

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد القادر
تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Par : YAHIAOUI Younes

Sujet

Détermination des caractéristiques mécaniques du matériau composite utilisé dans la fabrication du thonier réalisé par l'entreprise "Techno naval" du chantier naval de Honaine

Soutenu publiquement, le 26 / 06 /2023, devant le jury composé de :

M. HOUMAT A.M	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. HAMZA CHERIF S.M.	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. BELALAIA SA.	Professeur	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. AMIRAT M.	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur 1

Année universitaire :2022/2023

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Allah, le Très Miséricordieux, le Tout Miséricordieux, à qui je suis infiniment reconnaissant d'avoir reçu le courage, la volonté et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.

Tout d'abord, je souhaite adresser mes sincères et chaleureux remerciements à mon directeur de mémoire, Hamza Cherif Sidi Mohamed. Son soutien et son attention exceptionnels ont été inestimables. Je suis reconnaissant pour la confiance qu'il m'a accordée, ainsi que pour son soutien moral, sa patience, sa disponibilité et ses conseils judicieux.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon co-directeur, M. Belalia Sid Ahmed, pour ses conseils bienveillants et sa confiance en moi, qui m'ont encouragé à redoubler d'efforts pour être à la hauteur de ses attentes.

Mes remerciements vont également au Professeur Houmat Abderrahim d'avoir accepté l'honneur de présider le jury de ce mémoire et d'examiner attentivement mon travail.

J'adresse également mes vifs remerciements au Professeur Amirat Mohammed d'avoir accepté d'examiner ce travail avec attention.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents pour leur amour, leurs conseils et leur soutien inconditionnel, tant sur le plan moral qu'économique. Leurs efforts ont rendu possible la poursuite de mes études et, par conséquent, la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance envers mes amis et collègues qui m'ont apporté un soutien moral et intellectuel tout au long de ce parcours.

Enfin, un grand merci à tous mes enseignants, qu'ils aient été présents cette année ou dans les années précédentes, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Votre implication et votre partage de connaissances ont été précieux, et je suis reconnaissant de votre contribution.

Je prie pour que toutes les personnes mentionnées dans mes remerciements puissent recevoir mes sincères expressions de reconnaissance et de gratitude pour leur soutien et leur aide précieuse tout au long de mon parcours.

DEDICACES

*A tous ceux qui ont été mes côtés dans les moments
Difficiles.*

*A mes parents Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur
de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur
procure bonne santé et longue vie.*

*A mes frères Mustafa Ismail ? et Abdelhak et Nlyes chère sœur
Lamia pour leurs soutiens.*

Et A tous mes amies

Résumé :

Le sujet de ce mémoire porte sur l'étude des caractéristiques mécaniques en traction statique des stratifiés en fibre de verre renforcés par une résine polyester utilisés dans la fabrication du thonier réalisé par l'entreprise "Techno naval" du chantier naval de Honaine. L'objectif est d'analyser l'effet de la nature des fibres de verre et de leur association sur le comportement du composite obtenu. Trois composites ont été réalisés et testés le premier un stratifié à cinq couches de Mat, le deuxième un stratifié à sept couches constitué de Mat et de roving et le troisième de huit couches de mat.

Une série d'essais de traction a été réalisée sur les matériaux étudiés, et l'analyse des résultats a permis de quantifier les propriétés mécaniques et de sélectionner la meilleure variante présentant les meilleures performances mécaniques.

Mots clés : matériaux, composites, stratifiés, traction, fibre de verre, résine polyester, mat, roving (tissu de verre), caractéristiques mécaniques.

Abstract:

The subject of this thesis concerns the study of the mechanical characteristics in static traction of fiberglass laminates reinforced with a polyester resin used in the manufacture of the tuna boat carried out by the "Techno naval" company of the Honaine shipyard. The objective is to analyze the effect of the nature of the glass fibers and their association on the behavior of the composite obtained. Three composites were produced and tested, the first a laminate with five layers of Mat, the second a laminate with seven layers made up of Mat and roving and the third with eight layers of Mat.

A series of tensile tests were carried out on the loaded materials, and the analysis of the results made it possible to quantify the mechanical properties and to select the best variant with the best mechanical performance.

Key words: materials, composites, laminates, traction, fiberglass, polyester resin, mat, roving (glass fabric)

خلاصة :

يتعلق موضوع هذه الرسالة بدراسة الخصائص الميكانيكية للجر الساكن للصفائح المصنوعة من الألياف الزجاجية المقواة براتنج البوليستر المستخدم في تصنيع قارب التونة الذي تقوم به شركة "Techno naval" التابعة لحوض بناء السفن في هونين. الهدف هو تحليل تأثير طبيعة الألياف الزجاجية وارتباطها بسلوك المركب الذي تم الحصول عليه. تم إنتاج واختبار ثلاثة مواد مركبة ، الأولى عبارة عن صفح بخمس طبقات من مات ، والثانية صفح بسبع طبقات مكونة من حصيرة ومتجولة والثالثة بثماني طبقات من حصيرة.

تم إجراء سلسلة من اختبارات الشد على المواد المحملة ، ومكن تحليل النتائج من تحديد الخواص الميكانيكية واختيار أفضل متغير مع أفضل أداء ميكانيكي.

الكلمات الدالة :

المواد ، والمركبات ، والرقائق ، والجر ، والألياف الزجاجية ، وراتنج البوليستر ، والحصيرة ، والتجوال (النسيج الزجاجي)

Table des matières

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites	i
I. Matériaux	composites 1
II. Constituants des matériaux composites:	2
II.1. Renforts	2
II.2. Matrices	4
II.3. Charges et additifs	5
II.4. Gelcoats	5
III. Structures	composites : 6
a) structures en stratifiées,	6
b) Structures en sandwich :	6
c) Structures 3D	7
Chapitre 2 : Contexte du projet	9
I. Présentation de l'entreprise Techno navale	9
II. Présentation d'un navire :	10
II.1. Différentes parties d'un navire :	11
II.2. Caractéristiques de la coque d'un navire	11
II.3. Matériaux de construction	11
III. Matériaux composites dans la construction navale	13
aluminium	14
III.1. Matériaux utilisés dans l'élaboration des composites en fabrication navale	15
Les caractéristiques générales de la fibre E sont :	15
III.2. Procédés d'élaboration des composites en fabrication navale	17
IV. Objectifs de l'étude	17
Chapitre 3 : Fabrication du composite pour l'élaboration des éprouvettes	22
I. Procédé de Moulage en contact	22
II. Matériaux utilisés dans l'élaboration du composite pour la réalisation des éprouvettes	22
II.1. Fibre de verre E	22
1. Mat de verre	22
2. Tissu de verre (roving)	25
II.2. Résine polyester (ORTHO)	25
II.3. Catalyseur	26
II.4. Gelcoat	26
II.5. Agent de démoulage	27

III.Plaques	composite	réalisées	
.....			27
b) plaque composite 2:			27
Chapitre IV			31
I.Préparation	des	éprouvettes	
.....			31
II.Description	de	la	machine
.....		de	traction
.....			31
III.Caractérisation		mécanique	
.....			31
a) Essai de traction de la plaque composite 1			31
b) Essai de traction de la plaque composite 2			39
a) Essai de traction de la plaque composite 3			45
e) Comparaison entre les trois plaques			52
Conclusion			58

Liste des tableaux

Tableau 1 Composition chimique	24
Tableau 2 Caractéristiques du tissu de verre (roving).....	25
Tableau 3 Caractéristiques du tissu de verre (roving).....	25
Tableau 4 Quantité de catalyseur à mélanger à la résine polyester pour un mélange à 2%.....	26
Tableau 5 dimensions de chaque éprouvette.....	31
Tableau 6 Caractéristique mécanique moyenne du matériau composite plaque1	32
Tableau 7 Caractéristique mécanique du matériau composite plaque1	33
Tableau 8 Caractéristique mécanique moyenne du matériau composite plaque1	39
Tableau 9 Caractéristique mécanique du matériau composite plaque1	40
Tableau 10 Caractéristique mécanique moyenne du matériau composite plaque3.....	46
Tableau 11 Caractéristique mécanique moyenne du matériau composite plaque3.....	47
Tableau 12 comparaison des caractéristiques mécaniques des trois composites.....	52

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 Composition du Composite.....	1
Figure I-2.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I-3 Principaux types de renforts [9]	2
Figure I-4 Exemple de renforts fibres de verre	4
Figure I-5 Différents types de matrices.....	4
Figure I-6 Différents types de matrices.....	5
Figure I-7: Exemples de stratifiés. L'orientation des fibres en degrés est donnée entre crochets	6
Figure I-8 structures en sandwich	6
Figure I-9 structures en sandwich 3D	7

Chapitre II

Figure II-10 structures en sandwich	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-11 structures en sandwich	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-12 Fabrication de glisseur 5.5m avec remorque chez techno naval.....	10
Figure II-13 description d'un navire	12
Figure II-14 construction d'un navire en bois ⁷	14
Figure II-15 navire en acier	14
Figure I-16 navire avec une coque en	14
Figure I-17 : navire de plaisance et de course en composite.....	14
Figure I-18 Procède de moulage par injection basse pression (R.T.M.)	17
Figure 19 Principe du moulage en contact	23
Figure 20 Elaboration d'une coque de bateau	23

Chapitre III

Figure 21 Types de mat : a) Mat300, b) Mat450 et c) Mat600	24
Figure 22 Résine polyester ORTHO	26
Figure 23 Gelcoat utilisé dans la fabrication des plaques composites	27
Figure 24 plaque composite 1	27
Figure 25 plaque composite 2	28
Figure 26 plaque composite 3	29
Figure 27 dimensions des éprouvettes	31
Figure 28 Machine traction 600kg/N	32
Figure 29 Courbes charge/déplacement de la plaque composite 1	38
Figure 30 Courbes charge/déplacement de la plaque composite 2	45
Figure 31 Courbes charge/déplacement de la plaque composite 3	51

Introduction

La construction et la réparation navale est une industrie concernant la flotte militaire, de commerce et de la pêche. À titre d'exemples, on peut citer : sous-marins, navires à grande vitesse, paquebots, navires furtifs, navires de recherche, de servitude, navires de pêche : du grand thonier océanique au plus petit côtier, de l'offshore des pétrolier...

Les exigences de vitesse et de mobilité des navires obligent de plus en plus les concepteurs à optimiser les structures, et donc à faire appel à des technologies et des matériaux de plus en plus sophistiqués. Les composites sont devenus actuellement les matériaux les plus répondus dans la construction navale, ils permettent de réduire les émissions polluantes et la consommation de carburant, gagner en légèreté et en durabilité sans compromettre les performances.

Dans l'industrie navale, les fibres de verre sont le meilleur choix pour des raisons de coût, durée de vie, facilité de mise en œuvre.

Les tissus de renfort Mat et roving sont d'une grande importance dans l'élaboration des composites utilisés dans la construction navale.

Dans ce mémoire trois composites d'empilement différents : le premier à 5 couches, le deuxième à 7 et le troisième à 8 couches seront élaborés selon un cahier de charge défini par l'entreprise Techno navale. En vue de prendre les décisions correctes à l'égard de la sélection du matériau constituant les thoniers, des essais de traction seront réalisés à fin de déterminer leurs propriétés mécaniques.

Le mémoire est constitué de quatre chapitres :

Le chapitre 1 constitue une généralité sur les matériaux composites.

Le chapitre 2 présente le contexte et les objectifs fixés de l'étude.

Le chapitre 3 donne le processus d'élaboration des matériaux composites utilisés pour la fabrication des éprouvettes nécessaires aux essais de traction.

Le chapitre 4 est consacré à la détermination des propriétés mécaniques des plaques composites.

Chapitre I :

Généralités sur les matériaux composites

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Pour améliorer les produits existants ou en créer de nouveaux, les constructeurs ont constamment besoin de matériaux performants qui répondent à un cahier de charge de plus en plus sophistiqué. A titre d'exemples, on peut citer les matériaux composites qui sont devenus en quelques décennies les matériaux les plus utilisés dans l'aérospatial, l'aéronautique et le maritime.

I. Matériaux composites

Les composites sont des matériaux qui se composent de deux ou plusieurs matériaux différents, chacun ayant des propriétés spécifiques, voir figure I.1. Ils sont combinés pour obtenir des propriétés uniques qui ne sont pas présentes dans les matériaux de base individuels. Les composites peuvent ainsi offrir des propriétés améliorées, telles que la résistance, la légèreté, ou encore la durabilité [1-6].

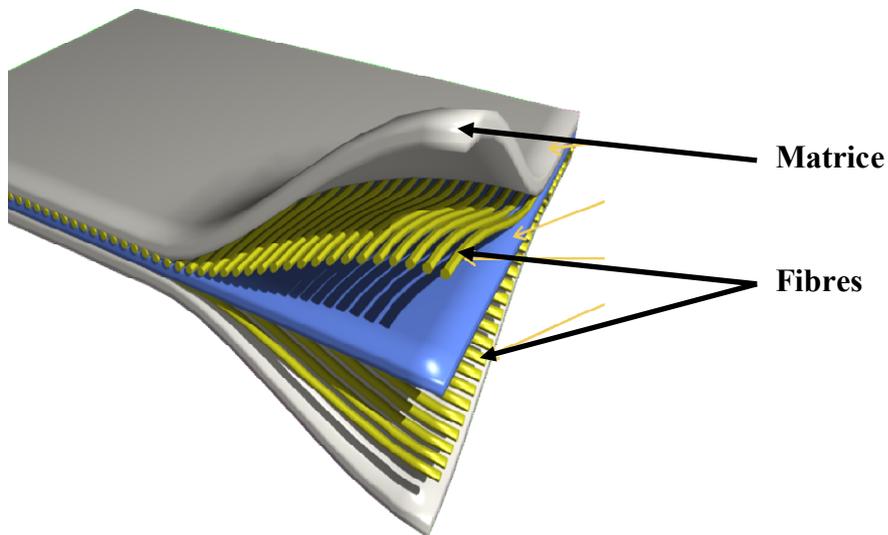


Figure 1-1 Composition du Composite.

On peut citer deux grandes familles de composites : les composites grandes diffusions et les composites hautes performances.

Les composites à grande diffusion présentent les avantages suivants : prix de revient abordable et une simplicité de mise en œuvre.

Les composites hautes performances sont employés dans des domaines nécessitant une grande résistance tel que l'aéronautique et l'aérospatiale. Les renforts sont des fibres longues ou le taux de renfort dépasse 50%.

On peut faire un classement suivant la forme et la nature des constituants [3] :

- Composite à particules.
- Composites à fibres courtes.
- Composites à fibres longues.
- Composites à renforts tissus.

On peut faire aussi un classement suivant la nature de la matrice [3] :

- Matrice organique.
- Matrice métallique.
- Matrice de carbone.
- Matrice céramique.

II. Constituants des matériaux composites:

II.1. Renforts

Les renforts sont sous forme filamentaire, ils contribuent à l'amélioration des propriétés mécaniques du composite. On distingue différents types de renforts, voir figure I.2.

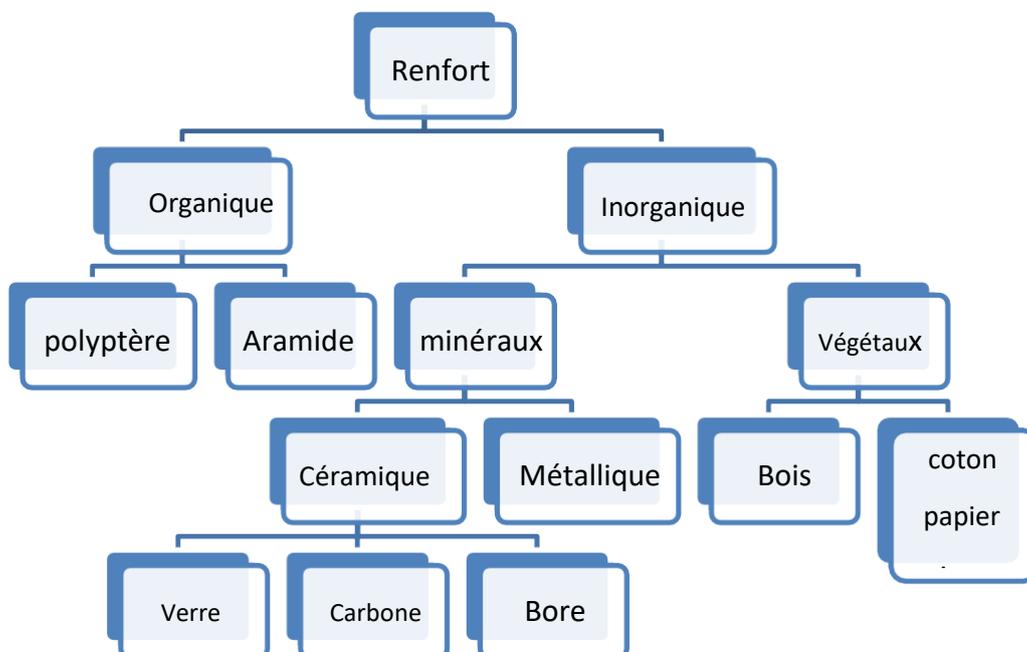


Figure 1-2 : Principaux types de renforts.

