bel Abbes
Codirecteur de thèse	BENDERDOUCHE Nouredine	Pr	Université de Mostaganem

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2023-2024

الملخص

تمثل مركبات الألياف الزجاجية والراتنج تقدمًا كبيرًا في الصناعة بفضل خفتها وقوتها الميكانيكية وتنوعها مع تسليط الضوء على عدد من الجوانب الحاسمة في تطوير مواد عالية الأداء، يفتح فرصا جديدة في قطاعات متنوعة مثل الفضاء الجوي والسيارات والبناء. من بين هذه المواد، تستخدم مركبات البوليمر المقوى بالألياف الزجاجية على نطاق واسع في بناء بيوت الزراعة بسبب قدرتها على تحمل الظروف الجوية السيئة، وضمان المتانة على المدى الطويل ونقل الضوء بشكل فعال، مما يخلق ظروف نمو مثالية لذلك يفضل المزارعون هذه المركبات لضمان بيئات موثوقة ومستدامة للزراعة، من بين أمور أخرى، هذه التطورات التي تحفز البحث والتطوير المستمر في مجال المواد المركبة، وإذ يشددون على أهمية هذه الجهود في تلبية الاحتياجات المستقبلية من حيث الأداء المادي والمتانة.

يهدف هذا العمل الى دراسة القدرة على التنبؤ بمتانة الألياف الزجاجية ومركبات البوليمر عند تعرضها لحمل الشد. يتمثل النهج التجريبي في استكشاف الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة والتغيرات في محتوى الألياف الزجاجية وطول الألياف وسمك الصفائح

وتشمل العملية اختبارات الشد والانحناء المكونة من ثلاث نقاط على عينات مركبة لتقييم خصائص مثل معامل يونغ وإجهاد الكسر، وتستخدم نهج مونت كارلو بدقة، لتقييم توزيع الضرر في المادة المركبة.

تركز هذه الدراسة على التأثير الكبير لمحتوى الألياف الزجاجية مع محتوى والطول بالحجم الأمثل على الخصائص الميكانيكية (معامل يونغ وطول عمر المركب. تسلط الدراسة الضوء على أهمية سمك الصفائح في تحسين الهيكل الأداء وكسر القوة حيث يُظهر معامل يونغ الاتساق عبر السماكات المختلفة.

من ناحية أخرى، تظهر الضغوط اتجاهًا تصاعديًا مع السماكة. تعمل النتائج على تحسين فهم الخصائص الميكانيكية والتنبؤات لقدرة شد مركبات البوليمر والألياف الزجاجية واستخدمنا منهجية سطح الاستجابة (RSM) كأداة كاملة لدراسة الخصائص الميكانيكية والبصرية للمواد المركبة.

تم تصميم دراستنا بعناية لتحليل التفاعل المعقد بين العوامل المهمة مثل محتوى الألياف وطول اللوحة وسمكها، لفهم تأثيرها المباشر على الخصائص الميكانيكية مثل معامل الإجهاد والمرونة.

الكلمات الرئيسية: الدفينة، الألياف الزجاجية - البوليمر، حمل الشد، التنبؤ بالمتانة، طريقة ثني الإجهاد في مونت كارلو، منهجية سطح الاستجابة، التحسين، الإرسال.

Résumé

Les composites de fibre de verre et de résine représentent une avancée significative dans l'industrie grâce à leur légèreté, leur résistance et leur polyvalence. Leur résistance mécanique, mettant en évidence un certain nombre d'aspects critiques dans le développement de matériaux hautes performances, ouvre de nouvelles perspectives dans des secteurs aussi divers que l'aérospatiale, l'automobile et la construction. Parmi ces matériaux, les composites polyester renforcés de fibres de verre sont largement utilisés dans la construction de serres agricoles en raison de leur capacité à résister aux conditions météorologiques défavorables, à assurer une durabilité prolongée et à transmettre efficacement la lumière, créant ainsi des conditions de croissance optimales. Les agriculteurs privilégient ces composites pour garantir des environnements fiables et durables pour la culture. Ces avancées contribuent à la stimulation de la recherche et le développement en cours dans le domaine des matériaux composites et soulignent leur importance pour répondre aux besoins futurs en termes de performance et de durabilité des matériaux. Cette étude examine la capacité de prédire la durabilité des composites de fibres de verre et de polyester lorsqu'ils sont soumis à une charge de traction. L'approche expérimentale consiste à explorer les propriétés mécaniques du matériau composite et les changements dans la teneur en fibres de verre, la longueur des fibres et l'épaisseur de la plaque. Le processus comprend des essais de traction et de flexion à trois points sur des échantillons composites pour évaluer des caractéristiques telles que le module de Young et la contrainte de rupture. Précisément, l'approche de Monte Carlo est utilisée pour évaluer la distribution des dommages dans le matériau composite. L'étude met l'accent sur l'influence substantielle de la teneur en fibre de verre et de sa taille sur les propriétés mécaniques du composite (module Young et longévité). L'étude met en évidence l'importance de l'épaisseur des plaques du composite dans l'amélioration de la structure, la performance et la résistance à la rupture où le module de Young montre une cohérence à travers différentes épaisseurs. En outre, les contraintes montrent une tendance à la hausse avec l'épaisseur. Les résultats permettent d'appréhender les caractéristiques mécaniques et de prédire des composites polyester-fibre de verre. Nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse (RSM) comme un outil adéquat pour étudier les caractéristiques mécaniques et optiques des matériaux composites préparés. Notre étude a été conçue pour analyser l'interaction complexe entre des facteurs importants tels que la teneur en fibres, la longueur et l'épaisseur de la plaque, afin de comprendre leur impact direct sur les propriétés mécaniques telles que le module de contrainte et d'élasticité.

Mots-clés: serre, fibre de verre-polyester, charge de traction, prédiction de durabilité, méthode Monte Carlo, flexion des contraintes, méthodologie de la surface de réponse, optimisation, transmittance.

Abstract

Fiberglass and resin composites represent a significant advance in the industry thanks to their lightness, strength and versatility. Their mechanical strength, highlighting a number of critical aspects in the development of high-performance materials, opens up new perspectives in sectors as diverse as aerospace, automotive and construction.

Among these materials, glass fiber reinforced polyester composites are widely used in agricultural greenhouse construction because of their ability to withstand adverse weather conditions, ensure long-term durability and effectively transmit light, creating optimal growing conditions. Farmers therefore prefer these composites to ensure reliable and sustainable environments for cultivation, among other things these advances, stimulating research and ongoing development in the field of composite materials, stressing the importance of these efforts in meeting future needs in terms of material performance and durability. This study examines the ability to predict the durability of glass fiber and polyester composites when subjected to tensile load. The experimental approach is to explore the mechanical properties of the composite material and changes in the glass fiber content, the length of the fibers and the thickness of the plate. The process includes tensile and three-point bending tests on composite samples to evaluate characteristics such as Young's modulus and fracture stress and uses precisely the Monte Carlo approach, to assess the damage distribution in the composite material. The study focuses on the substantial influence of the glass fiber content and the length with the optimal size on the mechanical properties (Young's modulus and composite longevity).

The study highlights the importance of plate thickness in improving the structure performance and breaking strength where Young's modulus shows consistency across different thicknesses. In addition, the stresses show an upward trend with thickness. The results improve the understanding of the mechanical characteristics and predictions of polyester-fiberglass composites tensile capacity. We used the response surface methodology (RSM) as an adequate tool to study the mechanical and optical characteristics of composite materials. Our study was designed to analyze the complex interaction between important factors such as

fiber content, plate length and thickness, to understand their direct impact on mechanical properties such as the modulus of stress and elasticity.

Keywords: greenhouse, fiberglass-polyester, tensile load, durability prediction, Monte Carlo stress bending method, response surface methodology, optimization, transmittance

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de thèse et ma sœur et amie, Dre Medjahdi Malika, d'avoir accepté de superviser ce travail de thèse en compagnie de mon co-directeur de thèse, professeur Benderdouche Nouredine. Je leur exprime ma gratitude pour leur contribution précieuse à mon développement professionnel et personnel tout au long de ce travail. Leur soutien, leurs conseils et leur expertise m'ont permis d'évoluer en tant que scientifique.

Je remercie le Professeur CHOUAÏH Abdelkader de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Je désire grandement remercier les professeurs HADJEL Mohamed et CHOUGUI Abdelkader ainsi que Dr BENZEKRI Benallou Mokhtar, maître de conférences A, d'avoir bien voulu examiner ce travail et accepté de participer à ce jury de thèse. Mes remerciements vont également à nos chers invités, en l'occurrence, Prof. BESTANI Benaouda et Dre ZERHOUNI Anissa pour avoir accepté de participer à ce jury.

Un très grand merci à mon professeur, monsieur DOUANI Mustapha, pour m'avoir accueillie, soutenue et mis à ma disposition les locaux et le matériel indispensables au bon déroulement des travaux de recherche au sein du Hall Technologique de département de Génie Mécanique de l'université de Chlef et j'en profite également pour remercier mon ami CHEMRAK Mohamed Amine et monsieur BELAÏD Mechab pour son soutien inconditionnel.

Je remercie mon cher époux pour son soutien quotidien indéfectible et son enthousiasme contagieux à l'égard de mes travaux comme de la vie en général. Notre couple a grandi en même temps que mon projet scientifique, le premier servant de socle solide à l'épanouissement sans oublier mon fils Mohamed.

Enfin, je tiens à remercier mes parents et ma famille pour leur soutien constant et leurs encouragements. Je tiens à remercier ceux qui comptent le plus pour

moi : ma famille. A mon très cher père (décédé et Son âme précieuse) et ma très chère Maman (mon âme), C'est grâce à vous deux que j'en suis là aujourd'hui. A mes chers frères Mohamed, Mihoub , Aissa, Belguendouz, Sadouk, Nouredine et Mustapha, à mes très chères sœurs Fatima, Kheira et Zineb pour leur grande sensibilité, leur grand amour qui n'a jamais cessé de m'entourer, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis.

Table des matières

Table des matières

Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Référence	
Introduction générale	01
Chapitre I : Etude bibliographique	
I. Introduction	06
I.1 Généralités sur les matériaux composites	06
I.2 Définition	07
I.3 Classification des matériaux composites	08
I.3.1 Composites à fibres	09
I.3.2 Composites à particules.....	09
I.3.3.Composites à phase dispersée	09
I.4 Différents types de matériaux composites	10
I.4.1 Composites de Grande Diffusion GD.....	10
I.4.2 Composites Haute Performance HP.....	10
I.5. Les composants du matériau composite	10
I.5.1 La matrice.....	10
I.5.1.1.a Les résines thermodurcissables	12
I.5.1.1.a Résines polyesters insaturées.....	11
I.5.1.1.b Les résines époxydes	14
I.5.1.1.c Les résines vinylesters	15
I.5.1.2 Les résines thermoplastiques	15
I.5.2 Renfort.....	15
I.5.2.1 Fibres en carbure de silicium.....	16
I.5.2.2 Fibres en Carbone	16
I.5.2.3 Fibres d'aramide (Kevlar)	17
I.5.2.4 Fibre de verre.....	17
I.5.2.4.1 Fabrication	18
I.5.2.4.2 Ensimage.....	21
I.5.2.4.3 Rôle	22
I.5.2.4.4 Formulation	22

I.6	Structure des renforts.....	25
I.6.1	Les fibres de forme linéaire	25
I.6.2	Les formes de surface ou tissus (2D)	25
I.7	Les charges et les additifs	26
I.7.1	Les charges	26
I.7 .1.1	Les charges de renforcement	27
I.7 .1.2	Les charges non renforçantes	27
I.7 .1.3	Les Charges ignifugeantes	27
I.7.2	Les additifs	27
I.8	Elaboration de matériaux composites	27
I.8.1	Cas des composites à matrices polymère.....	28
I.8.1.1	Technologies dites en moule ouvert (moulage au contact).....	28
I.8.1.2	Moulage par projection simultanée.....	28
I.8.1.3	Technologies dites en moule fermé	28
I.8.1.3.a	Moulage sous vide	30
I.8.1.3.b	Moulage par injection basse pression de résine – RTM	31
I.8.1.3.c	Moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression	31
I.8.1.3.d	L’infusion de résine sous membrane souple	32
I.8.1.4	Les technologies pour grandes séries.....	32
I.8.1.4.a	Moulage par injection de compound – BMC	32
I.8.1.4.b	Moulage par compression de mat preimprégné - SMC	32
I.8.1.4.c	Moulage par enroulement filamentaire (ou bobinage).....	33
I.8.1.4.d	Moulage par centrifugation	33
I.8.1.4.e	Moulage par pultrusion	35
I.8.1.4.f	Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres broyées	35
I.8.1.4.g	Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues.....	36
I.9	Architecture des composites	36
I.10	Mécanismes d’endommagement des composites	38
I.10.1	La fissure matricielle.....	39
I.10.2	Décohésion fibre-matrice	39
I.10.3	Délaminage	40
I.10.4	Rupture des fibres	41
I.11	Caractérisation mécanique des matériaux composites	42
I.11.1	Essai de traction	42

I.11.1.1 Description générale d'un dispositif de traction.....	43
I.11.1.2 Eprouvette de traction.....	44
I.11.1.3 Essais de traction des éprouvettes plates.....	44
I.11.2 Essais de flexion trois points.....	44
I.11.2.1 Principe	44
I.11.2.2 Objectif	45
I.11.2.3 Géométrie particulière des éprouvettes.....	45
I.12 Contexte de l'étude	46
I.12.1 Méthodes de calcul	48
I.12.2 Méthode des éléments finis	48

Chapitre II : Etude expérimentale

Introduction	64
II. 1 Choix des matériaux	65
II.1.1 Résine de Polyesters insaturés	65
II.1.2 Système catalytique catalyseur/accélérateur	66
II.1.3 Renfort de fibre de verre	66
II.1.4 Charge utilisée.....	67
II.1.4.1 Caractéristiques du carbonate de sodium	68
II.2 Elaboration des plaques composites (fibre de verre-polyester).....	68
II.2.1 Procédés de fabrication	68
II.2.2 Préparation de l'éprouvette	70
II.3 Tests mécaniques	70
II.3.1 Essai de traction	70
II.3.2. Essais de flexion à 3 points	73
II.4 Essais chimiques	75
II.4.1 Résistance à l'acide acétique (CH ₃ COOH).....	75
II.4.2 Résistance à l'eau bouillante	75
II.4.3 Résistance à l'acide chlorhydrique (HCl)	75
II.5 Test IZOD	75
II.6 Durabilité.....	76
II.6.1. Paramètres aléatoires.....	76
II.6.2.Optimisation des paramètres de synthèse par la méthode des plans d'expériences.....	76

II.6.3 Test optique (Transmittance)	76
II.7. Résultats et discussions pour l'analyse mécanique.	77
II.7.1. Essai de traction	77
II.7.1.a. Effet du taux de fibres de verre	77
II.7.1.b. Effet de la longueur des fibres.....	79
II.7.1.c. Effet de l'épaisseur de la plaque.....	80
II.7.1.d. Essais de traction en fonction de taux de charge (CaCO ₃).....	82
II.7.2. Essai de flexion 3 points	83
II.7.2.a. Effet du taux de fibre.....	83
II.7.2.b. Effet de la longueur des fibres	85
II.7.2.c. Effet de l'épaisseur de la plaque	87
II.7.2.d. Effet de la charge CaCO ₃	88
II.8. Analyses chimique.....	89
II.8.1 Effet d'immersion dans l'acide acétique... ..	90
II.8.2 Effet d'immersion dans l'eau bouillant	91
II.9 Test IZOD.....	95
II.10. Durabilité des plaques des composite résine-fibre	96
II.11. Paramètres aléatoires.....	96
II.12 Optimisation des paramètres de fabrication à l'aide de fonctions de flexion.....	99
II.12.1. Plan d'expériences	100
II.12.2. Codage des paramètres.....	100
II.12.3 Détermination des valeurs des coefficients.....	101
II.12.3 Analyse de la qualité du modèle	102
II.12.4 Résultats d'optimisation	102
II. 13. Propriétés optique	107
Conclusion Générale	

Listes des figures et tableaux

Figures

Figure I.1. Matériau composite	07
Figure I.2. Constituants principaux des composites.....	.08
Figure I.3 .Représentation schématique d'un matériau composite de type particule-matrice, fibre courtes-matrice et fibres continues matrice.....	08
Figure I.4 .Les différents types de matrice	11
Figure I.5.Composition d'une résine polyester	13
Figure I.6. Courbe de polymérisation d'une résine polyester	14
Figure I.7. Structure moléculaire d'une résine vinylester	15
Figure I.8. Principaux matériaux de renfort	16
Figure I.9. Schéma du procédé de fibrage	19
Figure I.10. Sortie de filières.....	21
Figure I.11. Type de Roving obtenu en sortie de filières	23
Figure I.12. Formes réelles de renforts à base de fibre de verre	24
Figure I.13. Exemples des charges : a. microbilles de verre ; b. noir de carbone ; c : Silice...	25
Figure I.14. Représentation schématique de technique de moulage au contact.....	27
Figure I.15. Représentation schématique de la technique Moulage par injection basse pression de résine - RTM	29
Figure I.16. Représentation schématique de la technique de moulage par injection	29
Figure I.17. Représentation schématique de la technique de moulage par infusion	30
Figure I.18. Représentation schématique de la technique Moulage par injection de compound – BMC	32
Figure I.19. Représentation schématique de la technique de moulage par compression	31
Figure I.20. Représentation schématique de la technique de moulage par enroulement	32
Figure I.21. Représentation schématique de la technique de moulage par centrifugation.....	32
Figure I.22. Représentation schématique de la technique de moulage par pultrusion	33
Figure I.23. Constitution d'un stratifié.....	34
Figure I.24. Matériaux sandwichs à âme pleine	35
Figure I.25. Matériaux sandwichs à âme creuse.....	35
Figure I.26. Fissuration de la matrice.....	35
Figure I.27. Décohésion fibre –matrice	38
Figure I.28. Délaminage d'un composite	39

Figure I.29. Rupture de fibre	39
Figure I.30. Machine de traction INSTRON 1195	41
Figure I.31. Machine de flexion à 3 points INSTRON 1195	44
Figure II.1. Résine polyester insaturé Norsodyne S	67
Figure II.2. Fibre de verre de type (Roving)	69
Figure II.3. Procédé de moulage au contact	69
Figure II.4. Eprouvette sous forme simple pour les essais de traction.....	70
Figure II.5. Echantillon confectionné soumis au test de traction	71
Figure II-6. Dispositif expérimental de l'essai de traction.....	71
Figure II.7. Contrainte de traction σ (N/mm ²) en fonction du l'allongement Y	72
Figure II.8. Test de flexion à trois points sur INSTRON 1195	73
Figure II.9. Contrainte de flexion σ_f (N/mm ²) en fonction du l'allongement Y.....	74
Figure II.10. Éprouvette avant et sous essai de flexion	74
Figure II.11. Évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de la teneur en fibres.....	78
Figure II.12. Évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de la longueur des fibres	80
Figure II.13. Évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de l'épaisseur de la plaque.....	81
Figure II.14. Évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de pourcentage de CaCO ₃	83
Figure II.15. Contrainte de traction (N/mm ²) en fonction de Taux de fibres	84
Figure II.16. Contrainte de traction (N/mm ²) en fonction de Taux de fibres	85
Figure II.17. Contrainte de flexion σ_F (N/mm ²) en fonction de longueur des fibres	86
Figure II.18. Module d'élasticité de flexion E_F (N/mm ²) en fonction de longueur des fibres .	86
Figure II.19. Contrainte de rupture de flexion en fonction d'épaisseur	88
Figure II.20. Module d'élasticité de flexion en fonction d'épaisseur	88
Figure II.21. Module de flexion en fonction du % de CaCO ₃	90
Figure II.22. Contrainte de flexion en fonction de temps (jour) dans l'acide acétique.....	91
Figure II.23. Evolution des propriétés mécaniques dans l'acide acétique	93
Figure II.24. Contrainte de flexion en fonction de temps (jour) dans l'eau bouillante.....	93
Figure II.25. Module de flexion en fonction de l'épaisseur	93
Figure II.26. Module de flexion en fonction de taux de CaCO ₃	95
Figure II.27. Contrainte de flexion en fonction de temps (jour) HCl.....	95

Figure II.28. Représentation graphique de l'énergie absorbée en fonction de taux de fibre	96
Figure II.29. Fonction d'histogramme et de densité de probabilité de $E(x)$	98
Figure II.30. Probabilité de défaillance de $\sigma(x)$ pour différentes valeurs de % des fibres.....	100
Figure II.31. Probabilité de défaillance de $\sigma(x)$ pour différentes valeurs de longueur (L)	100
Figure II.31. Essais de qualité du module d'élasticité des contraintes et (b)	103
Figure II.32. Représentation graphique des modèles mathématiques (a) Plaque basse mince $e = 0,6$ mm, (b) Plaque mince au centre $e = 1,8$ mm, (c) Plaque haute mince $e = 3$ mm.	106
Figure II.33. Transmittance pour différents pourcentage de fibres ($X_2 = 35$ mm, $X_3 = 0,6$ mm).....	107

Tableaux

Tableau I.1. Propriétés mécaniques des fibres en carbone.....	17
Tableau I.2. Caractéristique générales de types de verre les plus courants	18
Tableau I.3. Composition élémentaire massique des trois types de verre	18
Tableau I.4. Caractéristiques mécaniques du verre E sur monofilaments.....	19
Tableau II.1. Propriétés de la résine insaturée.....	66
Tableau II.2. Propriétés de la fibre de verre (Roving).....	67
Tableau II.3. Caractéristiques physiques de carbonate de calcium.....	68
Tableau II.4. Composition chimique du carbonate de calcium « ALCAL UF-5 »	68
Tableau II.5. Essai de traction contrainte-allongement.....	72
Tableau II.6. Essai de flexion contrainte-allongement	73
Tableau II.7. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction dans les différentes longueurs de fibre de verre	78
Tableau II.8. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction dans les différentes longueurs de fibre de verre	80
Tableau II.9. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction dans les différentes épaisseurs des plaques	81
Tableau II.10. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction pour les différents pourcentages de CaCO_3	83
Tableau II.11. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en flexion pour les différents pourcentages de fibre de verre	84
Tableau II.12 : Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en flexion pour les différentes longueurs de fibre de verre	85
Tableau II.13. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en flexion pour les différentes épaisseurs de plaque	91

Tableau II.14. Représentation des propriétés mécaniques en fonction de la durée d’immersion dans l’acide acétique	92
Tableau II.15. Représentation des propriétés mécanique en fonction de la durée d’immersion dans l’eau bouillant :	93
Tableau II.16. Représentation des propriétés mécaniques en fonction de la durée d’immersion dans HCl.....	94
Tableau II.17. Représentation de l’énergie absorbée en fonction de taux de fibres	96
Tableau II.18. Module de contrainte et d’élasticité et paramètres de fabrication	99
Tableau II.19. Les valeurs codées des paramètres	100

LISTE DES ABRÉVIATIONS

PMEC	Peroxyde de méthyle éthyle cétone
L (mm)	Longueur totale de la plaque
ℓ (mm)	Largeur de la plaque
e (mm)	Epaisseur de la plaque
E	Module de Young de traction en GPa
E_c	Module de Young à pression théorique
E_T	Module de Young en GPa
σ_T (N/mm²)	Contrainte de traction
σ_F (N/mm²)	Contrainte de flexion
ε %	Allongement %
V_f	Taux volumique de fibre
S (mm²)	Surface de la plaque
V_c	Taux volumique critique
M_f	Taux massique
K₁. K₂	Coefficients de désalignement et de continuité des fibres
E_M	Module de Young pour le Polyester
F (N)	Force appliquée
R_f	Résistance à la flexion (DIM 53452) N/mm ²
R_T :	Résistance à la traction (DIN 63455) N/mm ²
σ_M	Contrainte de traction pour le polyester
σ_c	Contrainte de traction
E_{rupt.max}	Module de Young à la rupture maximale
σ_{rupt.max}	Contrainte de rupture maximale
X₁	Pourcentage de fibre
X₂	Longueur de fibre
X₃	Epaisseur de la plaque
Y₁	Contrainte
Y₂	Module d'élasticité
X	Matrice du modèle de facteurs
X_t	Transposition de la matrice du modèle de facteurs
(X_t X)⁻¹	Matrice d'information
Y	Matrice de réponse (Jacques Goupy)

Q	Coefficient de corrélation validé par recouplement
R²	Coefficient de corrélation au carré
Q²	Le pourcentage de la variation de la réponse
ISO	Organisation internationale de normalisation
ENPC	Groupe Industriel des Plastiques & Caoutchoucs

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En effet, l'utilisation et l'avancement continu des composites organiques à renfort fibreux et à matrice organique marque une étape importante dans l'évolution des matériaux dans des domaines tels que l'aéronautique, la marine, l'automobile, robotique et sont largement utilisés dans la construction de serres agricoles en raison de leur capacité à résister aux conditions météorologiques défavorables [1,2], à assurer une durabilité prolongée et à transmettre efficacement la lumière, créant ainsi des conditions de croissance optimales. Les agriculteurs privilégient donc ces composites pour garantir des environnements fiables et durables pour la culture [3,4].

On observe une croissance de l'utilisation d'une variété des fibres et de résines. Ces matériaux sont particulièrement adaptés aux structures qui requièrent une haute résistance, une grande force et des caractéristiques légères en même temps. Il est essentiel de distinguer les comportements mécaniques des matériaux composites car ils subissent, tout comme les matériaux traditionnels, une importante diminution des intégrités structurales une fois endommagés. En général, la matrice environnante est chargée de maintenir les fibres en place et de maintenir leur orientation souhaitée, les fibres étant le principal composant supportant la charge [4, 6, 7].

La matrice assure la protection des fibres contre les ruptures environnementales et facilite le transfert de charge entre eux. Par conséquent, la rupture dans les matériaux composés se produit généralement au sein de la matrice, qui a tendance à être fragile, malgré le fait que les fibres puissent rester intactes. Grâce à leur fonction de pontage à travers la surface de la matrice micro-fissurée, les fibres empêchent efficacement ou éventuellement arrêtent la propagation de la rupture de la matrice [8].

Dans le but de construire des structures plus résistantes aux dommages, de nombreuses études ont été menées au cours des dernières années afin d'approfondir notre compréhension du comportement de rupture des composites matériaux face à différents phénomènes (comme l'impact, la fissuration, etc.).

Pour comprendre le comportement mécanique de ces matériaux, il est nécessaire d'adopter une approche expérimentale en utilisant des méthodes expérimentales et une théorique en utilisant la méthode des éléments finis aux fins de comparaison et de prédiction.

Cette étude vise à étudier expérimentalement et théoriquement la prédiction de la durabilité des composites polyester-fibre de verre soumis à des charges de traction. Grâce à une expérimentation et une analyse systématique, l'étude cherche à élucider l'influence de la teneur en fibres de verre, de la longueur des fibres et de l'épaisseur des plaques sur les propriétés mécaniques du matériau composite. De plus, des méthodes de prédiction analytique, en particulier la méthode de Monte Carlo sont utilisées pour évaluer la fonction de distribution de dommages au sein du composite [9].

Les résultats de cette recherche serviront à enrichir la compréhension fondamentale des attributs mécaniques présentés par les composites polyester-fibre de verre, en plus de faciliter la formulation de cadres prédictifs cruciaux pour évaluer la durabilité de tels composites sous les rigueurs des charges de traction.

En fin de compte, ces informations sont très prometteuses pour affiner les méthodologies de conception et améliorer les performances des structures composites dans divers domaines d'ingénierie [9].

Dans le premier chapitre, une brève analyse bibliographique sur l'élaboration des matériaux composites est présentée. L'objectif est de présenter tout d'abord les connaissances sur les matériaux composites par une description de leurs constitutions et sur les propriétés des matériaux utilisés dans la simulation eu égard à l'importante diversité de ces matériaux. Sont également exposés les procédés de fabrication de ce type de matériaux.

Dans le deuxième chapitre, différents endommagements sont examinés et une analyse approfondie est fournie sur le comportement mécanique des matériaux composites, ainsi qu'une revue générale de la littérature sur le comportement des structures composites stratifiées. On se concentrera exclusivement sur les dommages causés par les matériaux composites et la présence des contraintes pendant leur processus de fabrication. [10].

Tout au long du Chapitre 3, une présentation de la méthode expérimentale sur les tests de traction et de flexion, sont présentés. Le dernier chapitre est consacré à la discussion des résultats expérimentaux et numériques, ainsi qu'à une analyse comparative entre ces résultats, suivie d'une étude fracturo-graphique des différentes zones de fracture.

Les conclusions et les points de vue tirés de cette étude sont finalement développés, Toutes les références bibliographiques sont regroupées à la fin de ce manuscrit.

Partie I

Etude Bibliographique

I. Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction

Dans divers domaines d'application, les matériaux composites ont rapidement remplacé les métaux en tant que matériaux alternatifs tout au long du vingtième siècle. L'utilisation et la croissance continue des composites organiques à renfort fibreux et à matrice organique marquent un tournant majeur dans l'histoire des matériaux [11].

Les secteurs de l'aéronautique, de la marine, de l'automobile et de la robotique utilisent de plus en plus de fibres et de résines. Cette matière se démarque dans des applications nécessitant des niveaux élevés de légèreté, de résistance et de force dans les structures. Comme les matériaux traditionnels, les composites subissent une importante perte de solidité structurelle lors de dommages causés par des attaques physiques ou chimiques, ce qui souligne l'importance d'une compréhension approfondie de leur comportement mécanique [12].

En général, les fibres jouent le rôle principal de support de charge, tandis que la matrice qui les entoure maintient les fibres dans la position et l'orientation souhaitées. La matrice joue le rôle d'un moyen de transfert de charges entre les fibres et assure une protection contre les dommages environnementaux. Donc, les défauts dans les matériaux composites se produisent généralement au sein de la matrice, qui est généralement fragile, tandis que les fibres peuvent rester intactes. Les fibres génèrent des effets de transition à travers la surface de matrice microfissure, ce qui retarde ou peut-être empêche l'évolution ultérieure de la matrice [13].

La surcharge entraîne finalement la propagation de craquelures et la rupture des fils, ce qui entraîne la faillite du matériau.

Notre objectif principal est de fournir une compréhension des matériaux composés en donnant une description de leurs compositions et des caractéristiques des matériaux utilisés dans notre simulation, en prenant en compte la diversité de ces matériaux [14].

I.2 Définition

Le matériau composite est principalement composé de renfort et de la matrice. L'interface joue un rôle essentiel dans la préservation de la cohérence entre le renfort et la matrice, assurant la compatibilité et facilitant la transmission des contraintes sans déplacement relatif. On peut ajouter des charges supplémentaires et des additifs, sous forme de liquides, de poudres ou de particules, afin de modifier ou d'améliorer certaines caractéristiques du composite, telles que la résistance aux UV et la résistance à l'impact. La Figure I.1 présente un exemple de l'organisation de la composition des composites [15].

L'objectif de cette combinaison est de produire un matériau avec des caractéristiques spécifiques, notamment des caractéristiques mécaniques en termes de densité, qui dépassent celles de la matrice non renforcée. Grâce à une sélection minutieuse des composants et de leurs proportions correspondantes, ainsi qu'à la prise en compte de la forme, de la taille et de l'arrangement de renforcement, le concept de matériau composite facilite la création d'un matériau avec les caractéristiques spécifiques souhaitées.

Les composites peuvent être fabriqués afin de satisfaire des exigences de conception particulières, tandis que les matériaux traditionnels sont généralement conçus en fonction des caractéristiques de leurs composants (Figure I.2).

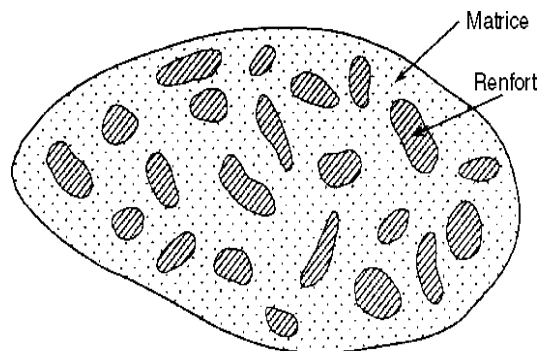


Figure I.1. Matériau composite [1]

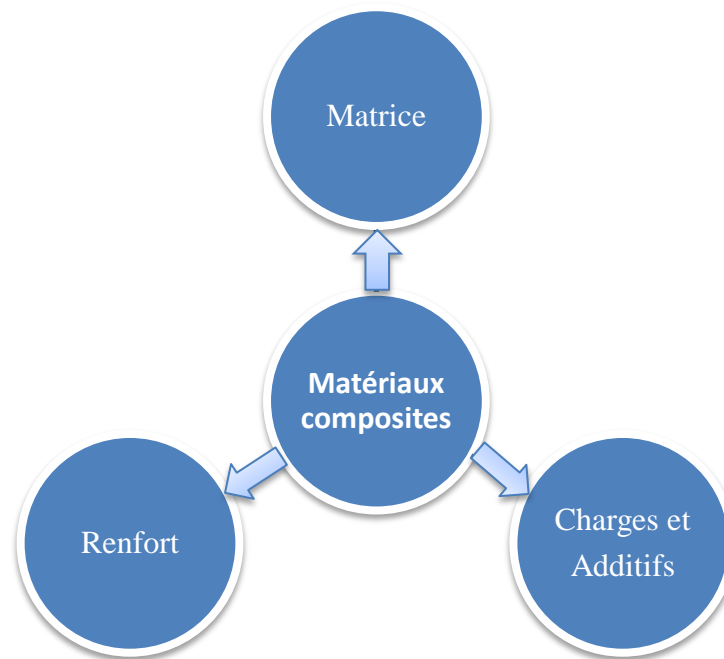


Figure I.2 : Constituants principaux des composites

I.3 Classification des matériaux composites

D'un point de vue général, les matériaux qui constituent la matrice peuvent être des métaux, des céramiques ou des polymères. On peut utiliser des renforts de type particulaire ou fibreux (Figure I.3.). On distingue les fibres courtes (longueur : 0,1 mm à 1mm), longues (longueur : 1 mm à 50 mm) et continues (longueur supérieure à 50 mm). Dans la suite, nous ne nous intéresserons qu'à la famille de composites faisant l'objet de cette thèse : fibres longues et matrice polymère [13,14].

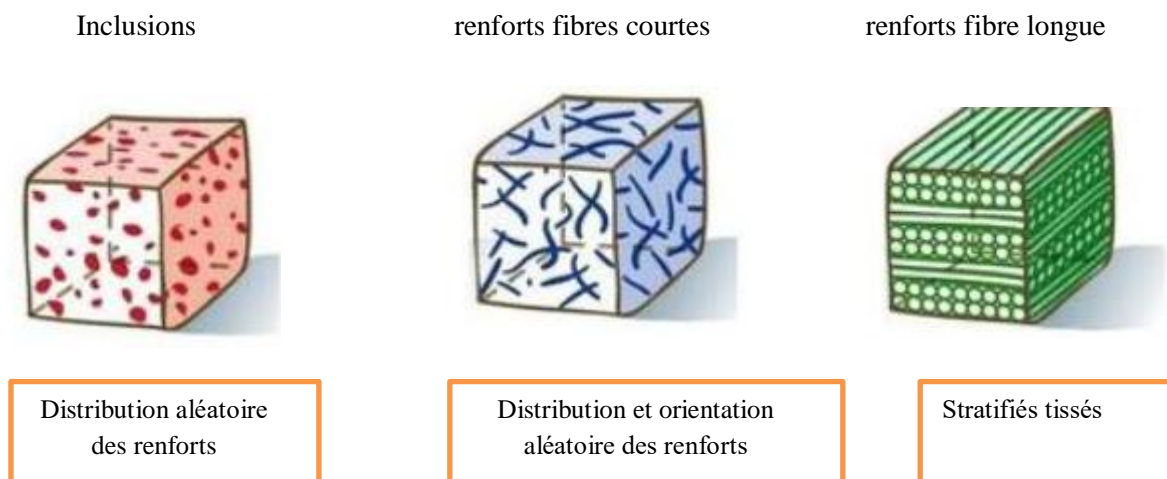


Figure I.3 : Représentation schématique d'un matériau composite de type particule-matrice, fibres courtes-matrice et fibres continues matrice [2]

Ces matériaux sont conçus pour transférer la contrainte aux fibres en profitant de la flexibilité de la matrice en raison de leur haute résistance et de leur bonne ténacité. Pour les applications industrielles, ces composites sont les meilleurs grâce à leur résistance exceptionnelle aux entailles. La résistance de ce type de composite est déterminée par la matrice, la géométrie et le type de renfort. Ainsi, on peut dire que le type de matrice utilisé détermine comment les composites de fibres sont fabriqués. Par exemple, pré-imprégner les fibres dans la résine, puis les soumettre à un processus de polymérisation, que cela se fasse ou non sous charge.

Les matériaux composites sont généralement définis comme des combinaisons de fibres de renfort, qu'elles soient continues ou discontinues, incorporées dans une matrice ayant une résistance mécanique inférieure. La matrice a pour rôle de transférer les contraintes appliquées au composant tout en préservant la géométrie des fibres [3].

I.3.2 Composites à particules

Bien que les particules incorporées dans la matrice de ces composites soient de taille supérieure aux microns, leur structure est comparable à celle des composites à phase dispersée. Ce sont généralement des matrices cubiques centrées sur le visage renforcées par des particules cubiques centrées. Contrairement aux composites à phase dispersée, la matrice ne porte qu'une partie de la charge dans ce cas. Les cermets (particules de céramique et matrice métallique), les polymères renforcés et les mélanges de métaux sont tous inclus dans ce groupe de composites. Les composites de particules sont produits en utilisant des méthodes de métallurgie des poudres. En plus de leur résistance, ces matériaux ont de nombreux autres avantages, c'est pourquoi ils sont utilisés dans un large éventail d'applications industrielles telles que les écrans de rayonnement, les contacts électriques, les outils de coupe et de forage, les buses de fusée, etc.