Selon des critères techniques bien définis (résistance, milieu ambiant, ...) on choisit l'architecture des renforts:

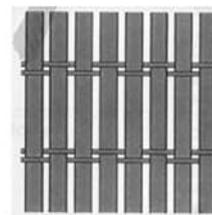
Pour les composites grandes diffusions généralement on utilise les fibres de verre non tissées :

- a) fibres de verre courtes,
- b) fibres longues disposées en mats : composites grande diffusion.

Contrairement aux renforts en fibre de verre non tissée, les renforts tissés sont utilisés dans les applications hautes performance. On distingue :

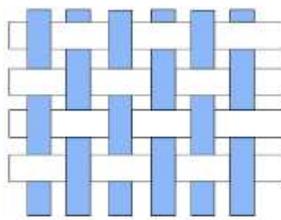
- a) **Roving sous forme de taffetas et de toiles** : des fils sont tissés en chaîne et en trame perpendiculaires, le renfort procure au composite une grande résistance en traction et en flexion.
- b) **Sergé**
- c) **Satin**
- d) **Multiaxiaux** : les couches parallèles de roving sont cousues ensemble en une construction à deux ou plusieurs couches, avec des orientations de fibres différentes à chaque couche
- e) **Rovimat** : c'est une combinaison de roving et de mat, il offre une bonne résistance traction, flexion et la compression

Mat de verre



Unidirectionnel

TAFFETAS



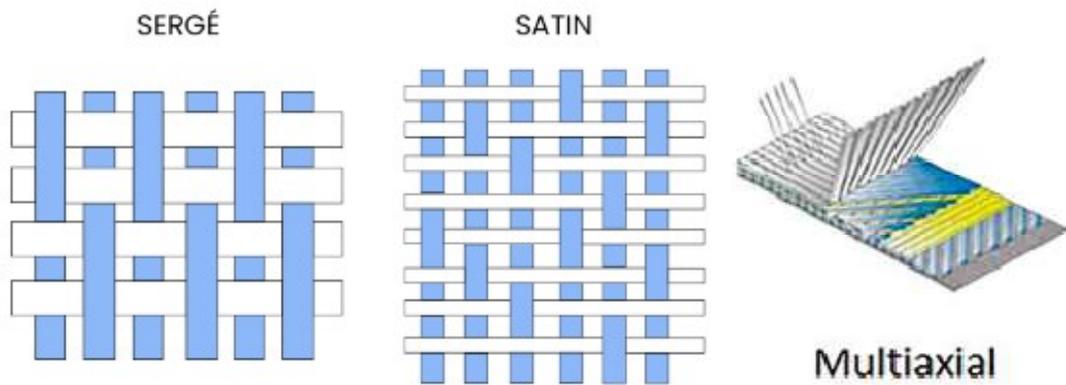


Figure I-2 : Exemple de renforts fibres de verre

II.2. Matrices

Les fibres sont enrobées dans une matrice qui permet :

- De donner une forme à la pièce ;
- De transmettre les efforts entre les fibres ;
- De protéger les fibres de toute agression extérieure.

Les différents types de matrices sont donnés comme suite [7].

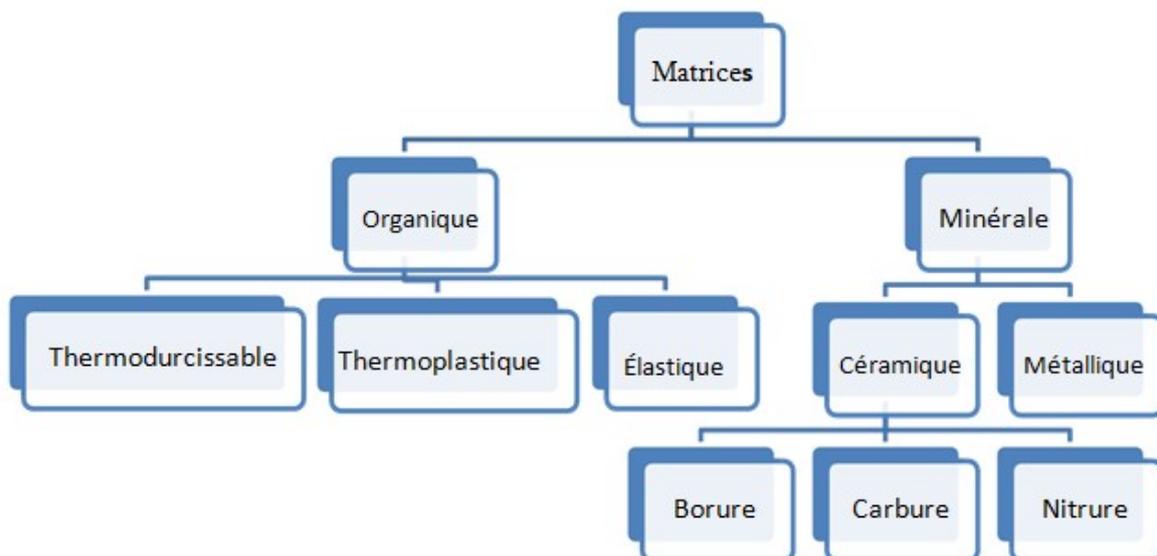


Figure I-3 : Différents types de matrices.

II.3. Charges et additifs

Pour remplir davantage de fonctions techniques et de conférer de nouvelles propriétés aux composites on ajoute au sein de la matrice des particules solides appelés charges et additifs. Ces charges peuvent être minérales, métalliques ou organiques. On peut rencontrer (figure 5) :

- Des poudres ou paillettes métalliques : matrice conductrice d'électricité et de chaleur, bonne usinabilité, bonne résistance aux chocs ou à l'abrasion...
- Du noir de carbone utilisé comme barrière anti-UV et antioxydant.
- Des microbilles de verre creuses utilisées pour améliorer la tenue en compression.
- Des billes thermoplastiques pour améliorer leur ductilité.
- Des particules de silice pour l'isolation thermique, électrique et acoustique.

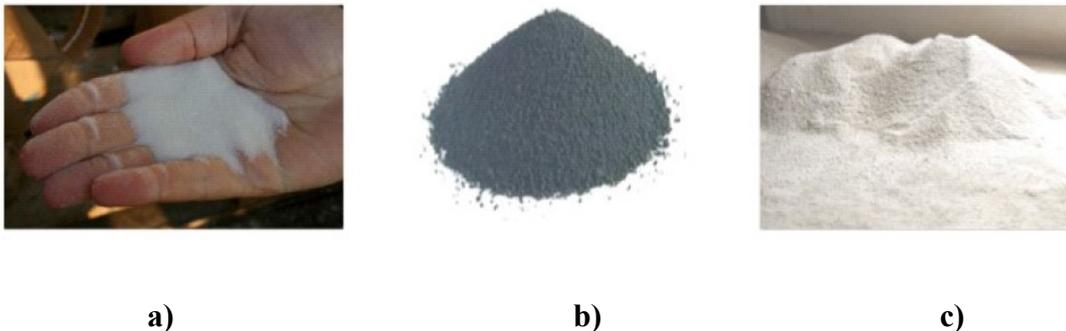


Figure I-4 : Différents types de charges.
(a) microbilles de verre, (b) noir de carbone, (c) silice

II.4. Gelcoats

Une couche de surface à base de résine appelée gelcoat est appliquée sur le composite à fin de lui assurer :

- Aspect de surface.
- Brillance.
- Coloration.
- Protection des stratifié.
- Résistance l'aberration.
- Résistance à la corrosion.
- Résistance aux chocs.
- Résistance UV ; rayure ; agression chimique ; feu ; l'hydrolyse

III. Structures composites :

Les structures composites à fibres longues possèdent des structures différentes de celles des composites à fibres courtes. Ces structures permettent une optimisation des propriétés selon l'orientation et la disposition des renforts en fonction du chargement subi par la pièce.

On trouve trois types de structures :

- les structures stratifiées,
- les structures sandwich,
- les structures 3D.

a) structures en stratifiées,

Ces structures sont les plus utilisées, la pièce est constituée d'un empilement de couches appelées plis. En fonction des propriétés mécaniques souhaitées on peut soit

- 1) Combiner les empilements de couches de différents types de renfort : mats avec couches de tissus ou une couche de roving intercalé entre deux couches de mat, par exemples,
- 2) jouer sur l'orientation des fibres

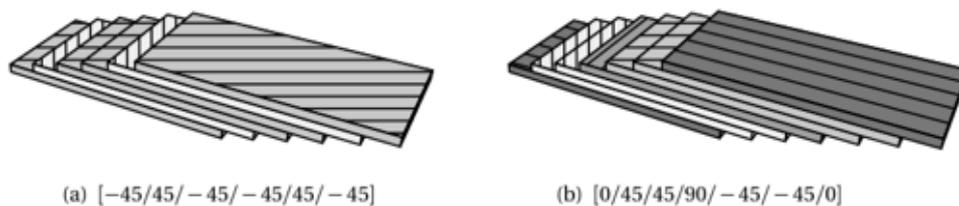


Figure I.7 : Exemples de stratifiés.

b) Structures en sandwich :

Les structures en sandwich sont utilisées dans la conception des structures à rigidité élevée en flexion et en torsion, composées de deux peaux en stratifiées et d'une âme légère dont l'épaisseur est largement supérieure à celle des peaux, en mousse de polymères ou en nids d'abeilles. (figure I.8).



Figure I-5 : Structures en sandwich.

c) Structures 3D

Les structures 3D possèdent des propriétés mécaniques élevées tout en restant légères. Elles sont obtenues par tressage, ou par l'emploi de renforts tissés 3D, voir figure I-9.

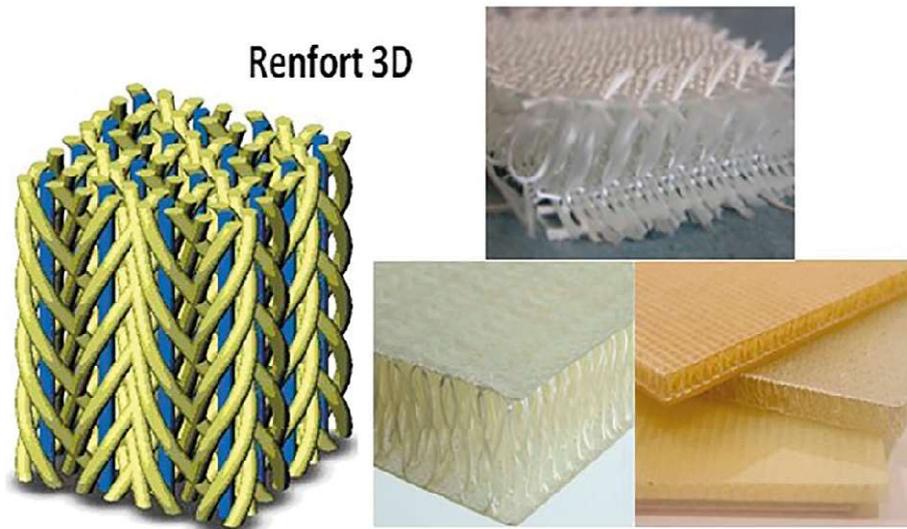


Figure I-6 : Structures en sandwich 3D.

Chapitre 2 :

Contexte du projet

Chapitre 2 : Contexte du projet

La construction et la réparation navale est une industrie concernant la flotte militaire, de commerce et de la pêche. À titre d'exemples, on peut citer : sous-marins, navires à grande vitesse, paquebots, navires furtifs, navires de recherche, de servitude, navires de pêche : du grand thonier océanique au plus petit côtier, de l'offshore des pétrolier...

I. Présentation de l'entreprise Techno navale

La société Techno navale est fondée par deux architectes navals et un ingénieur. Elle est spécialisée dans la construction et la réparation des grands bateaux. Elle active actuellement au port d'Honaïne, dans la wilaya de Tlemcen. L'entreprise est en cours de réaliser deux thoniers d'une longueur de 37 mètres destinés à la pêche hauturière et d'un bateau-restaurant au niveau du port de Sidna Youchâa, voir figures (Figure II-11)

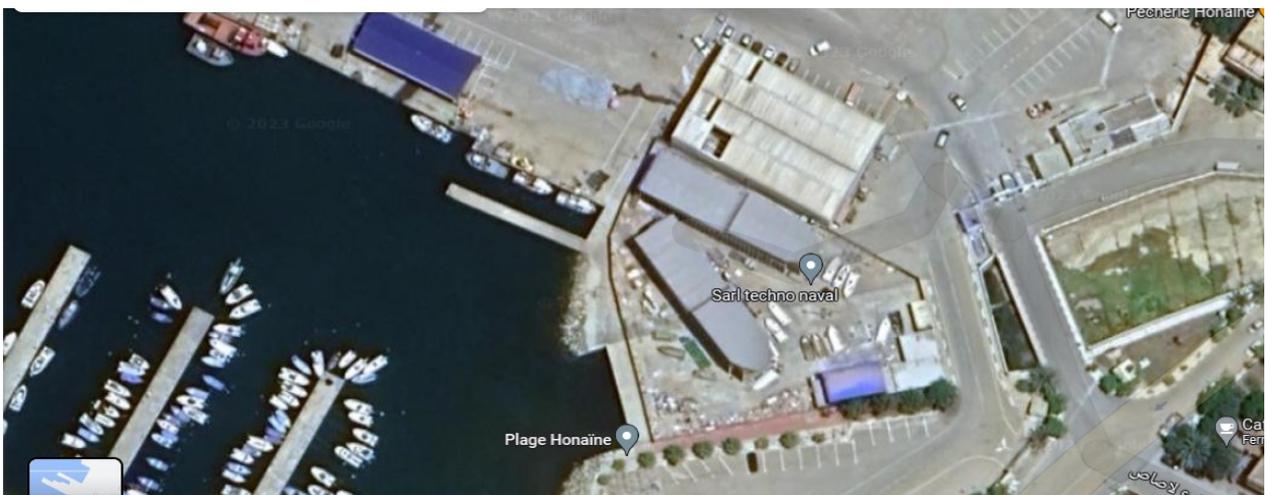
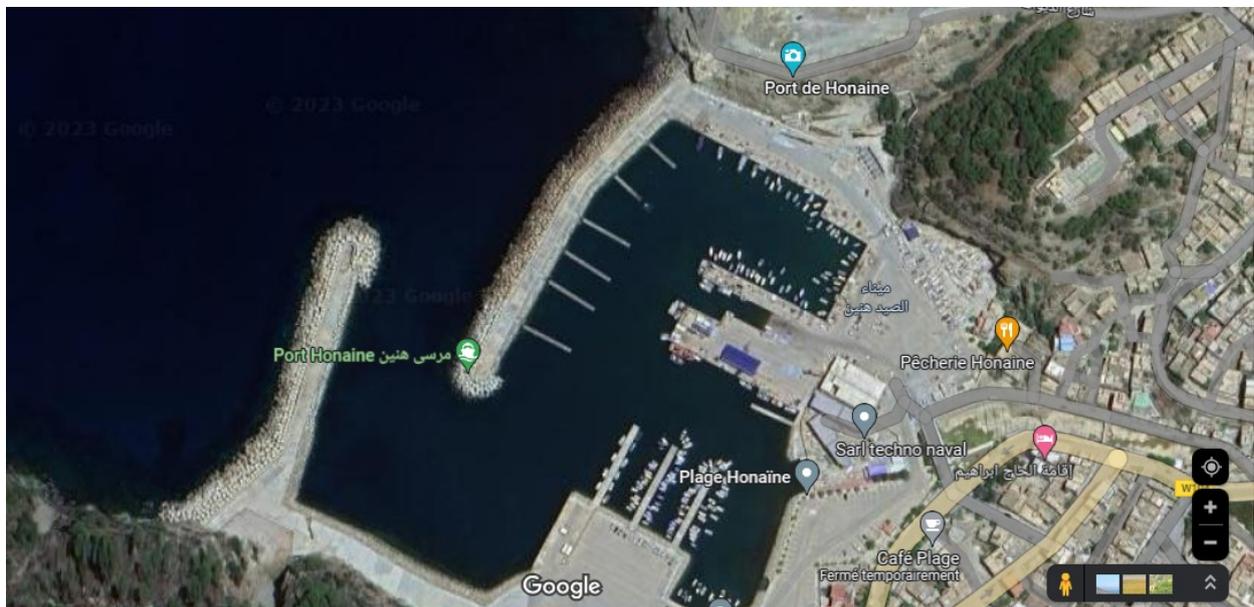




Figure II-7 : Fabrication de glisseur 5.5m avec remorque chez techno naval

II. Présentation d'un navire :

Un navire est un flotteur, utilisé pour le transport des marchandises et des hommes ou comme engin de guerre. Le navire s'est développé considérablement avec l'apparition de la machine à vapeur et le grand développement en construction mécanique.

II.1. Différentes parties d'un navire :

Il est constitué des structures suivantes :

1. Bouge
2. Etrave avec bulle
3. Ancre
4. Bâbord
5. Hélice
6. Partie arrière
7. Cheminée
8. Superstructure
9. Pont

II.2. Caractéristiques de la coque d'un navire

La structure externe ou enveloppe d'un bateau est appelée coque, c'est la structure du bateau à l'exception de la cabine, le mât, la quille. Certains bateaux sont constitués de différentes coques reliées entre elles : catamaran et trimaran. La forme de la coque est conçue de telle sorte que le bateau puisse se déplacer assez facilement dans l'eau.

Les fonctions d'une coque d'un navire sont :

- a) Matérialiser la carène ;
- b) Résister aux efforts extérieurs ;
- c) Assurer la sécurité contre un envahissement par l'eau et contre la propagation d'un incendie ;
- d) Utiliser comme support pour les appareils, les équipements et les installations nécessaires.

II.3. Matériaux de construction

La construction d'un navire est un processus très complexe qui nécessite un travail de collaboration entre de nombreuses équipes qualifiées. Les coques sont construites en matériaux très variés selon un cahier de charge bien défini.

a) Bois

Avant l'utilisation des aciers les coques étaient exclusivement réalisées en bois massif, les bateaux réalisés sont très solides mais, très lourds, voir figure II.5. Actuellement on utilise le bois en :

- Lamellé-collé : bonne résistance.
- Contreplaqué-époxy : 100% étanche et une mise en œuvre est très simple.

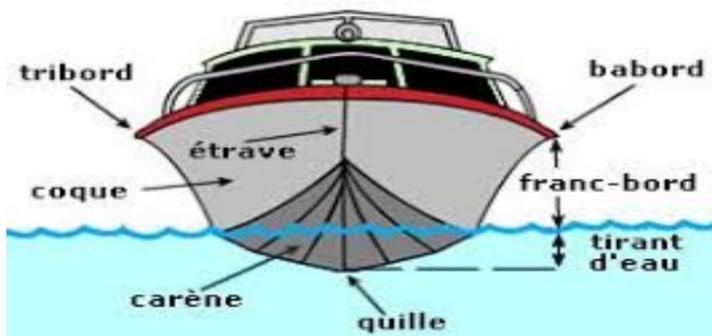
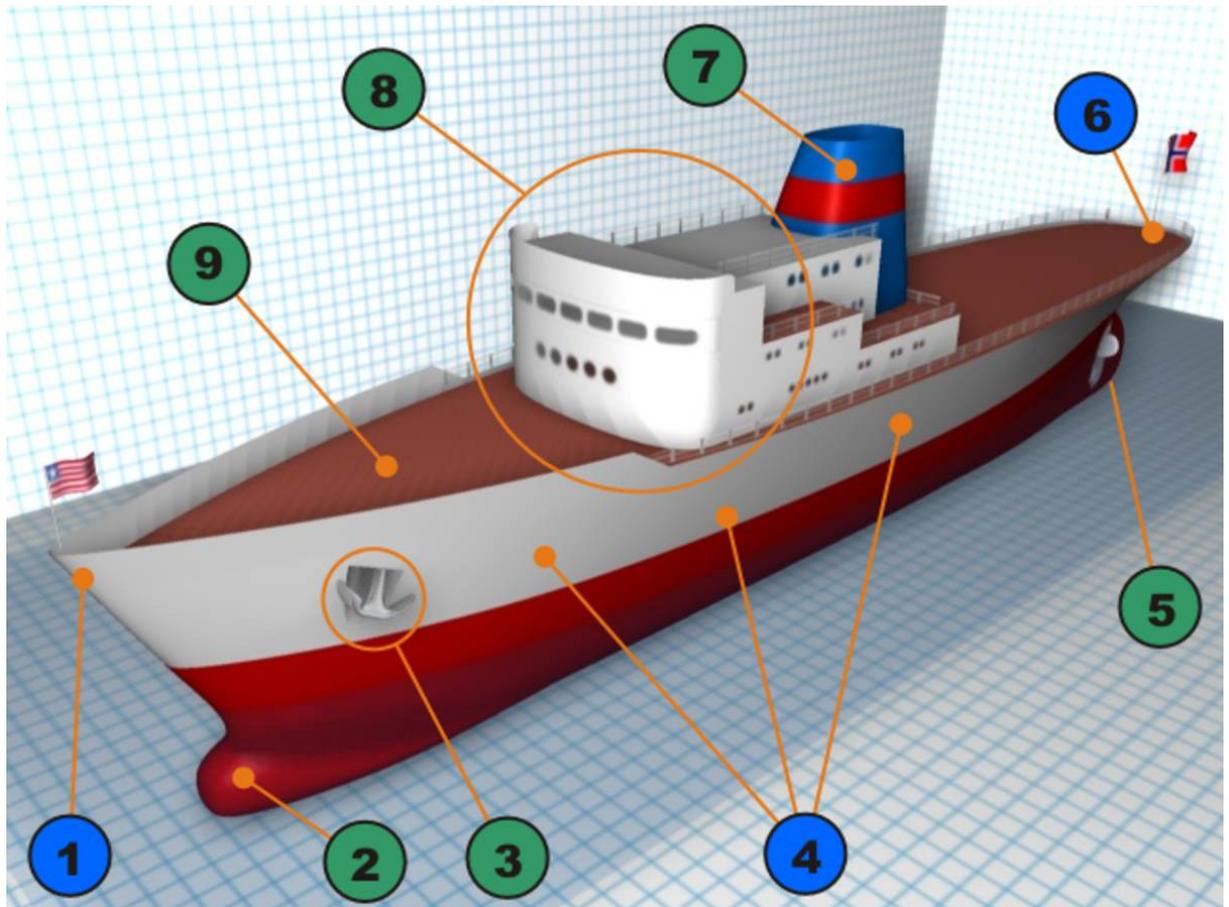


Figure II-8 :Description d'un navire

b) Acier

Réservée à la construction des navires de longueur supérieure à 15m, l'acier est actuellement le matériau le plus répandu, figure II.6. L'acier est très résistant aux chocs mais aussi le plus durable. On utilise également l'acier inoxydable pour certains voiliers de plaisance.

c) Aluminium

Il a les mêmes qualités que l'acier mais en plus il présente certains avantages par rapport à ce dernier : la légèreté, la résistance à la corrosion, l'absence d'interférence avec le matériel de bord (non magnétisme), figure II.7.

d) Matériaux composites

Ils comprennent le ferrociment, le polyester stratifié, les plastiques et les sandwichs. Le navire est réalisé à partir d'un moule sur lequel on superpose des couches de fibres de verre ou de carbone et de résine, figure II.8.

III. Matériaux composites dans la construction navale

Les exigences de vitesse et de mobilité des navires exigent de plus en plus les concepteurs à optimiser les structures, et donc à faire appel à des technologies et des matériaux de plus en plus sophistiqués. Les composites sont devenus actuellement les matériaux les plus répondus dans la construction navale, ils permettent de réduire les émissions polluantes et la consommation de carburant, gagner en légèreté et en durabilité sans compromettre les performances.

Les avantages des matériaux composites dans la fabrication navale sont :

- Légèreté
- Performances mécaniques
- Résistance à la corrosion
- Isolation thermique et acoustique
- Absence de corrosion
- Magnétisme
- Tenue au feu
- Conductivité thermique
- Propriétés électriques
- Transparence aux ondes sonar et radar
- Amortissement des vibrations



Figure II-9 :Construction d'un navire en bois.



Figure II-10 :Navire en acier



Figure II-11 :Navire avec une coque en aluminium



Figure II-12 : navire de plaisance et de course en composite

III.1. Matériaux utilisés dans la fabrication des composites en construction navale

Les constituants d'un composite en construction navales sont :

III.1.1. Fibres de verre E :

La fibre de verre est utilisée à grande échelle comme isolant thermique et électrique en application industrielle. La fibre de verre E est la plus utilisée, 90 % des renforts sont en verre E.

Les avantages de la fibre de verre E :

- Incombustible
- Bonne résistance à l'abrasion et aux vibrations
- Bonne résistance aux principaux agents chimiques
- Excellente résistance diélectrique
- Excellente stabilité dimensionnelle
- Compatible avec des matrices organiques

La fibre de verre E est fabriquée sur la base de l'oxyde de bore et un mélange de magnésie , de silice, de chaux et d'alumine. La pâte en fusion se transforme en pâte visqueuse, puis liquide pour enfin elle se vitrifier. À une température de 1 500 °C elle est filée pour produire un **fil de verre**, ensuite ensimé, bobiné puis séché.

Les caractéristiques générales de la fibre E sont :

a) Propriétés mécaniques

Leur résistance spécifique (résistance traction sur masse volumique) est supérieure à celle de l'acier. Les produits fabriqués à base de fibre de verre E résistent aux vibrations et à l'abrasion.

b) Propriétés thermiques

La fibre de verre E possède une faible conductivité thermique. La fibre résiste à des températures de plus de 600 °C et est incombustible.

c) Résistances chimiques

Les produits en fibre de verre E résistent à la majorité des produits chimiques, aux huiles et aux solvants et en plus, ils sont imputrescibles.

d) Stabilité dimensionnelle

Le fil de verre est insensible aux variations de température et d'hygrométrie et son coefficient de dilatation est peu élevé.

e) Propriétés électriques

Le fil de verre E a une excellente résistance diélectrique même à faible épaisseur.

III.1.2. Matrices

La fabrication de navires est basée essentiellement sur les matrices thermodurcissables. Les plus utilisées on trouve les matrices à base d'époxy, de polyester et de vinylester.

1. **Époxy** : L'époxy est une résine très résistante offrant une excellente adhérence aux fibres de renfort. Elle est souvent utilisée pour les applications nécessitant une résistance mécanique élevée et une résistance chimique. Elle présente les avantages suivants :

- bonne propriété mécanique.
- Bonne résistance aux agents chimiques.
- Bonne résistance à la fatigue.
- Propriétés thermique élevées.
- Bonne stabilité dimensionnelle.
- Retrait < 1 %.
- Pouvoir adhésif important.

Les inconvénients :

- Cycle de moulage long.
- Nécessite des démoulants appropriés.
- Retrait important (6 à 7% en volume).
- Inflammable.
- Durée de conservation limitée.
- Temps de travail limité.

2. **Vinylester** : Les matrices vinylesters offrent une excellente résistance chimique et une bonne résistance mécanique. Elle est couramment utilisée pour les applications marines où une résistance accrue à la corrosion est nécessaire, l'automobile, la protection balistique, etc. Elle présente les avantages suivants :

- Excellente tenue chimique.
- Bonne propriété mécanique.
- Bonne résistance à la fissuration.
- Bonne tenue thermique.

Les inconvénients :

- Polymérisation plus lente qu'un polyester.
- Nécessite des démoulant appropriés.
- Retrait volumique de 6 à 8 %.

3. **Polyester** : Le polyester est une résine plus économique et facile à utiliser. Il est souvent utilisé pour les applications de fabrication en série où une résistance modérée est requise. Elle présente les avantages suivants :

- Bonne adhérence avec la fibre de verre.
- Mise en œuvre facile.
- Tenue chimique acceptable.
- Prix abordable.

III.2. Procédés d'élaboration des composites en fabrication navale

Les procédés les plus utilisés en construction navale sont :

- a) Le moulage au contact ; Il s'agit du procédé le plus utilisé pour la réalisation de grandes structures navales,
- b) La projection simultanée ;
- c) L'injection basse pression (R.T.M.) figure II.9;
- d) La pultrusion.
- e) L'enroulement filamentaire en voie humide.



Figure II-13 : Procède de moulage par injection basse pression (R.T.M.)

IV. Objectifs de l'étude

La société Techno navale fabrique les coques de thonier en matériaux composites en utilisant des empilements de couches de différents types de renfort : mats avec couches de tissus.

La détermination des propriétés mécaniques de ces composites est d'une grande importance pour la société Techno navale qui a formulé le besoin de déterminer expérimentalement ces caractéristiques mécaniques. L'objectif de ce travail de mémoire est d'élaborer des plaques en composite selon les modèles utilisés par l'entreprise et de les tester expérimentalement pour déterminer les propriétés mécaniques de ces derniers.

Chapitre 3 :

Fabrication du composite pour
l'élaboration des éprouvettes

Chapitre 3 : Fabrication du composite pour l'élaboration des éprouvettes

Le procédé de moulage utilisé dans la réalisation des plaques en composites pour l'élaboration des éprouvettes est le moulage en contact. Trois types de plaques composites sont réalisés avec des stratifications différentes selon le cahier de charges élaborés par l'entreprise Techno Naval. Les trois plaques représentent des échantillons de la coque du thonier réalisés par cette entreprise.

I. Procédé de Moulage en contact

Le procédé consiste :

- a) A déposer avant le moulage un agent de démoulage.
- b) En suite une fine couche de gelcoat est déposée.
- c) Des couches successives de renforts imprégnés au rouleau (élimination des bulles d'air dans les empilements) de la résine. à température ambiante la résine se polymérise. la pièce est démoulée à l'aide d'un jet d'air une fois le durcissement du stratifié est terminé. (Figure III.1-2)

II. Matériaux utilisés dans l'élaboration du composite pour la réalisation des éprouvettes

II.1. Fibre de verre E

Les fibres de verre utilisées comme renfort dans les composites sont composées principalement de silice, mélangée à l'alumine, l'anhydride borique et l'oxydes alcalinoterreux. La composition chimique est donnée par le Tableau III.1.

Nous avons utilisé deux types de structures de fibres de verre le mat et le tissé.

1. Mat de verre

Le mat de verre est constitué de fibres de verre coupées et disposées de manière aléatoire. Ces fibres de verre sont liées à l'aide d'une résine pour former une structure cohérente. (Tableau III.3). Il existe différents types de mat de verre dont la caractéristique est la masse surfacique. Dans ce travail nous avons utilisé les mats suivants, voir Tableau III.2 et figure III.3 :

- a) **Mat 300.**
- b) **Mat 450.**
- c) **Mat 600.**

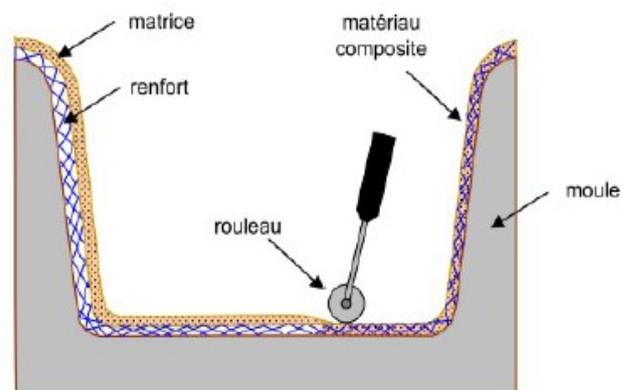
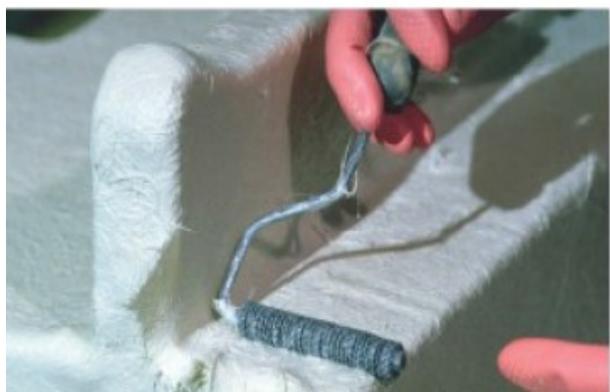
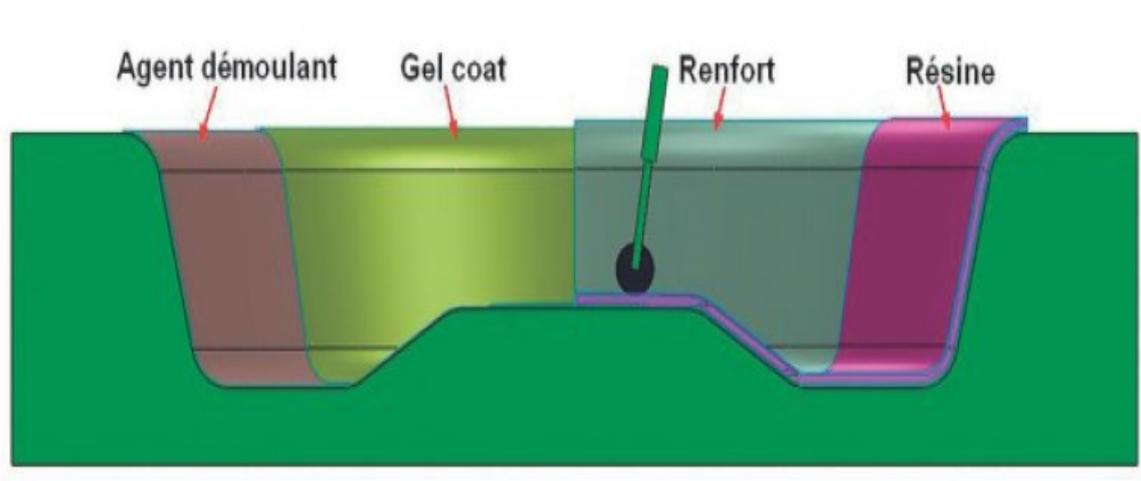


Figure III-14 : Principe du moulage en contact



Figure III-15 : Elaboration d'une coque de bateau

Tableau III-1 : Composition chimique

Composition chimique	SiO₂ (silice)	B₂O₃ (Trioxydedebore)	Al₂O₃ (L'alumine)	CaO (L'oxyde decalcium)
Teneur en %	54,5	8,5	14,5	22



a)

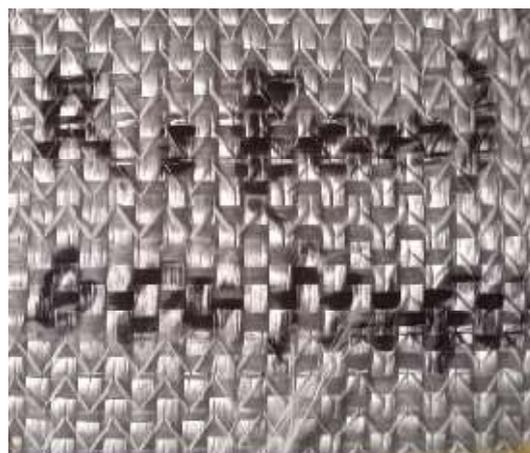


b)



c)

Figure III.16 : Types de mat : a) Mat300, b) Mat450 et c) Mat600



**Figure III.22: Tissu de verre
(roving)**

2. Tissu de verre (roving)

Un tissu de verre symétrique à structure sergée du type taffetas tissé et équilibré. Ce tissu est traité avec un finish à base d'époxy-silane, ce qui permet une bonne qualité d'imprégnation. De plus, il présente une bonne déformabilité lors de la mise en place (Figure III.4).