I.3.3 Composites en phase dispersée

Les particules dures de cette catégorie sont finement dispersées et généralement inférieures à un dixième de micron. Les particules sont des oxydes, des carbures ou des borures qui sont dispersés dans la matrice, qui est typiquement métallique et agit comme un matériau porteur. Cette dispersion a l'avantage de diminuer la capacité de déformation de la matrice. L'industrie utilise des composites en raison de leurs avantages, notamment leur résistance et leur stabilité à des températures extrêmement élevées.

I.4 Différents type de matériaux composites

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes classes : les composites à grande diffusion et les composites hautes performances.

I.4.1 Composites de Grande Diffusion GD

Les matériaux composites largement utilisés connus sous le nom de "composites à haut volume" (CVH) ont des propriétés mécaniques légèrement inférieures, mais sont rentables pour la production à grande échelle. Ces matériaux représentent 95 % de l'utilisation des composites. Ils sont généralement constitués de plastiques renforcés ou de polymères, avec des niveaux de renforcement d'environ 30 %. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas contrôlée en raison de l'utilisation de fibres courtes comme renforts. Les principaux constituants de base sont les résines de polyester (qui constituent 95 % des résines thermodurcissables) combinées aux fibres de verre. Les renforts et les matrices sont rentables.

I.4.2 Composites de Haute Performance HP

Les matériaux composites "haute performance (HP) se caractérisent par des qualités mécaniques spécifiques élevées et des coûts unitaires élevés, principalement utilisés dans les industries aérospatiale et spatiale. En général, ces composites sont renforcés par de longues fibres, ce qui influe sur leur coût, avec un taux de renforcement dépassant les 50%. Comparativement aux métaux, ces composites offrent des caractéristiques mécaniques (résistance et rigidité) bien supérieures [4].

I.5. Les composants du matériau composite

Un matériau composite est donc composé de plusieurs constituants de nature différente :

- Matrice
- Renfort

I.5.1 Matrice

La matrice est utilisée pour transférer les contraintes et lier les différents éléments de résistance. De plus, cela offre une protection contre les facteurs environnementaux et garantit leur entretien dans une forme compacte. On utilise principalement deux types de matrice : les résines thermodurcissables (TD) et les résines thermoplastiques (TP) [5]. La principale différence entre eux réside dans leur processus de formation. Dans le cas de TP, la structure est composée de chaînes de polymères distinctes, ce qui signifie que la transformation est réversible car ces chaînes ne sont pas liées par des liens chimiques covalents. En revanche, les TD construisent leur structure trois-dimensionnelle grâce à la formation de liens covalents, ce qui conduit à une transformation irréversible et à une matrice composée d'une seule molécule. Les différents types de matrice sont regroupés sur la Figure I.4.

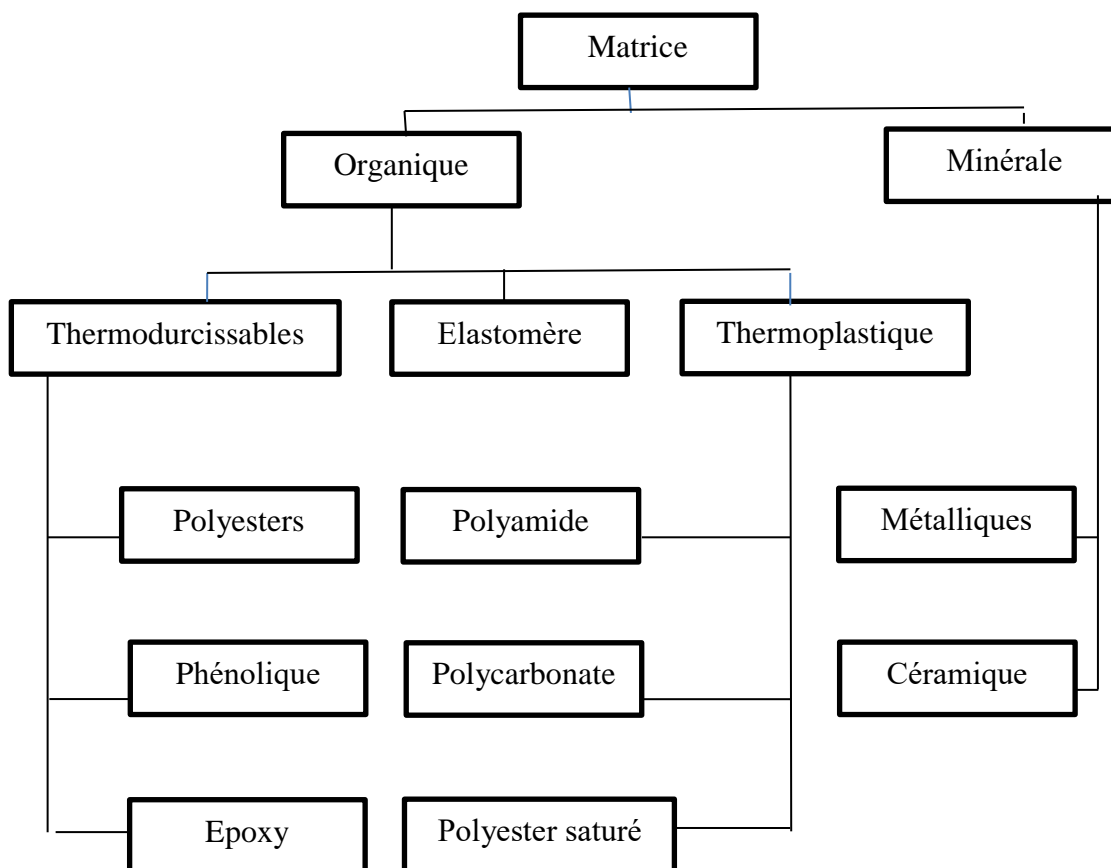


Figure I.4. Les différents types de matrice

I.5.1.1 Les résines thermodurcissables

Actuellement, un large éventail de résines thermodurcissables est disponible à travers le monde, parmi lesquelles les plus couramment utilisées, notamment dans divers secteurs industriels [6], sont les résines polyesters insaturées et les résines époxydes. Ces résines sont largement choisies en raison de leurs propriétés spécifiques et de leur adaptabilité à une gamme variée d'applications.

I.5.1.2 Résines polyesters insaturées

I.5.1.2.a . Structure

La résine polyester insaturée est élaborée en dissolvant des molécules de polyester insaturé dans un solvant réactif, souvent du styrène. Ces molécules de polyester sont produites par la polycondensation de l'acide maléique (un acide carboxylique insaturé), d'un acide phtalique et d'un polyalcool tel que l'éthanol-1,2.

Le dosage précis de l'acide maléique permet de réguler la densité de réticulation de la résine, influençant ainsi ses propriétés finales. Pour initier la réaction de réticulation entre le styrène et l'acide maléique, nécessaire à la formation de chaînes de polyester, un peroxyde est ajouté lors de la mise en œuvre, agissant en tant qu'initiateur de réaction radicalaire en chaîne. De plus, un catalyseur tel que les ions de cobalt peut également être incorporé. Le dosage de styrène est un facteur crucial, influençant la viscosité initiale de la résine ainsi que ses propriétés finales, telles que sa fragilité et sa résistance aux produits chimiques [7].

La maîtrise précise de ces paramètres est essentielle pour obtenir des résines présentant les caractéristiques désirées pour une application donnée. Il existe une variété considérable de formulations de résine polyester insaturée, caractérisées par des diols, des acides et des concentrations relatives différents. Cependant, une première distinction peut être établie selon la nature de l'acide phtalique, donnant lieu aux résines orthophtaliques et aux résines isophtaliques. Les résines polyester orthophtaliques sont les plus répandues parmi les formules de résine polyester insaturée. Elles sont produites à partir d'anhydrides orthophtaliques (saturés) et maléiques (insaturés), permettant de contrôler le degré de réticulation de la résine. Bien que les résines polyester orthophtaliques soient économiques, leurs résistances thermiques et chimiques sont limitées, et elles ont tendance à absorber l'humidité, ce qui compromet la durabilité des composites renforcés de fibres en les rendant

plus sensibles à l'humidité. De plus, elles présentent un retrait significatif, ce qui rend le démoulage des pièces difficile.

I.5.1.2.b. Les résines isophtaliques

Les résines isophtaliques sont synthétisées à partir d'acide isophtalique. Comparées aux résines orthophtaliques, elles sont généralement plus coûteuses et plus visqueuses. Cependant, elles offrent une meilleure résistance chimique ainsi qu'à l'hydrolyse. Cette caractéristique accrue en termes de résistance les rend particulièrement adaptées à des applications nécessitant une durabilité et une stabilité chimique élevées, même dans des environnements corrosifs ou exposés à l'humidité.

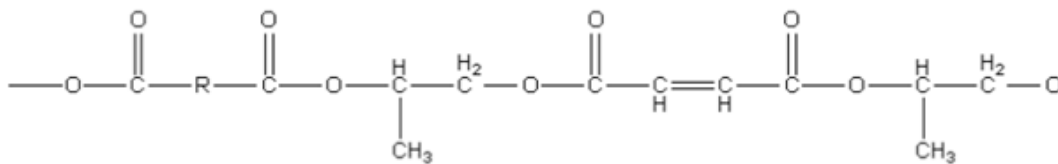


Figure I.5. Composition d'une résine polyester [8]

I.5.1.2.c. Propriétés

Grâce à leur résistance chimique exceptionnelle et à leur module d'élasticité relativement élevé, les résines polyester insaturées présentent une rigidité remarquable [9]. Ils sont simples à manipuler et garantissent un lissage efficace des fibres, avec une polymérisation qui se produit à température ambiante. De plus, leurs coûts de production sont inférieurs à ceux d'autres matériaux tels que les résines en émail époxy. Cependant, leur résistance à la chaleur reste inférieure à 120°C pendant de longues périodes d'utilisation, ce qui est considéré comme médiocre [10]. Exposés à l'ultraviolet, ils peuvent se détériorer et se briser. On considère également que ces résines sont inflammables en raison de la présence de styrène. Il est courant d'utiliser des résines polyesters non saturés dans la construction des bateaux, cuves, éoliennes, etc.

La polymérisation ou réticulation est le terme utilisé pour décrire le processus de durcissement des résines de polyester. Un accélérateur et un catalyseur dans la résine sont nécessaires pour le processus chimique connu sous le nom de polymérisation. Typiquement, un peroxyde organique (tel que le peroxyde de méthyléthylcétone (MEKP en anglais) sert de

catalyseur et un octoate ou un sel de cobalt naphtéate agit comme accélérateur. Le graphique ci-dessous décrit une réaction exothermique qui produit de la chaleur.

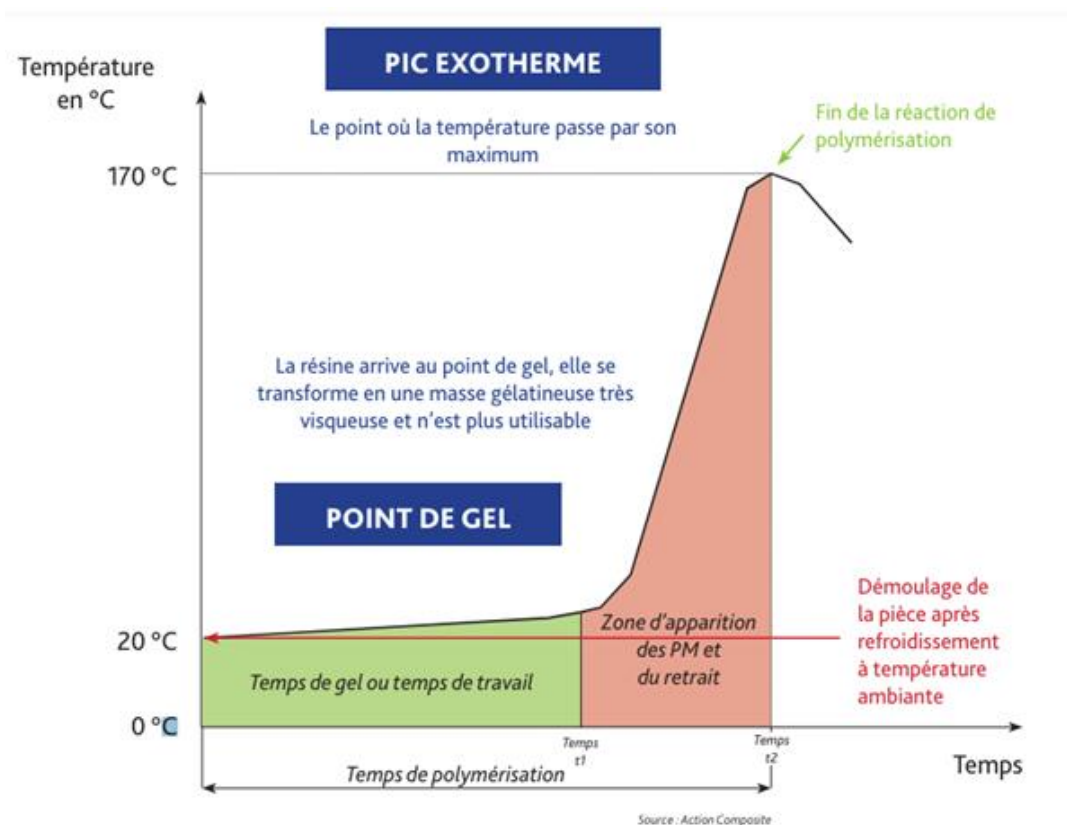


Figure I.6. Courbe de polymérisation d'une résine polyester [11]

I.5.1.1.b Les résines époxydes

Suite aux résines polyesters non saturés, les résines époxy sont le deuxième type de résine le plus utilisé. Néanmoins, leur part de marché représente seulement 5 % du secteur composite à l'échelle mondiale en raison de leur coût élevé [12], environ 5 fois plus élevé que celui des résines polyester. En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques telles que la traction, la flexion, la compression, le choc, le fluage, etc., les résines en émail sont supérieures aux polyesters. Elles présentent également une grande résistance chimique et peuvent supporter un peu plus de température (jusqu'à 160 °C) [12]. Malgré leur bonne mouillabilité des renforts, les résines époxydes sont sensibles à la fissuration. Elles possèdent un temps de polymérisation assez long.

I.5.1.1.c Vinylesters

Les résines vinylesters sont une sorte de polyester fabriqué à partir d'acides acryliques. Ils sont néanmoins inflammables malgré une résistance exceptionnelle à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion.

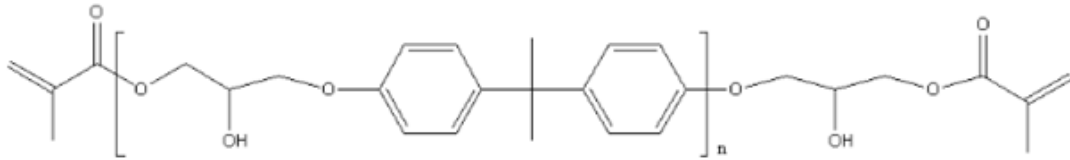


Figure I.7. Structure moléculaire d'une résine vinyle ester [8]

I.5.1.2 Les Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont des matériaux polymères constitués de macromolécules qui se condensent ou se transforment au-delà de leur température de transition vitreuse (T_g) et peuvent être sculptées en viscosité à cette température basse. Parmi les thermoplastiques, on peut citer le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP). On peut les rendre sensibles à la chaleur de manière réversible, ce qui permet de les former ou d'extruder avant de les refroidir et de les héberger à nouveau.

I.5.2 Renforts

Un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus) [13]. La Figure I-8, indique la classification des types de renforts couramment rencontrés

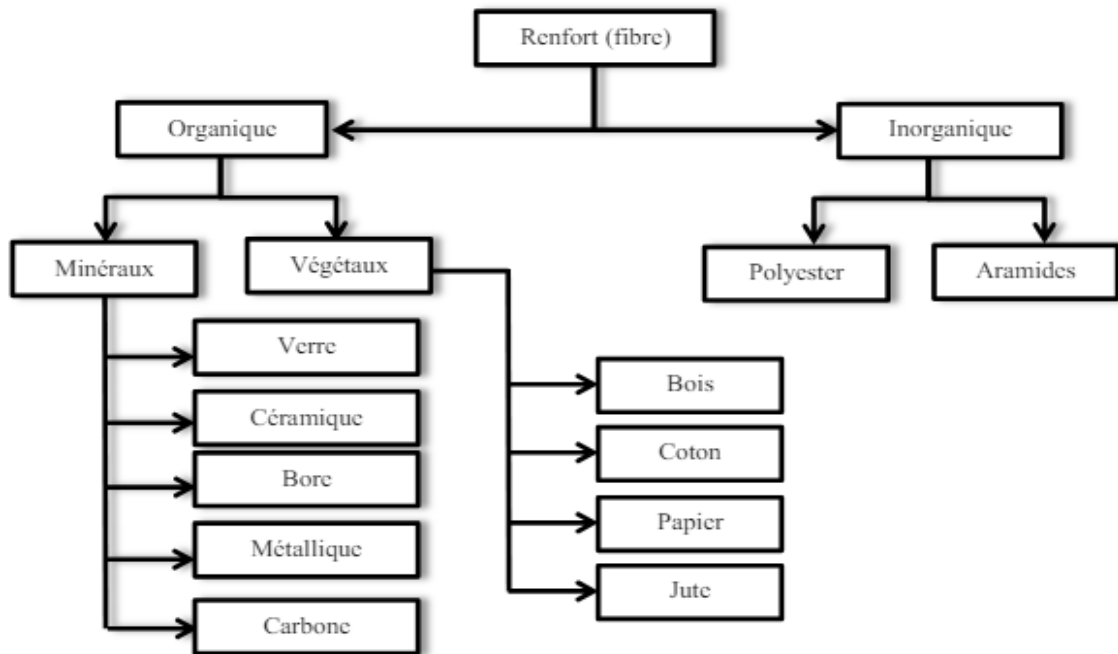


Figure I.8. Principaux matériaux de renfort [14]

I.5.2.1 Fibres en carbure de silicium

À partir d'environ 500°C, les fibres de carbure de silicium apparaissent comme une solution efficace contre l'oxydation du carbone. Ces fibres sont largement utilisées, notamment dans le secteur de l'aéronautique, grâce à leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, leurs diamètres généreux et leur stabilité thermique remarquable. Elles sont principalement destinées à l'intégration dans des matrices en céramique ou métallique [15]. Malheureusement, leur large utilisation est entravée par les coûts élevés de production.

I.5.2.2 Fibres en Carbone

Cette forme de renforcement découle de la combustion de fibres polymères, qui ont pu être tressées ou tissées auparavant, comme le rayon et surtout le polyacrylonitrile [16]. Les fibres de carbone ont connu une croissance significative dans les composites conçus pour des applications "haute performance", en particulier dans des secteurs exigeants tels que l'aviation. On peut trouver des fils de carbone continus dans différentes configurations, telles que les tapis, les fibres de carbone continues sont disponibles sous diverses formes de mèches de 3000 à 24000 filaments qu'ils soient unidirectionnels ou multidirectionnels. Ils présentent un faible coefficient d'expansion thermique, une conduction thermique élevée et des caractéristiques spécifiques supérieures, telles qu'un module de traction plus élevé. Cependant, ils présentent certains inconvénients, tels que (une résistance à l'abrasion

médiocre et une résistance à l'impact limitée. Les caractéristiques des fibres de carbone utilisées sont brièvement regroupées dans la Tableau I.1 ci-dessous.

Tableau I.1. Propriétés mécaniques des fibres en carbone [17]

Module de Young	E_f	180 à 230 GPa
Coefficient de poisson	ν_f	0.18
C.T.E	(α_f)	0.05 E-005 °C ⁻¹
Température max d'utilisation	T_{max}	2000°C
Résistance à la traction	R_t	2.2(GPa)

I.5.2.3 Fibres d'aramide (Kevlar)

L'aramide (dont le nom chimique est para phénylène-téréphtalamide ou PPD-T) est une fibre chimique et synthétique, apparue dans les années 1960. Il s'agit de polymères thermoplastiques (d'origine pétrochimique) constitués de noyaux aromatiques, séparés par des groupes amides. L'aramide est une fibre de résistance exceptionnelle employée dans la fabrication de gilets pare-balles et d'autres protections balistiques, en raison de sa plus grande résistance et résistance à l'impact par rapport aux fibres de carbone.

I.5.2.4 Fibre de verre

Aujourd'hui, les fibres de verre représentent environ 95% des composites de renforcement. Naturellement inorganiques, ils sont généralement considérés comme ayant des caractéristiques isotropes et possèdent une résistance exceptionnelle à la rupture, supérieure à celle de certains métaux. Cependant, en raison de leur vulnérabilité aux microfissures, les fibres de verre sont naturellement fragiles et attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Ces fibres sont très répandues dans des applications à basses performances ainsi que des applications hautes performances telle que les réservoirs de propulseurs de fusée.

Le verre peut être catégorisé en verre E, C, D, R ou S en fonction de la méthode de fabrication du mélange de préparation. Par conséquent, les propriétés de chaque type de verre

varient également. Les caractéristiques spécifiques des fibres de verre sont récapitulées dans le Tableau I.2.

Tableau I.2. Caractéristiques générales de types de verre les plus courants

Type	Indication générale
E	Usage général - Bonnes propriétés électriques
D	Hautes propriétés diélectrique
A	Haute teneur en alcalins
C	Résistance chimique en milieu acide
R ; S ; S2 ; H ; HS	Haute résistance mécanique
AR	Résistance en milieu acide et basique
E-CR	Pour usage en milieu acide

I.5.2.4.1 Fabrication

La composition chimique de l'alumine borosilicate est celle d'une alumine alcaline faible (Tableau I.3.). Les réseaux de silicium tétraédrique forment la structure du matériau. On modifie cette structure en introduisant d'autres oxydes, qui permettent de réduire la température de fusion (B_2O_3 , CaO), d'améliorer les caractéristiques mécaniques (Al_2O_3) ou de conférer des caractéristiques spécifiques telles que les caractéristiques diélectriques (B_2O_3).

Tableau I.3. Composition élémentaire massique des trois types de verre

Constituants (%m)	E	R	A
SiO_2	52-62%	60	72
Oxydes alcalins (Na_2O_3 ; K_2O)	<2%		14-16
Oxydes alcalino-terreux (CaO ; MgO)	16-30%	9-6	8-2
B_2O_3	0-10%		0-6
Al_2O_3	11-16%	25	0-6
TiO_2			0-0.6
Fe_2O_3	0-1%		0-0.5
HF	0-2%		0-0.4

La fabrication des fibres (Figure I-9) consiste à acheminer le mélange vitrifiable vers des appareils de filtration. À partir de là, les filaments produits sont rapidement extraits et refroidis. On désigne cette méthode sous le nom de fusion directe. Par la suite, ces filaments sont regroupés en longueurs et rassemblés en Rovings. Conformément à l'équation I-1, la masse linéaire (ou le nombre) du fil de base est exprimée comme la somme du nombre N de monofilaments assemblés en parallèle sans torsion et de leur diamètre ϕ .

Il est important de souligner que la taille est appliquée à la surface des fibres immédiatement après leur sortie de filière. En effet, les filaments de verre nus ne peuvent pas être utilisés directement pour diverses raisons (absence de cohésion, fragilité du verre à l'abrasion et à l'attaque de l'eau, ainsi que la production charges d'électrostatique). Afin de remédier à ces lacunes et donner certaines caractéristiques, un ensimage est appliqué sur la surface des fibres de verre. Cette méthode permet la fabrication continue de fibres avec des diamètres contrôlés en ajustant les diamètres de la filière et les températures de rotation, ainsi que les vitesses de dessin et de refroidissement [18,19].

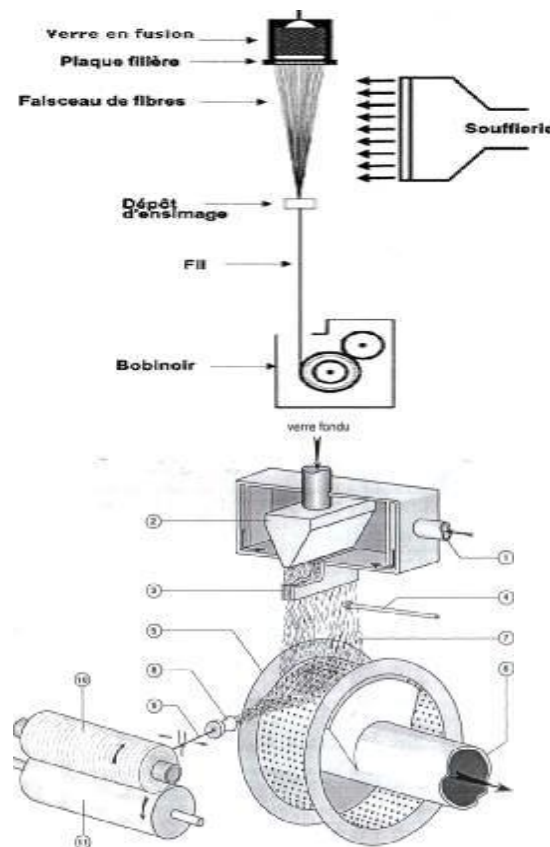


Figure I.9. Schéma du procédé de fibrage [22]

On évalue généralement les caractéristiques mécaniques de Glass E en utilisant des monofilaments prélevés directement après l'extrusion des filières (fibres vierges) (Tableau I.4.) [20].

Tableau I.4. Caractéristiques mécaniques du verre E sur monofilaments [20]

Masse volumique ρ_f (g /cm ³)	2.60
Module de Young E_f (MPa)	73000
Contrainte à rupture allongement à rupture ϵ_f (MPa)	3400
Allongement à rupture σ_f (%)	4.5

Les valeurs sont fournies pour les monofilaments. Cependant, ils seront soumis à diverses sollicitations mécaniques par la suite, ce qui réduit les données initiales de rupture [21]. Il convient de souligner que la contrainte de rupture d'une fibre incorporée dans un composite diminuera à 2400 MPa.

Il est également important de noter que les fibres de verre conservent leurs caractéristiques mécaniques même à des températures relativement élevées, environ 200°C pour fibre de verre-E. Par conséquent, ces fibres sont idéales pour renforcer des résines résistant à des températures élevées.

I.5.2.4.2 Ensimage

La surface des fibres subit un traitement, appelé ensimage, dans le but d'éviter les ruptures lors de leur processus et d'améliorer l'adhérence de la résine choisie. Les tailles commerciales universelles comprennent principalement des agents de formation de films basés sur des d'oligomères époxydes et des agents de couplage de silicium compatibles avec les matrices.



Figure I.10. Image de sortie de filières [22]

I.5.2.4.3 Rôle

L'objectif principal de l'ensimage est de préserver la fibre de verre contre l'abrasion lors des différentes étapes de fabrication de renforcement et d'assurer la cohérence de la fibre afin d'assurer l'intégrité du fil de base. Cependant, elle joue également un rôle lors de la fabrication de composants, en améliorant la ténacité des fils, leur résistance et leurs caractéristiques antistatiques, entre autres. Il est important de souligner que l'objectif principal du dimensionnement est de garantir la compatibilité entre le cristal et la matrice afin d'obtenir des performances composites optimales avant et après l'âge (résistance à l'eau, résistance à la chaleur, etc.).

I.5.2.4.4 Formulation

Afin d'accomplir toutes ces fonctions, les formulations spécifiques à chaque fabricant et gardées confidentielles ont pour principaux composants:

- ✓ des agents de formation de film solide qui garantissent la cohésion des fils et favorisent l'implantation par la matrice. Ils sont sélectionnés afin de s'adapter à la matrice polymère prévue. En plus du lubrifiant, ils offrent une protection aux fils contre l'abrasion.
- ✓ des agents de couplage ou pontants permettant de créer des liaisons solides entre la fibre et la résine, tout en offrant une protection contre les effets de l'âge tels que l'attaque par le sable. Ils sont des organosilanes.

✓ le lubrifiant favorise la dispersion des fibres et offre principalement une protection et une lubrification des fibres. Il s'agit de surfactants.

Dans certaines situations, des agents antistatiques, qui éliminent les charges électrostatiques, des agents anti-mousse, etc., sont employés [23-24].

Gorrowsa et ses collègues [25] ont étudié les brevets américains [26-27] afin de déterminer les agents utilisés et leurs proportions. En tant qu'indicateur, ils fournissent la proportion relative de chaque composant dans une taille typique pour les fibres de verre utilisées avec des résines thermodurcissables (Figure I-8). Le principal élément de l'extrait sec est l'agent de formation de film. Plusieurs études ont été menées sur des fibres de verre de taille commerciale, mais celles qui contiennent des composants de taille connues sont très limitées [25, 28].

Quelques additifs présents ont plusieurs fonctions et peuvent même avoir des effets opposés, tels que l'agent couplant et le lubrifiant. De plus, en raison des procédés de fabrication des fibres, la cristallisation doit nécessairement se faire dans de l'eau. Dans les quelques millisecondes qui suivent la formation et le refroidissement, les fibres de verre sont généralement recouvertes de silicone, généralement en contact avec un applicateur circulaire qui transporte une couche d'un mélange aqueux de coupants, de lubrifiants, de polymères émulsionnés, etc. On utilise souvent de l'eau en quantités importantes de très haute qualité pour diverses fonctions.

Le principal rôle est de refroidir les fibres, mais il agit également comme un support pour l'ensimage [18, 29]. La quantité (extrait sec) accumulée sur la surface des fibres est très faible, généralement comprise entre 0,2 et 2 % par masse des fibres [27, 28], mettant en évidence l'importance du liquide de support dans le processus de fabrication. En outre, Liao [29] a démontré à l'aide d'une analyse IRTF que le pH de la solution de traitement aqueuse a un impact significatif sur la liaison interfaciale. Plusieurs études indiquent que la répartition de l'ensimage n'est pas homogène dans toutes les trois dimensions (Figure I.9.) [19, 27, 28]; et que son épaisseur varie en fonction du diamètre de la fibre

Un certain nombre d'additifs présents ont plusieurs et même des fonctions opposées, telles que le coupleur et le lubrifiant. En outre, en raison de la fabrication des fils, les tailles doivent nécessairement se transformer en une émulsion aqueuse.

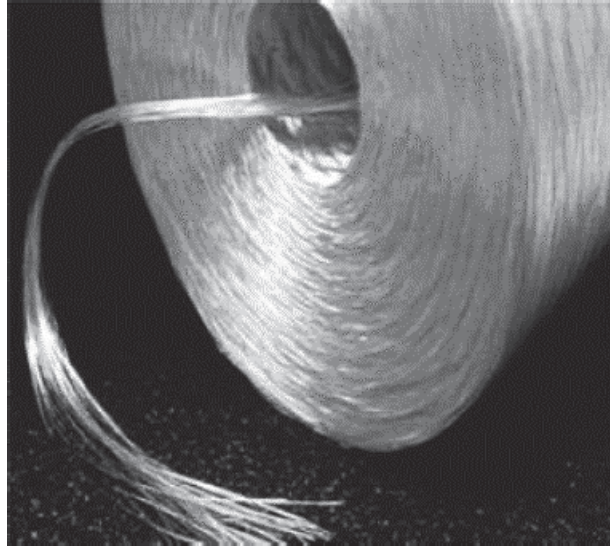


Figure I.11. Type de Roving obtenu en sortie de filières

I.6 Structure des renforts

Le type de structure de renforcement le plus souvent utilisé dans le secteur des composites est le renforcement fibreux, qui vise à minimiser le volume tout en maintenant la rigidité et la résistance requises. Les structures de renforcement se déclinent principalement en deux types :

I.6.1 Les fibres de forme linéaire : Elles ont des dimensions de quelques micromètres ou moins. Ils sont assemblés pour former des fils ou des brins de forme différente.

I.6.2 Les formes de surface ou tissus (2D) : Elles sont principalement composées de fibres de verre, telles que des bandes, des tapis et des tissus, et sont appliquées aux composants formés (coques ou plaques) en tant que structures bidimensionnelles (2D).

Les mats sont constitués de couches de fibres irrégulières, appelées filaments, qui sont organisées dans n'importe quelle direction, ce qui les rend bon marché, pliables et quasi-isotropes dans leur plan. Cependant, ils ne sont pas aussi solides mécaniquement que les matériaux tissés ou unidirectionnels. Les textiles sont créés sur des métiers à tisser en tissant des brins ensemble dans la chaîne et la trame, deux directions perpendiculaires. Ils peuvent être tissés de diverses façons, y compris le satin, le taffetas, le sergé et l'armure unie, et le motif de ce tissage régule la rigidité du tissu.

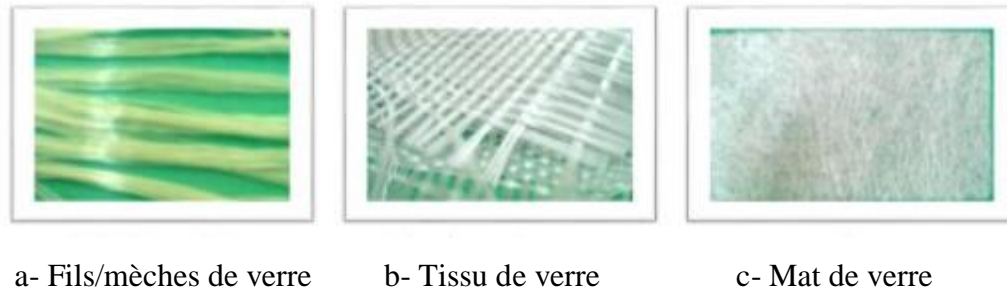


Figure I.12. Formes réelles de renforts à base de fibre de verre [27]

I.7 Les charges et les additifs

I.7 .1 Les charges

Les charges et additifs, dont il existe de nombreuses variétés, sont généralement indispensables pour atteindre les qualités des polymères, qu'ils soient utilisés en isolation ou comme matrice de composites. Les particules solides dispersées dans la matrice sont appelées charges. Elles sont utilisées de la même manière que les plastiques "traditionnels" et peuvent être minéraux, organiques (végétaux ou synthétiques) ou métalliques. À titre d'illustration, nous pourrions rencontrer sur la Figure I.13 :

- les microsphères de verre, qui allègent la matrice et augmentent la résistance à la compression en plus des renforts primaires;
- le noir de carbone est utilisé comme antioxydant, barrière UV et pigment noir;
- les particules de silice pour diminuer le retrait de la matrice pendant le moulage et pour augmenter ses propriétés isolantes (thermiquement, électriquement et acoustiquement);
- les paillettes ou poudres métalliques pour augmenter l'usinabilité de la matrice, la résistance à l'abrasion et aux chocs, ainsi que la conductivité électrique et thermique;
- des billes thermoplastiques pour augmenter la ductilité des matrices thermodurcissables et, par conséquent, leur résistance à la rupture.

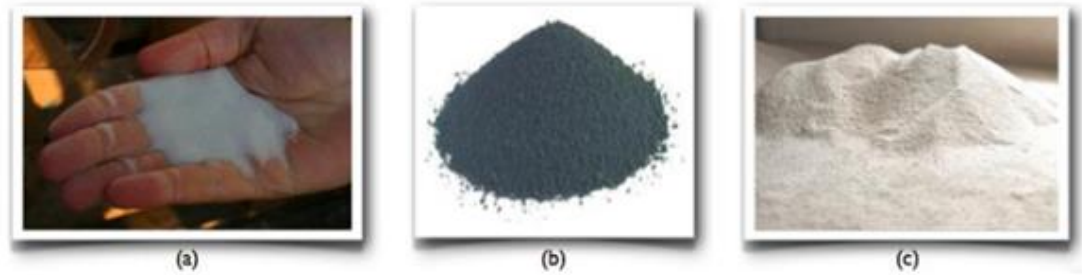


Figure I.13. Exemples des charges : a. microbilles de verre ; b. noir de carbone ; c : silice.

I.7 .1.1 Charges renforçantes

L'objectif de l'incorporation des charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométriques en :

- Charges sphériques
- Charges non sphériques

I.7 .1.2 Les charges non renforçantes

Pour réduire le coût de la résine, ces matériaux sont ajoutés à la résine. Ils sont extraits des minerais, qui comprennent le carbonate de calcium, le talc, le kaolin et les silices. Ces charges augmentent la densité, la dureté, la viscosité, le module d'élasticité et la stabilité dimensionnelle de la matrice en raison de leur incorporation. Néanmoins, cela entraîne une diminution du prix, de la résistance à la traction et de la résistance à la flexion du composite.

I.7.1.3 Les charges ignifugeantes

Des charges ignifugeantes telles que l'hydrate d'alumine, oxyde d'antimoine peuvent entrer dans la formulation.

II.7.2 Les additifs

Il s'agit de matériaux qui sont introduits dans la résine en petites quantités, généralement sous forme de pourcentage massique, pour modifier ou améliorer le comportement rhéologique ou les propriétés du produit final :

Les additifs se trouvent en quantités infimes (quelques pour cent ou moins) et ont les fonctions suivantes :

- Les lubrifiants et les agents de démoulage sont des additifs conçus pour rendre la résine de façonnage plus facile et moins susceptible de coller aux mandrins, moules et autres surfaces [31, 32].

- Les pigments sont des substances insolubles qui sont exposées sous forme de flocons ou de poudre. Ces pigments peuvent également être utilisés pour fabriquer des pâtes colorantes, qui sont des pâtes faites de dispersions de pigments dans un plastifiant ou une résine pour faciliter l'application.

- Les substances organiques solubles dans l'eau ou un solvant organique sont appelés colorants. Leur faible résistance chimique et thermique limite généralement leur application. Les distances entre les atomes du monomère initial diminuent lors de la polymérisation de la résine [31, 33].