Taffetas : une mèche de trame passe successivement dessus et dessous une mèche de chaîne (voir figure ci-dessus)

Sergé : une mèche de trame passe successivement dessus n mèches de chaîne puis dessous n mèches de chaîne (voir la figure ci-dessous).

Tableau III-2 : Caractéristiques du tissu de verre (roving)

	MAT 300	MAT 450	MAT 600
Poids au m²	300 g/m ²	450 g/m ²	600 g/m ²
Consommation de résine	700g/m ²	1350g/m ²	1850g/m ²

Tableau III-3 : Caractéristiques du tissu de verre (roving)

Poids au m²	300 g/m ²
Matériau	Verre E
Matière des fils	Silane
Consommation résine de stratification	Tissu de verre 300 g = env. 300 g/m ² pour une épaisseur de couche d'environ 0,2 mm.

II.2. Résine polyester (ORTHO)

La résine polyester est utilisée dans l'élaboration des plaques composites qui forment la coque des thoniers réalisés par l'entreprise Techno Naval. C'est un matériau thermodurcissable largement utilisé dans la fabrication des composites. Le type de résine polyester est la résine orthophtalique (ORTHO). Elle obtient ses caractéristiques définitives suite à une réaction chimique appelée (polymérisation). Elle est utilisée pour les raisons suivantes :

- Sa polyvalence,
- Sa facilité de mise en œuvre,
- Sa bonne résistance à la contrainte mécanique,
- Sa bonne résistance à la chaleur,
- Peu coûteuse par rapport à d'autres types de résines.



Figure III-23 : Résine polyester ORTHO.

II.3. Catalyseur

Pour mettre en œuvre la résine polyester, il faut la mélanger avec un catalyseur pour initier la polymérisation. Le mélange doit être appliqué dans un intervalle de temps allant de 20 à 30 minutes. La résine polyester se travaille dans un environnement tempéré à hygrométrie faible. La température de travail doit être constante et comprise, entre 15 et 25°C.

La quantité de catalyseur ajoutée au mélange de résine dépend du poids du composite préparé, elle varie entre 1% et 3% du poids total.

Tableau III-4 : Quantité de catalyseur à mélanger à la résine polyester pour un mélange à 2%

Quantité de résine polyester	1kg	25kg
Quantité de catalyseur	20g	500g

Remarque : Pour obtenir un mélange homogène et efficace :

- Il faut respecter les proportions de mélange recommandées.
- Utiliser un mélangeur jusqu'à ce que le catalyseur soit uniformément réparti dans la résine.

II.4. Gelcoat

Les gelcoats sont appliqués sur la couche extérieure du composite, dont les avantages sont :

- Résistance aux rayures,
- Bonne tenue aux ultraviolets
- Bonne tenue à la reprise d'humidité (hydrolyse) qui peut entraîner l'osmose du composite.

La figure III.23 Suivantes présente le gelcoat utilisé dans ce travail.

II.5. Agent de démoulage

Il faut utiliser un agent démoulant pour faciliter le démoulage et éviter que la plaque composite ne colle au moule. La cire de démoulage *Coller Wiz x 400 g* est utilisée dans notre travail de préparation des plaques composites.



Figure III-17 : Gelcoat utilisé dans la fabrication des plaques composites.

III. Plaques composite réalisées

Pour élaborer les essais expérimentaux nous avons réalisé 3 plaques composites :

a) Plaque composite 1 :

La plaque composite 1 servant pour tailler des éprouvettes pour le premier essai de traction est de longueur 63 cm, de largeur 43cm et d'épaisseur 6.29mm.

La stratification utilisée est de cinq couches (voir figure III.24), constituée de :

- 1ere couche : Mat 300
- 2eme couche : Mat 450
- 3eme couche : Mat 600
- 4eme couche Mat 600
- 5eme couche Mat 600

Une couche de gelcoat est utilisée pour la finition



Figure III-18 : plaque composite1.

b) Plaque composite 2:

La plaque composite 2 servant pour tailler des éprouvettes pour le premier essai de traction est de longueur 43 cm, de largeur 33cm et d'épaisseur 9.97mm.

La plaque est constituée d'une combinaison de Mat et de roving. La stratification utilisée est de sept couches (voir figure III.9), constituée de :

- 1ere couche : Mat 300
- 2eme couche : Mat 450
- 3eme couche : Mat 600
- 4eme couche : roving600/450
- 5eme couche : Mat 600
- 6eme couche : roving600/450
- 7eme couche : Mat 600

Le roving est intercalé entre deux couches de mat pour garantir une bonne solidité et une bonne adhérence, sinon il y a risque de délaminage.

Une couche de gelcoat est utilisée pour la finition



Figure III-19 : plaque composite 2

c) Plaque composite 3 :

La plaque composite 3 servant pour tailler des éprouvettes pour le premier essai de traction est de longueur 73 cm, de largeur 43cm et d'épaisseur 10.36mm.

La plaque est constituée d'une combinaison de plis de type Mat. La stratification utilisée est de huit couches (voir figure III.25), constituée de :

- 1ere couche : Mat 300
- 2eme couche : Mat 450
- 3eme couche : Mat 600
- 4eme couche : Mat600
- 5eme couche : Mat 600
- 6eme couche : Mat450
- 7eme couche : Mat 600
- 8eme couche : Mat 600



Figure III-20 : plaque composite 3

Chapitre IV

Etude expérimentale

Chapitre IV : Etude expérimentale

Après avoir aux chapitres précédents décrits la procédure de réalisation des plaques composites, nous allons dans cette partie élaborés les éprouvettes nécessaires aux tests de traction, ensuite étudier expérimentalement les éprouvettes réalisées.

I. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont taillées à partir des plaques déjà réalisées. La forme de l'éprouvette de traction est donnée par la figure IV.1 suivante

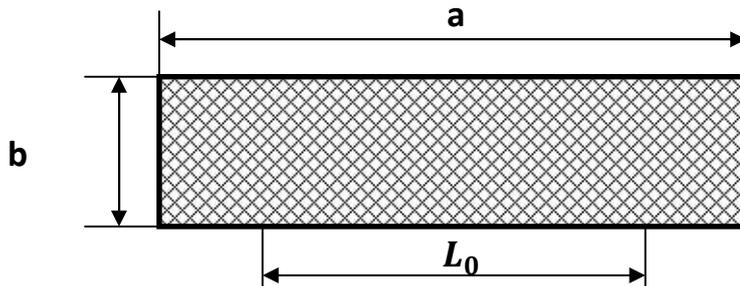


Figure IV-21 : Dimensions des éprouvettes.

Pour chaque plaque on a réalisé 10 éprouvettes. Les dimensions de chaque éprouvette sont données par le tableau suivant

Tableau IV-5 : dimensions des éprouvettes

	Epaisseur	Longueur a	Largeur b	L ₀
Plaque 1	6.29mm	250 mm	30mm	120mm
Plaque 2	9.97mm	250 mm	30mm	120mm
Plaque 3	10.36mm	250 mm	30mm	120mm

L₀ : est la longueur entre talons des mors de la machine de traction.

II. Description de la machine de traction

La machine d'essai hydraulique modèle Microlab dispose d'un entraînement hydraulique central 600kN, Figure IV-22 .

III. Caractérisation mécanique

Les essais ont été menés sur des éprouvettes élaborées à partir de Mat 300/450/600 et du roving600/450.

a) Essai de traction de la plaque composite 1

Les éprouvettes sont réalisées a partir d'un composite d'épaisseur 6.29mm, constitués de cinq couches :

- 1ere couche : Mat 300

- 2eme couche : Mat 450
- 3eme couche : Mat 600
- 4eme couche : Mat 600
- 5eme couche : Mat 600



Figure IV-23 : Machine traction 600kg/N

Les caractéristiques mécaniques de différentes éprouvettes ont été déduites des courbes charges/déplacements de la figure IV.28 et sont réunies au tableau IV.5 suivant

Les caractéristiques mécaniques moyennes ont été calculés en faisant la moyenne des valeurs fournies par les dix essais des éprouvettes, voir Tableau IV.5.

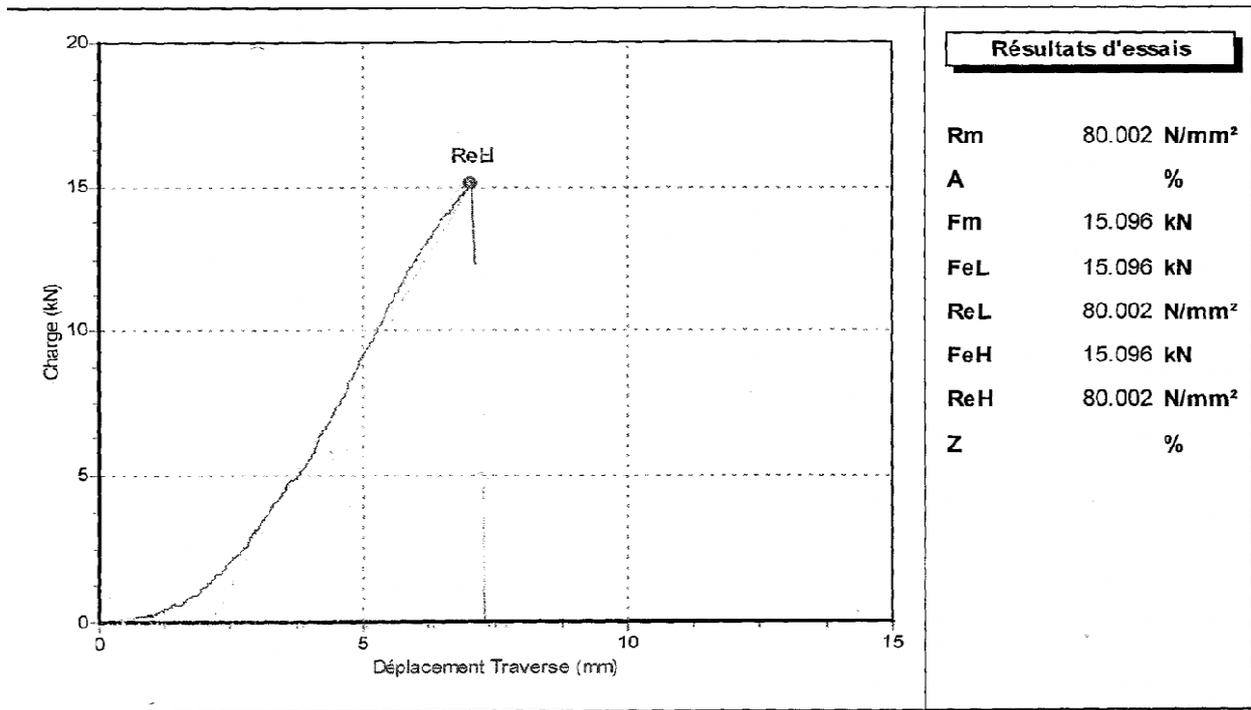
On constate après ces essais que le composite présente un domaine linéaire suivi d'une rupture brutale et ne présentant aucun domaine plastique ou élastoplastique. La résistance mécanique R^*_m est égale à 77.329MPa et la limite élastique R^*_e est égale à 77.329 MPa, le module d'élasticité E^*_1 est égale à 2.849 GPa et l'allongement pourcent $A^*\%$ est égale à 2.8%.

Tableau IV-6 : Caractéristique mécanique moyenne du matériau composite plaque1

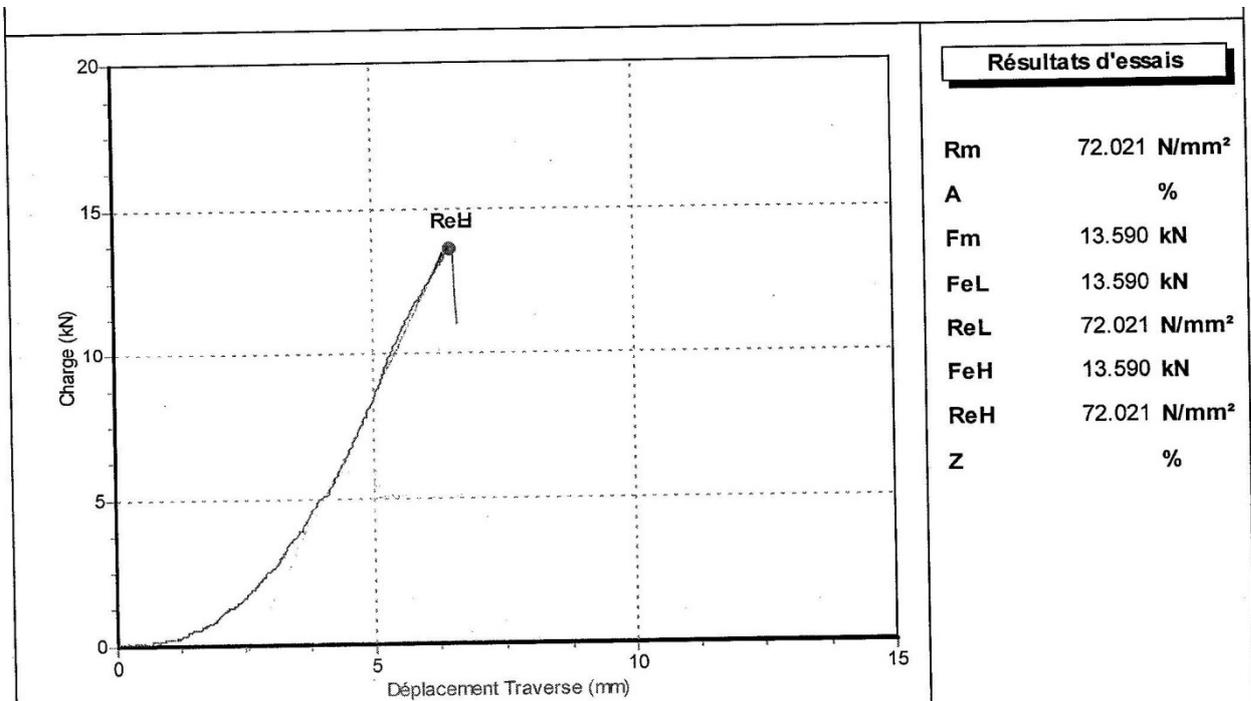
R^*_m (MPa)	77.329
R^*_e (MPa)	77.329
E^*_1 (GPa)	2.849
$A^*\%$	2.8

Tableau IV-7 : Caractéristiques mécaniques du matériau composite plaque1

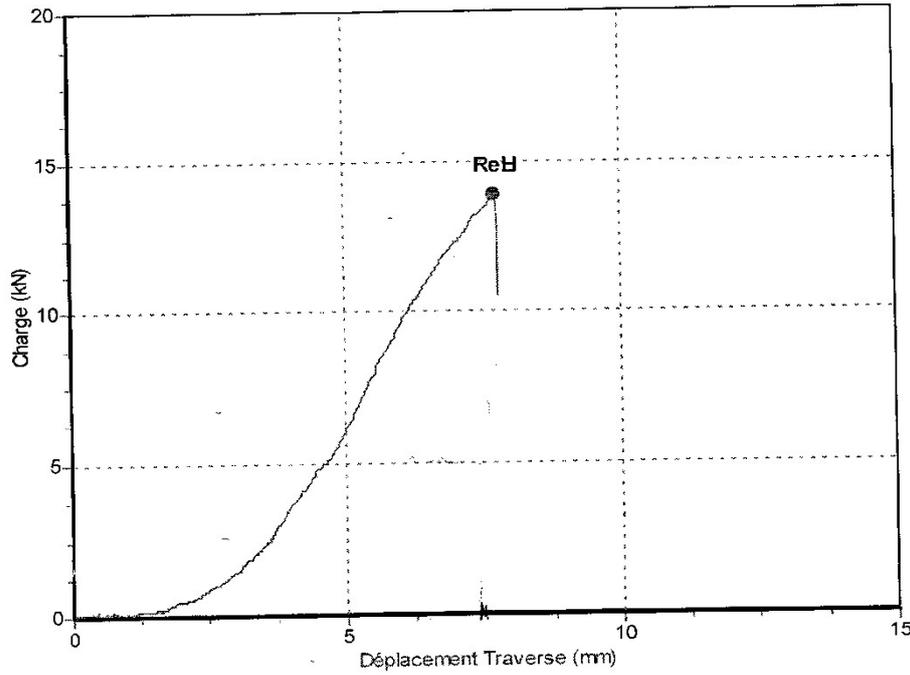
	Echantillons									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_m (MPa)	80.002	72.021	73.579	73.579	81.559	66.766	66.766	86.815	78.834	86.036
F_m (kN)	15.096	13.590	13.884	13.884	15.390	12.599	12.599	16.382	16.876	16.235
R_e (MPa)	80.002	72.021	73.579	73.579	81.559	66.766	66.766	86.815	78.834	86.036
F_e (kN)	15.096	13.590	13.884	13.884	15.390	12.599	12.599	16.382	16.876	16.235
E1 (GPa)	1.923	3.462	2.83	2.852	2.614	2.14	3.21	3.123	3.032	3.309
Déplacement Effective (mm)	5	2.5	3.125	3.1	3.75	2	2.5	2.52	3.125	3.125
A%	0.0416	0.0208	0.0260	0.0258	0.0312	0.0312	0.0208	0.0278	0.0260	0.0260



Echantillon 1



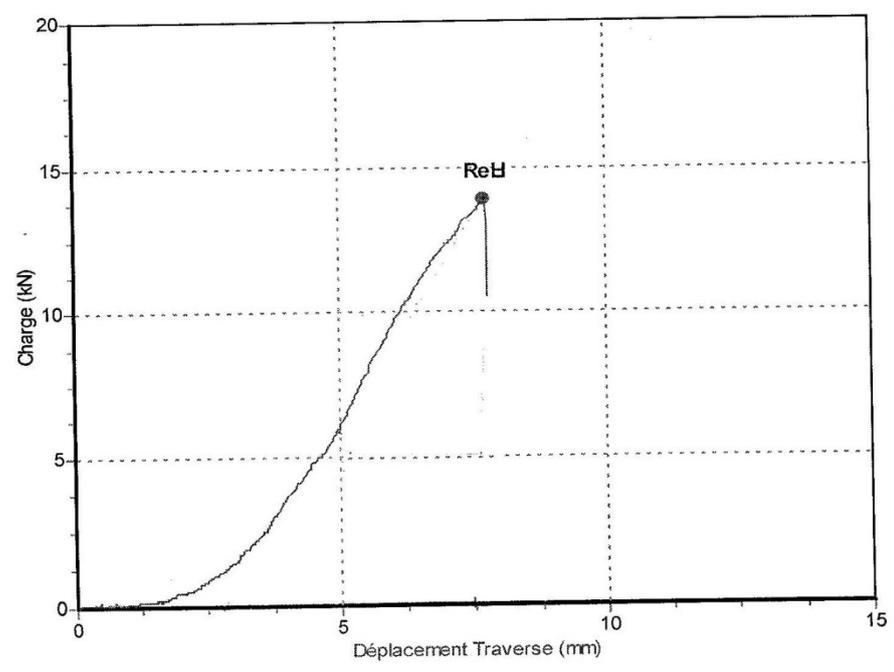
Echantillon 2



Résultats d'essais

Rm	73.579 N/mm ²
A	%
Fm	13.884 kN
FeL	13.884 kN
ReL	73.579 N/mm ²
FeH	13.884 kN
ReH	73.579 N/mm ²
Z	%

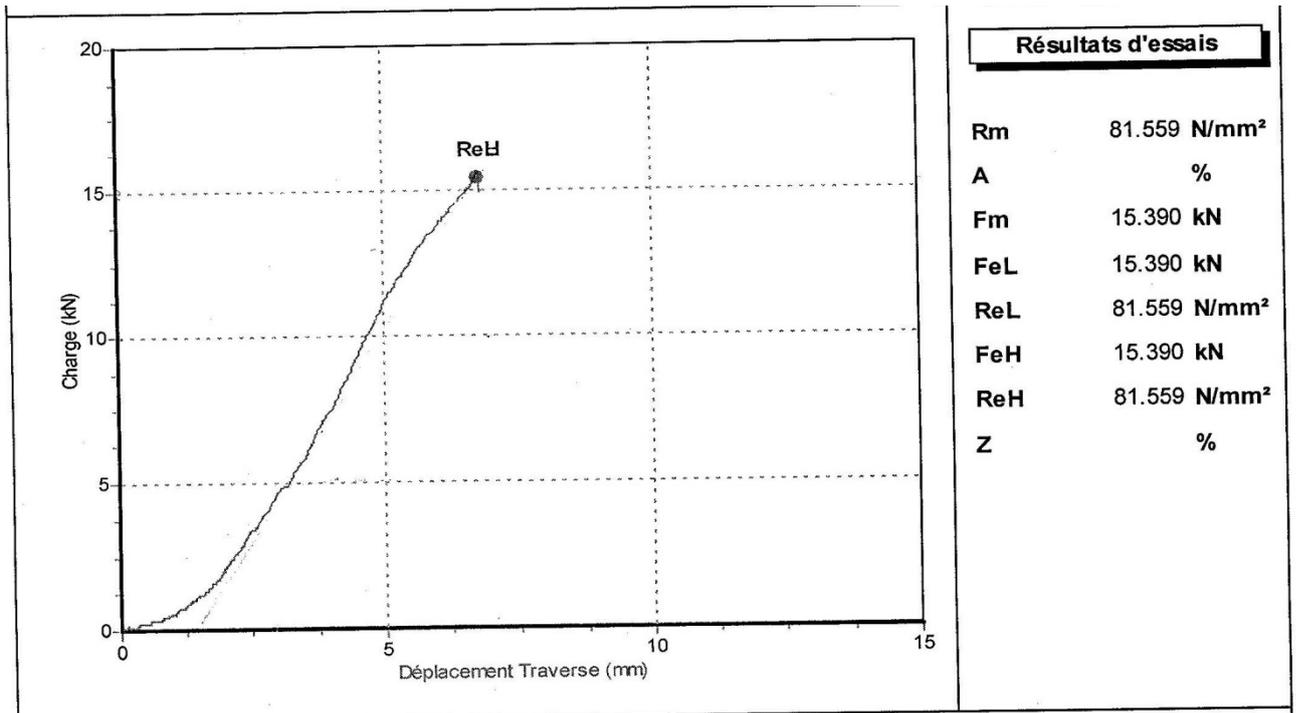
Echantillon 3



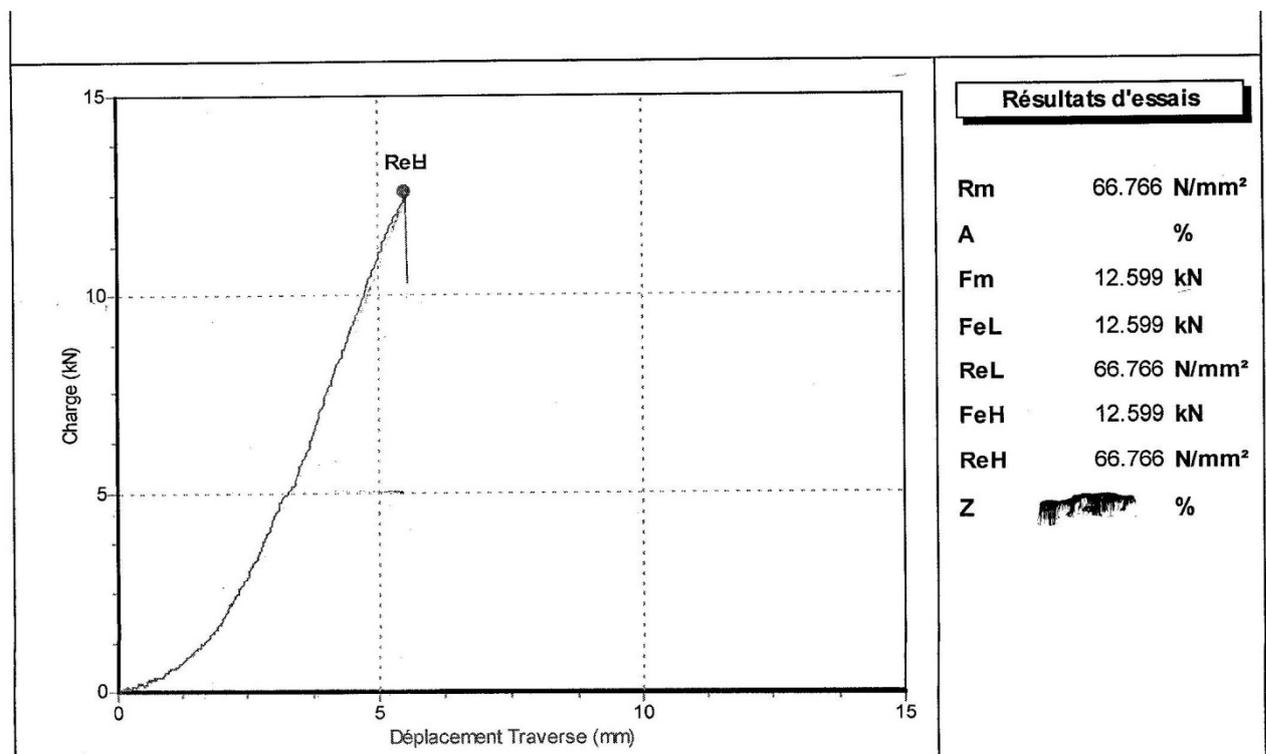
Résultats d'essais

Rm	73.579 N/mm ²
A	%
Fm	13.884 kN
FeL	13.884 kN
ReL	73.579 N/mm ²
FeH	13.884 kN
ReH	73.579 N/mm ²
Z	%