Cela entraîne le rétrécissement de la résine polymérisée, ce qui peut provoquer la déformation ou le micro-défilement des pièces moulées. Les charges présentes dans la résine limitent le retrait, mais pour minimiser ou éliminer complètement ce phénomène, il est généralement nécessaire d'inclure des produits chimiques spécifiques anti-rétrécissement (également appelés additifs "low profile" et "low shrink"). De plus, ces produits améliorent le flux des matériaux lors des processus de moulage spécifiques. Ces composés anti-rétrécissement sont souvent commercialisés sous forme de poudre ou de solution dans le styrène et sont basés sur la technologie thermoplastique ou élastomère [35]

I.8 Elaboration de matériaux composites

Chaque technique de fabrication a un effet permanent sur le produit final, il est impossible d'exclure l'importance des processus de fabrication dans le domaine des composites. Un grand nombre de méthodes de fabrication ont été élaborées pour répondre à des exigences spécifiques, avec leur choix principalement influencé par la géométrie du produit et les caractéristiques mécaniques qui en découlent. On peut notamment citer parmi ces méthodes :

I.8.1 Cas des composites à matrices polymères

Il existe différentes techniques de mise en forme des matériaux composites à matrices polymères mais la plus utilisée est la technique du moulage :

I.8.1.1 Technologies dites en moule ouvert (moulage au contact)

Moulage au contact il nécessite l'utilisation d'un moule pour l'obtention d'un stratifié. Ses étapes sont :

- ❖ Application d'un agent démoulant (cire) pour faciliter le démoulage et obtenir une surface finale lisse.
- ❖ Application d'une couche de gel coat qui sert à fournir une haute finition et une protection de la surface visible du composite.
- ❖ Dépôt d'une couche du renfort désiré, suivi par une couche de résine et ainsi de suite jusqu'à la fin des couches de renfort. Pour chaque couche déposée manuellement, on l'imprègne de résine par un pinceau et un rouleau débulleur jusqu'à obtention de l'épaisseur finale désirée.
- ❖ démoulage de la pièce après le durcissement de la résine (polymérisation)

Cette méthode est facile à mettre en œuvre, ce qui rend son coût relativement faible. Elle permet la fabrication des pièces de très grandes dimensions. Cependant cette technique ne permet d'obtenir qu'une seule surface lisse (gel-coatée). On ne peut pas l'utiliser pour la production en grandes séries à cause du facteur humain qui limite la cadence de production. L'épaisseur finale du produit n'est pas uniforme. Ses caractéristiques mécaniques sont bonnes à moyennes, tout dépend de la résine employée, des conditions de travail et du soin des opérateurs comme le respect de la température, de l'humidité...

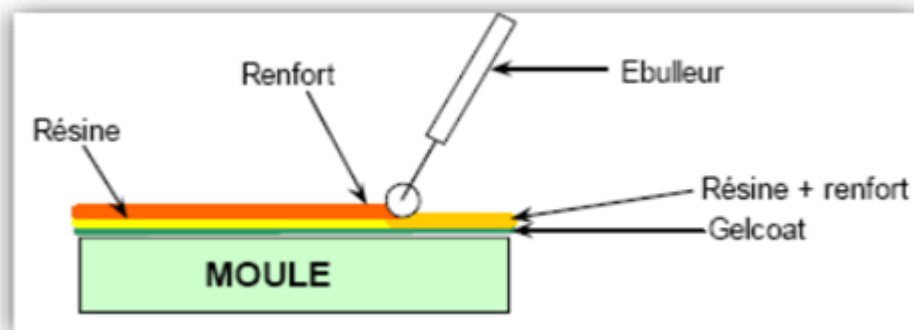


Figure I.14. Représentation schématique de la technique de moulage au contact

[36]

Domaines d'application

Nautisme ; Piscine ; Génie chimique ; Transport, carrosserie (petites séries) ; Bâtiment, travaux public (coffrage).

I.8.1.2 Moulage par projection simultanée

Le procédé manuel ou automatique permet la fabrication de pièces à température ambiante et sans pression en utilisant des résines thermodurcissables. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant [35] (Figure I .15) :

- un dispositif de coupe - projection du renfort (Roving),
- un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.

Après avoir appliqué les fibres coupées et la résine sur la surface du moules, suit l'opération de compactage et de débullage à l'aide de rouleaux et débulleurs. La résine pré-accelérée est catalysée de manière continue tout au long de sa projection.

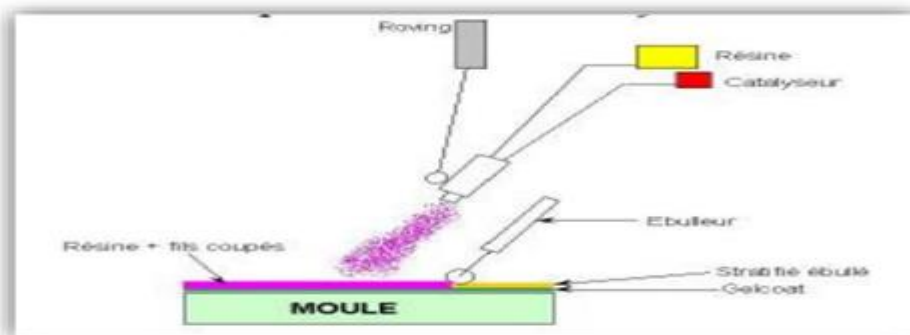


Figure I.15. Représentation schématique de la technique de moulage par projection [35]

I.8.1.3 Technologies dites en moule fermé

I.8.1.3.a Moulage sous vide

Selon la technologie utilisée, le moulage sous vide est réalisé entre un modèle rigide, semi-rigide ou flexible et un modèle contre-moule. Après avoir placé le renfort qu'il soit mat, tissu ou préforme - à l'intérieur du moules, une résine catalysée est versée sur lui. On applique ensuite une pression de vapeur sur le moule afin de disperser la résine et d'imprégner le

renfort [36]. De plus, on peut effectuer l'injection de résine grâce à l'aspiration consécutive au vide.

I.8.1.3.b Moulage par injection basse pression de résine - RTM

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Resin Transfer Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides. On place le renfort, qui comprend des mats, des préformes et éventuellement des tissus, est disposé dans l'entrefer du moules. Une fois que le renfort a été soigneusement fermé, la résine, qui a été accélérée et catalysée, est injectée à une basse pression (1.5 à 4 bar) jusqu'à ce que la cavité soit complètement remplie [36]. La Figure I.16 illustre l'ouverture du moule et la déformation de la partie une fois que la résine a été solidifiée.

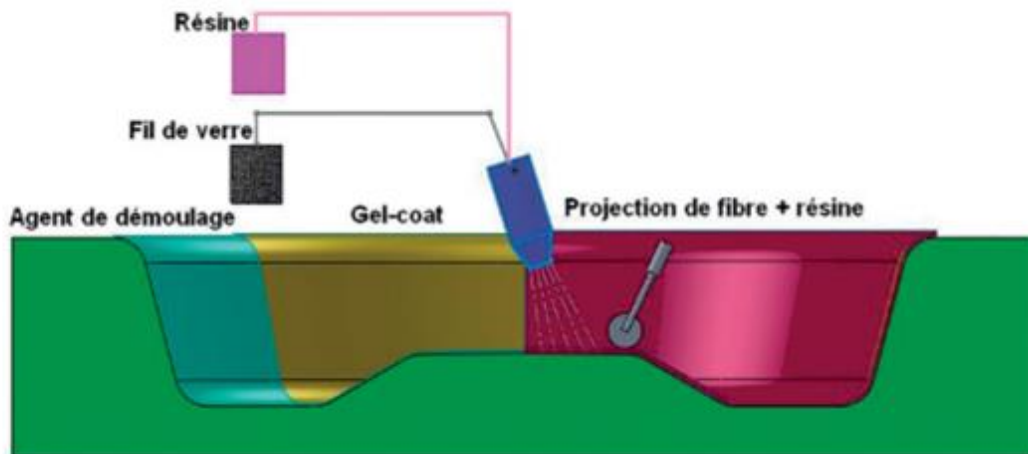


Figure I.16. Représentation schématique de la technique de moulage par injection

I.8.1.3.c Moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression

Le moulage se fait à l'aide d'une presse compression entre moule et contre-moule rigides en composite, au départ sans apport thermique externe. Lorsque le moule est ouvert, le revêtement (mat) est placé sur la partie inférieure du moule, et la résine, qui contient un système catalytique hautement réactif, est déposée de manière équitable sur le revêtement.

Après avoir fermé le moule sous une pression de 2 à 4 bar, la résine se répand à l'intérieur de l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est progressivement accéléré par l'augmentation de la température du moules découlant de la réaction exothermique, ce qui facilite le décollage rapide (Figure I.17). On peut considérablement améliorer les performances du processus en utilisant des moules

métalliques ou plastiques, en collaboration avec une régulation thermique à basse température.

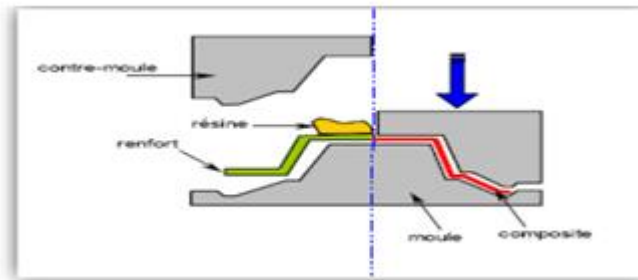


Figure I.17. Représentation schématique de la technique de moulage à la pression à froid [44].

I.8.1.3.d Infusion de résine sous membrane souple

Le principe repose sur le dépôt, dans un moule femelle, des renforts secs (tissus, âmes, etc.) qui vont concevoir la pièce composite, et de créer un système étanche à l'air à l'aide d'une bâche à vide (Figure I.18) [36]. L'infusion consiste ensuite à injecter de la résine, par dépression réalisée sur la pièce, sur les tissus déposés à sec.

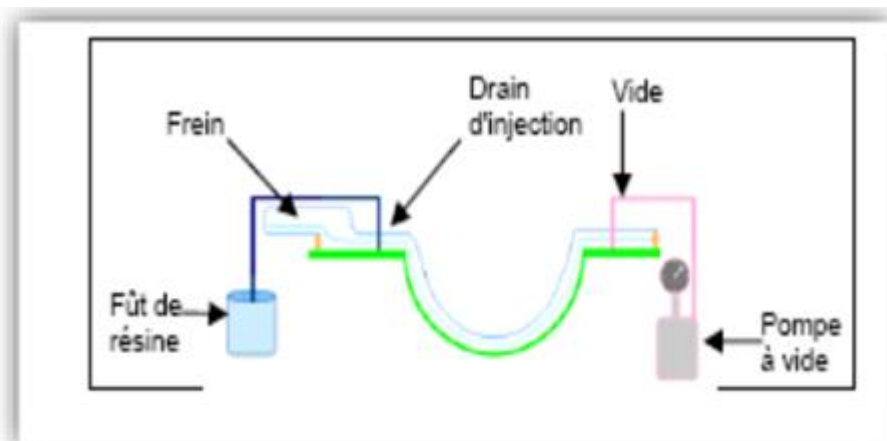


Figure I.18. Représentation schématique de la technique de moulage par infusion [44]

I.8.1.4. Les technologies pour grandes séries

I.8.1.4.a Moulage par injection de compound – BMC

Les fibres de verre coupées sont utilisées pour renforcer le composé de moulage en vrac (BMC), un composé de moulage constitué de résine, de charges et d'autres additifs mélangés dans un malaxeur [36]. Le composé est principalement injecté entre un moule et un contre-moule en acier usiné pendant le moulage à chaud, qui se produit entre 130 et 150 °C. Le matériau pré-dosé remplit la cavité du moule et est forcé dans l'écoulement par la pression de fermeture du moule, qui varie de 50 à 100 bar. La période de traitement très courte permet un démoulage rapide.

I.8.1.4.b Moulage par compression de mat préimprégné - SMC

Une couche de fibres coupées ou continues imprégnées d'un mélange de résine de polyester, de charges et de nombreux additifs particuliers constitue le tapis préimprégné (Feuilles composées ou pré-imprégnées (SMC)). Après avoir été découpé en ébauches avec une masse et des dimensions prédéterminées, le tapis préparé est comprimé entre un moule et un contre-moule en acier usiné tout en étant moulé à chaud à une température de 140 à 160 °C (voir Figure I.19). Induisant un flux de matériau, la pression (entre 50 et 100 bar) remplit la cavité du moule. Le démoulage peut se faire rapidement en raison de la période de durcissement extrêmement courte (selon l'épaisseur) [36].

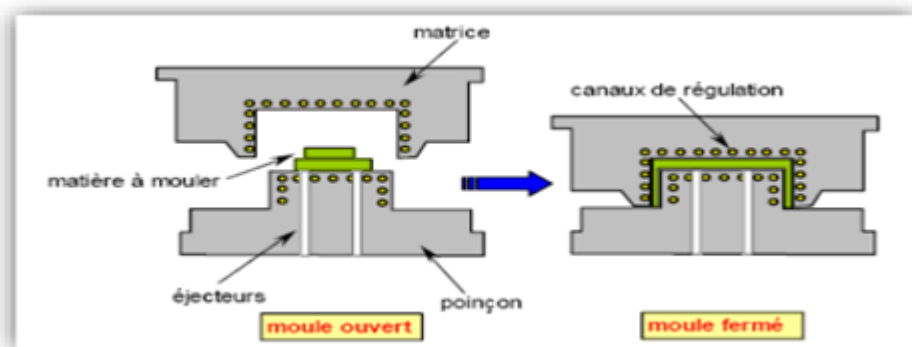


Figure I.19. Technique de moulage par compression [44]

I.8.1.4.c Moulage par enroulement filamentaire (ou bobinage)

Le procédé d'enroulement filamentaire permet d'obtenir des pièces en matériau composite, par enroulement de fibres sur un mandrin (pièce). Il consiste à enrouler, par l'intermédiaire d'un guide-fil, des fibres imprégnées de résine sur le mandrin et à faire polymériser la structure. Ce procédé permet de donner des pièces de très bonne caractéristique mécanique. En procédé d'enroulement filamentaire, selon la coordination entre le mouvement de rotation et le mouvement axial, trois types de configurations d'enroulement peuvent être obtenues : polaire, hélicoïdale, et le circonférentielle. Le choix est basé sur la forme de la pièce et les orientations de renforcement nécessaires. La Figure I.20 illustre le principe du modèle d'enroulement filamentaire.

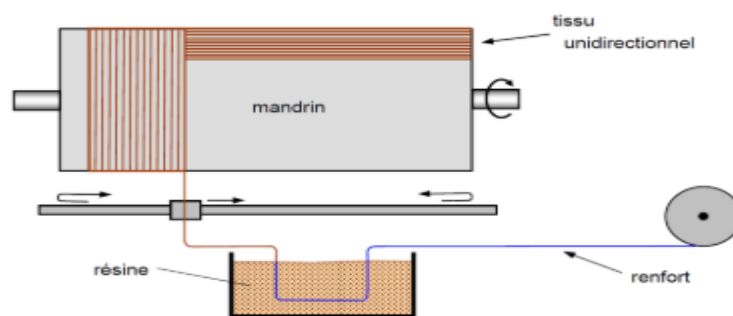


Figure I.20. Technique de moulage par enroulement [37]

I.8.1.4.d Moulage par centrifugation

C'est un procédé de moulage aux enveloppes cylindriques. Les fibres roving (ou mat) coupées, la résine catalysée et accélérée, ainsi que des granularités éventuellement ajoutées, sont placées dans un moule cylindrique qui tourne lentement (Figure I.21) [36]. Par la suite, le matériau est densifié et débullé par augmentation de la vitesse de rotation du moule.

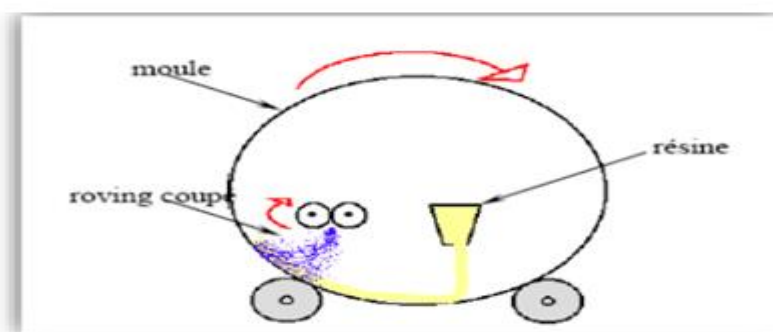


Figure I.21. Technique de moulage par centrifugation [44]

I.8.1.4.e Moulage par pultrusion

Ce procédé est utilisé pour les matériaux composites industriels de haute performance [35]. Il est conçu pour la fabrication continue de profils avec des sections constantes homogènes. À l'extrémité de la chaîne de production, Des renforts continus, divers Rovings, mats et tissus en bandes de largeurs appropriées, tirés par un banc de traction situé en fin de ligne de production, sont successivement prédisposés de façon précise, imprégnés de résine et mis à la forme désirée par passage à travers une filière chauffée dans laquelle s'effectue le durcissement de la résine [36].

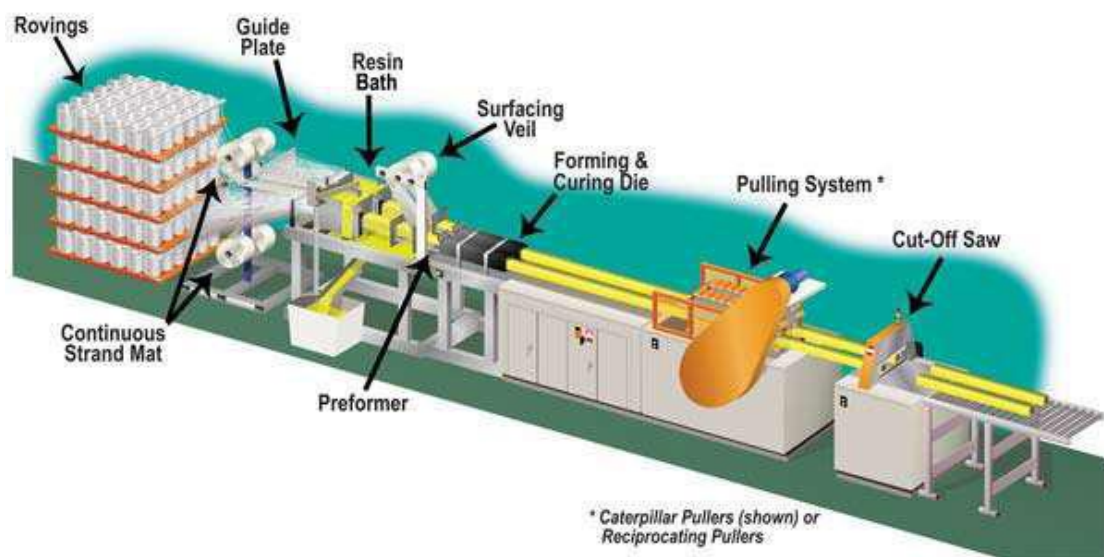


Figure I.22. Technique de moulage par pultrusion [45]

I.8.1.4.f Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres broyées (R.R.I.M.)

Cela concerne principalement la fabrication de polyuréthanes rigides. Dans le cas des polyuréthanes renforçables (PUs), des fibres de verre broyées sont ajoutées au polyol à une concentration de 10 à 20% par kilogramme, en fonction du produit final. Le processus de moulage des polyuréthanes renforçables est similaire à celui des polyuréthanes non renforçables : mélange, injection dans un modèle fermé, réaction, durcissement, et démoulage sont tous effectués sous pression régulée [36].

I.8.1.4.g Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues (S.R.I.M.)

Il s'agit d'un moulage entre moule et contre-moule. Le renfort, sous forme de matières ou de textiles (20 à 60% par masse), est placé dans le modèle chauffé (entre 100 et 150 degrés Celsius). Le système de résine à deux composants extrêmement réactif est injecté sous une pression de 20 à 30 bar. La résine peut être déformée pendant une à trois minutes après avoir été curée [36].

I.9 Architecture des composites

Les pièces en matériaux composites sont fabriquées en superposant des couches consécutives et en utilisant des surfaces (plaques, coque) [38]. La structure composite est basée sur les monocouches, appelées parfois plis, et qui se caractérisent par la forme du renfort (fibre longue, courte, tissu); une superposition de plis unidirectionnels, tissés ou mats forme le stratifié, "chaque pile ayant sa propre orientation par rapport à un cadre de référence commun pour les couches, désigné comme le cadre de référence stratifié" [39]. L'angle d'orientation ou le type de fibres détermine le nom du stratifié; le premier est appelé stratifié à base de filament ou stratifié à base de tissu, tandis que le second est appelé stratifié hybride.

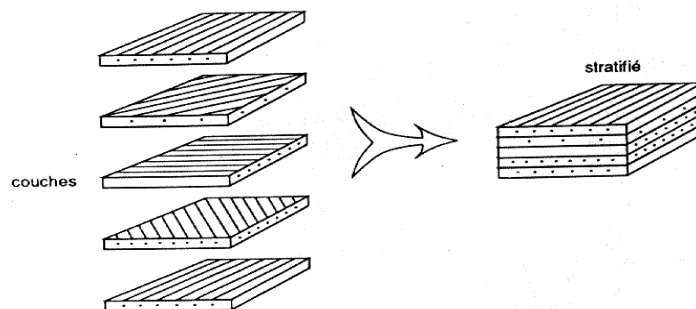


Figure I.23. Constitution d'un stratifié [39]

Il existe différents types de stratifiés :

1. Un stratifié équilibré est caractérisé par un nombre égal de couches orientées dans la direction $+\theta$ et dans la direction $-\theta$.
2. Un stratifié symétrique est constitué de couches orientées de manière symétrique autour d'un plan médian.

3. Un stratifié orthogonal est composé d'un nombre égal de couches orientées à 0° et à 90° .

Pour obtenir une structure légère et rigide, il est nécessaire d'examiner les composites sandwichs. Ces matériaux sont constitués de deux peaux minces à haute rigidité et faible épaisseur, qui enferment un noyau épais à faible résistance. Ce noyau peut être solide (comme le bois de balsa ou les mousses cellulaires) ou creux (comme les alliages métalliques ou le papier kraft). Cette combinaison permet d'obtenir une structure très légère. De plus, le matériau sandwich présente une grande légèreté en flexion et offre une excellente isolation thermique.

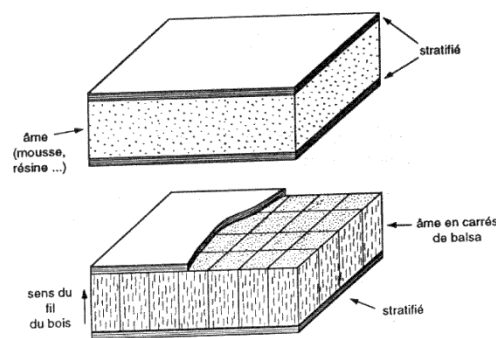


Figure I.24. Matériaux sandwichs à âme pleine [39]

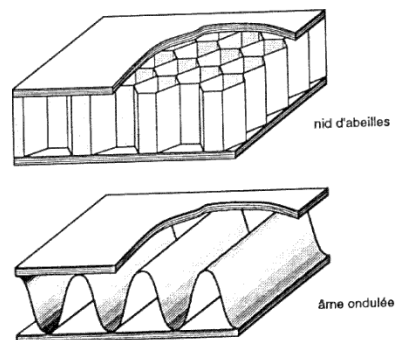


Figure I.25. Matériaux sandwichs à âme creuse [39]

D'autres formes d'architectures composites existent également, telles que les plastiques renforcés. Leurs matrices contiennent des renforts tels que des fibres courtes, des perles solides ou creuses, de la poudre métallique ou du graphite. Il est possible d'homogénéiser le comportement mécanique de ces composites.

De plus, il existe des structures appelées composites volumétriques qui ont été développées en utilisant le tissage volumétrique, mais elles sont connues pour être très coûteuses.

I.10 Mécanismes d'endommagement des composites

Le processus d'un matériau sous contrainte produisant de nouvelles surfaces est appelé dommage. Un accroissement de la taille ou du nombre de fissures est désigné comme un préjudice. En conséquence, les propriétés mécaniques du système se détériorent et finissent par se rompre. D'une manière générale, trois mécanismes sont observés tout au long du processus de dommage

- **L'amorçage** : cela se réfère aux vides internes du matériau qui commencent à apparaître.

- **La croissance** : processus qui provoque une augmentation du volume des cavités.

- **La rupture** : phase qui se produit lorsque des microcavités préexistantes fusionnent pour former de nouvelles microcavités.

Les matériaux composites se dégradent de diverses manières lorsqu'ils sont exposés à des facteurs de contrainte externes en raison de dommages localisés aux niveaux de l'interface, de la fibre et de la matrice.

Ces processus ont généralement lieu simultanément, ce qui diminue les qualités mécaniques des matériaux composites. Les mécanismes de détérioration évoluent en fonction des caractéristiques des matériaux et des conditions de charge mécanique appliquées. La contrainte de rupture de fibre, La matrice a la capacité d'absorber l'énergie libérée par la propriété, la force de l'interface entre la fibre et la matrice, ainsi que la fraction volumique., et les circonstances entourant la charge mécanique imposée sont les principaux facteurs influençant la redistribution des contraintes dans un matériau composite et le processus de rupture qui suit [30]. Après des recherches expérimentales approfondies, les modes de dégradation des composites stratifiés sont maintenant bien compris.

Lorsqu'il s'agit du scénario d'endommagement d'un spécimen constitué d'une pile de couches unidirectionnelles, il y a généralement quelques phases distinctes. - Microfissuration dans la matrice et délamination de la fibre. - Fissures transversales qui traversent la couche et sont parallèles aux fibres à la suite d'une coalescence de micro-dommages. - le

développement et l'apparition de micro-délamination aux extrémités transversales de l'interface de fissure entre les couches. - La rupture de stratification et la sollicitation causent l'effondrement ultime du stratifié [40].

I.10.1 La fissure matricielle

Des fissures transversales et longitudinales peuvent se produire dans la matrice (Figure I.26.). Il y a deux modes de défaillance dans ce cas. Le premier se produit lorsque la contrainte de traction de la matrice atteint sa limite de rupture, tandis que le deuxième se produit lorsque la contrainte de cisaillement de la matrice atteint sa limite de rupture de cisaillement, généralement près d'une fibre. Le dernier mode de défaillance, connu sous le nom de "division", se produit lorsque la contrainte de décohesion dépasse la limite de rupture de cisaillement de la matrice. Pour les composites de fibre de verre industriels, la déformabilité inadéquate de la matrice pourrait être un facteur limitant dans la performance de rupture. Pour optimiser la résistance à la rupture des matériaux composites, il est essentiel d'assurer une parfaite adéquation entre les propriétés de la matrice et celles des fibres. Décohesion entre la fibre et la matrice

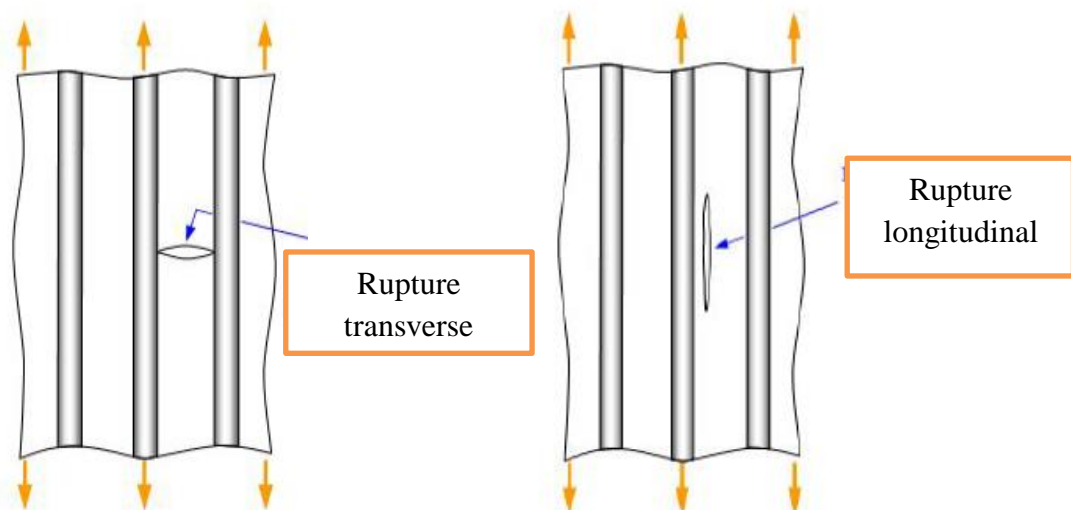


Figure I.26. Fissuration de la matrice [41]

I.10.2 Décohesion fibre-matrice

En réalité, les seuls efforts d'analyse et de prédiction ne seront pas suffisants pour maîtriser pleinement l'interface résultant de l'interaction des fibres et de la matrice constituantes, même après qu'elles ont été correctement choisies et placées sous des contrôles exacts. La zone interfaciale devient le site d'initiation de la fissure crucial pour

l'accumulation de dommages dans le scénario spécifique où les fibres sont discontinues (Figure I.27) Les causes principales sont la concentration de tension aux extrémités de fibre et l'efficacité de la transmission de charge au contact de fibre-matrice. Les caractéristiques mécaniques de l'interface fibre-matrice par rapport aux fibres et à la matrice déterminent son comportement. Le désendettement survient habituellement dans deux situations :

- Lorsque la cohésion est inférieure à la contrainte de rupture de cisaillement de la matrice.
- Quand il y a une mauvaise adhérence de fibre-matrice, La décohésion de l'interface de fibre-matrice est causée par la rupture de matrice, plutôt que la rupture de fibre.
- Quand il y a une forte adhérence de fibre-matrice lorsqu'une rupture est provoquée par la matrice ou la rupture de la fibre, des concentrations de contrainte se forment au front de la fissure, ce qui propage ensuite la rupture à travers les matrices et les fibres à son tour.

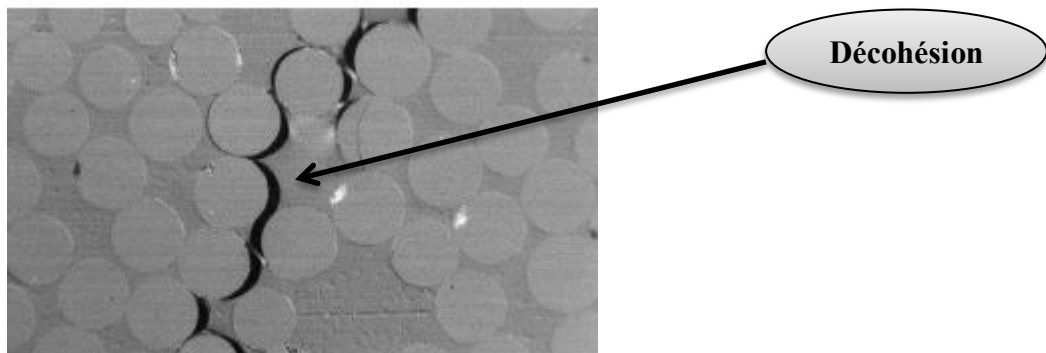


Figure I.27. Décohésion fibre-matrice [42]

I.10.3 Délaminage

Avec une structure stratifiée ou multicouche, en dehors des mécanismes de base discutés précédemment, il existe un mécanisme supplémentaire de défaillance entre les couches connu sous le nom de délamination. Le type de dommage varie en fonction des caractéristiques des constituants, de l'architecture des couches et de la méthode de chargement mécanique utilisée (figure I.28). Après la phase d'endommagement intralaminare, le délaminage se produit généralement aux marges avant de se propager dans tout l'échantillon. Il s'agit d'une fissuration qui a pour effet de séparer les couches du composite [41].

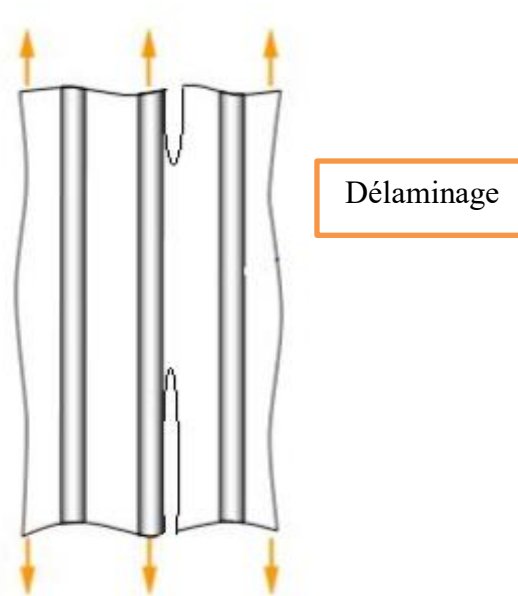


Figure I.28. Délaminage d'un composite [42]

I.10.4 Rupture des fibres

Les ruptures dans les fibres peuvent parfois être la première étape vers la détérioration du composite. Cela se produit généralement lorsque l'axe de chargement du matériau composite et l'orientation de la fibre sont grossièrement alignés. Quand la tension de rupture de fibre est rencontrée, la rupture se produira. Les dommages commencent à se produire et s'aggravent lorsque la force est appliquée, rompant la fibre et la matrice jusqu'à ce que le matériau tombe complètement en panne.

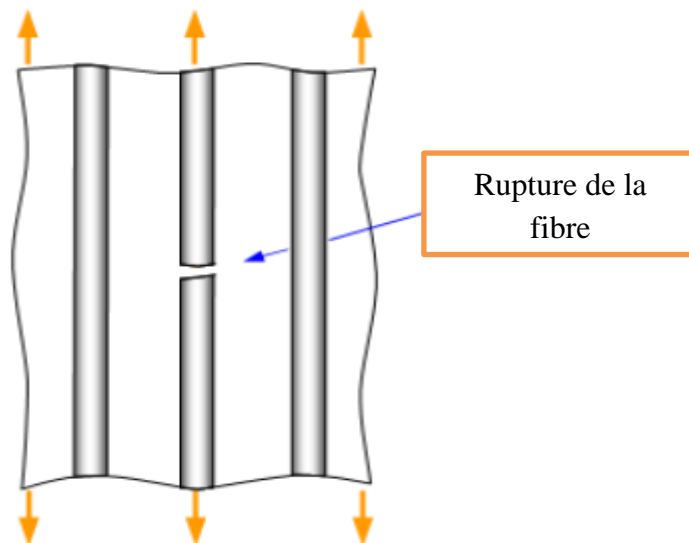


Figure I.29. Rupture de fibre [42]

I.11 Caractérisation mécanique des matériaux composites

En raison de leur faible poids spécifique, de leurs excellentes qualités mécaniques et de leur résistance à la corrosion, les composites sont de plus en plus utilisés dans diverses industries telles que l'automobile, la marine et l'aérospatiale au cours des dernières décennies. Les matériaux composites sont intrinsèquement anisotropes, ce qui nécessite la réalisation de plusieurs essais de traction uniaxiale pour évaluer leurs propriétés. Différents tests traditionnels sont utilisés pour déterminer les constantes mécaniques des matériaux composites en fonction du type de charge appliquée.

I.11.1 Essai de traction

Un des tests les plus couramment utilisés pour caractériser mécaniquement les matériaux est l'essai de traction. Sa nature entièrement uniaxiale permet d'éviter les techniques de calcul inverse et de dériver immédiatement une loi de comportement uniaxiale, du moins jusqu'à l'apparition du cou (ou necking, une réduction catastrophique de la section transversale de l'échantillon au centre). Il permet de calculer plusieurs paramètres standard nécessaires pour les calculs structurels, tels que la contrainte de rupture, la contrainte maximale, les limites d'élasticité, etc. Nous présentons brièvement un appareil d'essai de traction, puis nous nous concentrons sur les échantillons, les mesures de déformation et la charge appliquée [43].

I.11.1.1 Description générale d'un dispositif de traction

Généralement, l'essai de traction perpendiculaire est réalisé sur une machine de traction équipée d'un dispositif conçu pour faire office de sollicitation d'arrachement et commandé par ordinateur appelé "IBERTEST" avec une capacité de force maximale de 60 kN est utilisé pour effectuer des essais de traction.

Cette machine est constituée d'un piston hydraulique qui se déplace linéairement perpendiculairement à la base plate. En outre, les mâchoires de poignée manuelle, colinéaires avec l'axe du piston sont situées sur la base ainsi que le piston. Le piston est déplacé verticalement après que l'élément est placé entre les mâchoires. Le logiciel placé sur l'ordinateur connecté à la machine mesure et enregistre la force axiale nécessaire à ce déplacement ainsi que les déformations.

L'essai de traction uniaxiale est un essai qui permet de déterminer la loi de comportement d'un matériau composite dans une direction spécifique. Grâce à ce test, nous pouvons obtenir le module de Young, ainsi que les contraintes et les déformations correspondant à la limite d'élasticité, à la résistance à la traction ultime et à la déformation à la rupture.

La résistance à la traction, une caractéristique mécanique pivot, désigne la force maximale qu'un matériau peut supporter avant de subir une déformation ou une rupture sous contrainte de traction uniaxiale. L'évaluation expérimentale de la résistance à la traction a été effectuée à l'aide d'une machine INSTRON 1195, comme l'illustre la figure 3.

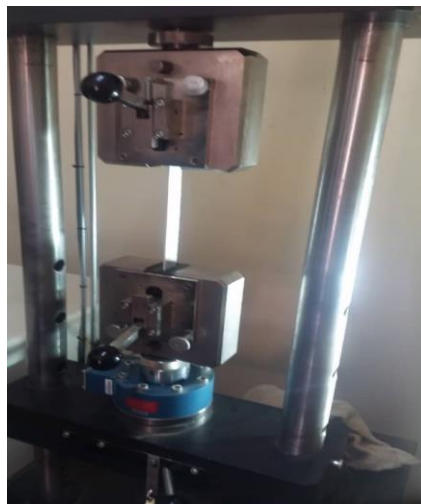


Figure I.30. Machine de traction INSTRON 1195

La caractérisation mécanique est basée sur des essais effectués sur des spécimens vierges de configuration géométrique simple soumis à la contrainte. Les résultats de ces évaluations servent de base à l'évaluation des modules élastiques et des contraintes au point de rupture, comme le montre la Figure I.30.

I.11.1.2 Epreuve de traction

Les éprouvettes de traction peuvent avoir deux formes différentes : haltère ou simple. Il est essentiel que la section reste constante sur une longueur adéquate afin d'assurer un état de contrainte uniforme pendant le test. Des têtes d'amarrage sont usinées aux deux extrémités (talon), Les extrémités sont conçues avec une épaisseur supérieure afin de minimiser la déformation, et elles se connectent à la section utile, qui est plus étroite et plus longue pour obtenir un état de contrainte uniaxial réel. Ces connexions sont effectuées en utilisant des

congé usinés afin d'éviter les concentrations de contraintes excessives, en optant pour un rayon de courbure aussi large que possible. L'illustration à droite montre un exemple d'un dispositif de traction.

I.11.1.3 Essais de traction des éprouvettes plates

La section chargée et la charge sont utilisées pour déterminer les contraintes. Dans ce genre d'essai, le mode de défaillance peut changer, basé sur l'angle formé par la direction de chargement et les angles de fibre. Par exemple, dans les fibres unidirectionnelles, le mode de défaillance peut passer de la rupture de la fibre (charges parallèles au chemin de la fibre) à la défaillance de la fibre (test transversal) perpendiculaire aux fibres [43].

Le spécimen utilisé pour l'essai de caractérisation de traction doit respecter les normes OIN 527 et ASTM D3039. Afin d'éviter toute défaillance du matériau dans les poignées des composites à haute résistance, des languettes doivent être fixées sur les parties de la pince. La zone collée doit être suffisamment grande pour atteindre le point de rupture composite avant la rupture par cisaillement de l'adhésif.

I.11.2 Essais de flexion trois points

I.11.2.1 Principe

De tous les essais de flexion effectués sur les matériaux, la flexion en trois points est la condition de charge la plus fréquemment utilisée. L'essai de flexion en trois points consiste à fournir une charge continue à un spécimen qui est soutenu sur deux supports fixes en utilisant un support mobile afin de le déformer (peut-être jusqu'à la rupture). La surface supérieure du spécimen est soumise à la charge.

I.11.2.2 Objectif

Les essais de flexion ont pour objectifs :

- de mesurer la contrainte de flexion ultime, le module de flexion et d'autres caractéristiques de flexion des stratifiés.
- d'étudier l'impact de l'ordre de superposition des couches sur les propriétés des stratifiés hybrides.
- de faciliter la comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus grâce à une méthode analytique qui sera expliquée.

II.11.2.3 Géométrie particulière des éprouvettes

La taille et la géométrie des éprouvettes de flexion ont été déterminées en appliquant la norme ISO 14125. Chaque éprouvette a la forme d'un parallélépipède. Elles ne sont pas toutes les mêmes dimensions, cependant. En fait, les épaisseurs des éprouvettes déterminent leurs dimensions. Pour une épaisseur de 4 mm, les dimensions des polymères renforcés par des textiles (matière classée classe II par la norme) sont fixées à 80 mm de longueur et 15 mm de largeur. Toutes nos plaques composites, cependant, sont plus minces que cela. Par conséquent, une formule donnée par la norme a été utilisée. Si nous indiquons l'épaisseur du spécimen par h ($1 \leq h \leq 4$), sa largeur, b , est toujours fixée à 15 mm ($b = 15$ mm), et sa longueur, l , est déterminée par :

$$L = 20 h$$

La distance entre les appuis (inférieurs) sur lesquels repose l'éprouvette est définie comme la portée L .

On peut la calculer en utilisant la relation suivante :

$$E = \frac{L^3}{4le^3} \frac{\Delta F}{\Delta d} \quad (\text{I-1})$$

$$L = 16 h$$

Pour l'analyse des courbes de comportement mécanique, on va utiliser l'équation I.1 entre les contraintes de flexion σ_f et la relation (1.2) pour les valeurs de module de Young en flexion E_f .

$$\sigma_f = \frac{3F1}{2bh^2} \quad (\text{I-2})$$

où

F : la charge à la rupture appliquée [N];

l : la longueur entre appui [mm];

b : la largeur de l'éprouvette [mm];

h : l'épaisseur de l'éprouvette [mm].

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (\text{I-3})$$

$$S_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} \quad (i = 1; 2) \quad (\text{I-4})$$

Les contraintes de flexion σ_{f2} et σ_{f1} sont mesurées aux flèches tandis que les déformations en flexion ε_{f2} et ε_{f1} correspondent respectivement à 0,0025 et 0,005 pour les flèches S_2 et S_1 .

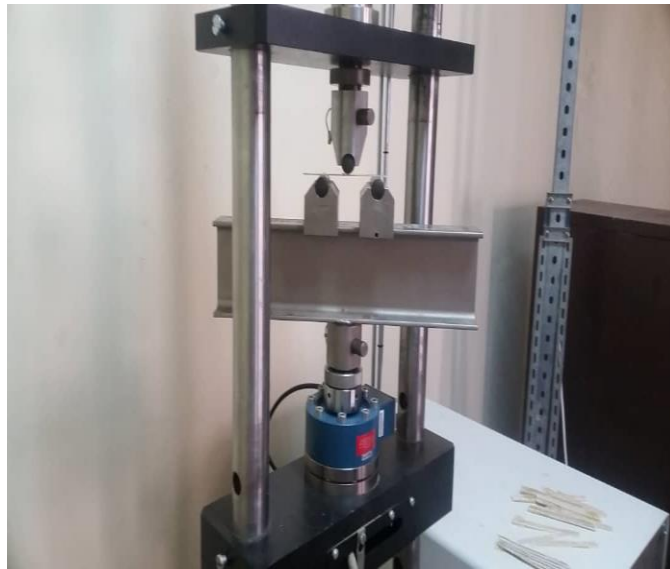


Figure I.31. Machine de flexion à 3 points INSTRON 1195 [45]

I.12 Contexte de l'étude

Les composites sont généralement constitués de trois parties principales : l'interface, la matrice et le renforcement. Lorsque l'on parle de matériaux composites, les fibres de verre sont souvent mises en avant. Elles sont les matériaux de renforcement les plus couramment utilisés dans la fabrication de stratifiés composites, et sont souvent associées à du polyester en tant que matériau de matrice de liaison [46].

Les composites polymères imprégnés sont des choix extrêmement judicieux pour de nombreuses utilisations dans l'automobile, l'aérospatiale, la médecine et d'autres industries

[48]. De nombreuses recherches se sont penchées sur l'étude du comportement en flexion des composites en polymère renforcé de fibres de verre.

Cette étude s'intéresse à un composite à base de fibre avec pour application potentielle, la fabrication de serre agricole. La serre fabriquée en polyester de fibre de verre combine des matériaux modernes et un design pour créer un espace efficace pour la croissance des plantes. Cette structure innovante offre un environnement contrôlé pour cultiver diverses plantes en captant la lumière naturelle tout en les protégeant des éléments extérieurs. Notre recherche se concentrera sur les avantages de la conception en polyester de fibre de verre de la serre, en mettant en lumière ses propriétés optiques et mécaniques à l'aide de la méthodologie de surface de réponse.

L'objectif principal de cette recherche consiste à analyser les propriétés mécaniques et optiques de ces composites.

En utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM), l'étude cherche à comprendre l'interaction complexe entre différents facteurs tels que la teneur en fibres, la longueur et l'épaisseur de la plaque, et leur influence sur des propriétés mécaniques comme le module de contrainte et d'élasticité.

De plus, l'objectif est d'identifier les plages optimales de ces facteurs pour obtenir des performances mécaniques maximales tout en assurant une transmission efficace de la lumière dans les serres agricoles.

Comme le modèle mathématique a établi les facteurs optimaux en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM), un échantillon a été synthétisé pour valider le modèle et utilisé pour étudier les propriétés optiques.

Nous avons synthétisé un échantillon et étudié ses propriétés optiques pour valider les résultats du mode mathématique RSM utilisé.

I.12.1 Méthodes de calcul

Diverses techniques de calcul, certaines plus complexes que d'autres, peuvent être employées pour effectuer des calculs. Les états limites ultimes sont utilisés comme référence pour les règles de calcul des composites. Deux approches seront abordées : la méthode des éléments finis et les techniques statistiques pour la conception expérimentale.

I.12.2 Modélisation Numérique

Nous avons utilisé un programme informatique nommé "Abaques" pour étudier les propriétés des structures composites en utilisant la méthode des éléments finis. Cela nous a permis de simuler le comportement linéaire sous contrainte ainsi que l'influence de pourcentage des fibres et d'autres paramètres (épaisseur des stratifiée ; longueur des fibres.

Ce programme propose un ensemble de fonctionnalités avancées en plus des fonctions de base de calcul.

I.12.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une technique qui étend les approches d'analyse structurale en deux et trois dimensions, comme les poutres et les coquilles. Elle est considérée comme l'une des meilleures et des plus avantageuses pour la simulation numérique, adaptée aux problèmes de mécanique des solides impliquant des milieux continus avec des propriétés linéaires ou non linéaires, tels que l'élasticité et la plasticité.

L'objectif est de trouver la meilleure façon de lier le domaine pour obtenir des résultats acceptables. Il faut comprendre que si un maillage grossier réduit le temps de calcul sans sacrifier la précision, un maillage trop fin donne des résultats précis mais nécessite beaucoup de temps de calcul. La stratégie utilisée consiste à affiner les zones considérées comme cruciales (encoches et délaminage) en utilisant un maillage "raisonnable" dans cette étude.

Il est nécessaire de peaufiner le maillage jusqu'à obtenir des résultats comparables. Un bon maillage a un nombre optimal d'éléments qui peuvent produire des résultats précis dans un temps de calcul raisonnable, et cela est obtenu en raffinant de manière optimale près de l'entaille. Pour mener cette enquête efficacement, un élément quadrilatéral quadratique de la coque a été utilisé.

Partie II

Etude Expérimentale

Introduction

Les matériaux composites sont caractérisés par des propriétés mécaniques supérieures à celles de leurs composants individuels en raison de la fusion complexe de divers éléments. Parmi ces matériaux [43], les composites polyesters renforcés de fibres de verre sont largement utilisés dans la construction, entre autres, de serres agricoles en raison de leur capacité à résister aux conditions météorologiques défavorables, à assurer une durabilité prolongée et à transmettre efficacement la lumière, créant ainsi des conditions de croissance optimales. Les agriculteurs privilégient donc ces composites pour garantir des environnements fiables et durables pour la culture [44].

L'objectif de cette étude est d'étudier de manière expérimentale la prédiction de durabilité des composites de polyester-fibre de verre soumis à une charge de traction et flexion de 3 points [45]. L'étude vise à expliquer l'impact de la teneur en fibres de verre, de la longueur des fibres et de l'épaisseur de la plaque sur les caractéristiques mécaniques du matériau composite. De plus, une expérience systématique et les méthodes de prédiction analytique, en particulier la méthode Monte Carlo.

Dans le cadre de cette étude, nous utilisons la méthodologie de surface de réponse (RSM) comme un outil complet pour approfondir les caractéristiques mécaniques et optiques inhérentes à ces matériaux composites [46, 47]. Notre enquête est conçue pour démêler l'interaction complexe entre des facteurs cruciaux tels que la teneur en fibres, la longueur et l'épaisseur de la plaque, en éclairant leurs impacts directs sur les propriétés mécaniques telles que le module de contrainte et d'élasticité. Notre examen révèle que le pic de performance mécanique est atteint dans une plage spécifique : une teneur en fibres allant de 20% à 40%, des longueurs de fibres de 35 à 45 mm et des épaisseurs de plaques de 0,6 à 3 mm.

De plus, notre examen des mesures de transmittance met en évidence une corrélation intéressante : des épaisseurs plus fines et une teneur en fibres plus faible correspondent à une transmission accrue de la lumière dans le spectre visible. En revanche, l'augmentation de la teneur en fibres ou de l'épaisseur améliore la résistance mécanique, mais réduit simultanément la transmission de la lumière [48]. Ainsi, trouver un équilibre harmonieux entre ces caractéristiques devient essentiel pour la construction pratique des serres agricoles. De plus, nous envisageons d'incorporer des films plastiques ultraviolets (UV) pour améliorer les performances optiques de ces composites, augmentant ainsi leur efficacité dans les applications en serre [49]. En entreprenant cette enquête exhaustive, notre objectif primordial

est de faire avancer les pratiques agricoles durables en fournissant une compréhension nuancée des facteurs à multiples facettes qui façonnent la performance de la fibre de verre et les composites de polyester dans les serres agricoles [50].

Les matériaux examinés sont élaborés au sein de l'entreprise de films et de polystyrène expansé film FIPEXPLAST, wilaya de CHLEF et les différentes étapes de leur mise en œuvre sont d'abord exposés dans la section expérimentale. Les procédés de simulation et de caractérisation, ainsi que les méthodes d'évaluation mécanique sont évalués aux laboratoires de mécanique de l'université de Chlef et Sidi bel Abbes. Enfin, les paramètres d'étude utilisés sont présentés.

II. 1 Choix des matériaux

Les composites développés pour le projet visent principalement la commercialisation dans les secteurs de l'agronomie [51], Par conséquent, nous avons opté pour l'utilisation exclusive de renforts fibre de verre E sous forme des mèches, et des résine polyester les plus couramment utilisés pour les composites.

II.1.1 Résine de Polyesters insaturés

Cette résine est la plus couramment utilisée dans la fabrication des composites à grande échelle. La résine polyester insaturée contient des monomères non saturés. On procède à la réticulation à température ambiante en ajoutant un catalyseur peroxyde organique et un accélérateur. Le processus passe d'un premier liquide visqueux à un gel, puis à un solide infusible [52, 54].

La résine subit à une réaction exothermique, ce qui entraîne l'augmentation de sa température depuis le stade gelé jusqu'à atteindre un maximum avant de revenir progressivement à la température ambiante [53]. Plus l'approche verticale de la courbe de température-temps est proche, plus le processus de curage est rapide, ce qui entraîne des temps de montage plus courts. La réaction de curage est influencée par des éléments tels que la nature et la concentration du système catalytique, l'épaisseur et d'autres caractéristiques physiques de l'objet en cours de production, ainsi que la réactivité de la résine.

En effet, la résine polyester insaturée présente plusieurs bénéfices tels que l'accroche idéale aux fibres de verre, sa translucidité, sa bonne résistance chimique, sa facilité d'élaboration et son prix abordable. Cependant, ce genre de résine présente également quelques inconvénients tels que l'inflammabilité et sa durée de conservation limitée à moins de quatre mois. Les caractéristiques de la résine non saturée sont résumées dans Tableau II.1.

Tableau II.1. Propriétés de la résine insaturée

Propriété	Valeur	
Densité (20°C) kg/m ³	1200	
Résistance à la flexion (DIM 53452) N/mm ²	142	
Résistance à la traction (DIN 63455) N/mm ²	87	
Module d'élasticité (traction) N/mm ²	3600	
Allongement %	4.2	
Température de déformation thermique (ASTM D 642-56) (ISO 75 A) °C	96	
Caractéristiques de durcissement (SPI test)	Temps de gel	8 min
	Pic exothermique	195 °C
	Intervalle de temps entre 66°C et le pic exothermique	9 min 30 s

II.1.2 Système catalytique catalyseur/accélérateur

Le P MEC (Peroxyde de méthyle éthyle cétone) est l'initiateur de la réaction de copolymérisation et utilisé pour favoriser la réaction. La quantité d'initiateur introduite varie en fonction de la température de fonctionnement et varie selon les fiches techniques des fournisseurs de 1 à 1,5 % [53] et un accélérateur est de sel de cobalt.

II.1.3 Renfort de Fibre de verre

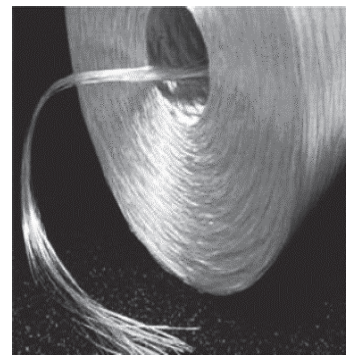
Le renfort nécessaire le plus souvent utilisé dans mes composites est la fibre de verre E. Le sable (silice) et les additifs (alumine, carbonate de calcium, magnésium, oxyde de bore, oxydes de métaux alcalins) sont les sources de cette substance. Les fibres de verre E sont utilisées dans les composites largement distribués pour les applications courantes. Actuellement, c'est le type de verre le plus développé en raison de sa facilité de traitement [55], de ses bonnes propriétés et de son faible coût. Les propriétés des fibres de verre sont résumées dans le Tableau II.2.

Tableau II.2. Propriétés de la fibre de verre (Roving)

Propriété	Valeur		
Résistance à la traction	4.5 cm	18.6 cm	87 cm
	286 kg/mm ²	233 kg/mm ²	171 kg/mm ²
Teneur en humidité	0,6 % selon la norme ISO 1887		
Dimensionnement	0,925 % selon la norme ISO 1887		
Masse linéique	2127 g/k TEX selon la norme ISO 1889		



**Figure II.1. Résine polyester insaturé
Norsodyne**



**Figure.II.2. Fibre de verre de type
(Roving)**

II.1.4 Charge utilisée

La charge utilisée dans cette recherche est le carbonate de calcium de type ALPHA Constantine (Algérie), vendu sous le nom "ALCAL UF-5 ; Le produit final se présente sous forme de particules dures et grossières pouvant être broyées pour obtenir des particules plus fines. Durant la première phase de fabrication, les blocs de carbonate de calcium sont broyés mécaniquement pour les réduire en taille, facilitant ainsi le processus de séchage [56]. Ce dernier est effectué sous un courant d'air chaud jusqu'à ce que presque toute l'humidité soit évaporée.

II.1.4.1 Caractéristiques du carbonate de sodium

Le tableau II.3 regroupe quelques propriétés de la charge utilisée, CaCO₃.

Tableau II.3. Propriétés physique du carbonate de calcium

Paramètre	Valeur
Humidité, %	< 0,2
pH d'une solution aqueuse	9,00
Masse volumique, g/cm ³	2,70
Surface spécifique, m ² /g (BET)	2,64 + 0,2
Diamètre moyen des particules, µm	5
Calcination à 1000°C, %	43,50

Le Tableau II.4 indique la composition chimique du carbonate de calcium « ALCAL UF-5 » [46].

Tableau II.4. Composition chimique du carbonate de calcium

Élément		Pourcentage %
Dénomination	Symbole	
Carbonate de calcium	CaCO ₃	98.5
Magnésie	MgO	0.29
Oxyde d'aluminium (alumine)	Al ₂ O ₃	0.4
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0.04
Silice	SiO ₂	0.3

II.2 Elaboration des plaques composites (fibre de verre-polyester)

II.2.1 Procédés de fabrication

Les matériaux sont mis en œuvre au sein de l'entreprise de films et de polystyrène expansé film FIPEXPLAST, Wilaya de Chlef, dans les conditions de fabrication (température et humidité relative) similaires à celles utilisées sur site. Il comporte deux phases:

La résine insaturée Norsodyne durcit et est catalysée par le contact avec un durcisseur (peroxyde de méthyle éthyle cétone) et de l'accélérateur de sel de cobalt appliqué sur un moule en acier plat qui a été traité avec la cire de paraffine comme agent de libération. Le procédé consiste à pulvériser de l'air comprimé à une pression de trois à quatre bar, ce qui permet à la résine de s'écouler naturellement dans la buse et d'assurer quelque épaisseur constante [59, 60].

Le matériau composite est fabriqué en utilisant uniquement un type de renfort en verre Roving ; une fois la fibre de verre déposée sur le mélange, elle est étalée à l'aide d'un rouleau. Cette opération est répétée jusqu'à ce que différentes épaisseurs soient atteintes ; avec des pourcentages de fibre variant de 10% à 60% et de longueurs différentes ; le traitement de finition rend le renfort minéral compatible avec la résine organique, et la chaîne organique insaturée permet la réticulation avec la résine d'imprégnation [61].

Une fois la polymérisation de résine est terminée, le processus de moulage par contact peut commencer, et l'adhérence peut être vérifiée visuellement. Les couches de renfort imprégnées de résine sont appliquées et les bulles d'air sont éliminées à l'aide d'un rouleau d'ébavurage [62].

Après quelques couches, des plaques de 300 mm x 300 mm sont obtenues. Les plaques moulées sont ensuite soumises la polymérisation qui est effectuée pendant quelques semaines dans des conditions ambiantes à une température de 20 °C et à une humidité relative de 50 à 55 %. Pour faciliter l'échappement des microbulles d'air, des plaques de résine et de fibre de verre non renforcées sont moulées par gravité entre deux plaques d'acier verticales. Différentes épaisseurs de feuilles peuvent être produites en utilisant des entretoises [63, 64].

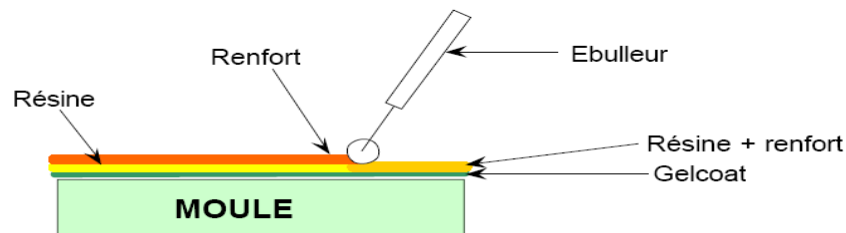


Figure II.3. Procédé de moulage au contact

Les plaques ont été mises en œuvre dans le Hall Technologique du département de Génie Mécanique de l'Université de Chlef.

Cette partie consiste à essayer d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus par les différents essais effectués sur des éprouvettes en composites (polyester / fibre de verre).

Nous avons à évaluer séparément :

- L'influence du taux de fibre de verre,
- L'influence de la longueur des fibres de verre,
- L'influence de l'épaisseur des plaques,

- L'influence du taux de charge (CaCO_3).

II.2.2 Préparation de l'éprouvette

Les essais de traction nécessitent des éprouvettes simples, comme le montre la figure suivante. Typiquement, la charge est appliquée aux extrémités de l'échantillon par des mors auto-serrant. Les échantillons ont été préparés selon les directives ASTM D3039 [65].

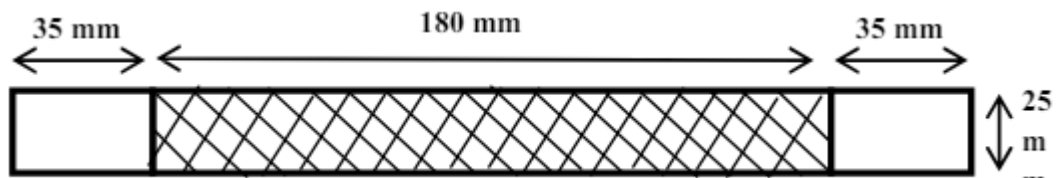


Figure.II.4. Eprouvette sous forme simple pour les essais de traction

II.3 Tests mécaniques

Les matériaux composites résine polyester-fibre de verre peuvent présenter une résistance à la traction, et flexion 3 point très supérieure aux matériaux conventionnels. Grâce à la fibre de verre, ces matériaux offrent un excellent rapport résistance/poids, les rendant particulièrement adaptés pour des applications nécessitant peu de poids [78].

L'effet de chaque paramètre sera étudié par l'essai de traction et flexion afin de passer à l'analyse chimique ; optique et l'optimisation des paramètres de synthèse [79].

II.3.1 Essai de traction

La résistance à la traction, une caractéristique mécanique pivot, désigne la force maximale qu'un matériau peut supporter avant de subir une déformation ou une rupture sous contrainte de traction uniaxiale. L'évaluation expérimentale de la résistance à la traction a été effectuée à l'aide d'une machine INSTRON 1195 [66], comme l'illustre la Figure II.5. Le logiciel placé sur l'ordinateur connecté à la machine mesure et enregistre la force axiale nécessaire à ce déplacement ainsi que les déformations et autres détails [67. 68].

L'essai de traction uniaxiale consiste à évaluer la loi de comportement d'un matériau composite dans une direction précise. Ce test permet d'obtenir le module de Young en MPa, ainsi que les contraintes et les déformations liées à la limite d'élasticité, à la résistance à la traction maximale et à la déformation dans le cas de rupture.

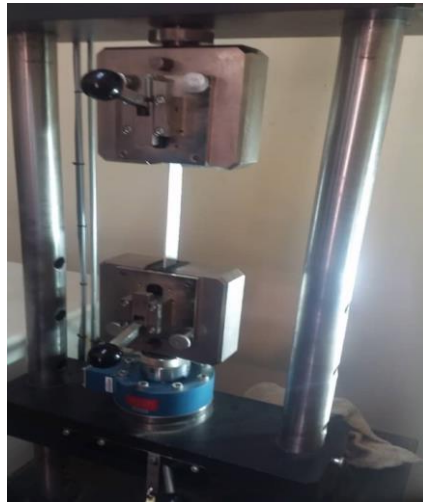


Figure II.5. Echantillon confectionné soumis au test de traction

La caractérisation mécanique est basée sur des essais effectués sur des éprouvettes vierges de configuration géométrique simple soumis à la contrainte. Les résultats de ces évaluations servent de base à l'évaluation des modules élastiques et des contraintes au point de rupture, comme le montre la Figure II.6 [69].



a) L'éprouvette avant la rupture



b) L'éprouvette après la rupture

Figure II.6. Dispositif expérimental de l'essai de traction

Ces essais permettent de déterminer les contraintes à la traction et à la flexion 3 points ainsi que les modules d'élasticité correspondants.

Les courbes enregistrées donnent la charge de traction en fonction de l'allongement ($\Delta L/L$). et Le Tableau II.5. présente les résultats de l'essai de traction sur l'éprouvette confectionnée.

Tableau II.5. Essai de traction contrainte-allongement

σ (N/mm ²)	4.82	8.63	15.16	26.52	33.75	40.9	41.4	48.22
$\epsilon\% = \Delta L/L$	0.32	0.6	0.77	1.62	2.28	2.78	3.18	3.57

La figure suivante présente la courbe de contrainte-déformation pour le spécimen (stratifié).

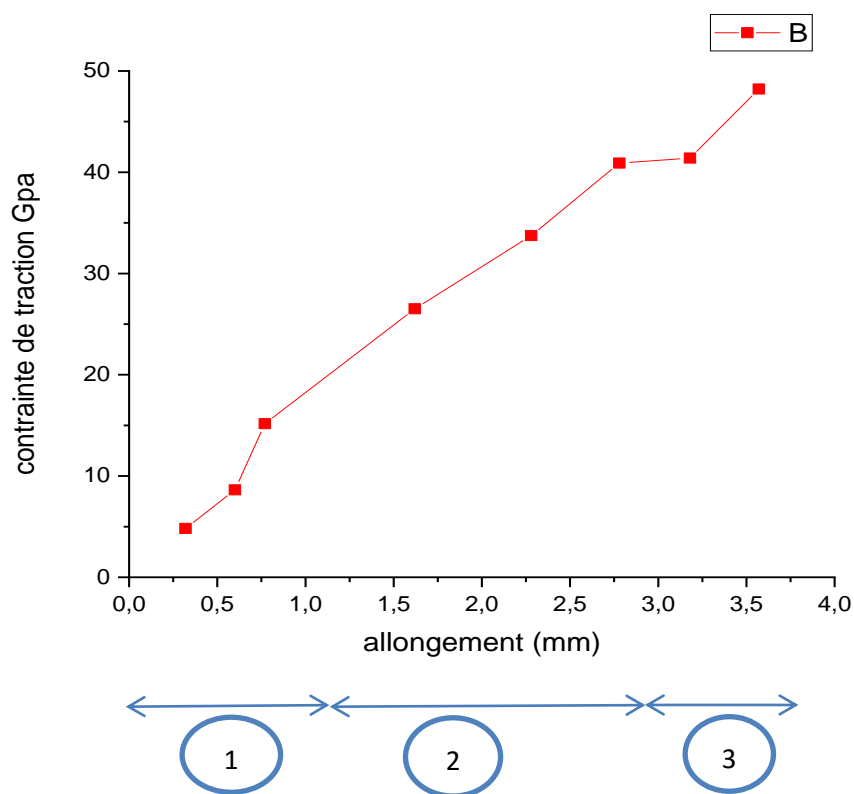


Figure II.7. Contrainte de traction σ (N/mm²) en fonction de l'allongement Y

Au commencement de cette étape, à l'exception de quelques cas qui sont probablement dus au glissement entre les mors et l'éprouvette, le premier allongement est lié à une augmentation linéaire de la contrainte appliquée avec la déformation. Cette partie de la courbe contrainte-déformation correspond à la zone élastique [70].

Le deuxième allongement possède une section linéaire, mais ce n'est pas une zone élastique car il y a des ruptures de résine alors que les fibres dans les stratifiés sont encore capables de résister à la tension mais la troisième et dernière étape est caractérisée par une libération complète du contrainte, indiquant une rupture totale des fibres et de la résine du stratifié [71].

II.3.2. Essais de flexion à 3 points

L'équipement expérimental utilisé comprend une machine d'essai électronique universelle (type : WDW-20), comme le montre la Figure II.8. ainsi qu'un microscope optique (Nikon Eclipse E200). Des essais de flexion en trois points ont été effectués à l'aide de la machine d'essai électronique universelle (type : WDW-20) avec une vitesse de charge de flexion appliquée de 2 mm/min [72, 73, 74]. La Figure II.8 illustre la configuration de la charge pour une poutre soumise à l'essai de flexion en trois points. Des données de charge - déplacement ont été recueillies pour chaque spécimen d'essai, trois spécimens de chaque type composite faisant l'objet d'une évaluation. Les dimensions et les procédures d'essai ont été effectués selon la norme ASTM D7264 / D7264M – 07 (ASTM., 2007).

L'essai de flexion en trois points consiste à appliquer une charge perpendiculaire à la surface de l'éprouvette, qui est placée entre deux supports distants de 60 mm. Les résultats sont regroupés dans le Tableau II.6. qui présente les résultats de l'essai de flexion sur l'éprouvette confectionnée.

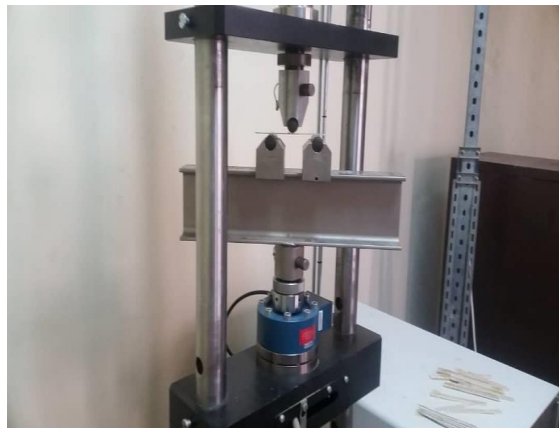


Figure II.8. Test de flexion à trois points sur INSTRON 1195

Tableau II.6. Essai de flexion contrainte -allongement

σ (N/mm ²)	16	30	44	55	66	75	73	86	87.1
Y (mm)	1.2	2.0	2.8	3.6	4.4	5.4	6.0	7.6	8.6

La Figure II.9. Contrainte de flexion σ_f (N/mm²) en fonction de l'allongement Y obtenue pour le stratifié :

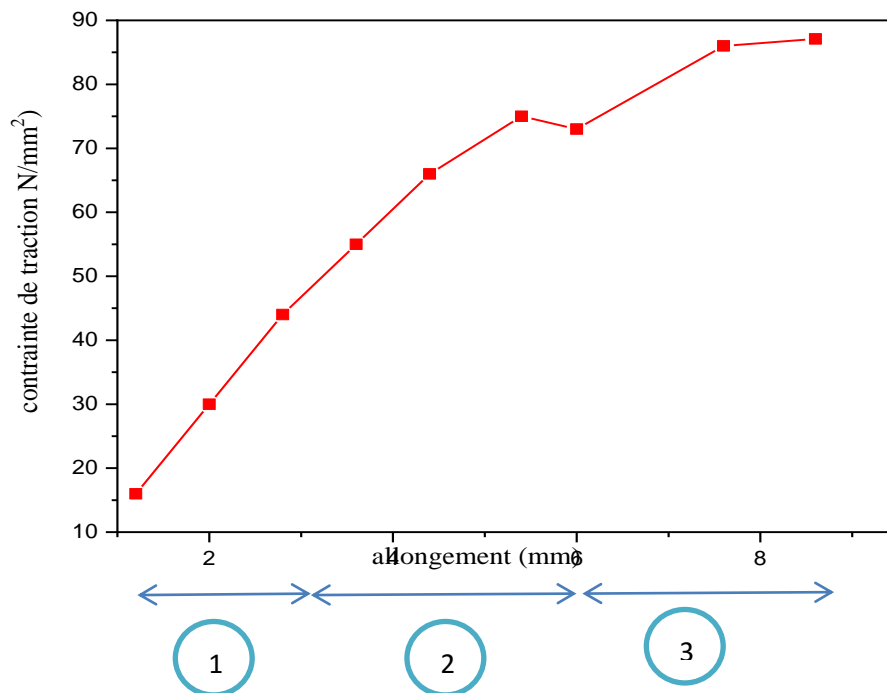


Figure II.9. Contrainte de flexion σ_f (N/mm²) en fonction de l'allongement Y

Le graphique illustre la variation de la charge en fonction du déplacement pour l'échantillon soumis à une flexion en trois points. Le comportement pour différents échantillons est similaire et peut être divisé en trois étapes principales. La première étape correspond à la partie élastique, caractérisée par une augmentation linéaire modérée de la charge appliquée en fonction du déplacement [76].

La charge augmente de manière non linéaire pendant la deuxième phase, jusqu'à atteindre la charge maximale. C'est pendant cette phase que la déformation plastique se produit. À partir de ce moment, la résine et les fibres commencent à se séparer, ce qui endommage les composants de ces matériaux. La troisième phase, quant à elle, se caractérise par une diminution de la force et se termine par une défaillance complète [77].

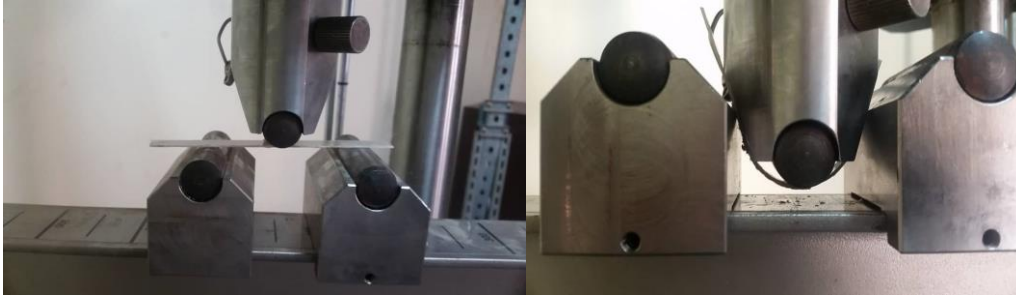


Figure II.10. Éprouvette avant essai et sous essai de flexion

II.4. Essais chimiques

II.4.1 Résistance à l'acide acétique (CH_3COOH)

Après avoir été plongé dans de l'acide acétique, les propriétés mécaniques du polyester (taux de fibres : 21 % ; taux de charges : 5 %) isophtalique diminuent rapidement, démontrant ainsi que cet acide, bien qu'il soit faible, attaque le matériau. De plus, l'acide provoque également un défibrage de la fibre et une diminution de l'épaisseur.

II.4.2 Résistance à l'eau bouillante

Lorsqu'un matériau composite (polyester-fibre de verre) est immergé dans de l'eau bouillante pendant une période prolongée, ses propriétés mécaniques ainsi que sa résistance à la flexion diminuent légèrement, mais restent au-dessus de 50 % de leur valeur initiale jusqu'à 8 jours. Une fois passé ce délai, la résistance tend à diminuer encore plus, mais se stabilise à plus de 50 % de sa valeur initiale [80]. L'attaque de l'eau se produit par diffusion des molécules d'eau à l'interface fibre-résine, cette diffusion s'accélère après la dilatation du matériau, provoquant des fissures à l'interface qui se propagent à l'intérieur.

II.4.3 Résistance à l'acide chlorhydrique (HCl)

L'acide chlorhydrique attaque le polyester isophtalique, les tests montrent la diminution des propriétés mécaniques en fonction de la durée d'immersion. Le composite conserve cependant 50% de sa résistance à la flexion après 5 jours dans l'acide.

L'attaque semble se stabiliser après 8 jours avec une résistance de 49 N/mm². Le module d'élasticité diminue rapidement au début, restant supérieur à 50% de sa valeur initiale après 8 jours, puis décroît plus rapidement que la résistance à la flexion.

II.5. Test Izod

La méthode BS IZOD 306A2782 pour les matériaux thermodurcissables utilise des spécimens de 60 mm de longueur et de 12 mm de largeur, avec deux spécifications d'épaisseur différentes [81].

- Pour une épaisseur de 8 mm, le spécimen doit être entaillé.
- pour une épaisseur de 4 mm, le spécimen ne doit pas être entaillé.

Les échantillons testés sont du deuxième type (60 x 12 x 4 mm x mm x mm) car la résistance aux chocs des matériaux hétérogènes n'est pas affectée par l'entaille. Le dispositif de test est équipé d'un pendule ayant une énergie initiale correspondant à une hauteur initiale de 305 mm, générant une vitesse de 2440 ± 30 mm/s. L'énergie absorbée est mesurée à l'aide d'un dispositif de repérage et est indiquée sur une échelle graduée calibrée [82].

Au moyen d'un dispositif de repérage, l'énergie absorbée est indiquée sur une échelle graduée calibrée en joule.