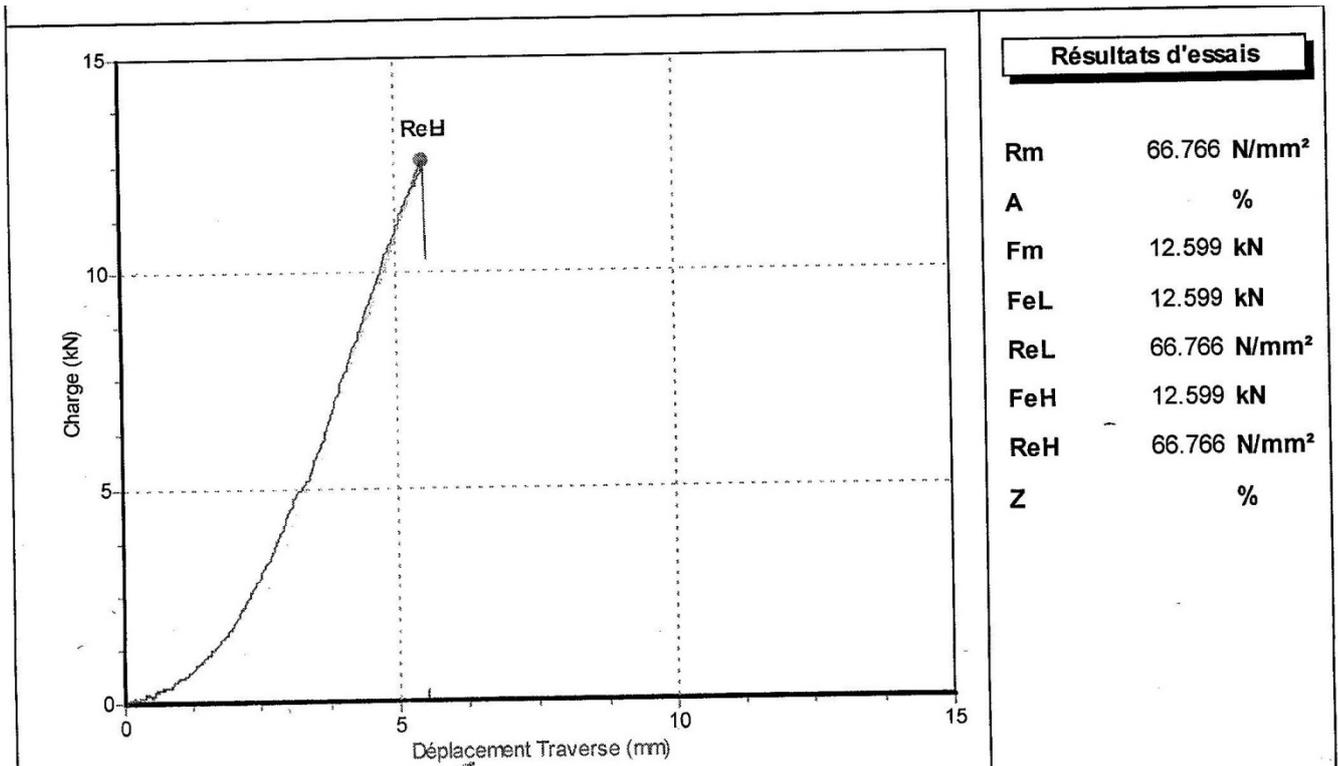
Echantillon 4



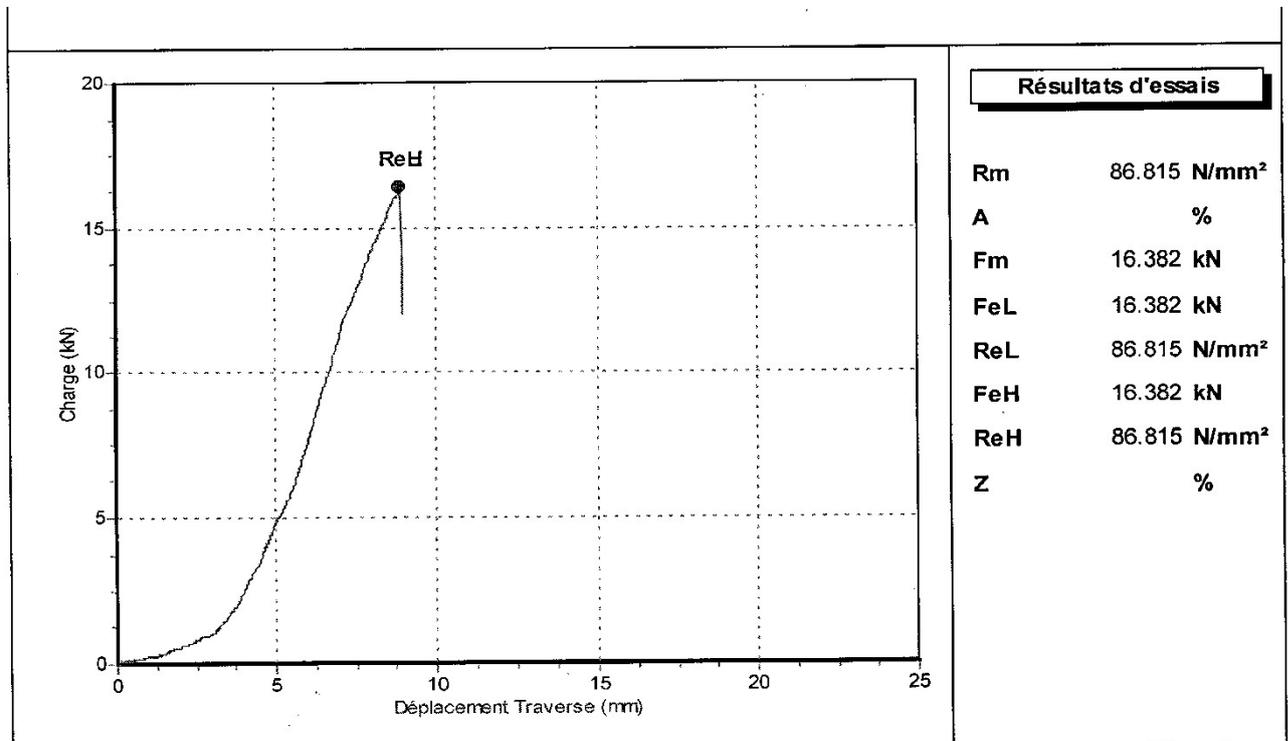
Echantillon 5



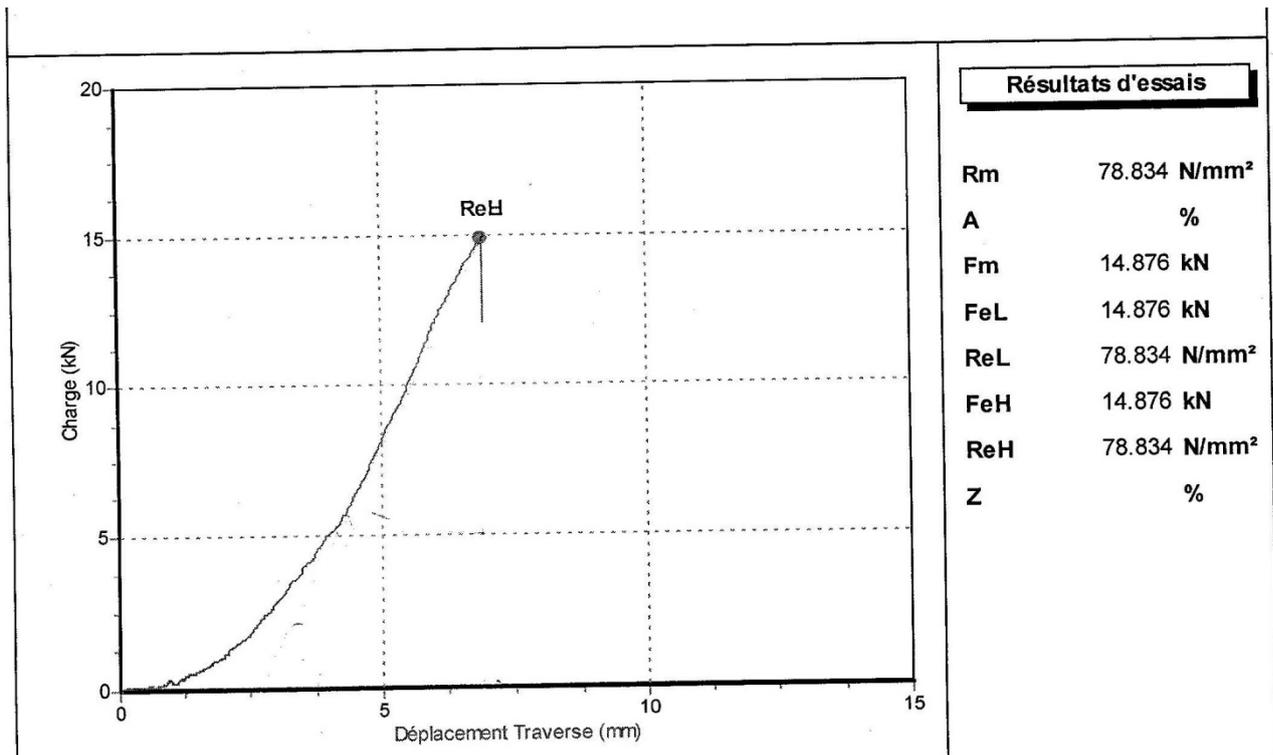
Echantillon 6



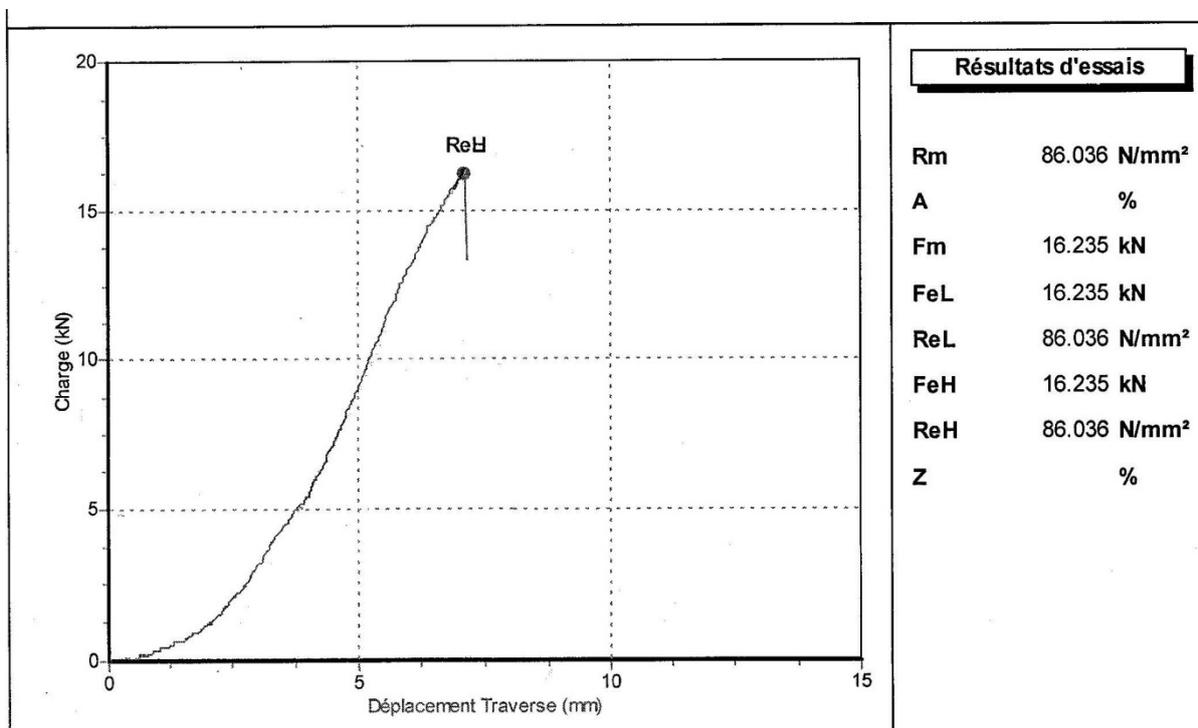
Echantillon 7



Echantillon 8



Echantillon 9



Echantillon 10

Figure IV-24 : Courbes charge/déplacement de la plaque composite 1

b) Essai de traction de la plaque composite 2

Les éprouvettes sont réalisées à partir d'un composite d'épaisseur 9.97mm, constitués de sept couches :

- 1ere couche : Mat 300
- 2eme couche : Mat 450
- 3eme couche : Mat 600
- 4eme couche : roving600/450
- 5eme couche : Mat 600
- 6eme couche : roving600/450
- 7eme couche : Mat 600

Les caractéristiques mécaniques de différentes éprouvettes ont été déduites des courbes charges/déplacements de la figure IV.2 et sont réunies au tableau IV.1 suivant

Les caractéristiques mécaniques moyennes ont été calculés en faisant la moyenne des valeurs fournies par les dix essais des éprouvettes, voir Tableau IV.2.

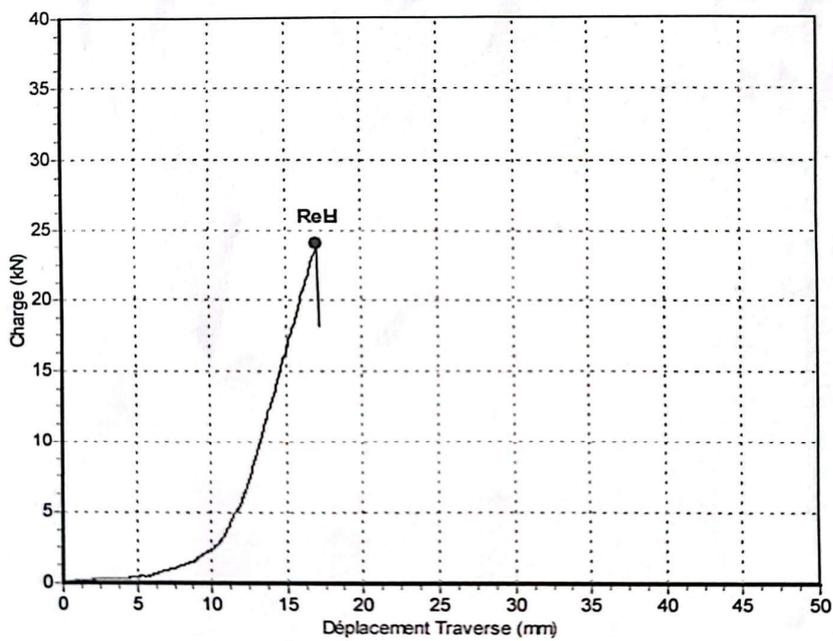
On constate après ces essais que le composite présente un domaine linéaire suivi d'une rupture brutale et ne présentant aucun domaine plastique ou élastoplastique. La résistance mécanique R^*_m est égale à 70.935MPa et la limite élastique R^*_e est égale à 70.329 MPa, le module d'élasticité E^*_1 est égale à 1.523GPa et l'allongement pourcent $A^*\%$ est égale à 4.83%.

Tableau IV-8 : Caractéristique mécanique moyenne du matériau composite plaque1

R^*_m (MPa)	70.935	65.909
R^*_e(MPa)	70.329	65.909
E^*_1(GPa)	1.523	1.414
$A^*\%$	4.83	

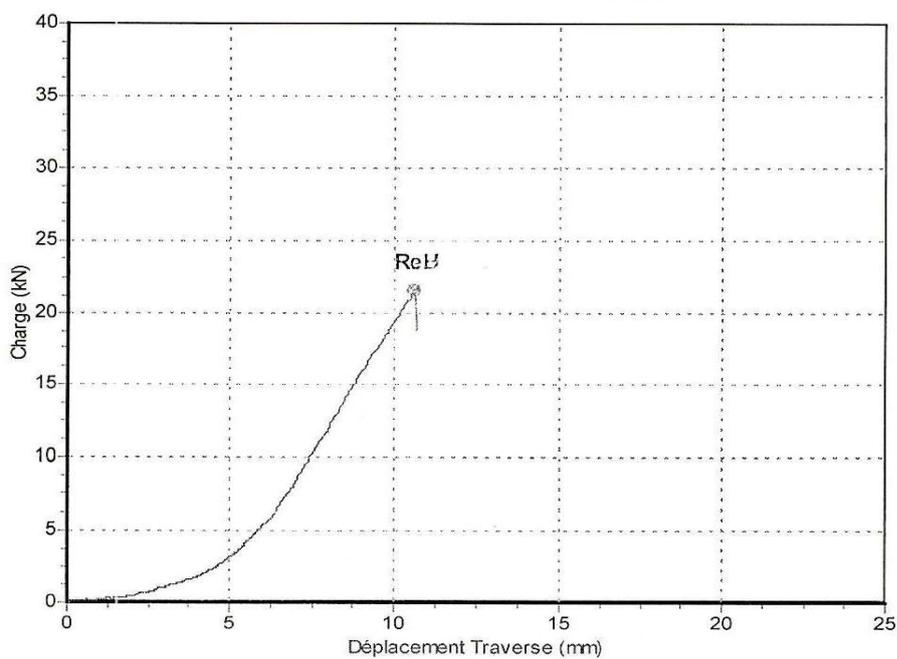
Tableau IV-9 : Caractéristique mécanique du matériau composite plaque1

	1	2	3	4	5	6	7	8*	9	10*
R_m (MPa)	80.437	72.087	64.595	52.806	74.665	77.244	70.122	46.789	75.525	44.824
F_m (kN)	24.059	21.561	19.320	15.794	22.332	23.104	20.973	13.994	22.590	13.407
R_e (MPa)	80.437	72.087	64.595	52.806	74.665	77.244	70.122	46.789	75.525	44.824
E1 (GPa)	1.207	1.236	1.557	1.467	2.263	1.857	1.299	0.877	1.295	1.077
A%	0.0666	0.0583	0.0415	0.036	0.033	0.0416	0.0541	0.0533	0.0583	0.0416
Déplacement Effective (mm)	5.12	5	4.98	4.32	4.01	5	6.5	6.4	6.9	5



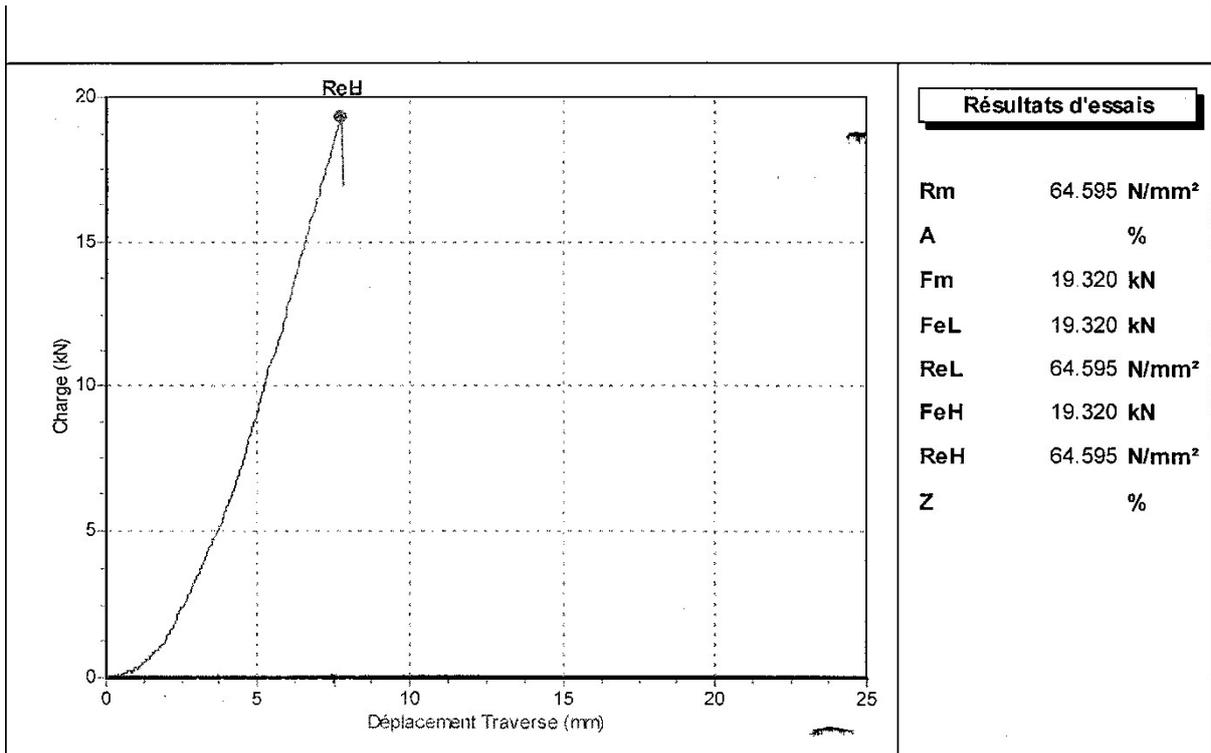
Résultats d'essais	
Rm	80.437 N/mm ²
A	%
Fm	24.059 kN
FeL	24.059 kN
ReL	80.437 N/mm ²
FeH	24.059 kN
ReH	80.437 N/mm ²
Z	%

Echantillon 1

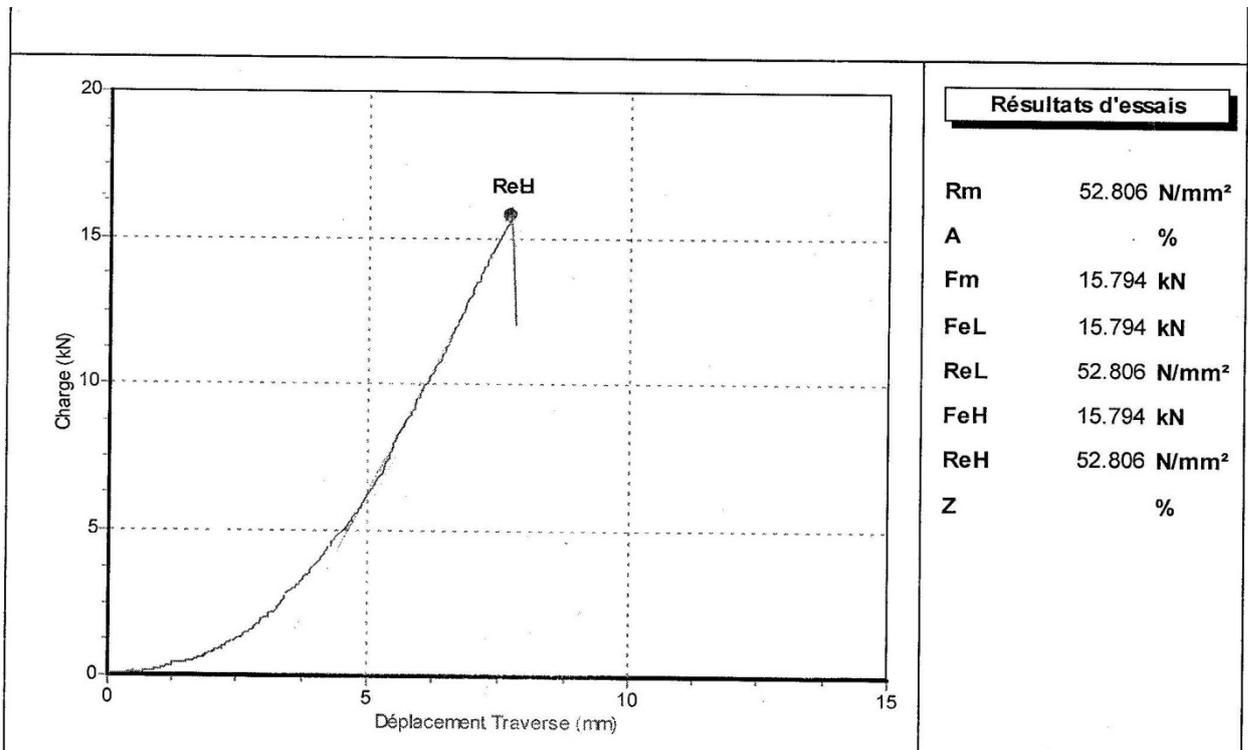


Résultats d'essais	
Rm	72.087 N/mm ²
A	%
Fm	21.561 kN
FeL	21.561 kN
ReL	72.086 N/mm ²
FeH	21.561 kN
ReH	72.086 N/mm ²
Z	%