II.6. Durabilité

L'analyse numérique est un outil efficace pour évaluer les structures des matériaux composites sous forme d'une plaque et leur comportement mécanique, confirmant ainsi les résultats expérimentaux ; cette partie présente une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux pour déterminer les caractéristiques mécaniques du stratifié verre/polyester. Des tests mécaniques ont été effectués sur un sandwich en verre/polyester, tandis que des essais chimiques et optiques ont été réalisés sur les mêmes sandwichs de verre-polyester avec la variation de quelques paramètres (pourcentage de fibre ; longueur des fibres et l'épaisseur).

II.6.1. Paramètres aléatoires

La densité de fonction est calculée en utilisant la méthode de Monte Carlo, qui nécessite la génération d'échantillons aléatoires pour les paramètres d'entrée, puis le calcul des réponses mécaniques pour chaque échantillon. Le cadre de calcul a été créé en FORTRAN pour garantir une grande précision, avec un total de 105 simulations effectuées [83].

II.6.2. Optimisation des paramètres de synthèse par la méthode des plans d'expériences

L'objectif de la conception expérimentale est d'améliorer la collecte d'informations tout en minimisant le nombre d'expériences réalisées. Afin de fournir des informations précieuses aux chercheurs, la méthodologie de la conception expérimentale consiste à construire un modèle d'approximation, également connu sous le nom de "modèle empirique".

Une fonction mathématique prédéterminée est choisie pour relier la réponse (y) aux facteurs (xi). Typiquement, ce processus comprend l'utilisation d'une expansion de série de Taylor-Mac Laurin, qui suppose des dérivés constants de ai et représente l'expansion comme un polynôme avec des degrés différents. (Morineau et al .,2005; Jacques Goupy.,2013) (formule II.1) [84].

$$y = a_0 + \sum a_{ij}x_i x_j + \dots + \sum a_{ii}x_i^2 + a_{ij\dots z}x_i x_j \dots x_z \quad \text{II.1}$$

Néanmoins, les composantes ci-dessus (xi) sont indiquées en utilisant diverses unités et valeurs qui présentent une variation significative. Par conséquent, leurs valeurs absolues doivent être révisées pour être représentées dans le modèle en raison de leur nature en tant que sommes de monômes [85]. Pour répondre aux exigences de l'équation du modèle (1), il est nécessaire de normaliser les facteurs pour générer des valeurs non unitaires qui se situent entre les deux valeurs extrêmes « -1 » et « +1 ». Cela peut être réalisé en utilisant la relation II.2 de codage suivante (valeurs codées) (Jacques Goupy.2013) :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left(\frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad \text{(II.2)}$$

Xi représente la valeur du paramètre codé, Umax représente la valeur du paramètre réel, Umax est la valeur réelle maximale de tous les paramètres et Umin est la valeur réelle minimale de tous les paramètres [85].

II.6.3. Test Optique (Transmittance)

Une analyse de la transmittance a été réalisée sur des échantillons renforcés de résine contenant différentes quantités de fibres de verre, ainsi que sur des échantillons de différentes épaisseurs. Cette analyse a été effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre TOUCH UV-31 SCAN et un balayage a été effectué sur trois domaines spectraux : UV, visible et proche-I [86].

II.7. Résultats et discussions pour l'analyse mécanique

II.7.1. Essai de traction

II.7.1.a. Effet du taux de fibres de verre

La répartition des résultats est l'allure des graphes représentatifs de l'évolution du module d'élasticité de la contrainte à la rupture en traction, en fonction de taux de fibres sont très significatifs ; il apparait clairement que ces deux caractéristiques mécaniques relatives à la traction qui augmentent régulièrement avec le taux de fibres. Cette augmentation ne peut être indéfinie du fait qu'il existe un taux de renfort maximal au-delà duquel, la liaison fibres-matrice n'est plus assurée. Le Tableau II.7. présente les valeurs de leurs principales caractéristiques mécanique pour différents pourcentages de fibre de verre.

Tableau II.7. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction pour différents pourcentages de fibre de verre

Taux de fibre %	ℓ (mm)	e (mm)	$S = \ell \cdot E$ (mm ²)	F (N)	σ_T (N/mm ²)	$\epsilon \% = \frac{\Delta L}{L} \%$	E (N/mm ²)	Dureté Bercol
9,64	13,88	0,87	12	1200	100	2,92	3422	45-55
28,18	12,38	1,0	12,38	2383	192	3,67	5246	45-55
39,1	14,02	0,93	13,03	2800	215	3,57	6019	45-55
49,1	19,55	1,04	14,13	3600	255	3,24	7847	45-50
62,27	13,38	1,16	15,59	4900	314	3,89	8074	45-50

La figure suivante illustre l'évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de la teneur en fibres.

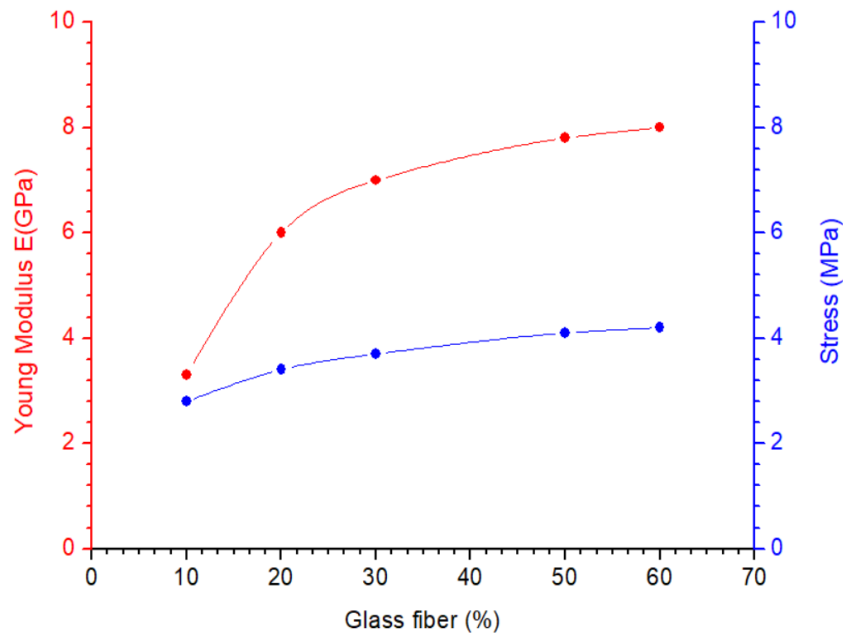


Figure II.11. Évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de la teneur en fibres

Le graphique présenté sur la Figure II.11 montre clairement les variations du module de Young et de la contrainte de rupture en traction en fonction de la teneur en fibres. On peut observer une augmentation régulière des deux propriétés mécaniques avec une augmentation de la teneur en fibres. En particulier, lorsque la teneur en fibre de verre atteint 60%, le module de Young atteint sa valeur maximale de 7,2 GPa, tandis que la résistance à la traction maximale de la plaque analysée est de 3,5 MPa. L'évaluation de la teneur en fibre de verre améliore la résistance à la traction de la structure examinée, Néanmoins, il est impératif de reconnaître que cette trajectoire vers la teneur augmentée en fibres est finie; un seuil de renforcement existe au-delà duquel l'intégrité de l'interface fibre-matrice ne peut pas être assurée [86].

Par ailleurs, certains chercheurs ont mis en évidence l'existence d'un taux minimal de fibres, pour lequel le composite bien que le transfert de charge de la matrice aux fibres se fasse correctement et ne puisse supporter d'une charge intérieure à la charge de rupture de la matrice. D'autre part, le renforcement de la matrice par des fibres exige une fraction volumique dite critique V_c à partir de laquelle le composite commence à supporter une charge à la rupture supérieure à celle de la matrice [87].

II.7.1.b. Effet de la longueur des fibres

La progression des propriétés mécaniques sous traction nécessite une élucidation théorique explicite. Déchiffrer de tels résultats implique une interprétation complexe, nécessitant une série d'expériences reproductibles pour élucider l'impact de longueurs de fibres variables (Roving) [65] sur le comportement mécanique de notre matériau composite sous tension.

Le Tableau II.8. représente les valeurs de leurs principales caractéristiques mécaniques pour différents longueurs de fibre de verre.

Tableau II.8. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction dans les différentes longueurs de fibre de verre

Longueur (mm)	l (mm)	e (mm)	$S=l.e$ (mm ²)	F (N)	σ_T (N/mm ²)	ε % = $\Delta L/L$ %	E (N/mm ²)	Dureté
30	12,54	2,86	35,9	2417	67	3,46	1947	35-40
60	12,51.	2,71	33,9	2900	85	3,97	2151	35.40
90	12,60	2,79	34,99	2500	73	3,24	2234	40-45
160	12,49	2,4	34,25	3500	102	4,05	2775	40

La figure suivante illustre l'évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de la longueur des fibres

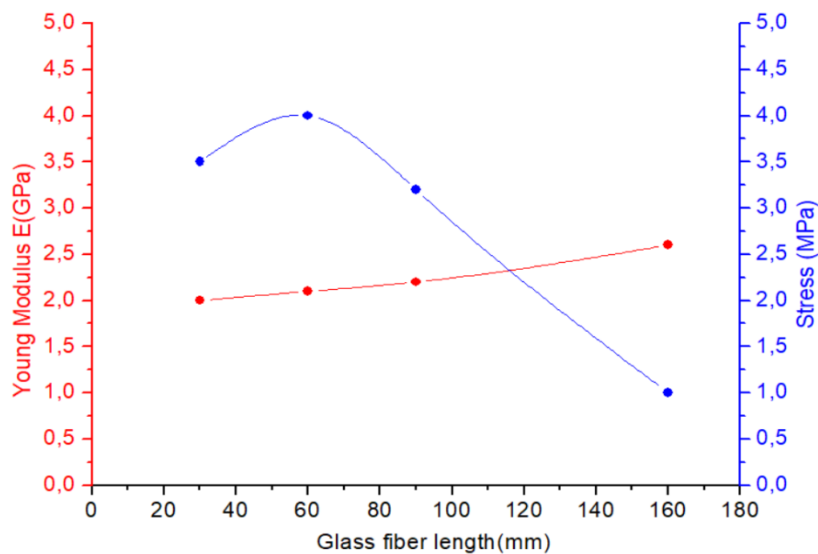


Figure II.12. Évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de la longueur des fibres

La Figure II.12 illustre l'évolution du module de Young et des contraintes de traction en fonction de la longueur de la fibre de verre. Il devient évident que ces deux propriétés mécaniques sous tension présentent une relation proportionnelle, augmentant régulièrement jusqu'à une longueur de 60 mm [66]. Le module de Young atteint une valeur de 4 GPa à ce moment, parallèlement à une contrainte de rupture de la plaque de 3,5 MPa. Cependant, avec une augmentation continue de la longueur des fibres, la résistance à la rupture de la plaque diminue, atteignant une contrainte de 1 MPa à une hauteur de $L = 160$ mm. Par conséquent, l'allongement des fibres entraîne une diminution de la résistance à la rupture de la structure. Cette observation s'aligne sur la prémisse théorique selon laquelle les fibres plus longues favorisent une liaison plus forte avec la matrice, ce qui implique que les fibres broyées d'une longueur de 1 cm fournissent un renforcement des particules moindre que les fibres plus longues.

II.7.1.c. Effet de l'épaisseur de la plaque

Le Tableau II.9. Représente les valeurs de leurs principales caractéristiques mécanique pour différentes épaisseurs des plaques. La Figure II.13 illustre la progression du module de Young et de la contrainte de rupture en fonction de l'épaisseur de la plaque [69]. Notamment, le module de Young présente une constance à travers des épaisseurs variables, tandis que la contrainte affiche une tendance croissante avec l'épaisseur, culminant à une valeur de 3,4 MPa.

Tableau II.9. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction dans les différentes épaisseurs des plaques

Epaisseur	ℓ (m)	$S=\ell.e$ (mm ²)	F (N)	σ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	ε % = $\Delta L/L$ %	Taux de fibre %	dureté
1,24	12,65	15,75	610	38	2334	1,62	20	45
1,92	14,17	23,14	1360	50	2522	1,98	20	35
2,72	14,09	38,29	2420	69	2627	2,79	20	50-55
3,76	13,73	51,57	3121	81	2177	2,79	20	40-45

La figure suivante dépeint l'évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de l'épaisseur de la plaque

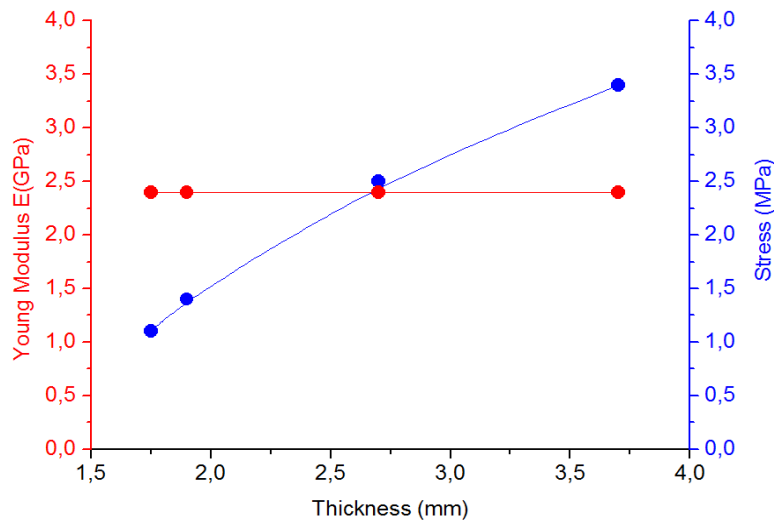


Figure II.13 : Évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de l'épaisseur de la plaque

Cette observation suggère que l'augmentation de l'épaisseur aide à augmenter la résistance à la rupture de la structure examinée, prolongeant ainsi sa durée de vie. Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'épaisseur de la plaque dans le contexte des performances structurelles et de la ténacité à la rupture et contribuent à la compréhension de ces propriétés mécaniques [75].

II.7.1.d. Essais de traction en fonction de taux de charge (CaCO_3)

Composite à fibres unidirectionnelle parallèles à la direction de la charge (FORCE).

Taux de fibre : 10% massique

Les valeurs du Tableau II.10 indiquent que les propriétés mécaniques dépendent des dimensions, du taux de CaCO_3 et de la teneur en fibres de verre. Elles varient en conséquence. D'après la Figure II.14., l'effet de l'addition de charge (CaCO_3) dans un composite polyester/fibre de verre, n'apparaît que pour des taux supérieurs à 5% massique où l'on constate une modification des propriétés mécaniques, ainsi la résistance à la traction et le module de Young diminuent en tenant compte de la variation de ces trois paramètres. Toutefois, l'évolution finale de la courbe n'est pas très précise au delà de 20 % massique. D'autres travaux peuvent être envisagés dans ce but.

Tableau II.10. Valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction de la teneur en CaCO_3

Taux CaCO_3	l (mm)	E (mm)	$S = l \cdot e$ (mm^2)	F (N)	σ_T (N/mm^2)	$\epsilon \% = \Delta L/L$ %	E (N/mm^2)	% exact de fibre
5	14,52	1,21	17,96	1020	59	1,72	3400	45-50
10	14,03	1,20	16,83	1000	58	1,65	3803	45-55
15	13,83	0,91	12,58	940	74	1,23	6226	50
20	13,66	1,08	14,86	1200	81	1,85	4376	40

La figure suivante représente l'évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de du taux de charge CaCO_3

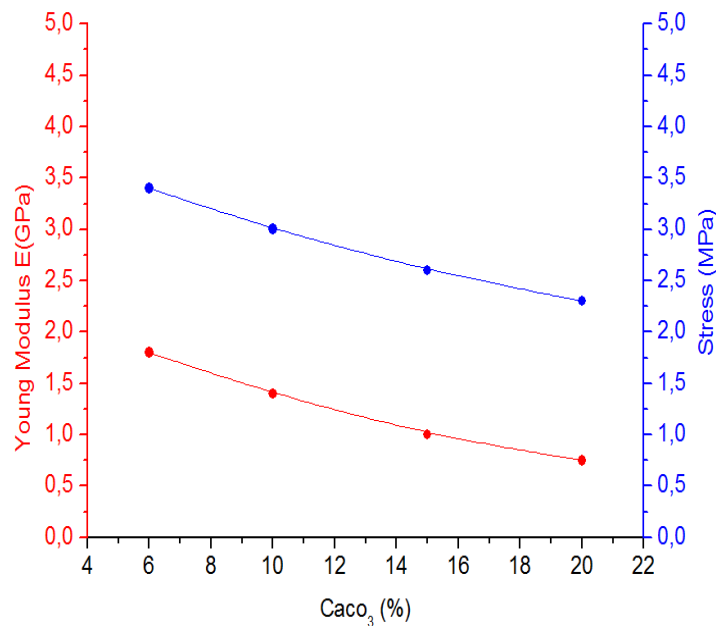


Figure II.14. Évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de la teneur en CaCO_3

II.7.2. Essai de flexion 3 points

II.7.2.a. Effet du taux de fibre

Le Tableau II.11. présente les valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction pour les différents pourcentages de fibre de verre étudiés. Les Figures II.15. et II.16. présentent l'évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction du taux de fibres. A première vue, on peut dire que la contrainte à la rupture et le module d'élasticité

augmentent avec le taux de fibres ; toutefois, l'allure de la courbe n'est pas très précise, l'augmentation de ces deux caractéristiques mécaniques présente des variations importantes ; un facteur qui pourrait en être la cause est la présence des fibres, mais d'un point de vue général, on peut conclure que nos résultats s'accordent plus au moins avec la théorie d'après laquelle la contrainte et le module augmentent de la même manière avec l'augmentation du taux de fibres.

Tableau II.11. Valeurs du module d'élasticité et la contrainte en flexion pour différents pourcentages de fibre de verre

Taux de fibre %	L (mm)	ℓ (mm)	E (mm)	F (N)	σ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Y (mm)	Dureté
9,64	82,06	27,8	1,0	35	54	26583	14,8	45-55
29,12	77,6	26,3	1,1	120	283	32383	14,8	45.55
39,1	81,8	27,9	1,07	75	176	43957	15,6	45-50
48,1	79,1	25,5	1,7	155	283	66237	14	45-50
62,28	81,9	27,9	1,1	160	355	96174	14	45-50

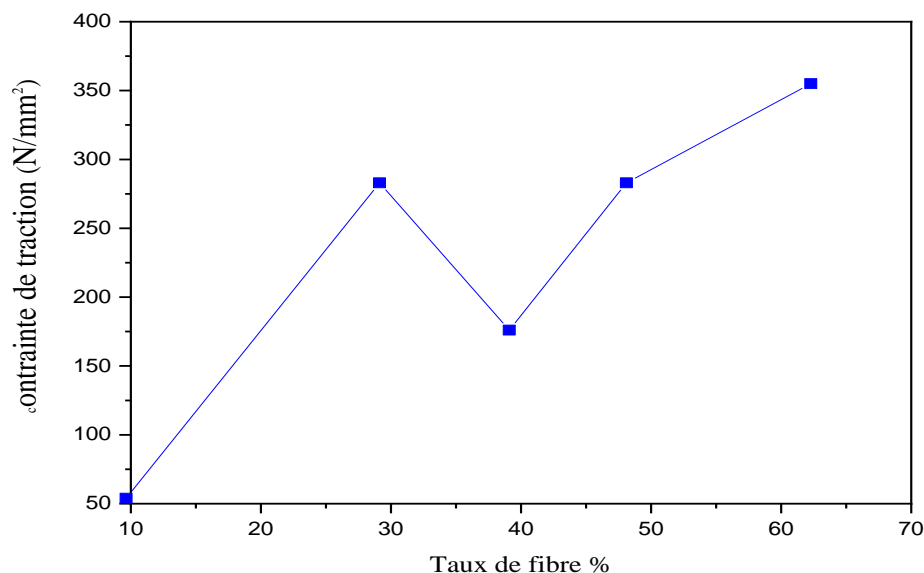


Figure II.15. Contrainte de traction (N/mm²) en fonction du taux de fibres

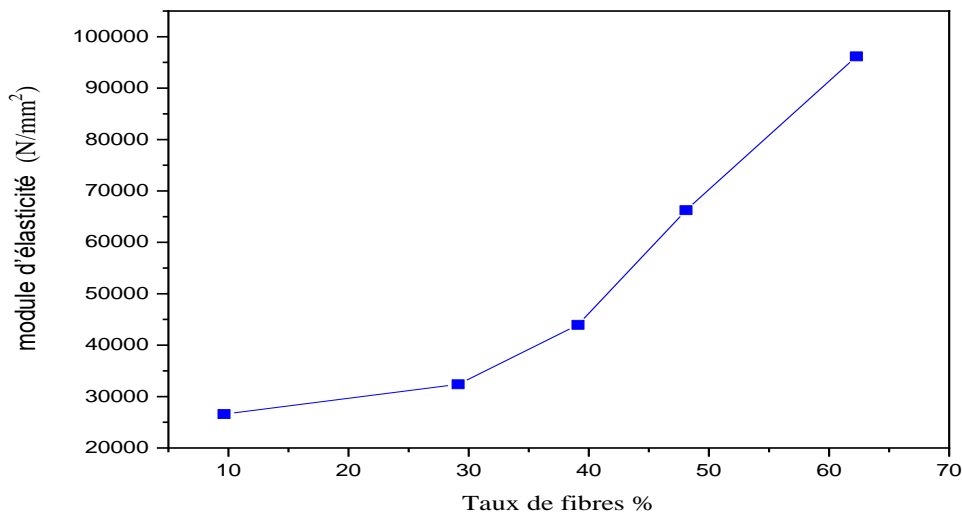


Figure II.16. Module d'élasticité (N/mm²) en fonction du taux de fibres

Certains chercheurs ont mis en évidence l'existence d'un taux minimal de fibres en deçà duquel, bien que le transfert de charge de la matrice aux fibres s'opère correctement, le composite ne peut pas supporter une charge supérieure à la résistance à la rupture de la matrice elle-même. D'autre part, le renforcement de la matrice par des fibres nécessite l'atteinte d'une fraction volumique critique à partir de laquelle le composite commence à supporter une charge à la rupture supérieure à celle de la matrice seule [76].

II.7.2.b. Effet de la longueur des fibres

Le Tableau II.12 donne des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en traction pour les différentes longueurs de fibre de verre investiguées.

Tableau II.12. Représentation des valeurs du module d'élasticité et la contrainte en flexion pour différentes longueurs de fibre de verre

Longueur des fibres	L (mm)	ℓ (mm)	E (mm)	F (N)	σ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Y	Taux de fibre (%)
30	80,21	23,92	2,13	234	166	4363	8,1	14,71
45	80,89	24,00	2,03	277	215	6605	8,5	15,9
60	80,89	23,83	2,53	198	100	1399	8,8	15,32
80	80,91	24,06	2,52	165	78	777	11,6	15,79

Les Figures II.17 et II.15. suivantes représentent l'évolution de la contrainte de rupture et du module d'élasticité et en fonction de la longueur des fibres.

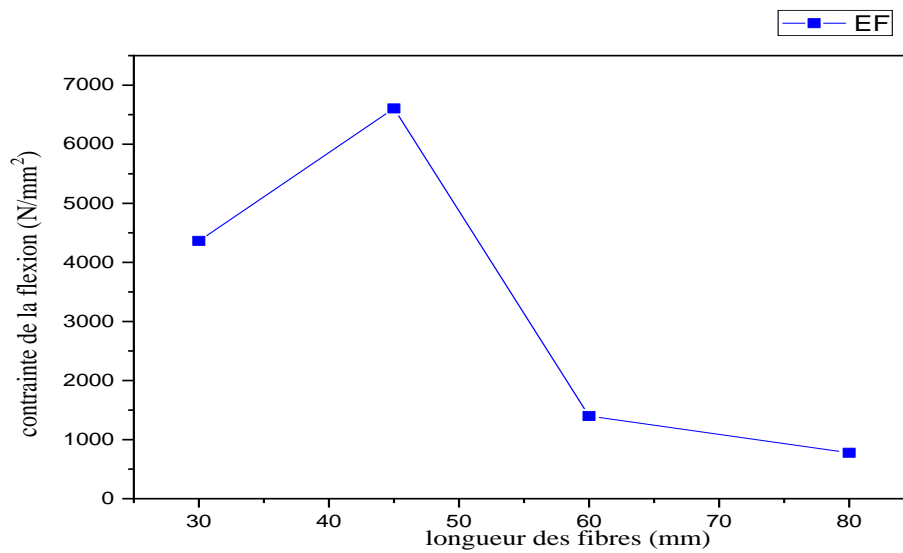


Figure II.17. Contrainte de flexion σ_F en fonction de longueur des fibres

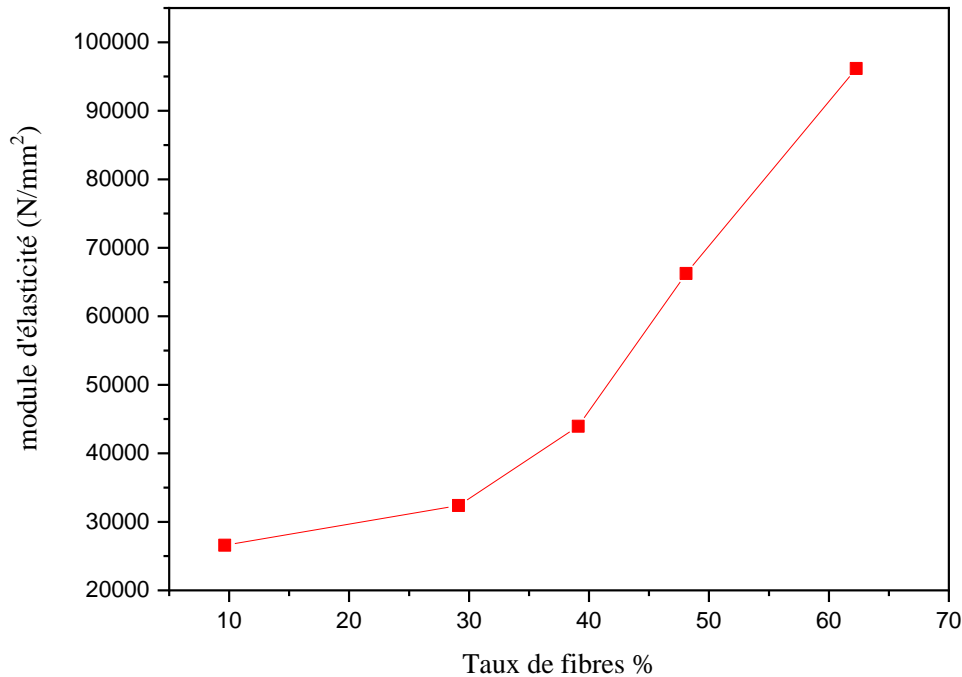


Figure II.18. Module d'élasticité de flexion E_F en fonction de longueur des fibres

On pourrait annoncer que la résistance à la flexion ainsi que le module d'élasticité augmentent avec la longueur des fibres jusqu'à une longueur optimale de 45 mm, ensuite, ils décroissent pour une longueur supérieure à 45 mm, ce qui s'accorde avec la théorie. A l'échelle industrielle, on utilise toujours dans le cas des fibres coupées, une longueur qui varie de 3 à 5 cm, ce qui est le cas pour les fibres coupées utilisées pour la fabrication de tubes PES à l'unité tubes de l'ENPC [79]. De même, les fibres coupées utilisées dans les différents mats constituent le type de renfort principal pour les stratifiés. L'effet de la longueur des fibres réside dans le fait que tout composite soumis à une charge de flexion, présente une force supérieure sollicitée en compression et une force extérieure sollicitée en traction, cependant la zone du milieu reste neutre, ainsi les fibres de la zone inférieure sont soumises à des contraintes de traction et la résistance à la traction augmente avec la longueur des fibres, donc la rupture est causée par la zone supérieure sollicitée en compression. Le mécanisme de rupture est très complexe à expliquer et son étude fait l'objet de nombreuses recherches.

II.7.2.c. Effet de l'épaisseur de la plaque

Le Tableau II.13. présente les valeurs du module d'élasticité et la contrainte en flexion pour les différentes valeurs d'épaisseur de plaque étudiées et Les figures II.19. et

II.20. montrent l'évolution du module d'élasticité et de la contrainte de rupture en fonction de l'épaisseur de la plaque.

Tableau II.13. Valeurs du module d'élasticité et la contrainte en flexion pour les différentes épaisseurs de plaque

Epaisseur	L (mm)	ℓ (mm)	F (N)	σ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Y (mm)	Taux de fibre %	Dureté Bercol
1,3	31,5	25,17	49	88	2977	9,6	26,31	45
2,2	81,75	27,66	180	98	2619	7,2	25,23	35
2,9	82,47	28,87	384	123	3483	5,1	26,45	50-55
3,8	82,25	28,61	721	133	3878	3,8	26,6	40-45

A première vue l'idée dégagée à partir du graphe représentatif en fonction des épaisseurs est que la contrainte de rupture en flexion augmente avec l'épaisseur. Cependant, en ce qui concerne la chute de module d'élasticité à l'épaisseur (2,2 mm) ne pourrait être attribuée qu'au taux de fibre de verre légèrement inférieur au taux de fibres de verre dans les autres échantillons ainsi qu'au degré de polymérisation de ce échantillon [81].

En conclusion, on pourrait dire que la résistance à la flexion ainsi que le module d'élasticité augmentent avec l'épaisseur des plaques.

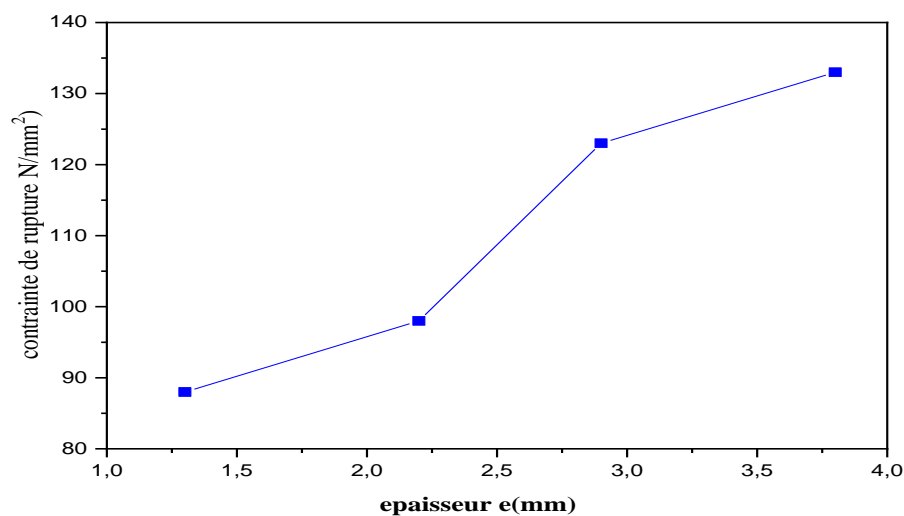


Figure II.19. Contrainte de rupture de flexion en fonction de l'épaisseur de plaque

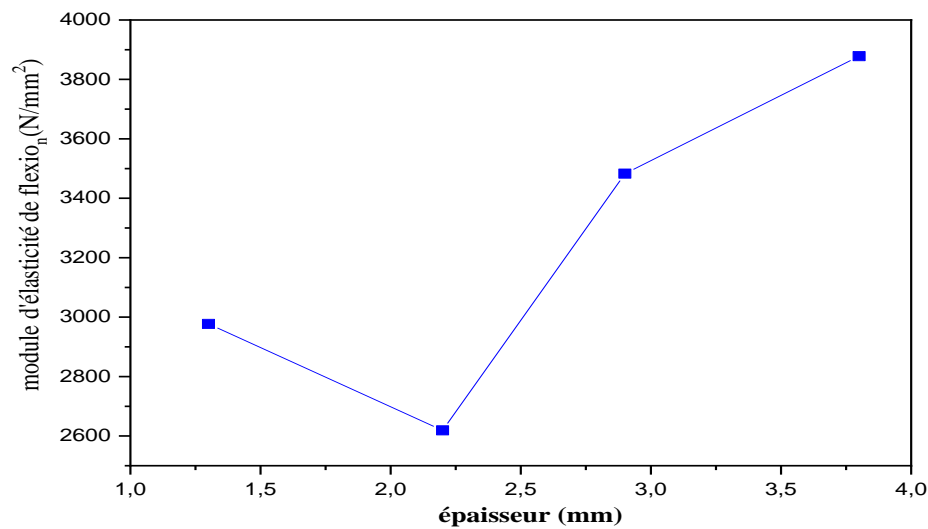


Figure II.20. Module d'élasticité de flexion en fonction de l'épaisseur de plaque

II.7.2.d. Effet de la charge CaCO_3

Il est aisé de voir que les propriétés mécaniques d'un composite polyester/fibres de verre pour l'essai en flexion sont améliorées par l'addition de la charge (Figure II. 21) ; cependant et comme indiqué sur le graphe de la résistance, pour un taux de charges supérieur à 20 % massique [84], l'amélioration de la résistance à la flexion comme pour le module d'élasticité n'est plus sensible. On aperçoit un palier où les produits mécaniques, tendent à rester constants, ce qui s'accorde bien avec la théorie qui prédit une diminution des propriétés mécaniques au-dessus de 40 % de CaCO_3 . Ceci conduit à une zone optimale de charges entre 20 % et 40 %. Par ailleurs, on remarque une amélioration de la dureté du composite avec l'élévation à taux de charge.

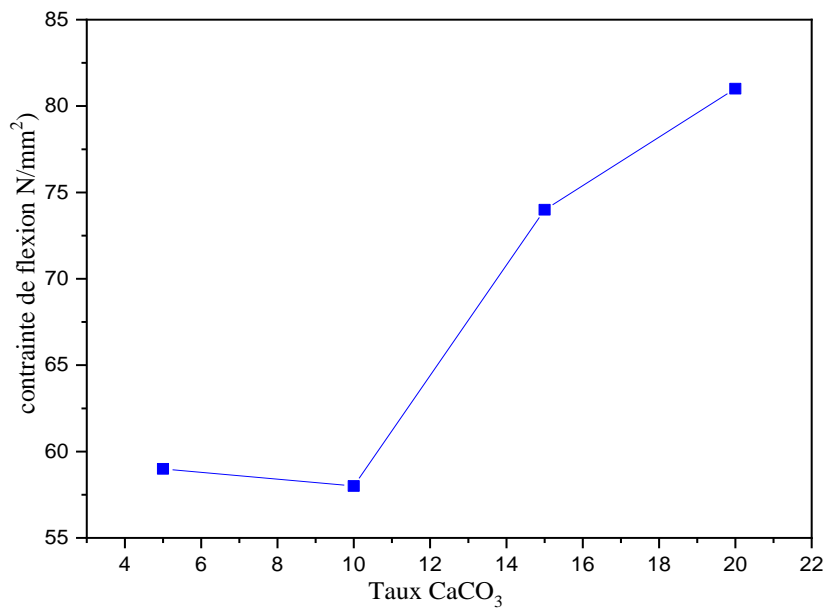


Figure II.20 : Contrainte de rupture de flexion en fonction de % de CaCO₃

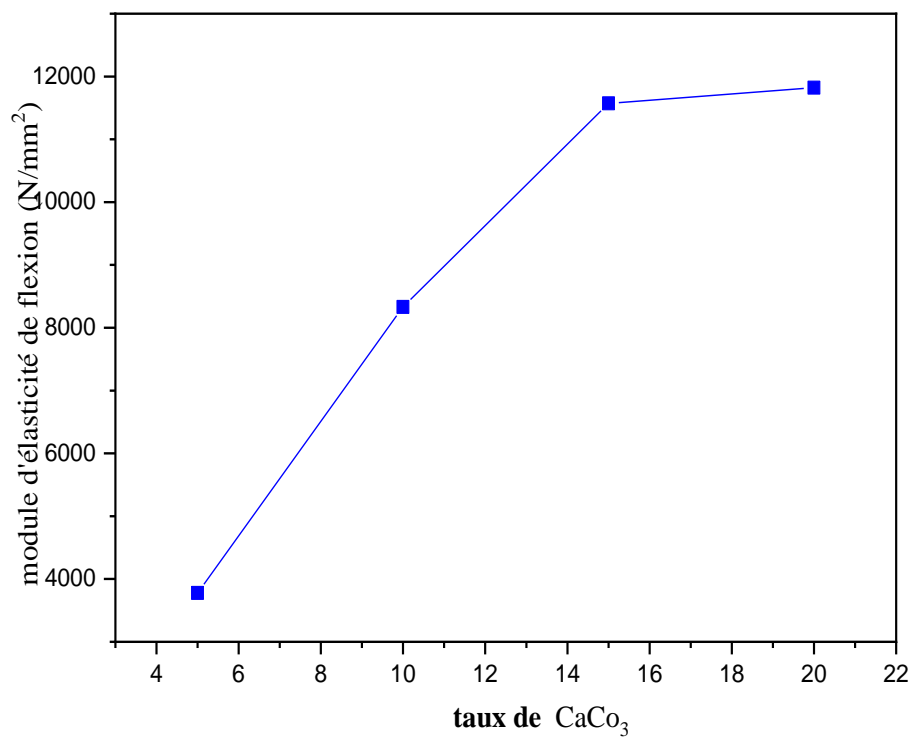


Figure II.21 : Module de flexion en fonction du % de CaCO₃

II.8 Analyses chimiques

L'objectif de l'étude est de déterminer la durée de vie des matériaux soumis au délaminage, c'est-à-dire de prédire à quel moment les caractéristiques mécaniques atteignent un niveau d'intégrité d'une structure cloquée. Les modifications des modules des stratifiés pendant le processus de vieillissement sont surveillées à l'aide d'une analyse modale et confirmées par des essais mécaniques traditionnels (flexion 3 points et traction).