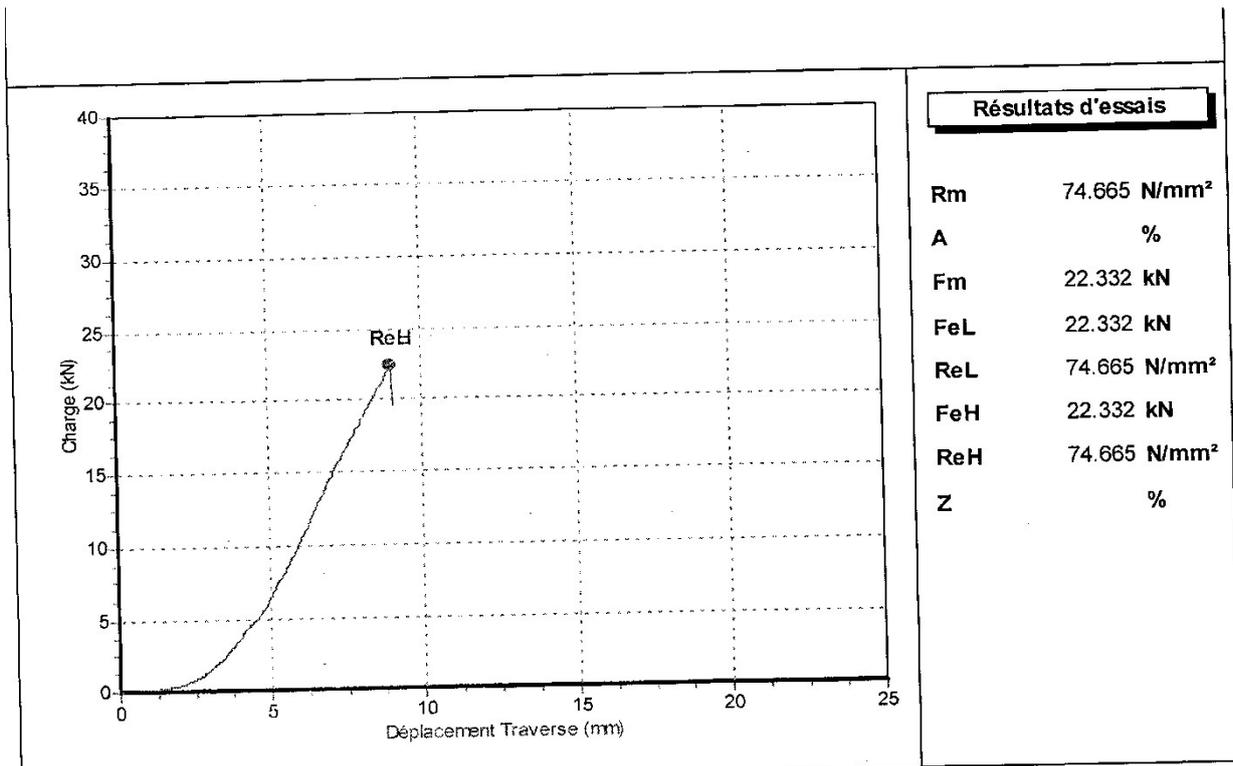
Echantillon 2



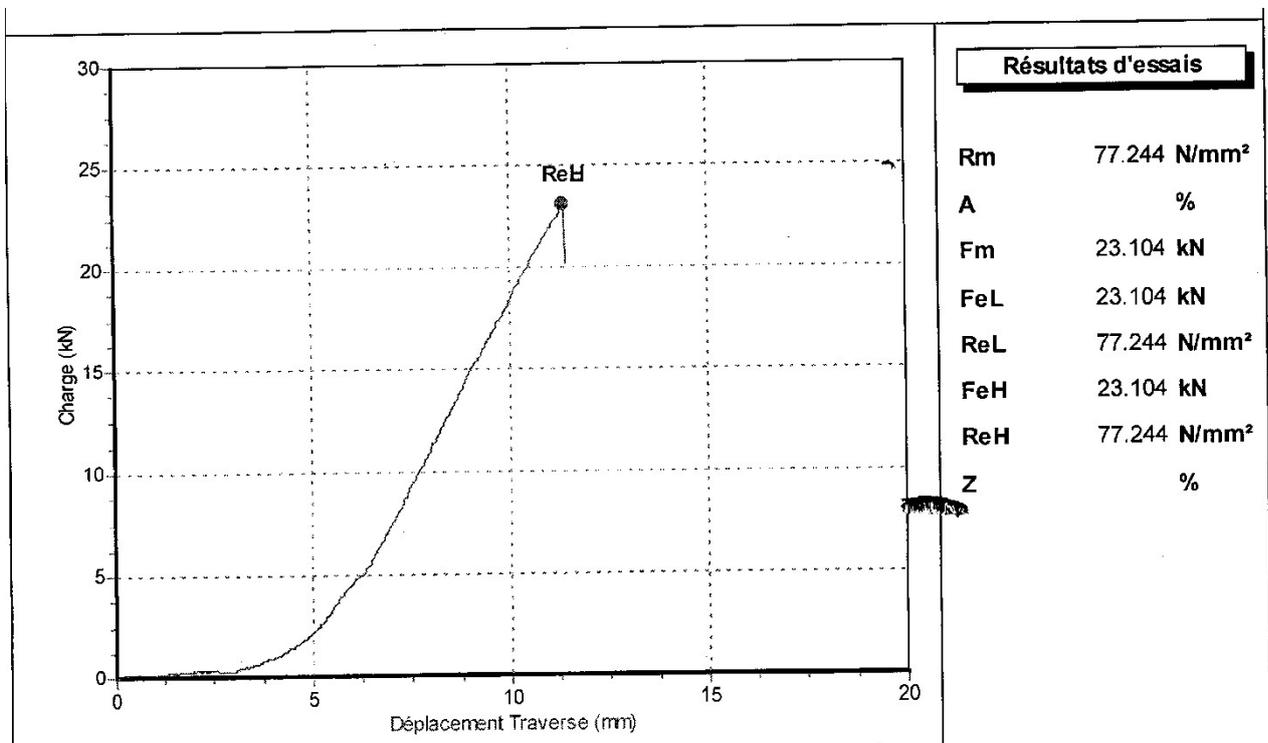
Echantillon 3



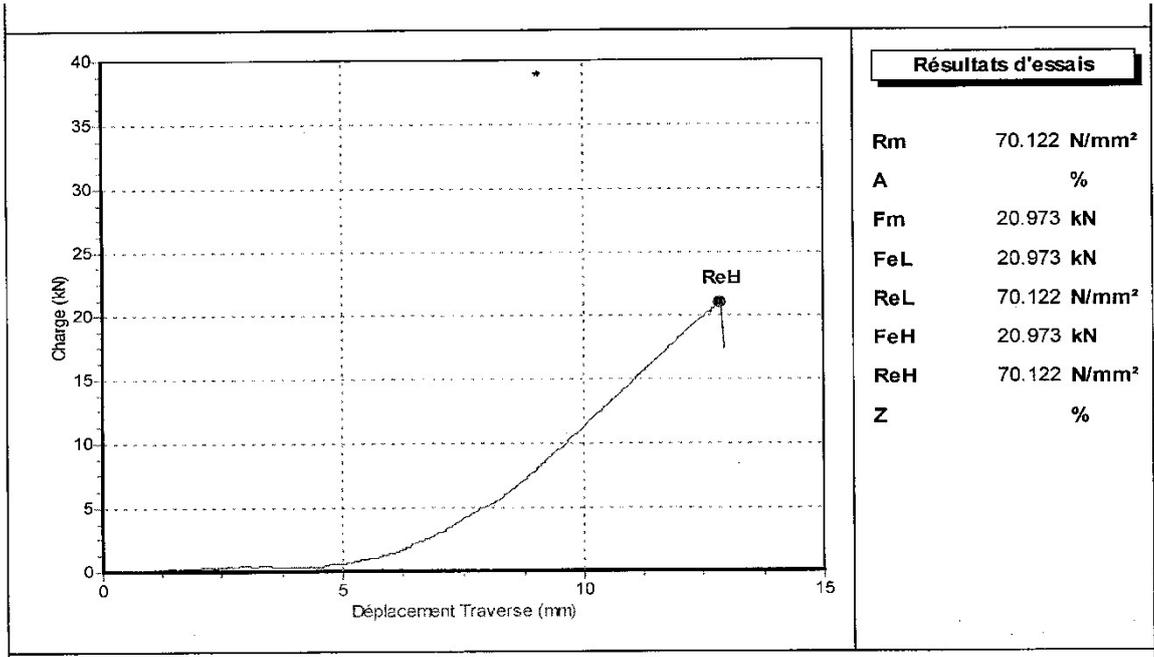
Echantillon 4



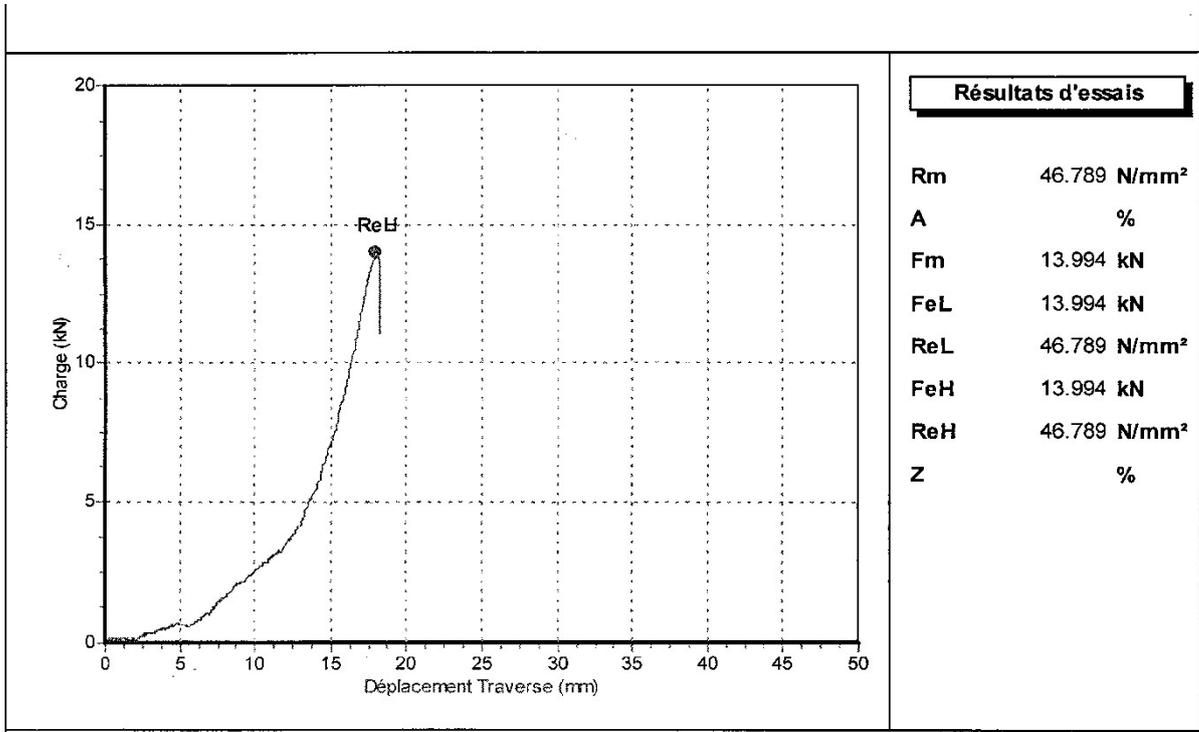
Echantillon 5



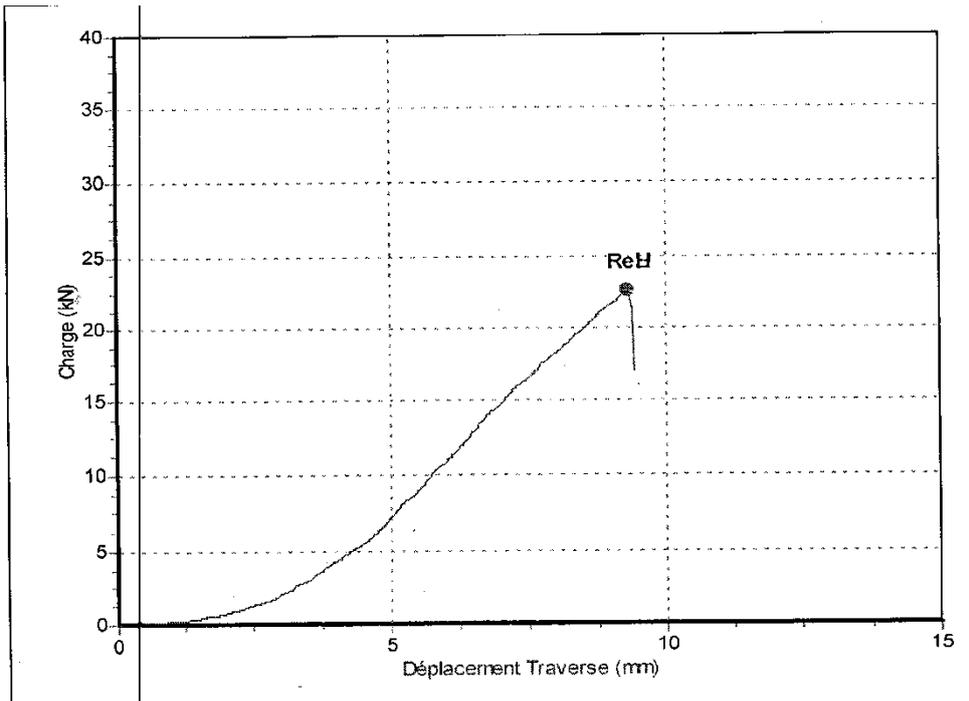
Echantillon 6



Echantillon 7

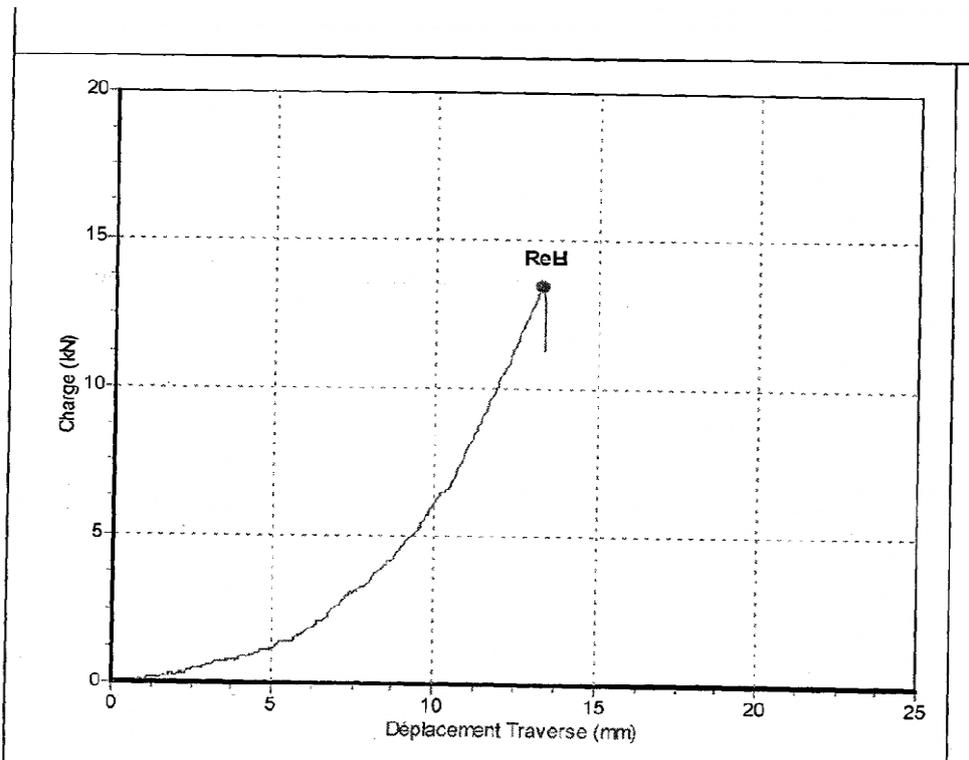


Echantillon 8



Résultats d'essais	
Rm	75.525 N/mm ²
A	%
Fm	22.590 kN
FeL	22.590 kN
ReL	75.525 N/mm ²
FeH	22.590 kN
ReH	75.525 N/mm ²
Z	%

Echantillon 9



Résultats d'essais	
Rm	44.824 N/mm ²
A	%
Fm	13.407 kN
FeL	13.407 kN
ReL	44.824 N/mm ²
FeH	13.407 kN
ReH	44.824 N/mm ²
Z	%

Echantillon 10

Figure IV-25 : Courbes charge/déplacement de la plaque composite 2.

a) Essai de traction de la plaque composite 3

Les éprouvettes sont réalisées à partir d'un composite d'épaisseur 10.36mm, constitués de huit couches :

- 1ere couche : Mat 300
- 2eme couche : Mat 450
- 3eme couche : Mat 600
- 4eme couche : Mat600
- 5eme couche : Mat 600
- 6eme couche : Mat450
- 7eme couche : Mat 600
- 8eme couche : Mat 600

Les caractéristiques mécaniques de différentes éprouvettes ont été déduites des courbes charges/déplacements de la figure IV.2 et sont réunies au tableau IV.1 suivant

Les caractéristiques mécaniques moyennes ont été calculés en faisant la moyenne des valeurs fournies par les dix essais des éprouvettes, voir Tableau IV.10.