II.8.1 Effet d'immersion dans l'acide acétique

-Le tableau II.14 regroupe quelques valeurs des propriétés mécaniques en fonction de la durée d'immersion dans l'acide acétique (CH_3COOH).

Tableau II.14. Valeurs des propriétés mécaniques en fonction de la durée d'immersion dans l'acide acétique

	L (mm)	ℓ (mm)	e (mm)	F (N)	σ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Y	Taux de CaCO ₃ (%)
Avant immersion	81,1	27,21	1,3	60	94	3247	9,33	5
Après 2 jours	81,36	26,8	1,14	19	40	1318	11	5
Après 2 jours	81,25	28,6	1,4	15	19	799	10,4	5
Après 2 jours	81,22	27,41	1,4	18,5	15	520	10,5	5

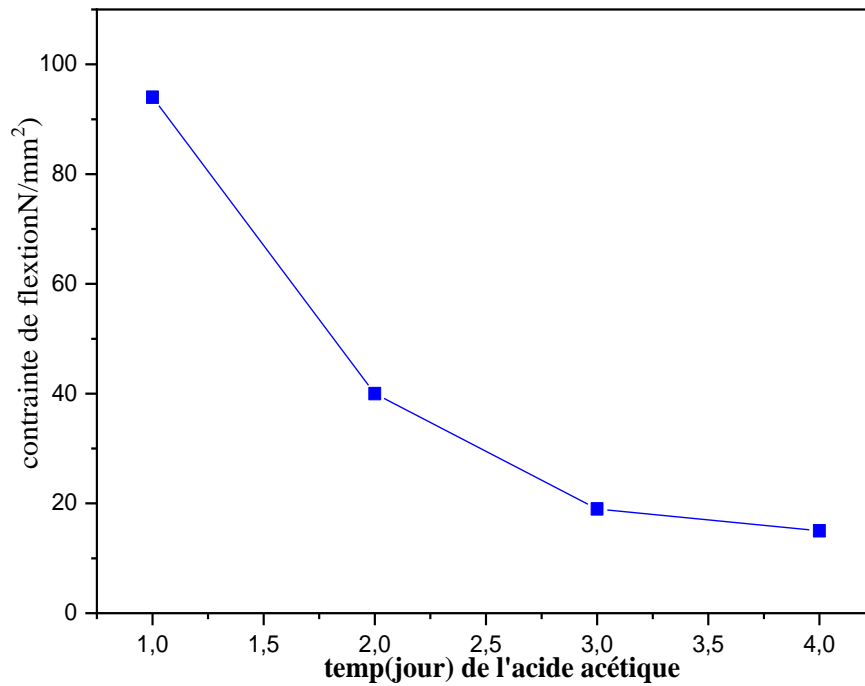


Figure II.22. Contrainte de flexion en fonction de temps (jour) dans l'acide acétique

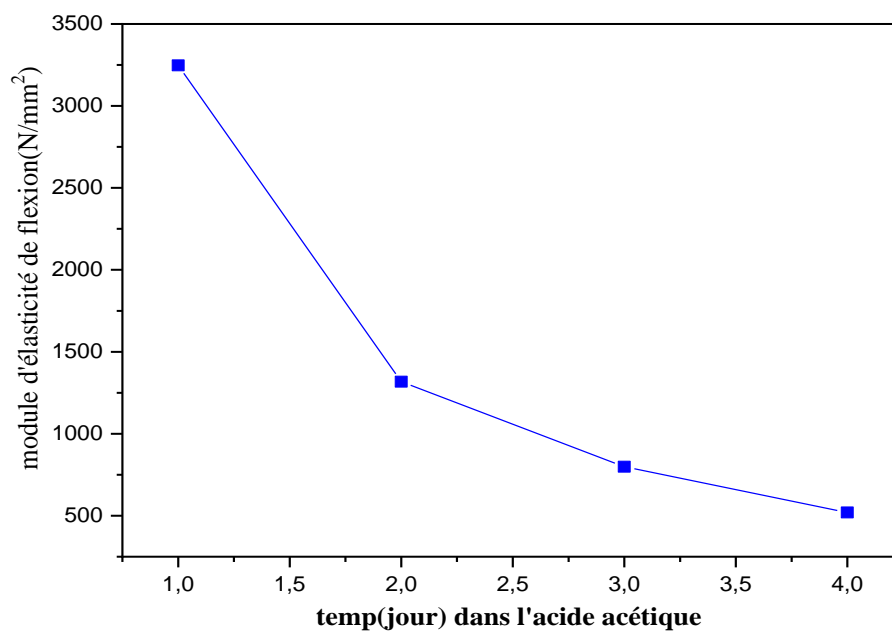


Figure II.23. Evolution des propriétés mécaniques dans l'acide acétique

II.8.2 Effet d'immersion dans l'eau bouillant

- La Figure II. 15 présentent l'évolution des propriétés mécanique en fonction de la durée d'immersion dans l'eau bouillant

Tableau II.15. Représentation des propriétés mécanique en fonction de la durée d'immersion dans l'eau bouillant :

	L (mm)	ℓ (mm)	E (mm)	F (N)	σ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Y
Avant immersion	82,05	28,95	1,1	41	89	4078	8,6
Après 2 jours	81,85	27,82	1,29	50	82	3498	7,3
Après 4 jours	81,22	28,2	1,2	41	76	2523	10,4
Après 6 jours	82,05	28,51	1,32	47	71	2300	9,7
Après 8 jours	83,05	29,61	1,32	47	71	2300	9,7

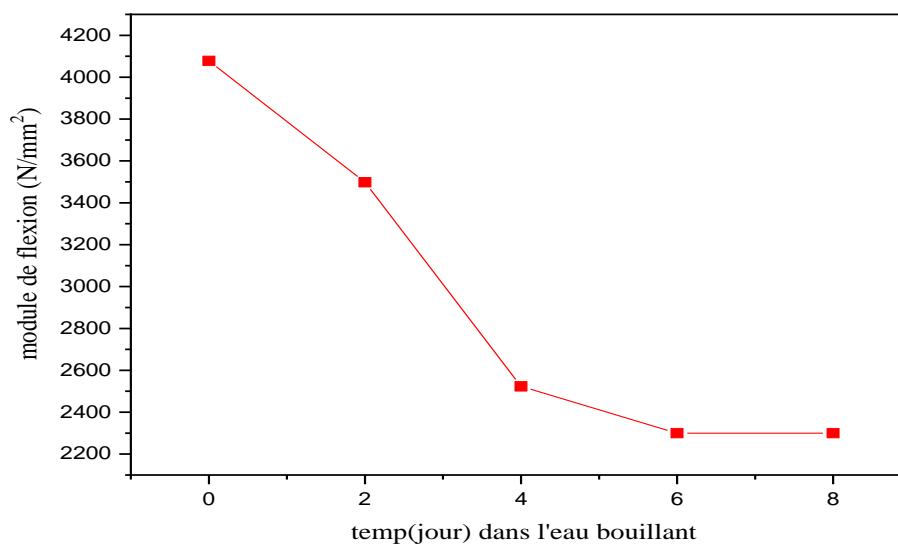


Figure II.23. Module de flexion en fonction de temps (jour) dans l'eau bouillante

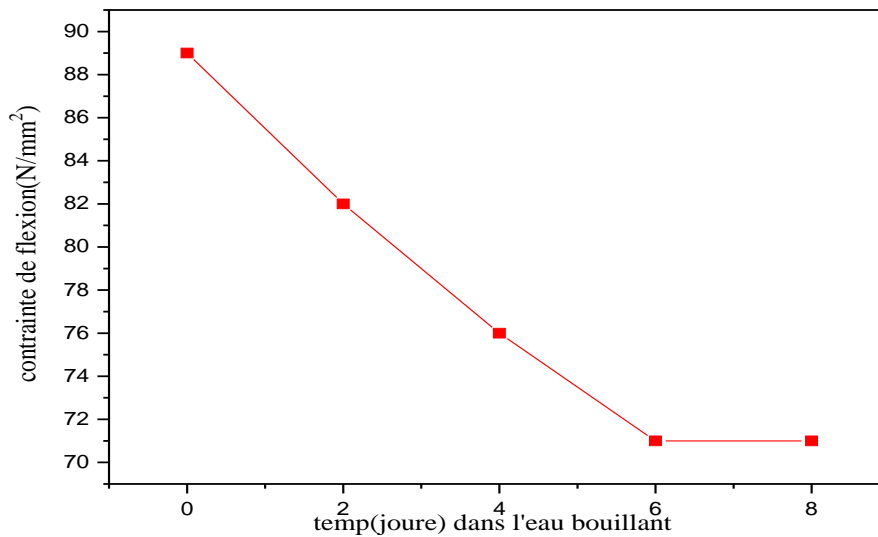


Figure II.24. Contrainte de flexion en fonction de temps (jour) dans l'eau bouillante

L'impact de l'humidité sur le comportement mécanique des matériaux composites est extrêmement complexe. En effet, les effets de l'eau sur un matériau à matrice polymère ont des conséquences importantes sur ses caractéristiques mécaniques. Diverses études ont attribué la dégradation à la détérioration de la matrice, puis à la détérioration de l'interface entre la fibre et la matrice (délamination) et enfin à la défaillance de la fibre.

Dans cette étude le module d'élasticité du matériau composite est demeuré changé ; après 2 jours d'immersion à 23 °C. Elle a toutefois noté une baisse de 20 % du module d'élasticité. Elle a observé une perte de 45 % de la résistance à la flexion après seulement de 8 jours d'âge, les modifications structurelles substantielles provoquées par les augmentations de temps d'immersion ont un impact immédiat sur ces caractéristiques. En fait, la mobilité des chaînes polymères constituant augmente avec le temps. La formation de volumes libres entre les chaînes macromoléculaires est favorisée par le passage d'un état vitreux à un état caoutchouteux. Sous sollicitation mécanique [87], ce changement d'état se traduit par un assouplissement du matériau et une augmentation au niveau de la déformation à rupture.

- Le tableau II.16 Regroupe quelques propriétés mécaniques en fonction de la durée d'immersion dans l'acide chlorhydrique (HCl).

Tableau II.16. Propriétés mécaniques en fonction de la durée d'immersion dans l'acide chlorhydrique à une concentration de 0,1 mol/l

	L (mm)	l (mm)	E (mm)	F (N)	σ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Y
Avant immersion	82,25	28,4	1,16	55	106	3865	9,93
Après 2 jours	82,25	28,32	1,31	50	89	2947	8,62
Après 4 jours	71,79	28,39	0,9	21,25	69	2839	11,2
Après 6 jours	82,41	28,8	1,07	25	54	2002	11,1
Après 8 jours	82,41	28,76	1,2	27,5	49.5	1902	9

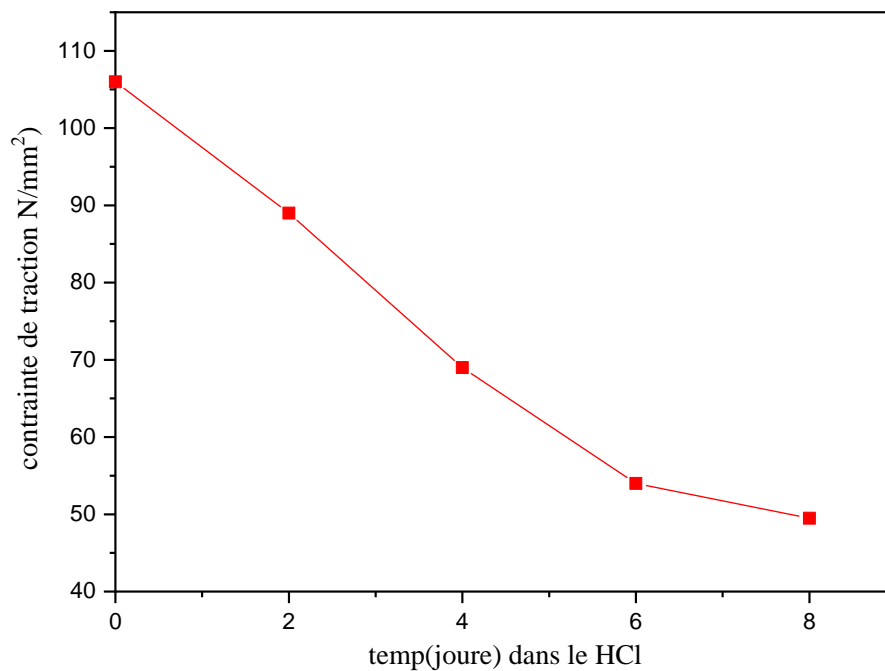


Figure II.25. Contrainte de traction en fonction de temps (jour) dans HCl

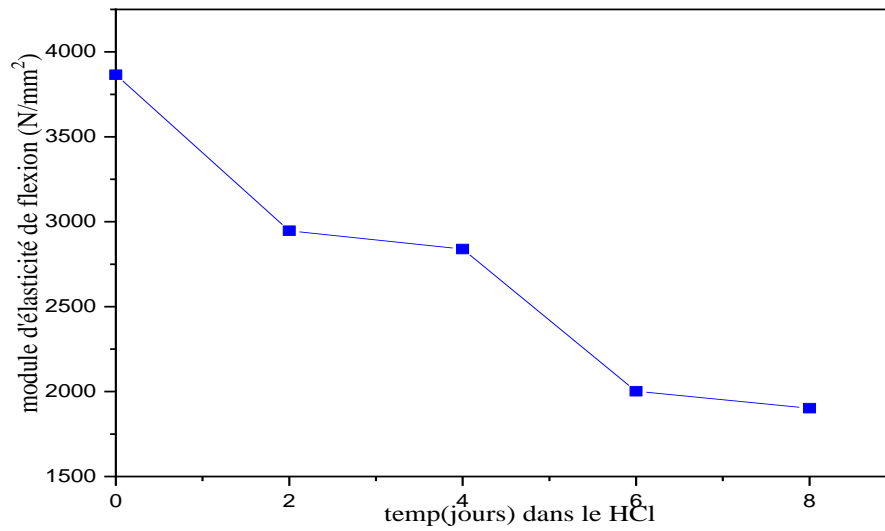


Figure II.26. Module d'élasticité en fonction de temps dans HCl

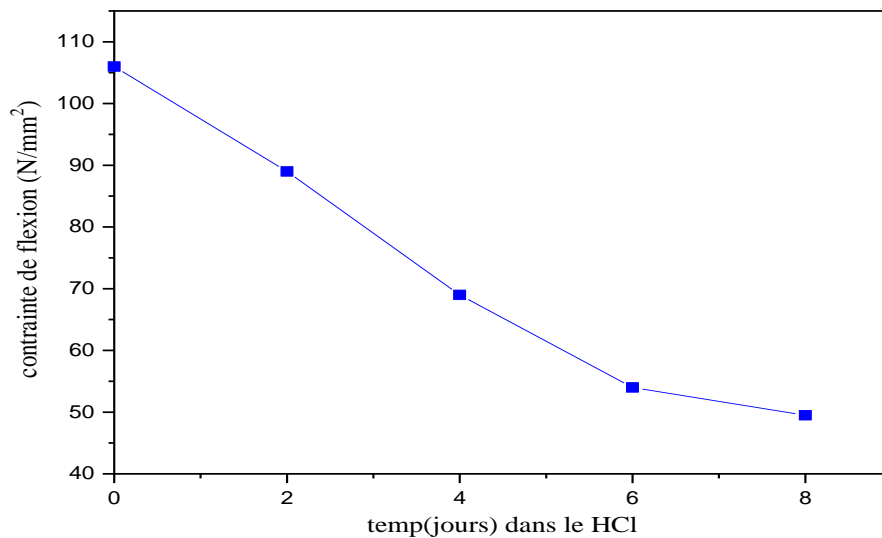


Figure II.27. Contrainte de flexion en fonction de temps (jour) HCl

A partir de ces résultats, on observe une perte de masse continue du composite à partir du deuxième jour. Après 2 jours, on constate une légère différence de tendance de détérioration; après le 4ème jour, le composite présente une perte de masse significative de l'ordre de 10%. La réduction de la masse est due à la dissolution de certains constituants du matériau composite suite à l'attaque d'acides à savoir l'acide chlorhydrique et de l'acide acétique ce qui s'expliquerait par sa faible résistance chimique.

Quant aux propriétés mécaniques, on doit signaler un accroissement considérable en liaison avec la présence de la matière résineuse qui permet de consolider autant que possible les couches stratifiées de fibres. Par ailleurs et en rapport avec les faibles contraintes dues au gonflement du matériau, on note que leur effet n'affecte pratiquement pas la qualité du matériau constitué [88]. Il en ressort que la présence de la résine dans la structure des mèches de fibres de verre soit entre les espaces interstitiels, la porosité du matériau composite obtenu et la possibilité de décollement d'interfaces mal formées contribuent à l'altération du dit matériau.

Il se dégage qu'on doit accorder une importance toute particulière à la qualité de liaisons entre fibres, disposées en couches enchevêtrées et au taux d'imprégnation de la résine notamment lorsque la mise en œuvre est effectuée à froid [89]. A remarquer qu'il y a lieu d'attirer l'attention sur l'existence d'un seuil de fissuration directement dépendant de la teneur du matériau composite en résines.

II.9 Test IZOD

Dans notre cas, nous allons nous intéresser d'avantage aux essais Izod pour l'étude de ténacité de notre matériau.

La norme ASTM 0256 doit être suivie pour les essais d'impact Izod. Les mesures de l'éprouvette doivent être les suivantes : 64 mm pour la longueur, 12,7 mm pour la largeur et 3,2 mm pour l'épaisseur minimale. Chaque test doit être exécuté au moins cinq fois afin de vérifier les résultats [90].

-Le tableau III.17 présente l'énergie absorbée en fonction de taux de fibre les résultats seront présentés sous forme d'une courbe décrivant ainsi les valeurs des moyennes d'énergies absorbée pour chaque pourcentage de fibres.

Tableau II.17 : Représentation de l'énergie absorbée en fonction de taux de fibres

Taux de fibres (%)	Energie absorbée E (joule)				
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne	Erreur ΔE
UP	1,5	1,7	2,0	1,7	0,3
10 %	2,5	2,8	3	2,7	0,3
20 %	3	3,5	3,8	3,4	0,5
27 %	4,8	5,5	7	5,7	1,3
35 %	7,5	8,0	8,5	8,0	0,6

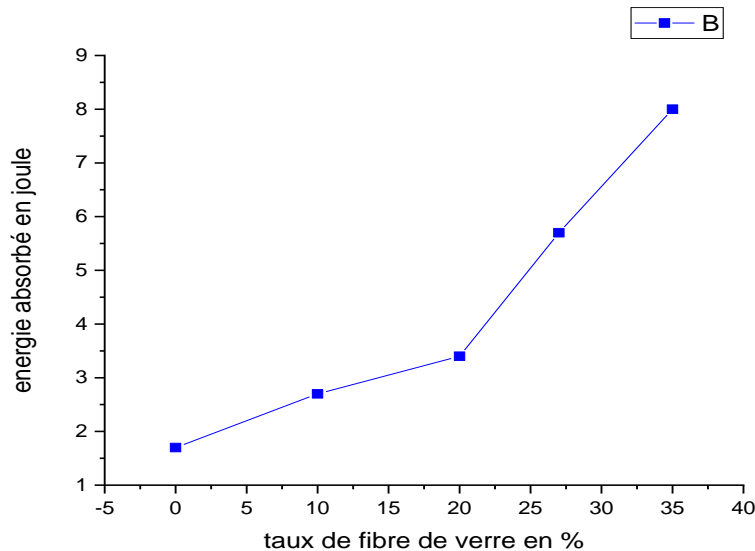


Figure II.28 : Représentation graphique de l'énergie absorbée en fonction de taux de fibre

La courbe montre que la résistance au choc IZOD dépend fortement du renfort incorporé dans la résine, ce qui affecte la dureté du composite de manière significative. Cette dureté augmente de manière linéaire avec l'augmentation du taux de fibres de verre, ce qui signifie que plus la concentration en verre est élevée, plus la résistance augmente.

$$E = E_{\text{moy}} \pm \Delta E \quad (\text{II.3})$$

II.10. Durabilité des plaques des composite résine-fibre

Les matériaux composites résine/fibre de verre continuent de s'imposer dans de nombreux secteurs grâce à leurs performances mécaniques exceptionnelles. Cependant, des défis technologiques restent à relever pour en améliorer l'accessibilité et la durabilité à long terme. La durabilité est fonction de paramètres d'intérêt

II.11. Paramètres aléatoires

Les éléments aléatoires incluent les paramètres de résistance à la traction des matériaux notés E , ν , α , n et la contrainte appliquée σ . La figure II.29 présente la fonction de densité de probabilité obtenue en ajustant l'histogramme à des modèles théoriques. Deux lois de distribution, à savoir polynomiale et gaussienne [91], ont été étudiées. En comparaison, il est conclu que la loi gaussienne offre une approximation satisfaisante de la fonction de densité de probabilité $E(x)$ avec une estimation moyenne raisonnable.

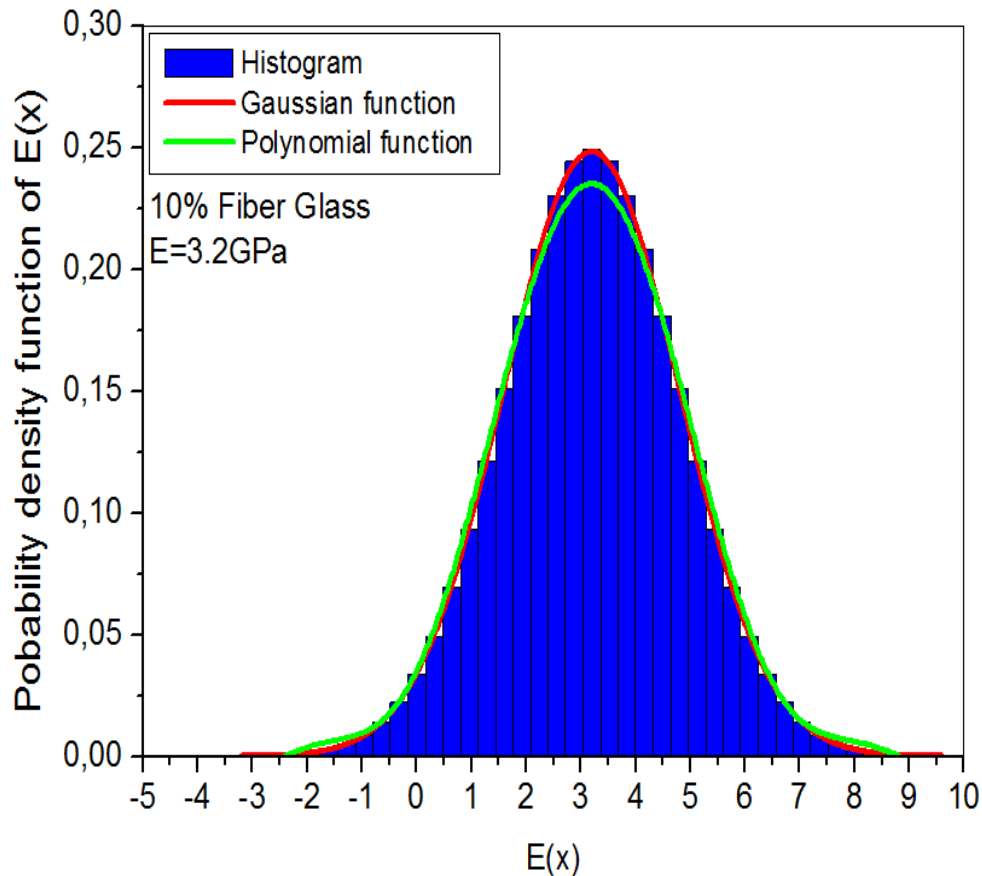


Figure II.29 : Fonction d’histogramme et de densité de probabilité de $E(x)$

- La figure II.30 montre la relation entre la probabilité de défaillance de $E(x)$ et les différents pourcentages de fibres de verre. Il est clair qu’une faible quantité de fibres de verre entraîne une probabilité de défaillance plus élevée. De plus, la marge augmente significativement avec les incertitudes liées au pourcentage de fibres de verre, mettant en évidence son importance dans l’influence de la probabilité de défaillance.
- La Figure II.31 présente la probabilité de défaillance de $\sigma(x)$ pour différentes longueurs de fibres de verre. On observe que les fibres de verre plus courtes sont associées à une probabilité de défaillance plus faible de $\sigma(x)$. Cependant, à mesure que la longueur des fibres de verre augmente, les incertitudes liées à ce paramètre entraînent une augmentation significative de la marge. L’incertitude entourant la longueur des fibres de verre a un impact important sur la probabilité de défaillance, surtout pour les longueurs importantes. En fin de compte, la probabilité de défaillance est influencée par la longueur des fibres de verre.

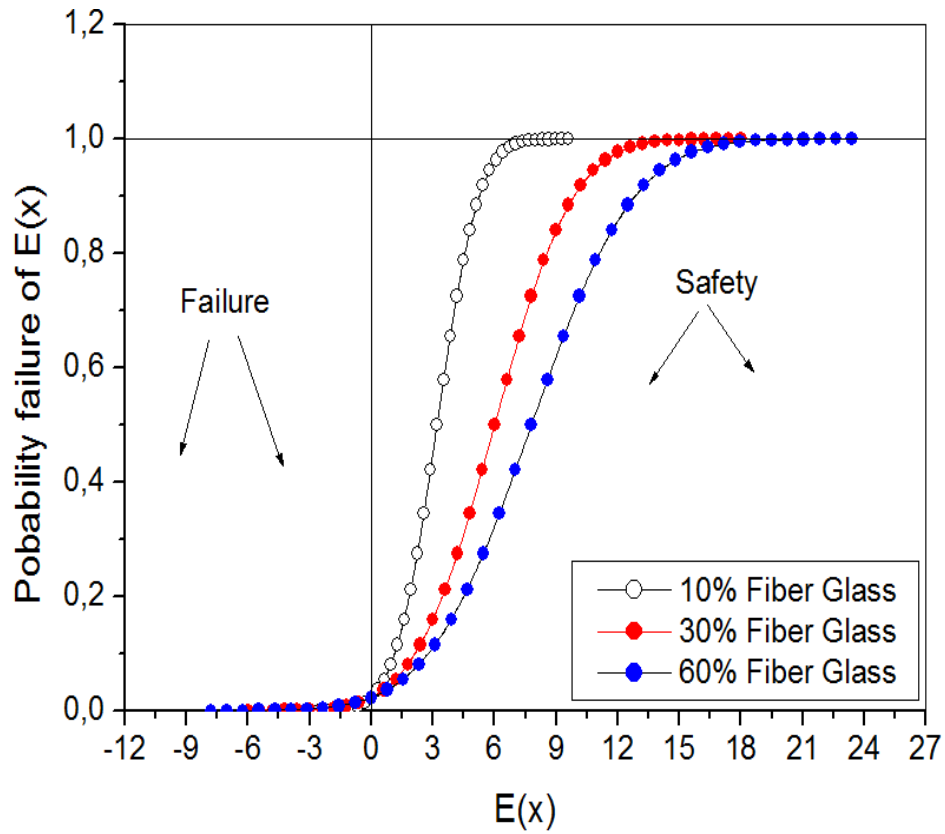


Figure II.30. Probabilité de défaillance de $E(x)$ pour différentes valeurs du pourcentage de fibre de verre

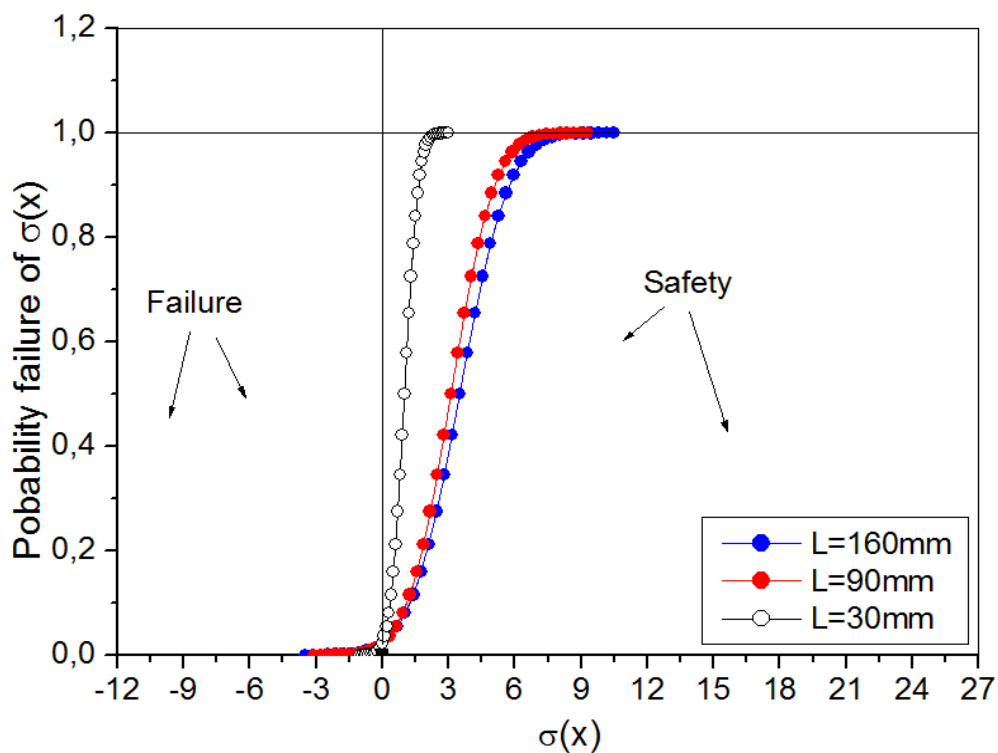


Figure II.31 : Probabilité de défaillance de $\sigma(x)$ pour différentes valeurs de longueur (L)

II.12 Optimisation des paramètres de fabrication à l'aide de fonctions de flexion

Compte tenu du problème traité dans le cadre de cette étude et vu les interactions entre les différents facteurs et après une analyse du problème, la méthode des plans d'expériences est un outil puissant dont l'objectif principal est de résoudre les difficultés dans le cadre d'un minimum d'expériences et avec un maximum de précision si le domaine d'expérimentation est judicieusement défini. Dans cette perspective de recherches, on rappelle d'une part que les facteurs expérimentaux retenus sont :

- 1) Pourcentage de fibres de verre (%) ;
- 2) Longueur moyenne des fibres ;
- 3) Epaisseur de la matrice (plaque) de matériau composite :

Alors que les réponses sont respectivement la contrainte σ et le module d'élasticité d'autre part. On a choisi un modèle mathématique censé être en mesure de décrire, à priori, de façon précise la réponse dans le domaine d'expérimentation [92]. Dans l'objectif d'estimer les effets principaux et les interactions, nous avons prévu la réalisation des expériences décrites dans le tableau suivant ;

-Le tableau II.18 représente le module de contrainte et le module d'élasticité et les différents paramètres de fabrication.

II.12.1. Plan d'expériences

Tableau II.18. Module de contrainte et d'élasticité et paramètres de fabrication

Exp N°	Paramètre			Réponse	
	% fibre (taux)	Longueur de fibre L (mm)	épaisseur de plaque (mm)	Contrainte σ (MPa)	module d'élasticité (MPa)
1	9,64	1	0,81	100	3422
2	28,18	1,6	1	192	5246
3	39,1	1,07	0,93	215	6019
4	49,1	1,17	1,04	255	7847
5	62,28	1,1	1,16	314	8074
6	14,71	30	2,13	166	4363
7	26,6	82,26	2,8	133	3878
8	26,31	81,5	1,3	88	2977
9	9,64	1	0,81	98	2619
10	26,64	80	1,9	128	3493
11	15,79	80	2,52	78	777
12	25,23	81,75	2,2	98	2619
13	0	0	4	87,1	1267
14	39,1	1,07	0,93	180	5983

Dans les essais de flexion, deux réponses clés ont été retenues: la contrainte et le module d'élasticité. La contrainte représente la force exercée sur un matériau lorsqu'il est plié, tandis que le module élastique mesure sa capacité à retrouver sa forme initiale après déformation. On note que nous avons jugé utile de regrouper dans le tableau ci-dessus les réponses et les niveaux des facteurs, prévus pour l'analyse de la significativité de la régression [94].

Lors des essais de flexion, il est essentiel de prendre en compte la résistance et la déformation d'un matériau soumis à des contraintes de pliage ou de courbure. Le module d'élasticité joue un rôle crucial dans la détermination de la rigidité du matériau dans de telles situations.

II.12.1. Codage des paramètres

Par ailleurs, le codage des facteurs permet le passage des grandeurs physiques à des grandeurs adimensionnelles, variant toutes dans un [96], domaine tout à fait précis à savoir $[-1, +1]$ via la transformation suivante :

$$X = \frac{x - \bar{x}}{Ec(x)}$$

Où \bar{x} est la valeur moyenne de x sur l'intervalle et (x) l'écart type de x qu'on définit par :

$$\bar{x} = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}$$

$$Ec(x) = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

Le codage des facteurs expérimentaux nous a permis de dresser le tableau II.19.

Tableau II.19. Valeurs codées des paramètres

Exp No	% Fibres X_1	longueur de fibre X_2	Épaisseur de la plaque X_3
1	-0,976	-1	-0,825
2	-0,29	-0,985	-0,667
3	0,115	-0,998	-0,725
4	0,485	-0,996	-0,633
5	0,973	-0,998	-0,533
6	-0,789	-0,293	0,275
8	-0,348	0,982	0,833
9	-0,359	0,963	-0,417
10	-0,976	-1	-0,825
11	-0,347	0,927	0,0833
13	-0,749	0,927	0,6
14	-0,399	0,97	0,333
15	-1,33	-1,02	1,83
16	0,115	-0,998	-0,725

Pour clarifier d'avantage :

X_1 : représente le pourcentage de fibres,

X_2 : représente la longueur de la fibre,

X_3 : représente l'épaisseur de la plaque,

Y_1 : représente la contrainte,

Y_2 : représente le module d'élasticité

Ainsi, le modèle mathématique s'écrirait :

$$Y_i = a_0 + a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + a_3 * x_3 + a_{12} * x_1x_2 + a_{13} * x_1x_3 + a_{23} * x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3 + \varepsilon$$

Avec Y_1 , représente la contrainte et Y_2 , le module d'élasticité.

II.12.3 Détermination des valeurs des coefficients

En remplaçant ces valeurs codées dans le modèle (équation II.1), différentes équations sont formées et exprimées sous forme de matrice; la solution de ce système d'équations est inégale en exprimant (équation II.4)

$$a_{ij} = (X^t X)^{-1} (X^t) (Y) \quad (\text{II.4})$$

Où : X : Matrice du modèle de facteurs, X^t : Transposition de la matrice du modèle de facteurs, $(X^t X)^{-1}$: Matrice d'information, (Y) est la matrice de réponse (Jacques Goupy., 2013). Ainsi, les équations modèles (4 et 5) sont présentées :

$$Y_1 (\text{contrainte}) = 178,16 + 22,39X_1 - 12,69X_2 + 9,04X_3 + 0,68X_1^2 - 29,36X_2^2 - 11,65X_1X_2 - 1,38X_2X_3 + 1,74X_1^3 + 46,95X_1X_2^2 \quad (\text{II.5})$$

$$Y_2 (\text{module d'élasticité}) = 5340,14 + 748,26X_1 - 435,44X_2 + 74,64X_3 - 239,67X_1^2 - 1024,42X_2^2 - 253,80X_1X_2 + 67,84X_2X_3 - 4,99X_1^3 + 1679,89X_1X_2^2 \quad (\text{II.6})$$

II.12.3 Analyse de la qualité du modèle

Plusieurs coefficients indicateurs et tests de qualité, y compris R^2 (coefficient de corrélation au carré ou coefficient de détermination), Q^2 (coefficient de corrélation validé par recouplement) [96], validité du modèle et reproductibilité, montrent la capacité du modèle de module de contrainte et d'élasticité à représenter avec précision les paramètres de fabrication. La qualité du modèle obtenu peut être évaluée par des essais statiques, comme le montre la figure II.32.

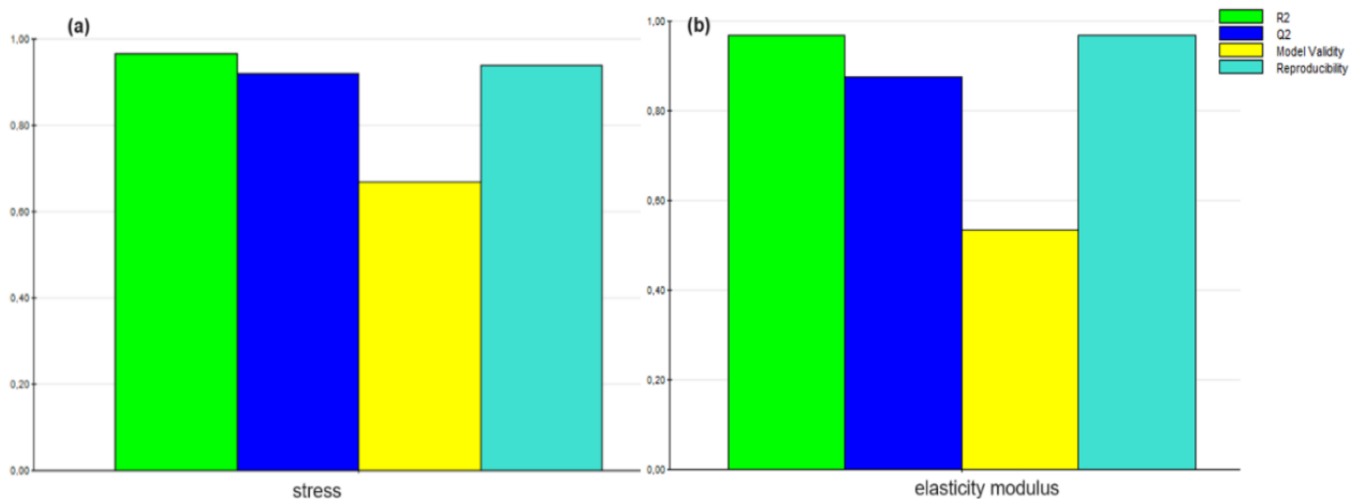


Figure II.32 : Essais de qualité du module d'élasticité des contraintes et (b)

- Qualité descriptive (R^2) : Cette mesure représente le pourcentage de la variation de la réponse que le modèle (équations 3 et 4) peut expliquer.

R^2 mesure dans quelle mesure le modèle correspond aux données; un R^2 élevé est nécessaire, mais plus est nécessaire pour un bon modèle. Dans notre cas, $R^2 = 0,97$.

- Qualité prédictive (Q^2) : Q^2 indique le pourcentage de la variation de la réponse que le modèle peut prédire par validation croisée. Il évalue l'efficacité avec laquelle le modèle peut s'attendre à de nouvelles données. Un modèle fiable devrait avoir un Q^2 élevé; dans notre cas, Q^2 est égal à 0,87 pour le module élastique et à 0,92 pour la contrainte.

- La validité du modèle est confirmée lorsque sa valeur dépasse 0,25, ce qui signifie qu'il n'y a pas de manque d'ajustement. La reproductibilité mesure la variation de la réponse dans des conditions identiques, par rapport à la variation totale de la réaction. Une valeur de reproductibilité de 1,0 indique une erreur pure nulle, avec des valeurs de réponse identiques.

Dans notre cas, la reproductibilité est supérieure à 0,90, montrant un excellent contrôle de l'erreur expérimentale.

II.12.4 Résultats d'optimisation

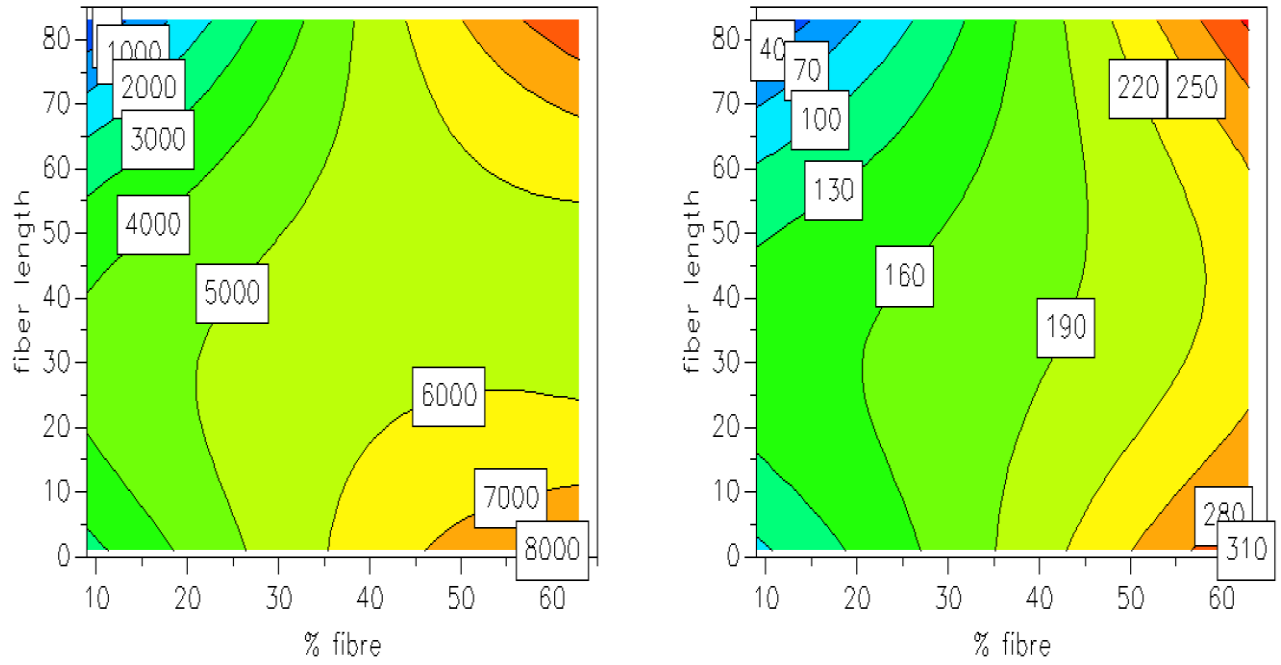
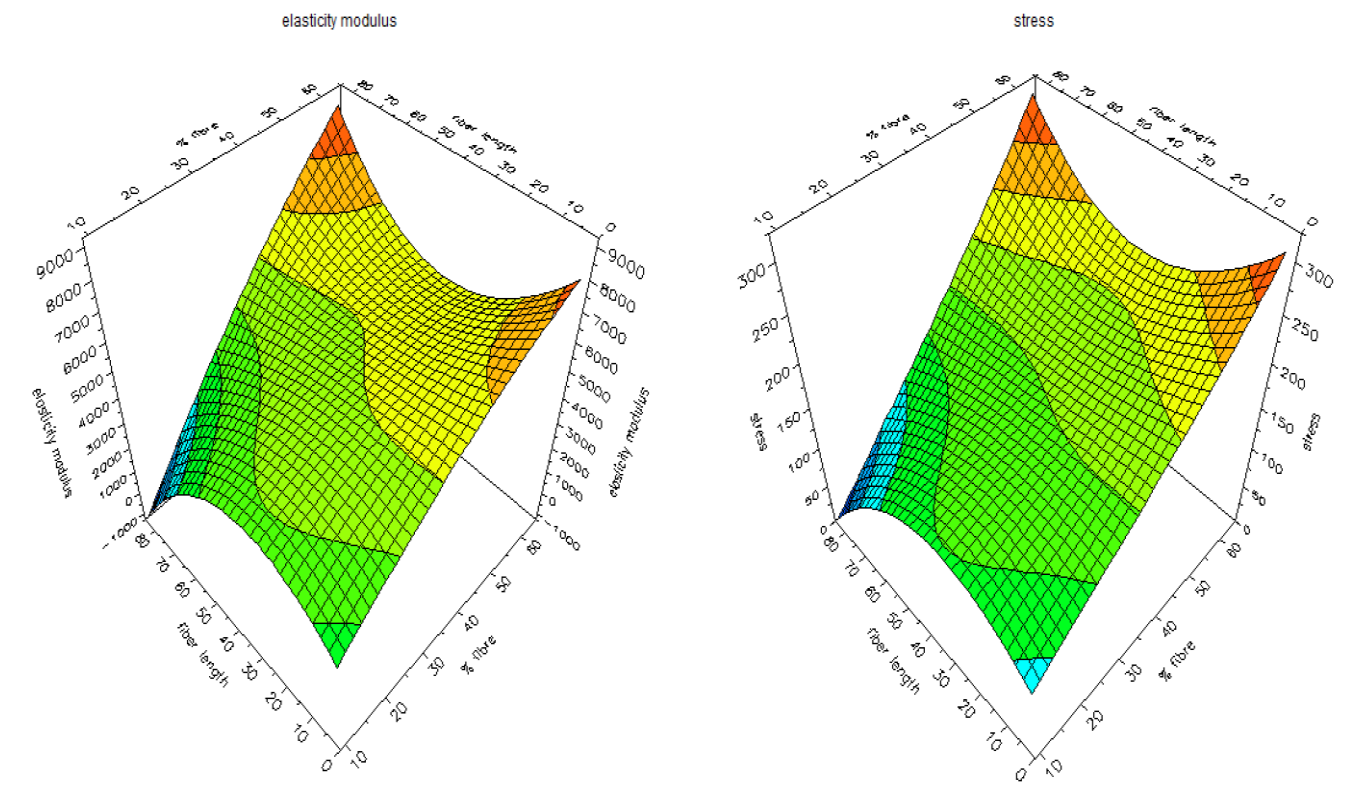
Les surfaces de réponse sont des représentations visuelles en trois dimensions, avec le plan horizontal montrant la variation des composants et l'axe vertical représentant la variance de la réponse basée sur le modèle. Il est essentiel de maintenir une valeur intermédiaire pour les deux paramètres variés afin d'éviter toute confusion dans l'interprétation des variations sur les axes horizontaux. Le principe fondamental est de manipuler simultanément les deux variables tout en maintenant l'autre constante à des valeurs intermédiaires, comme $X = 0$ dans une forme codée [97].

L'analyse graphique du modèle vise à représenter son équation sous deux formes différentes : les surfaces de réponse et les courbes iso-réponse. Le modèle comprend des termes qui représentent des interactions de premier degré, de deuxième degré et d'autres interactions entre ces éléments.

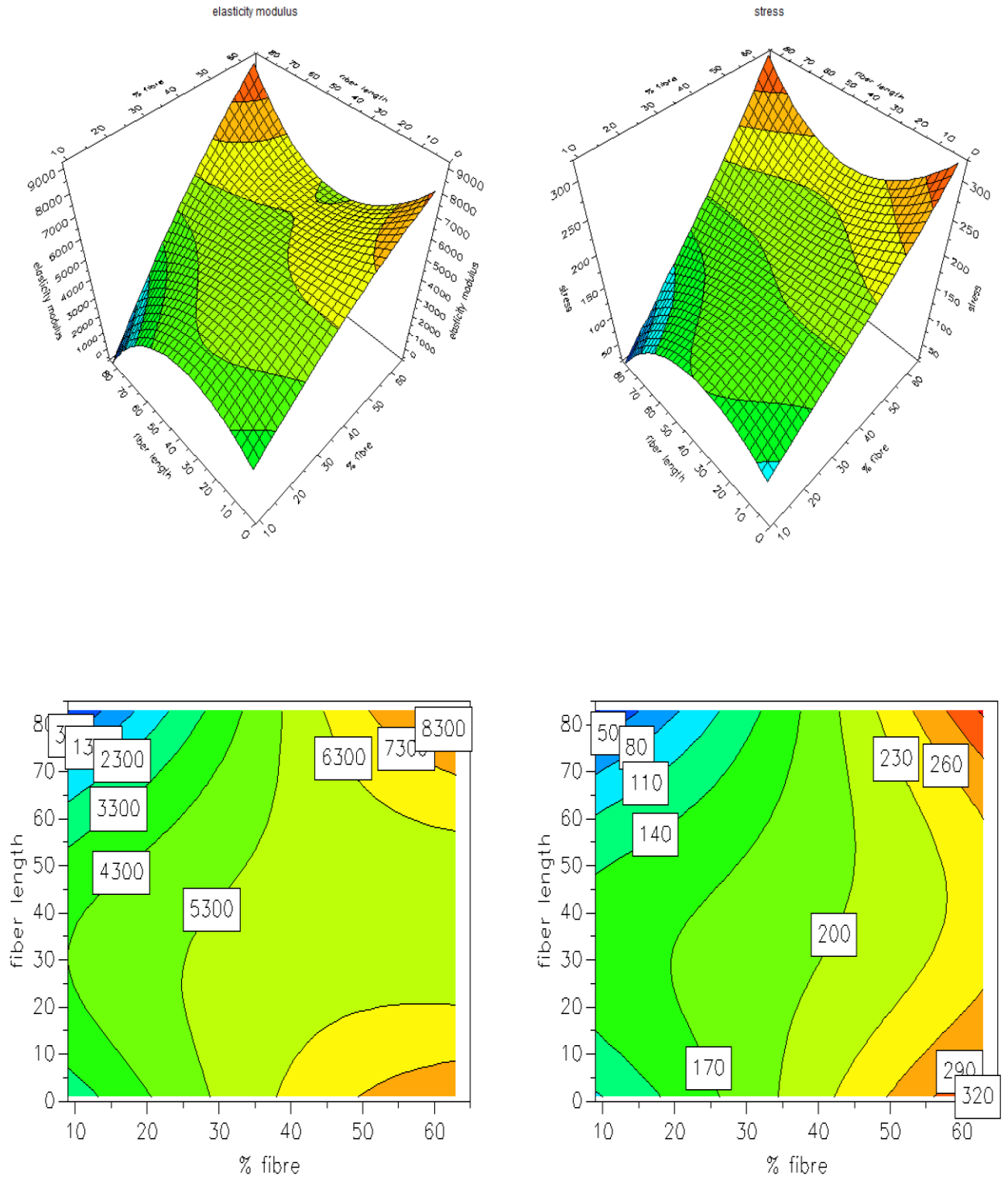
La Figure II.32 illustrée par des surfaces de réponse, expose les modèles mathématiques (équations 4 et 5). Ces graphiques mettent en évidence la corrélation entre la contrainte, le module d'élasticité, le taux de fibre, la longueur et les variables d'épaisseur de la plaque.

Les graphiques présentent la variation de la réponse avec le taux de fibres ainsi que de leur longueur des fibres, lorsque l'épaisseur de la plaque est maintenue constante à ses valeurs minimales, moyennes et maximales [98].

(a)



(b)



(c)

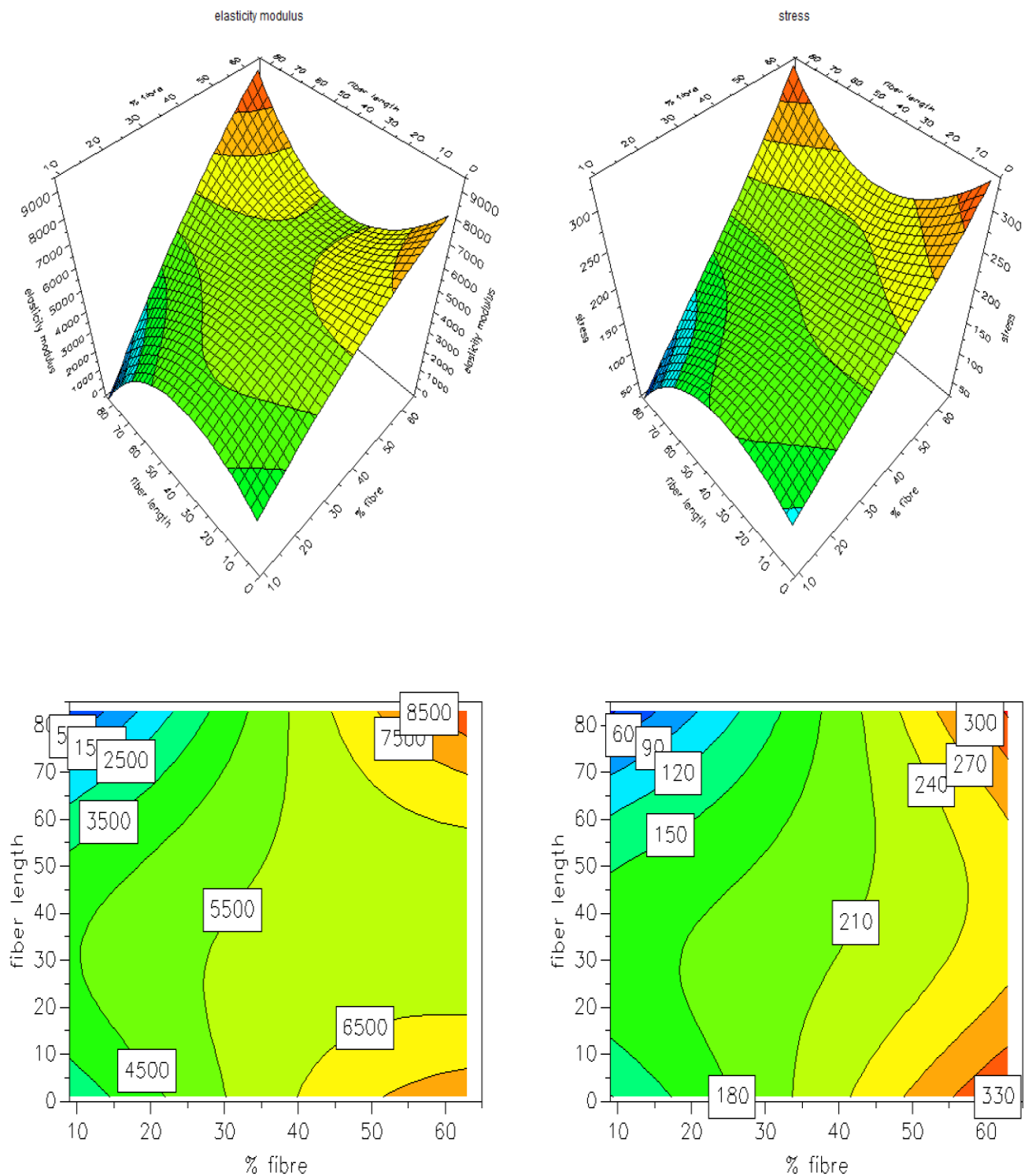


Figure II.32 : Représentation graphique des modèles mathématiques (a) Plaque basse mince $e = 0,6$ mm, (b) Plaque mince au centre $e = 1,8$ mm, (c) Plaque haute mince $e = 3$ mm.

D'après l'observation préliminaire du graphique des données sur l'épaisseur, il est constaté que la contrainte de rupture en flexion augmente avec l'épaisseur, atteignant un maximum de 8500 MPa pour les échantillons contenant 60% de fibres de 80 mm de longueur. De même, le module élastique atteint un maximum de 330 MPa pour les échantillons avec 60% de fibres et moins de 10 mm de longueur. Dans ces mêmes conditions, la contrainte peut atteindre 7500 MPa. En conclusion, la résistance à la flexion et le module élastique augmentent avec l'épaisseur des plaques et la teneur en fibres [99].

L'impact de la teneur en fibres et de la longueur des fibres est associée au comportement des composites lorsqu'ils sont soumis à une charge de flexion. Dans de telles situations, une force de compression plus importante agit sur la face externe tandis qu'une force de traction agit sur la face interne, la zone centrale restant neutre. Ainsi, les fibres situées dans la partie inférieure subissent des contraintes de traction, ce qui augmente la résistance à la traction avec une plus grande longueur de fibre. Par conséquent, la rupture est principalement causée par la région supérieure soumise à une contrainte de compression.

Les échantillons composites contenant 20% à 40% de fibres peuvent produire un matériau avec des propriétés mécaniques constantes, avec des valeurs de contrainte allant de 4500 à 6500 MPa et un module élastique de 180 à 240 MPa, surtout pour les plaques de 0,6 à 3 mm d'épaisseur. Cette stabilité est constatée indépendamment de la longueur des fibres ou de l'épaisseur de la plaque.

En se basant sur cette observation, il est possible de déduire que les paramètres optimaux sont les suivants : une teneur en fibres entre 20 % et 40 %, une longueur des fibres de 35 à 45 mm, et une épaisseur de plaque entre 0,6 et 3 mm. En pratique industrielle, les fibres hachées mesurent généralement de 3 à 5 cm de longueur, ce qui est applicable aux fibres hachées utilisées pour produire des tubes en PES (Polyéther-sulfone) et divers tapis servant de renfort de stratifié primaire [100].

II. 13. Propriétés optique

Afin de valider le modèle, nous avons appliqué les paramètres recommandés ainsi que les modèles mathématiques (équations II.4 et II. 5). Pour validation de modèles, des échantillons ont été préparés tout en leur faisant les tests appropriés pour comparer les réponses aux valeurs calculées par le modèle.

Les 2 figures II.39. présente les valeurs de transmission de l'échantillon pour chaque longueur d'onde.

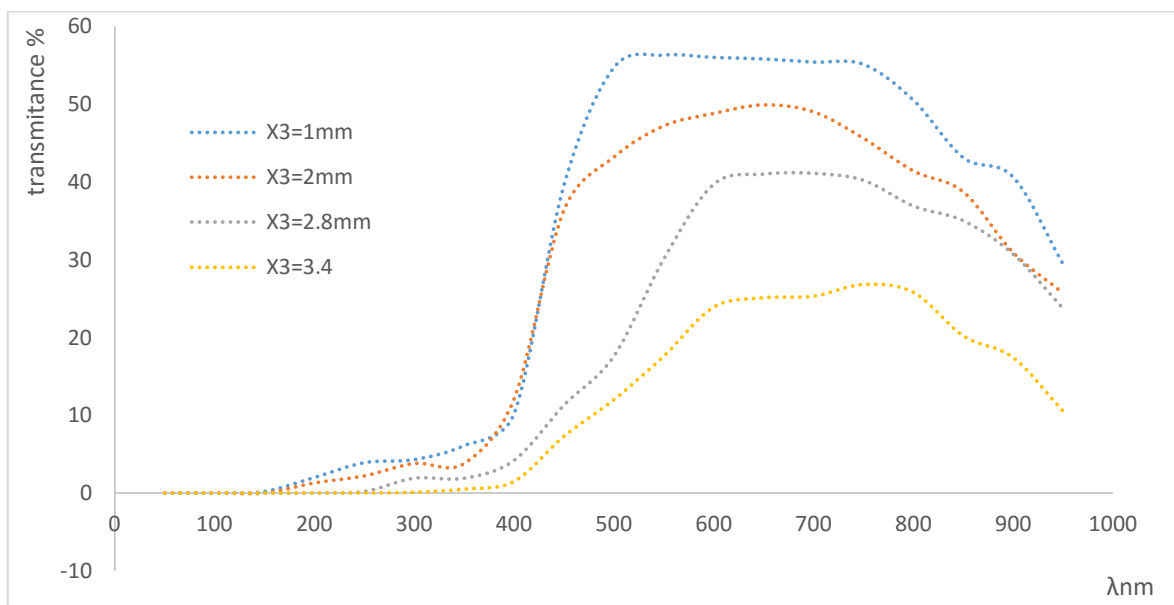
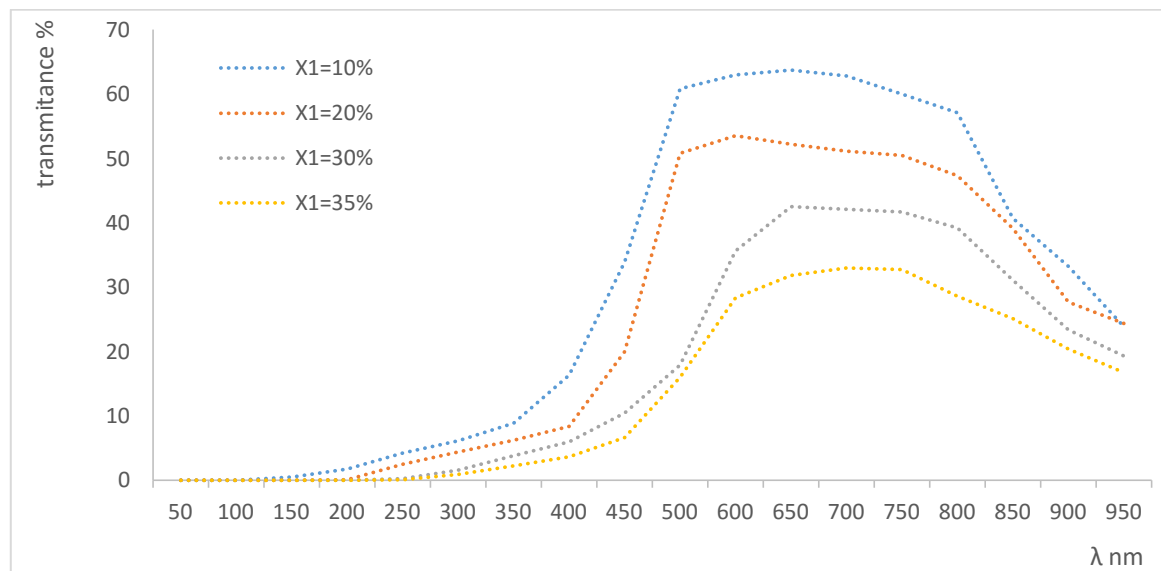


Figure II.33 : Transmittance pour différents pourcentage de fibres ($X_2 = 35$ mm, $X_3 = 0,6$ mm)

L'analyse de la courbe obtenue révèle que le pic de transmittance se situe entre 500 nm et 750 nm pour les échantillons à teneur variable en fibre de verre, indiquant une excellente transmission de la lumière dans le spectre visible. Cependant, pour les longueurs d'onde plus courtes dans la région UV, la transmittance reste inférieure à 15% pour tous les échantillons,

quelle que soit leur teneur en verre. Au-delà de 750 nm, dans le spectre proche IR, la transmittance diminue à mesure que la teneur en fibres augmente.

La transmittance maximale se produit toujours dans le spectre visible pour des échantillons de différentes épaisseurs. Cependant, pour les épaisseurs de 1 mm et 2 mm, il y a une transmission de la lumière d'environ 20% dans la gamme UV. En revanche, les échantillons plus épais absorbent principalement la lumière au-delà de 750 nm, s'étendant dans la plage proche de l'infrarouge, ce qui limite la transmission de la lumière.

Les courbes de transmission indiquent que la transmittance est maximale pour des épaisseurs plus faibles et une teneur en fibres plus basse. À l'inverse, une teneur en fibres plus élevée ou une épaisseur accrue contribue à une résistance mécanique plus élevée, mais entraîne une transmission réduite.

Ainsi, il est possible d'utiliser le matériau composite examiné pour construire des serres agricoles, à condition de trouver un équilibre entre la résistance mécanique et la transmittance. Cela peut être obtenu en choisissant des niveaux modérés de résistance mécanique et de transmittance, avec des épaisseurs moyennes et une teneur en fibres d'environ 2 mm et 20% respectivement. De plus, pour améliorer les propriétés optiques de ces composites, il est possible d'intégrer des films plastiques UV.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Cette étude propose d'optimiser la conception et la fabrication de la composition en améliorant ces aspects pour maximiser sa durabilité et ses performances dans diverses applications. D'autre part, l'objectif principal est de fournir des informations pertinentes pour l'industrie et la recherche future en guidant les futures recherches sur les composites résine-fibre de verre tout en offrant des conseils pratiques aux industries utilisant ces matériaux.

Dans l'ensemble, les résultats de cette recherche sur les propriétés mécaniques et la longévité prédite des composites en polyester et fibres de verre sous contrainte de traction sont encourageants. L'influence de paramètres critiques tels que la teneur en fibres de verre, la longueur des fibres et l'épaisseur des plaques sur les propriétés mécaniques a été élucidée par l'expérimentation et l'analyse systématiques.

Les résultats révèlent que l'augmentation de la teneur en fibres de verre améliore la résistance à la traction de la structure composite jusqu'à un certain seuil, au-delà duquel l'intégrité de l'interface fibre-matrice peut être compromise. En outre, l'étude souligne l'importance de considérer la longueur des fibres, avec des fibres plus longues contribuant généralement à une résistance accrue jusqu'à un point, après quoi des rendements décroissants sont observés en raison du détachement potentiel de la matrice des fibres.

De plus, l'épaisseur des plaques a influencé les contraintes de rupture, avec une tendance constante observée sur différentes épaisseurs tout en maintenant le module de Young. Ces observations soulignent l'importance d'optimiser la composition des matériaux et les paramètres de conception structurelle pour améliorer les performances et la durabilité des structures composites.

En outre, des méthodes de prévision analytique, y compris la méthode de Monte Carlo, ont été utilisées pour évaluer la fonction de distribution des dommages dans le composite. Les résultats ont souligné le rôle critique du pourcentage et de la longueur de la fibre de verre dans la détermination de la probabilité de défaillance, soulignant le besoin de méticuleux la prise en compte de ces facteurs dans la conception et l'analyse des composites.

Dans l'ensemble, les résultats de cette étude contribuent à faire progresser la compréhension des composites polyester-fibre de verre et fournissent des informations précieuses pour optimiser leurs performances mécaniques et leur durabilité dans des applications pratiques dans divers domaines de l'ingénierie. D'autres recherches pourraient

explorer d'autres facteurs influencer le comportement composite et affiner les modèles prédictifs pour une précision et une fiabilité accrues.

Plusieurs facteurs, tels que la résine, les fibres et le processus de fabrication, ont un impact sur les propriétés d'un matériau composite. Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites sont principalement influencées par les propriétés spécifiques des fibres, la résine ayant un rôle secondaire. Voici quelques observations importantes.

L'augmentation de la teneur en fibres entraîne une amélioration des propriétés mécaniques du matériau pour les fibres coupées, il est essentiel d'obtenir une longueur appropriée afin d'améliorer considérablement l'efficacité du renforcement. L'analyse des propriétés mécaniques d'un matériau composite met en évidence l'importance de l'adhérence entre la fibre et la résine.

Une procédure expérimentale robuste a été mise en place grâce à l'utilisation de la méthode de conception d'expériences (DOE) afin d'étudier les propriétés de flexion. Cette méthode a permis de modéliser et de prédire efficacement les résultats concernant différents aspects qui influencent le modèle proposé. La validité du modèle a été évaluée à 0,55 pour le module de contrainte et à 0,65 pour le module élastique. De plus, la reproductibilité du modèle s'est avérée être de 0,95 pour le module de contrainte et de 0,97 pour le module élastique.

Les résultats de cette recherche ont présenté des valeurs de contrainte et de module d'élasticité de 8500 MPa et 330 MPa respectivement, pour différentes configurations de facteur spécifiées telles que l'épaisseur de la plaque, la teneur en fibres et la longueur de la fibre à 3 mm, 60% et 80 mm.

La présente étude confirme la pertinence des composites fibres de verre-polyester pour une utilisation dans les serres agricoles en raison de leur combinaison favorable de résistance mécanique et de transmission de la lumière. L'équilibre optimal est généralement atteint avec une épaisseur moyenne d'environ 2 mm et une teneur en fibres d'environ 20%, ce qui donne des valeurs de contrainte et de module d'élasticité mesurées à 4500 MPa et 150 MPa respectivement. De plus, la longueur de la fibre a un effet léger mais bénéfique sur les capacités de flexion, comme l'a révélé l'étude.

Les résultats prospectifs précieux de cette étude apportent des avantages significatifs à la société et au milieu universitaire. En se concentrant sur l'importance des fibres dans

l'amélioration des caractéristiques mécaniques et en utilisant des approches avancées telles que la méthode DOE, cette recherche permet une meilleure compréhension du comportement des matériaux composites.

Cette étude apporte une contribution à la compréhension du comportement des matériaux composites. De plus, les résultats obtenus offrent des conseils pratiques pour optimiser l'utilisation des composites fibres de verre-polyester dans les serres agricoles, en accord avec les objectifs de durabilité environnementale et de pratiques agricoles durables. Cette recherche contribue un tant soit peu à l'amélioration de l'efficacité et de l'efficience des pratiques agricoles, dans le but de promouvoir le développement durable.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J.-M Berthelot., "Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures", 2^{ème} édition, édition MASSON, 1996.
- [2] P. Jaquinet., "Utilisation des matériaux composites", Technologies de pointe, édition Hermès, 1991.
- [3] D. Gay., "Matériaux Composites", 4^{ème} édition, édition Hermès, 1997.
- [4] Glossaire des matériaux composites-CARMA-Actualisation octobre ,2006.
- [5] B. Castanié, C. Bouvet, and D. Guedra-Degeorges, "Structures en matériaux composites stratifiés," Tech. L'Ingénieur BM5080 V2, 2013, Accessed: Feb. 26, 2020.[Online].Available:<https://www.techniques-ingenieur.fr/base documentaire/mecanique-th7/comportement-mecanique-des-materiaux-42179210/structures-en-materiaux-composites-stratifies-bm5080/>
- [6] J.-M. Berthelot, Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures. Mans, France: Les Clousures, Chemin des Horts 05290 Vallouise, 2010. Accessed: Feb. 26, 2020. [Online]. Available: <file:///C:/Users/arbia.nouigues/Desktop/mod%C3%A8les%20m%C3%A9caniques%20u%20laminage/Downloads/Composites%20Jean-Marie%20Berthelot.pdf>
- [7] cetim-ceramat cetim-ceramat, "Composites et recyclage : état de l'art et perspectives." <https://www.progepi.fr/wpcontent/uploads/2017/04/f.-ruch-cetim-ceramat.pdf> (accessed Apr. 08, 2021).
- [8] Cédric Thomas. Étude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV. Matériaux. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011. Français. ffNNT : 2011ENMP0035ff. ffpastel-00656807f
- [9] . L. Berreur, B. De Maillard, and S. Nösperger, "Étude prospective stratégique sur les matériaux composites." L'industrie française des matériaux composites, 2002. Accessed: Feb. 26, 2020. [Online]. Available: <https://archives.entreprises.gouv.fr/2012/www.industrie.gouv.fr/biblioth/docu/dossiers/sect/pdf/synthese.pdf>
- [10] J.-M. Berthelot, Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures. Mans, France: Les Clousures, Chemin des Horts 05290 Vallouise, 2010. Accessed: Feb. 26, 2020. [Online]. Available: <file:///C:/Users/arbia.nouigues/Desktop/mod%C3%A8les%20m%C3%A9caniques%20>

- u%20laminage/Downloads/Composites%20Jean-Marie%20Berthelot.pdf
- [11] Solutions composites. Maurice Reyne. Edition JEC Publications. 2006
- [12] B. Castanié, C. Bouvet, and D. Guedra-Degeorges, "Structures en matériaux composites stratifiés," Tech. L'Ingénieur BM5080 V2, 2013, Accessed: Feb. 26, 2020. [Online]. Available: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique7/comportement-mecanique-des-materiaux-42179210/structures-en-materiauxcomposites-stratifies-bm5080/>
- [13] [GAY, 1991] D. Matériaux composites. 3 ieme édition. Paris: Hermès, 1991. 569 p.Hhll.D. An introduction to composite materials: combridge university press.
- [14] Laurent Gornet : généralité sur les matériaux composites page 2.
- [15] Cherouali.H, Reynaud. P, Rouby. D, Cardinal. S, R'Mili. M & Merle. P, " Elaboration de Composites Monofilamentaires à Matrice Céamique et à Matrice Méallique" , numéro horsserie de la Revue des Composites et des Matériaux Avancée, Vol. 7, p. 13-30, novembre 1997
- [16] Smith. P.R and Froes. F.H "Developments in titanium metal matrix composites". Journal of Metals, 1984, vol. 36, mars, pp 19-26.
- [17] CHEVALIER, Y. Comportement élastique et viscoélastique des composites. In :Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et composites, vol. A7. Paris Techniques de l'ingénieur, 1990.
- [18] Chua, P.S., Dynamic mechanical analysis studies of the interphase. Polymer Composites, 1987. 8: p. 308-313.
- [19] .Eckstein, Role of silanes in adhesion Part I : Dynamic Mechanical properties of silanes coatings on glass fibers. Journal of Adhesion Science and Technology, 1988. 2: p. 339-348.
- [20] Jonscher, A.K., Dielectrics relaxation in solids. 1983, London: Chelsea Dielectrics.
- [21] Dissado, L.A. et R.M. Hill, Anomalous low-frequency dispersion. Near direct current conductivity in disordered low-dimensional materials. Journal of the Chemical Society. Faraday Transactions II, 1984. 30: p. 291-319.
- [22] Hammiche, A. et H.M. Pollock, Micro thermal analysis: techniques and applications. J.of Physics D:Applied Physics, 2001. 34: p. R23-53. Chapitre II Matériaux et techniques 118
- [23] Dirand, X., Etude des interfaces et interphases verre/résine vinylester. Thèse soutenue à

- Mulhouse, 1994. laboratory, 1982: p. 21-26.
- [24] Williams, M.L., R.F. Landel, et J.D. Ferry, The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of American Chemical Society*, 1955. 70: p. 3701-3706.
- [25] Oudet, C., *Polymères : structures et propriétés*. MASSON ed. 1994.
- [26] Jonscher, A.K., *Dielectrics relaxation in solids*. 1983, London: Chelsea Dielectrics.
- [27] Garcia, F.G. et B.G. Soares, Determination of the epoxide equivalent weight of epoxy resins based on diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) by proton nuclear magnetic resonance. *Polymer Testing*, 2003. 22: p. 51-56.
- [28] 11. Thomason, J.L., A note on the investigation of the composite interphase by means of thermal analysis. *Composites Science and Technology*, 1992. 44: p. 87-90.
- [29] 25. David, L., Développement de la microscopie thermique à sonde locale pour la détermination de la conductivité thermique de films minces. Application aux céramiques pour le nucléaire. 2006, Thèse de doctorat soutenue à l'INSA de LYON. 26. *The Handbook of Infra-Red spectroscopy*
- [30] J.-M. Berthelot, *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures*. Mans, France: Les Clousures, Chemin des Horts 05290 Vallouise, 2010. Accessed: Feb. 26, 2020. [Online]. Available: file:///C:/Users/arbia.nouigues/Desktop/mod%C3%A8les%20m%C3%A9caniques%20du%20laminage/Downloads/Composites%20Jean-Marie%20Berthelot.pdf
- [31] Matériau composite, Encyclopédie scientifique en ligne sur le site Internet <http://www.techno-science.net>
- [32] J. Weiss et C. Bord., " les matériaux composites", tomes 1 et 2, édition de l'usine, 1983.
- [33] R. Zenaseni, "Influence du vieillissement hygrothermique sur le comportement à la rupture des composites à matrice thermoplastique", thèse de doctorat; Université des Sciences et de la Technologie Oran,
- [34] H. Ku, Y. M. Cheng, C. Snook and D. Baddely, "Drop weight impact test fracture of Vinyl Ester Composites: Micrographs of pilot study", *Journal of Composite Materials*, Vol.39, N°18, pp.1607-14, 2005.
- [35] PHAM, H.T., BOSNYAK, C.P. et SEHANOBISH, K. (1 993). Residual stresses in

- injection molded polycarbonate rectangular bars. *Polymer Engineering and Science*, 33 1634- 1643.
- [36] SIEGMANN, A., BUCHMAN, A. et KENIG, S. (1982). Residual stresses in polymers I: The effect of thermal history. *Polymer Engineering and Science*, 22,40-47.
- [37] J. M. Berthelot, *Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures*, 5 ème édition, Mason, Paris, 2012.3] Berthelot J.M., *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures*. Lavoisier, 2012.
- [38] J.Fitoussi, F.Meraghni, Z.Jendli, G.Hug, D.Baptiste, " Méthodologie expérimentale d'analyse du comportement mécanique de matériaux composites sous sollicitations dynamiques", *Revue des composites et des matériaux avancés*, vol. 14/1, pp.9-30,2004.
- [39] cours de matériaux composite, l'université des matériaux composites sur le site Internet www.composites.free.fr
- [40] Francois-Xavier Irisarri; "Strategies de calcul pour l'optimisation multi objectif des structures composites" Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [41] Jean-Marie Berthelot; "Matériaux composites, 11-08191
- [42] image de Sjo gren et Berglund, 2000
- [43] Y. M. Tarnopol'skii and V. L. Kulakov, 'Tests Methods for Composites. Survey of Investigations Carried out in the PMI of Latvian Academy of Sciences in 1964-2000', p. 18, 2001.
- [44] PHAM, H.T., BOSNYAK, C.P. et SEHANOBISH, K. (1 993). Residual stresses in injection molded polycarbonate rectangular bars. *Polymer Engineering and Science*, 33 1634- 1643
- [45]] J. M. Berthelot, *Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures*, 5 ème édition, Mason, Paris, 2012.
- [46] Fiche technique fournie par la firme E.N.G, ALCAL UF-5, el khroub, (Algérie).
- [47] AKPINAR, S.; AKPINAR, I. A. Influence of carbon and glass fiber reinforced composite adhesive on the strength of adhesively bonded joints. **Material pruefung/Materials Testing**, v. 65, n. 5, p. 802–814, 1 maio 2023. <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0284>
- [48] CHAVAN, S. et al. An Insight into Nylon 6,6 Nanofibers Interleaved E-glass Fiber Reinforced Epoxy Composites. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, v. 104, n. 1, p. 15–44, 1 fev. 2023. <https://doi.org/10.1007/s40032-022-00882-0>
- [49] GOKULKUMAR, S. et al. Investigation and analysis of sound-absorbing properties of

- [50] waste tea leaf fiber as fillers in pineapple leaf/glass fiber-reinforced composites. **Sage Journals**, v. 237, n. 2, p. 403–424, 25 jul. 2022. <https://doi.org/10.1177/14644207221116032>
- [51] AKPINAR, S.; AKPINAR, I. A. Influence of carbon and glass fiber reinforced composite adhesive on the strength of adhesively bonded joints. **Materialpruefung/Materials Testing**, v. 65, n. 5, p. 802–814, 1 maio 2023. <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0284>
- [52] AKPINAR, S.; AKPINAR, I. A. Influence of carbon and glass fiber reinforced composite adhesive on the strength of adhesively bonded joints. **Material pruefung/Materials Testing**, v. 65, n. 5, p. 802–814, 1 maio 2023. <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0284>
- [53] CHAVAN, S. et al. An Insight into Nylon 6,6 Nanofibers Interleaved E-glass Fiber Reinforced Epoxy Composites. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, v. 104, n. 1, p. 15–44, 1 fev. 2023. <https://doi.org/10.1007/s40032-022-00882-0>
- [54] GOKULKUMAR, S. et al. Investigation and analysis of sound-absorbing properties of waste tea leaf fiber as fillers in pineapple leaf/glass fiber-reinforced composites. **Sage Journals**, v. 237, n. 2, p. 403–424, 25 jul. 2022. <https://doi.org/10.1177/14644207221116032>
- [55] GOKULKUMAR, S. et al. Investigation and analysis of sound-absorbing properties of waste tea leaf fiber as fillers in pineapple leaf/glass fiber-reinforced composites. **Sage Journals**, v. 237, n. 2, p. 403–424, 25 jul. 2022. <https://doi.org/10.1177/14644207221116032>
- [56] GOKULKUMAR, S. et al. Investigation and analysis of sound-absorbing properties of waste tea leaf fiber as fillers in pineapple leaf/glass fiber-reinforced composites. **Sage Journals**, v. 237, n. 2, p. 403–424, 25 jul. 2022. <https://doi.org/10.1177/14644207221116032>
- [57] GOKULKUMAR, S. et al. Investigation and analysis of sound-absorbing properties of waste tea leaf fiber as fillers in pineapple leaf/glass fiber-reinforced composites. **Sage Journals**, v. 237, n. 2, p. 403–424, 25 jul. 2022. <https://doi.org/10.1177/14644207221116032>
- [58] GOKULKUMAR, S. et al. Investigation and analysis of sound-absorbing properties of waste tea leaf fiber as fillers in pineapple leaf/glass fiber-reinforced composites. **Sage Journals**, v. 237, n. 2, p. 403–424, 25 jul. 2022. <https://doi.org/10.1177/14644207221116032>
- [59] HUSSEIN, S. M.; RASHEED, Z. N. Performance Evaluation of Chestnut Nano Particles on Tensile, Impact, Vickers Hardness of Polyester/Glass Fiber Composite. **Iraqi Journal of Science**, v. 64, n. 4, p. 1753–1763, 30 abr. 2023. <https://doi.org/10.24996/ijs.2023.64.4.16>
- [60] KHOSHAKHLAGH, A. H. et al. Health risk assessment of exposure to benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) in a composite manufacturing plant: Monte-Carlo simulations. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 29, n. 3–4, p. 728–742, 2023. <https://doi.org/10.1080/10807039.2023.2167193>

- [61] KHOSHAKHLAGH, A. H. et al. Health risk assessment of exposure to benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) in a composite manufacturing plant: Monte-Carlo simulations. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 29, n. 3–4, p. 728–742, 2023. <https://doi.org/10.1080/10807039.2023.2167193>
- [62] LIU, B. et al. Space neutron radiation shielding property of continuous fiber and functional filler reinforced polymer composite using Monte Carlo simulation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 168, p. 107483, 1 maio 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107483>
- [63] MA, D. et al. A novel numerical method for stochastic study of fiber-reinforced composites with nanoparticles under impact loading. **International Journal of Impact Engineering**, v. 180, p. 104662, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104662>
- [64] MOHAMMAD SHOHEL, S.; HOSSAIN RIYAD, S.; ALL NOMAN, A. Study to analyze the mechanical strength of composite glass fiber laminated with resin epoxy, resin polyester, and PVC foam under tensile loading conditions by numerically using finite element analysis via Ansys. **Materials Today: Proceedings**, 15 maio 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.062>
- [65] MOUSTAPHA SARR, M.; KOSAKA, T. Effect of cellulose nanofibers on the fracture toughness mode II of glass fiber/epoxy composite laminates. **Heliyon**, v. 9, n. 2, 1 fev. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13203>
- [66] MUSLIM, M. A. et al. The Effect of Micro Granite on Barcol Hardness, Flexural and Compression Strength of Basalt and Glass Fiber Reinforced Composites using Industrial Polyester. v. 8, 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10072102>
- [67] MUTAR, RIYADH et al. Evaluation of the Composite Cantilever Beam Reliability Using the Foshm and Monte-Carlo Techniques. 25 Sep 2023. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4582905>
- [68] MUTHALAGU, R. et al. Tensile attributes and material analysis of kevlar and date palm fibers reinforced epoxy composites for automotive bumper applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 433–438, 1 jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.777>
- [69] PAN, Y.; YAN, D. Study on the durability of GFRP bars and carbon/glass hybrid fiber reinforced polymer (HFRP) bars aged in alkaline solution. **Composite Structures**, v.

- 261, p. 113285, 1 abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113285>
- [70] RAJABI, A.; KADKHODAYAN, M.; GHANEI, S. An investigation into the flexural and drawing behaviors of GFRP-based fiber–metal laminate. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, v. 25, n. 10, p. 805–812, 27 jul. 2018. <https://doi.org/10.1080/15376494.2017.1308587>
- [71] SHANTI, Y.; VEMULA, J.; SATYADEVI, A. Effect of combined natural and synthetic filler addition on the behaviour of glass fibre reinforced composite. **Advances in Materials and Processing Technologies**, 15 abr. 2023. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2201750>
- [72] VENKATESAN, K. et al. Comparative structural analysis of advanced multi-layer composite materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 2673–2687, 1 jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.247>
- [73] WULANDARI, R. et al. Comparative Study of Commercial Glass Fiber-Reinforced Polyester Composite Beams: Thermal Behavior and Durability to QUV Exposure. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series D**, p. 1–10, 9 dez. 2023. <https://doi.org/10.1007/s40033-023-00599-z>
- [74] ZIMMERMANN, M. V. G. et al. Influence of Flexographic Photopolymer-Plate Residue Incorporation on the Mechanical Properties of Glass-Fiber-Reinforced Polyester Composites. **Materials Research**, v. 26, p. e20230239, 25 ago. 2023. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0239>
- [75] WULANDARI, R. et al. Comparative Study of Commercial Glass Fiber-Reinforced Polyester Composite Beams: Thermal Behavior and Durability to QUV Exposure. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series D**, p. 1–10, 9 dez. 2023. <https://doi.org/10.1007/s40033-023-00599-z>
- [76] ZIMMERMANN, M. V. G. et al. Influence of Flexographic Photopolymer-Plate Residue Incorporation on the Mechanical Properties of Glass-Fiber-Reinforced Polyester Composites. **Materials Research**, v. 26, p. e20230239, 25 ago. 2023. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0239>
- [77] Rajabi, A.; Kadkhodayan, M.; Ghanei, S. An investigation into the flexural and drawing behaviors of GFRP-based fiber–metal laminate, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol 25, Issue 10, Pages 805-812, <http://dx.doi.org/10.1080/15376494.2017.1308587>

- [78] Tiwary, A.; Kumar, R.; Chohan, J.S. A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications, *Mater. Today: Proc.* Vol 51, pp 865-870 , 2022, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.276>.
- [79] Kishore, C. et al. Analysis of carbon fiber reinforced with epoxy resin using FEM, *Mater. Today: Proc.* Volume 46, Part 20, Pages 11120-11128, 2021, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.334>
- [80] Xian, G.;Guo, R .;Li, C. Combined effects of sustained bending loading, water immersion, and fibre hybrid mode on the mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced polymer composite, *Composite Structures*, Volume 281, 1 February 2022, 115060 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115060>
- [81] Abdellaoui, H .et al. Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials, *Failure Anal. Biocompos. Fibre-Reinforced Compos. Hybrid Compos.* 2019, Pages 29-49 <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>
- [82] Ibrahim, N. C. M.; Serier, B.; Mechab, B. Analysis of the crack-crack interaction effect initiated in aeronautical structures and repaired by composite patch. *Frattura ed Integrità Strutturale*, v. 12, n. 46, p. 140–149, 23 set. 2018. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.46.14>
- [83] Serier, N. et al. A new formulation of the J integral of bonded composite repair in aircraft structures. *Structural engineering and mechanics*, v. 58, n. 5, p. 745–755, 2016. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.58.5.745>
- [84] Medjahdi, M .et al . Development of a Hydrophobic Carbon Sponge Nanocomposite for Oil Spill Cleanup.*Materials*, 15(23), 8389, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15238389>
- [85] Kherroub, D.E.; Bouhadjar, L.; Medjahdi, M. Development of novel conductive copolymer based on furan with improved solubility and thermal properties. *Journal of Molecular Structure* .1225, 129174.2021. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129174>
- [86] Goupy, J .Experimental designs for response surfaces, *Engineering techniques, analysis and characterisation*, pp 230-23,2000 ,<https://doi.org/10.51257/a-v1-r275>
- [87] Goupy, J. Introduction to the design of experiments with applications, Book Dunod edition 5th, pp 401,2013. Paris <https://www.dunod.com/sciences-techniques/introduction-aux-plans-d-experiences-toutes-techniques-necessaires-conduite-d>
- [88] Guo, J .et al . A transverse failure criterion for unidirectional composites based on the

- Puck failure surface theory, *Composites Science and Technology*, Vol 242, 29, 110192, 2023, <https://doi.org/10.3390/polym14193955>
- [89] Das, M.; Sahu, S. ; Parhi, D.R. Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: a brief review, *Mater. Today: Proc.* Volume 44, Part 1, 2021, Pages 955-960 <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.005>
- [90] Morineau, A.; Chatelin, Y.M. *Statistical data analysis. Learn, understand and perform with Excel.* Book Ellipses edition, 2005, pp 416 <https://www.amazon.com/Analyse-statistique-donnees-apprendre-comprendre/dp/2729823034>
- [91] Mokhtar, D.et al. An experimental investigation to predict the durability of polyester-glass fiber composite subjected to tensile loading, *Studies in Engineering and Exact Sciences* 5 (1), 619-633.2024, DOI: 10.54021/seesv5n1-035
- [92] Mechab, B. et al. Probabilistic elastic-plastic analysis of repaired cracks with bonded composite patch. *Steel and Composite Structures*, v. 20, n. 6, p. 1173– 1182, 6 abr. 2016. <https://doi.org/10.12989/scs.2016.20.6.1173>
- [93] Lakshmi, N.B.V et al. Performance Analysis of Ply Orientation in Composite Laminates. *Mater. Today: Proc.*Vol 5, pp 5984-5992,2019, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.044>
- [94] Venkatesan, K. et al. Comparative structural analysis of advanced multi-layer composite materials.*Mater. Today: Proc.* Vol 27, pp 2673-2687,2020, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.247>
- [95] Prabhakar, P. ; Waas, A.M. Interaction between kinking and splitting in the compressive failure of unidirectional fibre reinforced laminated composites, *Composite Structures*, Vol 98, Pages 85-92,2013 <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.005>
- [96] Hatti, P.S. et al. Investigation on tensile behaviour of glass-fibre reinforced polymer matrix composite with varying orientations of fibres, *Mater Today Proc*, Volume 54, Part 2, 2022, Pages 137-140 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.196>
- [97] Muthalagu, R .et al. Tensile attributes and material analysis of kevlar and date palm fibre reinforced epoxy composites for automotive bumper applications, *Mater. Today: Proc.* Volume 46, Part 1Pages 433-438,2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.777>
- [98] Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. ASTM 2007, D 7246M-2007. https://doi.org/10.1520/D7264_D7264M-21
- [99] Fasel, U. et al. Composite additive manufacturing of morphing aerospace structures,

- Manuf. Lett. Volume 23, 2020, Pages 85-88
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.12.004>
- [100] Salem, M. et al .Elastic-plastic analysis of the J integral for repaired cracks in plates, Advances in Materials Research, Vol. 4, No. 2, 87-96 ,2015 , <http://dx.doi.org/10.12989/amr.2015.4.2.087>
- [101] Pan, Y.; Yan, D Study on the durability of GFRP bars and carbon/glass hybrid fibre reinforced polymer (HFRP) bars aged in alkaline solution, Composite Structures, Volume 261, 1, 2021, 113285 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113285>
- [102] Fan, W.et al. Fatigue behaviour of the 3D orthogonal carbon/glass fibres hybrid composite under three-point bending load, Materials & Design, Volume 183, 5, 2019, 108112 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108112>
- [103] Zeno, M.et al .Deformation and failure behaviour of hybrid composite laminates made of Glass Epoxy and woven Kevlar Epoxy. Mater. Today: Proc. Volume 46, Part 4, 2021, Pages 1618-1625 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.253>.

Annexes 01

A. Production scientifique

PUBLICAÇÕES

An experimental investigation to predict the durability of polyester-glass fiber composite subjected to tensile loading

Uma investigação experimental para prever a durabilidade do composto de poliéster e fibra de vidro submetido a cargas de tração

DOI: 10.54021/seesv5n1-035

Recebimento dos originais: 19/02/2024
Aceitação para publicação: 08/03/2024

Djamila Mokhtar
PhD Student in Chemical Engineering
Institution: Faculty of Science and Technology, University of Tissemsilt
Address: BP 38004 Tissemsilt, Algeria
E-mail: mokhtar.djamila@univ-tissemsilt.dz

Malika Medjahdi
PhD in Process Engineering
Institution: APLEC Faculty of Technology, University of Djillali Liabes (UDL-SBA)
Address: B.P. 89 Ben M'Hidi city Sidi bel Abbes, 22000, Alegria
E-mail: mmedjahdi@yahoo.fr

Belaid Mechab
Doctor in Mechanical Engineering
Institution: LMPM Faculty of Technology, University of Djillali Liabes (UDL-SBA)
Address: B.P. 89 Ben M'Hidi city Sidi bel Abbes, 22000, Alegria
E-mail: bmechab@yahoo.fr

Noureddine Benderdouche
Doctor in Chemical Engineering
Institution: Laboratory of SEAMM, University of Mostaganem
Address: BP 188 Mostaganem, Algéria
E-mail: benderdouchen@yahoo.fr

Benaouda Bestani
Doctor in Chemical Engineering
Institution: Laboratory of SEAMM, University of Mostaganem
Address: BP 188 Mostaganem, Algéria
E-mail: bestanib@yahoo.fr

Mohammed Amin Chemrak
PhD in Chemical Engineering
Institution: Faculty of Science and Technology, University of Tissemsilt
Address: BP 38004 Tissemsilt, Algéria
E-mail: ma.chemrak@univ-tissemsilt.dz

Studies in Engineering and Exact Sciences, Curitiba, v.5, n.1, p. 619-633, 2024 619



Experimental study of the mechanical and optical properties of glass-polyester fiber composite based on response surface methodology

Estudo experimental das propriedades mecânicas e ópticas do composto de fibra de vidro-poliéster com base na metodologia de superfície de resposta

DOI: 10.54021/seesv5n1-071

Recebimento dos originais: 29/03/2024
Aceitação para publicação: 19/03/2024

Djamila Mokhtar

PhD student in Chemical Engineering
Institution: Faculty of Science and Technology, University of Tissemsilt
Address: Tissemsilt, Algeria
E-mail: mokhtar.djamila@univ-tissemsilt.dz

Malika Medjahdi

PhD in Process Engineering
Institution: University of Djillali Liabes (UDL)
Address: Sidi bel Abbes, Algeria
E-mail: mmedjahdi@yahoo.fr

Noureddine Benderdouche

PhD in Chemical Engineering
Institution: University of Mostaganem
Address: Mostaganem, Algéria
E-mail: benderdouchen@yahoo.fr

Mohammed Amin Chemrak

PhD in Chemical Engineering
Institution: University of Tissemsilt
Address: Tissemsilt, Algéria
E-mail: ma.chemrak@univ-tissemsilt.dz

Belaid Mechab

PhD in Mechanical Engineering
Institution: University of Djillali Liabes (UDL)
Address: Sidi bel Abbes, Algeria
E-mail: bmechab@yahoo.fr

Benaouda Bestani

PhD in Chemical Engineering
Institution: University of Mostaganem
Address: Mostaganem, Algeria
E-mail: bestanib@yahoo.fr

University of Relizane
Faculty of Science and Technology
Civil Engineering Department



CERTIFICATE of participant

This is to certify that
Mokhtar Djamila

Co-AUTHOR: Medjahdi Malika, Benderdouche noureddine, Mechab Belaid

In oral and technical presentation, recognition and appreciation of research

“Study Day: Structure & Geo-Materials

”09 March, 2024, RELIZANE/ALGERIA

with the paper entitled

**“EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COMPOSITE STRUCTURE UNDER TENSILE
LOADING”**

SIGNATURE CHAIRMAN

Dr. ZEMRI AMINE



DEAN OF THE FACULTY



B. Paramètres de calcul

- Valeurs codées

Exp No	% Fibres X_1	longueur de fibre X_2	Épaisseur de la plaque X_3
1	-0.976	-1	-0.825
2	-0.29	-0.985	-0.667
3	0.115	-0.998	-0.725
4	0.485	-0.996	-0.633
5	0.973	-0.998	-0.533
6	-0.789	-0.293	0.275
8	-0.348	0.982	0.833
9	-0.359	0.963	-0.417
10	-0.976	-1	-0.825
11	-0.347	0.927	0.0833
13	-0.749	0.927	0.6
14	-0.399	0.97	0.333
15	-1.33	-1.02	1.83
16	0.115	-0.998	-0.725

- Matrice de corrélation (calcul – Modèle mathématique)

	Frate	L	pla	Frate*Fr ate	L*L	Frate *L	L*pla	Frate*Frate*F rate	Frate*L *L	stres	
Frate	1	-0,152	-0,482	-0,47516	0,20362	-0,753	0,433 0	0,861926	0,95085	0,8700	0,8700
L	-0,152	1	0,405	-0,3869	-0,1682	-0,472	-0,06	0,189727	-0,1171	-0,506	-0,506
pla	-0,482	0,4059	1	0,41754	-0,1529	0,1488	-0,697	-0,545166	-0,4512	-0,440	-0,506
Frate*Frate	-0,475	-0,386	0,417	1	0,02611	0,609	-0,553	-0,708789	-0,4851	-0,187	-0,386
L*L	0,203	-0,168	-0,152	0,02611	1	0,031	0,114	-0,00876289	-0,1083	0,016	0,02611
Frate*L	-0,753	-0,4722	0,148	0,609212	0,03127	1	-0,379	-0,862263	-0,7683	-0,449	-0,4722
L*pla	0,433	-0,060	-0,697	-0,55370	0,11407	-0,379	1	0,64034	0,41563	0,3302	0,427
Frate*Frate*Frate	0,8619	0,1897	-0,5451	-0,708789	-0,0087	-0,862	0,640 3	1	0,87582	0,6396	0,675
Frate*L*L	0,9508	-0,117	-0,451	-0,48511	-0,1083	-0,768	0,415 6	0,875826	1	0,8831	0,875
stres	0,8700	-0,506	-0,440	-0,18776	0,01610	-0,449	0,330 24	0,639621	0,88313	1	0,953
E	0,8761	-0,5004	-0,5896	-0,336592	0,053	- 0,4140	0,427	0,675687	0,87780 7	0,953	

- Valeurs observées Vs prédites

stress	Observed	Predicted	Obs - Pred	Conf. int()
1	100	98,1026	1,89735	47,1041
2	192	168,875	23,1253	61,0011
3	215	208,384	6,61557	37,4107
4	255	249,904	5,09644	51,934
5	314	313,527	0,472534	66,0558
6	166	166,341	-0,341064	66,6188
8	133	120,794	12,2058	60,7679
9	88	109,623	-21,6228	63,3693
10	98	98,1026	-0,102646	47,1041
11	128	119,205	8,79482	64,9753
13	78	71,827	6,173	66,2373
14	98	110,442	-12,4415	34,2787
15	87,1	88,5884	-1,48836	66,6074
16	180	208,384	-28,3844	37,4107

- Intervalle de confiance de chaque paramètre

stress	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int()
Constant	178,164	288,507	0,570302	801,027
Frate	22,3986	409,549	0,959008	1137,09
L	-12,6906	152,01	0,937476	422,049
pla	9,04383	15,7612	0,596822	43,7603
Frate*Frate	0,689875	24,7694	0,979114	68,7712
L*L	-29,3687	297,498	0,926111	825,99
Frate*L	-11,65	203,529	0,957099	565,09
L*pla	-1,38106	17,0953	0,939493	47,4644
Frate*Frate*Frate	1,74421	13,3968	0,902696	37,1957
Frate*L*L	46,9571	403,308	0,912923	1119,77

- Effets des facteurs

stress	Effect	Conf. int()
Frate*L*L	167,727	3999,73
Frate	72,3093	3928,25
L*L	-64,9893	3214,48
Frate*L	-39,5607	253,607
L	-26,6979	173,607
pla	22,7925	106,346
Frate*Frate*Frate	14,671	312,862
L*pla	-3,66113	125,826
Frate*Frate	3,5949	124,194

Annexes 02

ANNEXE 2 : Loi normale réduite et loi de Student

1 - LOI NORMALE RÉDUITE

La variable normale réduite U suit une loi normale de moyenne 0 et d'écart-type 1 (**Figure V**).

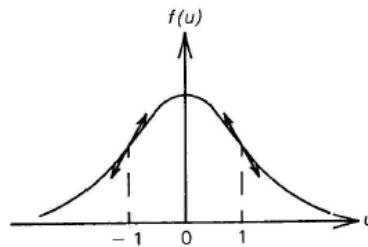


Figure V Loi normale

La table (**Tableau VI**) donne pour $u_p \geq 0$ les valeurs de la probabilité p pour que la variable centrée réduite soit inférieure à u_p , soit :

$$p = \Pr [U < u_p] = F(u_p)$$

La fonction de répartition est représentée sur la **Figure VI**.

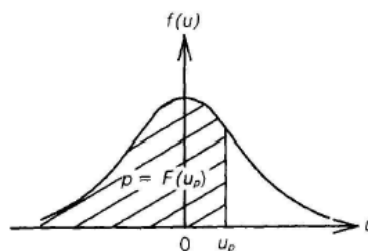


Figure VI Représentation de la fonction de répartition $F(u_p)$

Le **Tableau VI** est utilisé pour :

- donner les bornes de l'intervalle de confiance d'une moyenne au niveau $1 - \alpha$ (σ connu),
- comparer une moyenne à une valeur donnée (σ connu),
- comparer deux moyennes (σ_1 et σ_2 connus).

Tableau VI Valeurs des bornes supérieures et inférieures dans la représentation de la variable normale réduite U

	Niveau de signification	Niveau de confiance		
Intervalles de confiance et tests bilatéraux	$\alpha = 0.1$	$1 - \alpha = 0.90$	$U_{1-\alpha/2} = U_{0.95}$	1.64
	$\alpha = 0.05$	$1 - \alpha = 0.95$	$U_{1-\alpha/2} = U_{0.975}$	1.96
	$\alpha = 0.01$	$1 - \alpha = 0.99$	$U_{1-\alpha/2} = U_{0.995}$	2.58

Soit $1 - \alpha$, le niveau de confiance attaché à un intervalle bilatéral symétrique pour U :

- la borne inférieure u_1 (**Figure VII**) est définie par : $\Pr(U < u_1) = F(u_1) = \alpha/2$. La borne inférieure s'écrit donc $u_1 = u_{\alpha/2}$.
- la borne supérieure u_2 (**Figure VII**) est telle que :
 $\Pr(u < u_2) = F(u_2) = \alpha/2 + 1 - \alpha = 1 - \alpha/2$. La borne supérieure s'écrit donc $u_2 = u_{1-\alpha/2}$.
- la symétrie de la distribution permet d'écrire : $u_{\alpha/2} = -u_{1-\alpha/2}$.

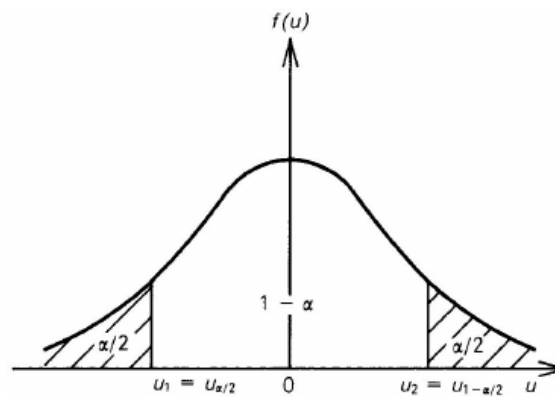


Figure VII Détermination des bornes de la courbe de la loi normale réduite

2 - LOI DE STUDENT

La variable t de Student a une distribution symétrique de moyenne nulle (**Figure VIII**) ; l'écart type dépend du nombre de degrés de liberté v.

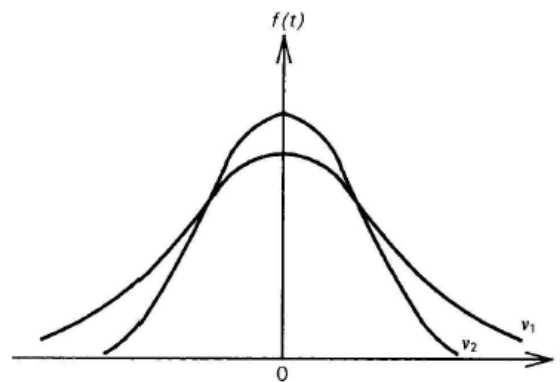


Figure VIII Représentation de la loi de Student

Quand v tend vers l'infini, la loi de Student tend vers la loi normale réduite ; l'assimilation est acceptable à partir de $v = 60$. Le **Tableau VII** donne en fonction de v les valeurs de t_p telles que :

$$\Pr (t < t_p) = F(t_p) = p \quad (p \geq 0,50)$$

La fonction de répartition est représentée sur la **Figure IX**.

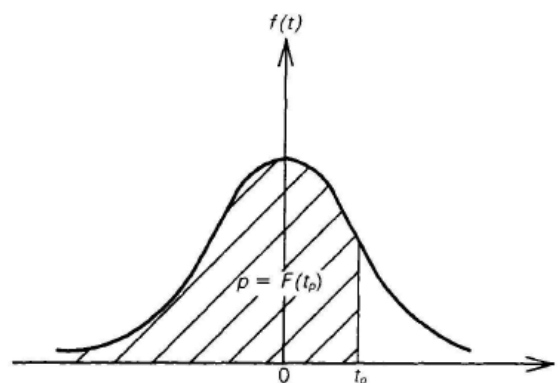


Figure IX Représentation de la fonction de répartition $F(t_p)$

Le **Tableau VII** est utilisé pour :

- donner les bornes de l'intervalle de confiance d'une moyenne au niveau $1 - \alpha$ (écart type σ estimé),
- comparer une moyenne à une valeur donnée (σ estimé),
- comparer deux moyennes (σ_1 et σ_2 égaux et estimés par s_1 et s_2).

Soit $1 - \alpha$, le niveau de confiance attaché à un intervalle bilatéral symétrique pour t . Cet intervalle a pour borne supérieure $t_{1-\alpha/2}$ et pour borne inférieure $t_{\alpha/2}$ (Figure X).

Par raison de symétrie : $t_{\alpha/2} = -t_{1-\alpha/2}$

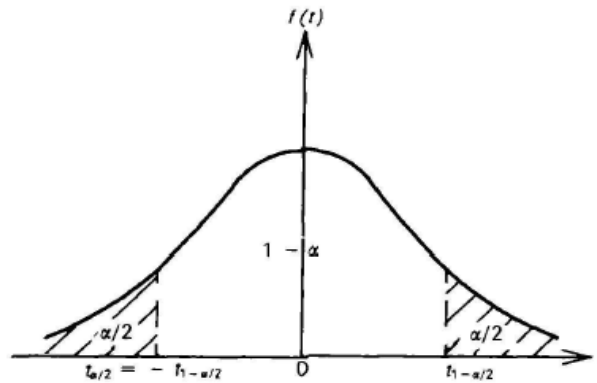


Figure X Détermination des bornes de la courbe de la loi de Student

Tableau VII Table de la loi de Student

ν	P	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,975	0,990	0,995	0,999	0,9995
1	0,000	0,325	0,727	1,376	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	318,3	636,6	
2	0,000	0,289	0,617	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,33	31,60	
3	0,000	0,277	0,584	0,978	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,22	12,94	
4	0,000	0,271	0,569	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610	
5	0,000	0,267	0,559	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,859	
6	0,000	0,265	0,553	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959	
7	0,000	0,263	0,549	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,405	
8	0,000	0,262	0,546	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041	
9	0,000	0,261	0,543	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781	
10	0,000	0,260	0,542	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587	
11	0,000	0,260	0,540	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437	
12	0,000	0,259	0,539	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318	
13	0,000	0,259	0,538	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221	
14	0,000	0,258	0,537	0,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140	
15	0,000	0,258	0,536	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073	
16	0,000	0,258	0,535	0,865	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015	
17	0,000	0,257	0,534	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965	
18	0,000	0,257	0,534	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,611	3,922	
19	0,000	0,257	0,533	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883	
20	0,000	0,257	0,533	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850	
21	0,000	0,257	0,532	0,859	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819	
22	0,000	0,256	0,532	0,858	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,782	
23	0,000	0,256	0,532	0,858	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,767	
24	0,000	0,256	0,531	0,857	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745	
25	0,000	0,256	0,531	0,856	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725	
26	0,000	0,256	0,531	0,856	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707	
27	0,000	0,256	0,531	0,855	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690	
28	0,000	0,256	0,530	0,855	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674	
29	0,000	0,256	0,530	0,854	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659	
30	0,000	0,256	0,530	0,854	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646	
40	0,000	0,255	0,529	0,851	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551	
60	0,000	0,254	0,527	0,848	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	2,232	3,460	
80	0,000	0,254	0,527	0,846	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,415	
100	0,000	0,254	0,526	0,845	1,290	1,660	1,984	2,365	2,626	3,174	3,389	
200	0,000	0,254	0,525	0,843	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,339	
∞	0,000	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,291	

(Source : CERESTA, Revue de statistique appliquée. Tables statistiques, no spécial, Paris, 1973.)

ANNEXE 3 : Loi de Snedecor

La loi de Snedecor ou loi de F permet de comparer les variances inconnues σ_1^2 et σ_2^2 (ou les écarts-types) de deux populations normales :

- σ_1^2 est estimée par s_1^2 avec ν_1 degrés de liberté,
- σ_2^2 est estimée par s_2^2 avec ν_2 degrés de liberté.

Si $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, le rapport $F = s_1^2/s_2^2$ suit la loi de F à ν_1 et ν_2 degrés de liberté.

La loi de F dépend de ν_1 , nombre de degrés de liberté de s_1^2 et ν_2 , nombre de degrés de liberté de s_2^2 .

Les tables (**Tableaux VIII et IX**) donnent, en fonction de ν_1 et ν_2 , les valeurs de F_p telles que :

$$\text{Prob}(F < F_p) = p \quad p \text{ peut prendre différentes valeurs : } p = 0,95 \text{ et } p = 0,975.$$

Au niveau $1 - \alpha$, les tables permettent d'obtenir :

- un intervalle de confiance bilatéral symétrique en probabilité pour F (**Figure XII**). La borne supérieure $F_{1-\alpha/2}$ est lue directement dans la table. La borne inférieure $F_{\alpha/2}$ est obtenue par la relation : $F_{\alpha/2} = 1/F_{1-\alpha/2}$ (pour ν_1 et ν_2).

- un intervalle de confiance unilatéral à droite (**Figure XIII**). Si l'éventualité $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ est la seule retenue, on forme le rapport $F = s_1^2/s_2^2$ que l'on compare au seuil $F_{1-\alpha}$ donné par la table.

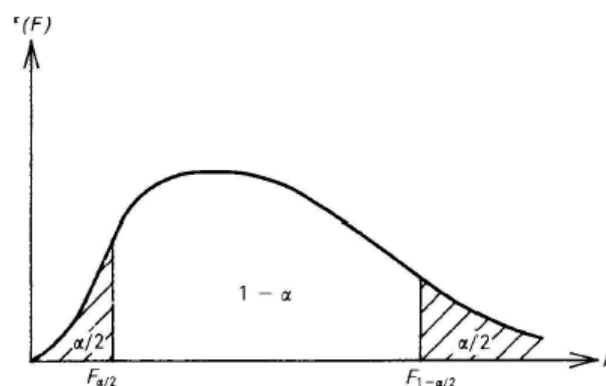


Figure XI

Détermination des bornes de la courbe de la loi de Snedecor pour un intervalle de confiance bilatéral

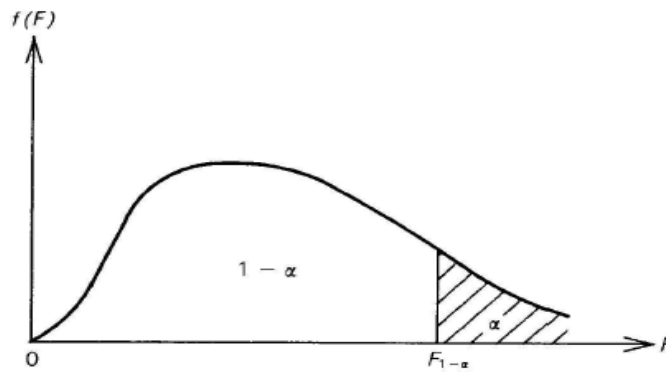


Figure XII Détermination de la borne de la courbe de la loi de Snedecor pour un intervalle de confiance unilatéral

Tableau VIII Table de la loi de Snedecor pour $p = 0,95$

$v_1 \backslash v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	20	40	60	100	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	242	244	248	251	252	253	254
2	16,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,79	8,74	8,66	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	5,96	5,91	5,80	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,74	4,68	4,56	4,46	4,43	4,41	4,37
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,06	3,97	3,87	3,77	3,74	3,71	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,64	3,57	3,44	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,35	3,28	3,15	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,14	3,07	2,94	2,83	2,79	2,76	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	2,98	2,91	2,77	2,66	2,62	2,59	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,85	2,79	2,65	2,53	2,49	2,46	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,75	2,69	2,54	2,43	2,38	2,35	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,67	2,60	2,46	2,34	2,30	2,26	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,60	2,53	2,39	2,27	2,22	2,19	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,54	2,48	2,33	2,20	2,15	2,12	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,49	2,42	2,28	2,15	2,11	2,07	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,45	2,38	2,23	2,10	2,06	2,02	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,41	2,34	2,19	2,06	2,02	1,98	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,38	2,31	2,16	2,03	1,98	1,94	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,35	2,28	2,12	1,99	1,95	1,91	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,32	2,25	2,10	1,96	1,92	1,88	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,30	2,23	2,07	1,94	1,89	1,85	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,27	2,20	2,05	1,91	1,86	1,82	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,25	2,18	2,03	1,89	1,84	1,80	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,24	2,16	2,01	1,87	1,82	1,78	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,22	2,15	1,99	1,85	1,80	1,76	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,20	2,13	1,97	1,84	1,79	1,74	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,19	2,12	1,96	1,82	1,77	1,73	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,44	2,35	2,28	2,18	2,10	1,94	1,81	1,75	1,71	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,16	2,09	1,93	1,79	1,74	1,70	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,08	2,00	1,84	1,69	1,64	1,59	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	1,99	1,92	1,75	1,59	1,53	1,48	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,44	2,29	2,17	2,08	2,01	1,91	1,83	1,65	1,49	1,42	1,36	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,83	1,75	1,57	1,39	1,32	1,24	1,00