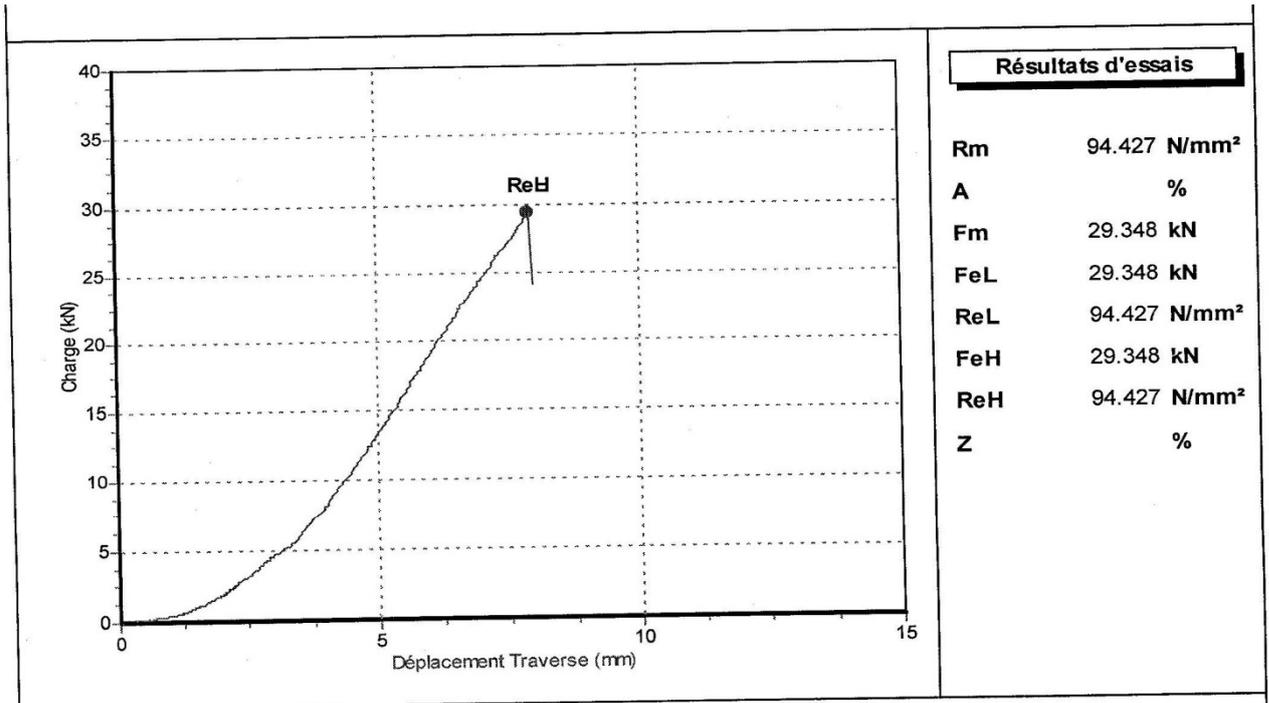
On constate après ces essais que le composite présente un domaine linéaire suivi d'une rupture brutale et ne présentant aucun domaine plastique ou élastoplastique. La résistance mécanique R^*_m est égale à 95.235MPa et la limite élastique R^*_e est égale à 95.235 MPa, le module d'élasticité E^*_1 est égale à 2.79 GPa et l'allongement pourcent $A^*\%$ est égale à 3.53%.

Tableau IV-10 : Caractéristique mécanique moyenne du matériau composite plaque3

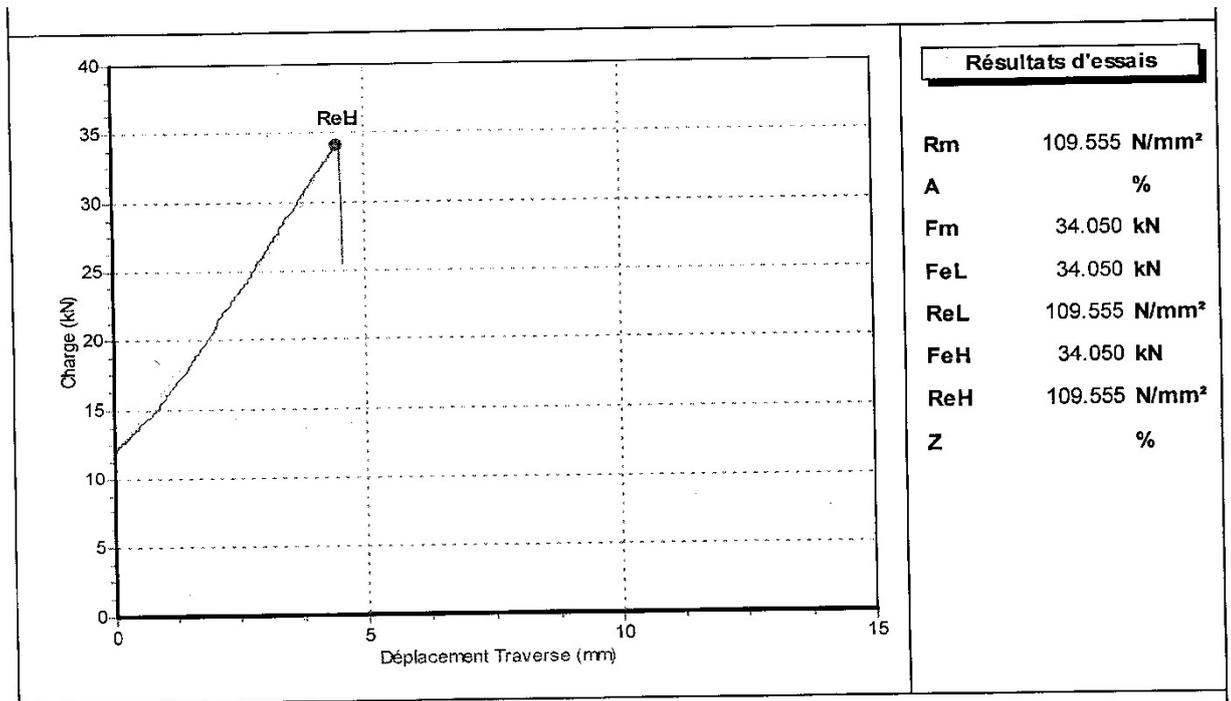
R^*_m (MPa)	95.235
R^*_e (MPa)	95.235
E^*_1 (GPa)	2.79
$A^*\%$	3.53

Tableau IV-11 : Caractéristique mécanique moyenne du matériau composite plaque3

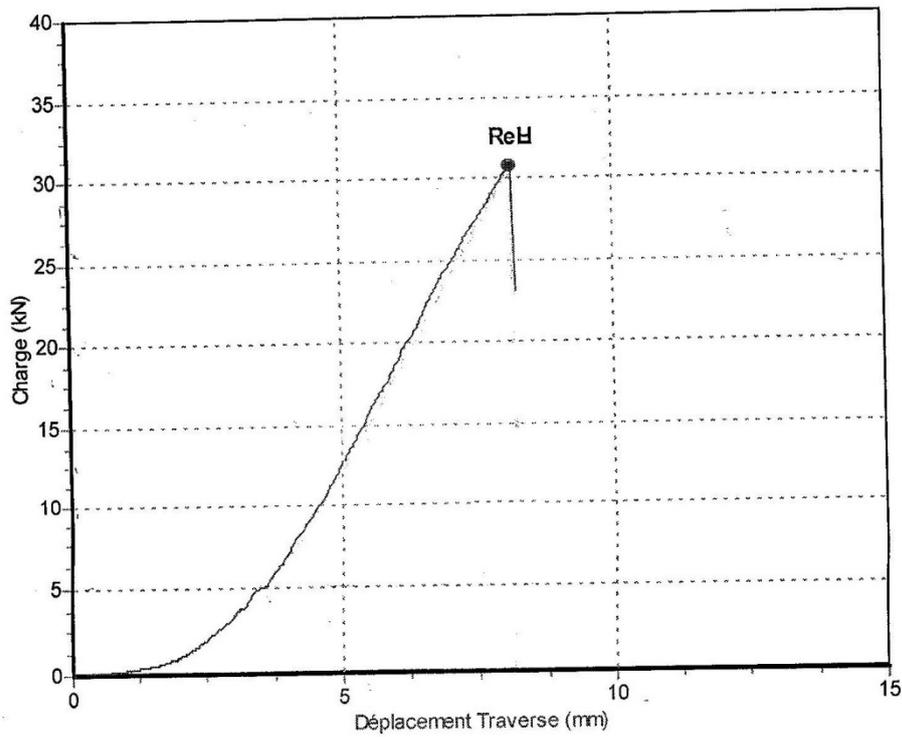
	1	2	3	4	5	6	7	8
R_m (MPa)	94.427	109.55	88.164	83.555	98.800	98.564	101.991	87.218
F_m (kN)	29.348	34.05	27.401	25.969	30.707	30.634	31.699	27.107
R_e (MPa)	94.427	109.55	88.164	83.555	98.800	98.564	101.991	87.218
E1 (MPa)	3.027	3.018	3.417	2.182	2.533	2.527	2.334	3.279
A%	0.0312	0.0363	0.0258	0.0383	0.039	0.039	0.0437	0.0266
Déplacement Effective (mm)	3.75	4.36	3.1	4.6	4.68	4.68	5.25	3.2



Echantillon 1

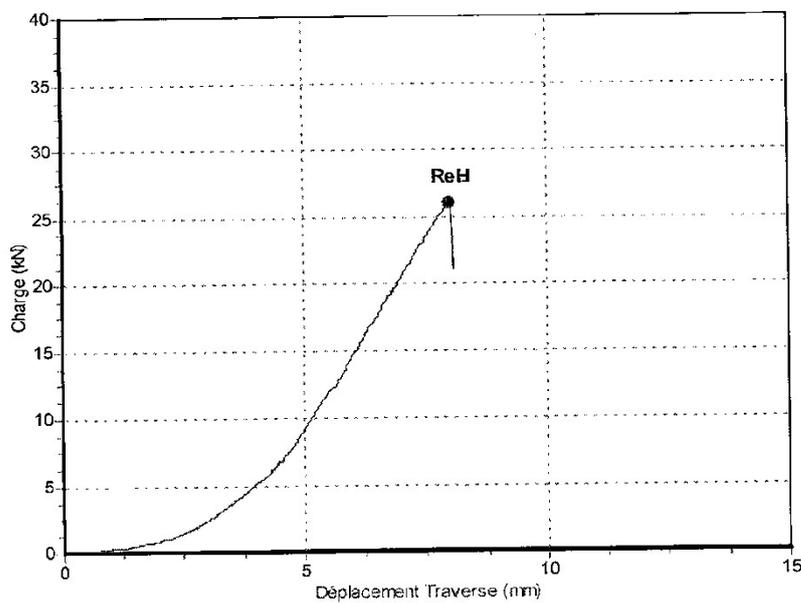


Echantillon 2



Résultats d'essais

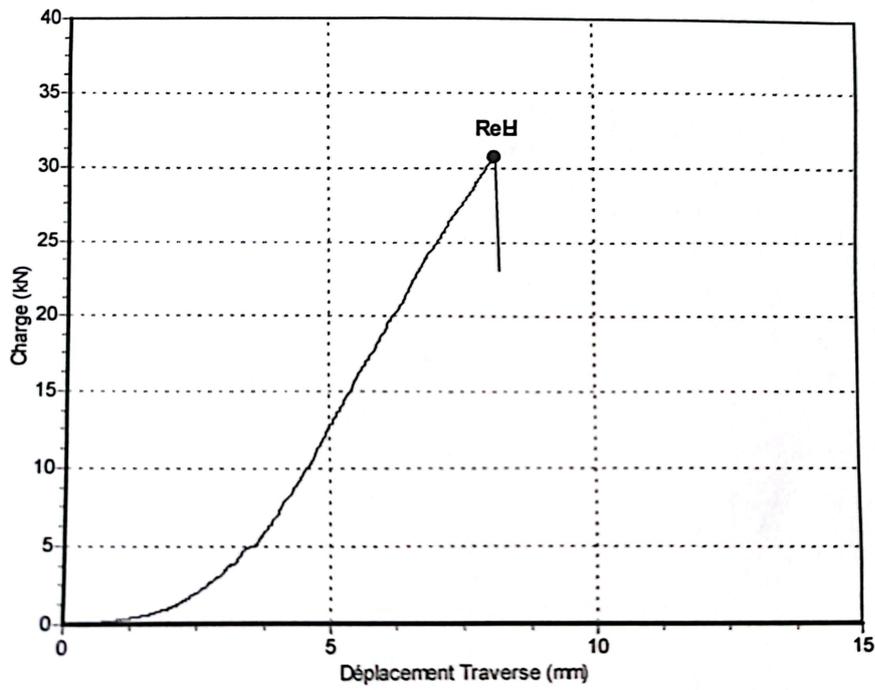
Rm	98.800 N/mm ²
A	%
Fm	30.707 kN
FeL	30.707 kN
ReL	98.800 N/mm ²
FeH	30.707 kN
ReH	98.800 N/mm ²
Z	%



Résultats d'essais

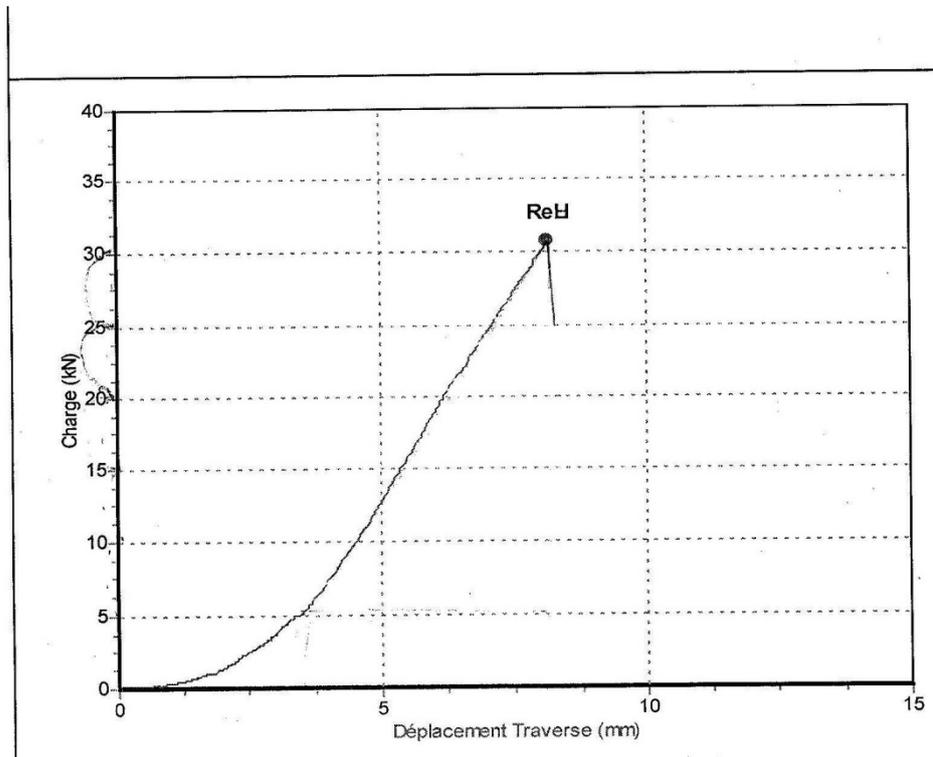
Rm	83.555 N/mm ²
A	%
Fm	25.969 kN
FeL	25.969 kN
ReL	83.555 N/mm ²
FeH	25.969 kN
ReH	83.555 N/mm ²
Z	%

Echantillon 4



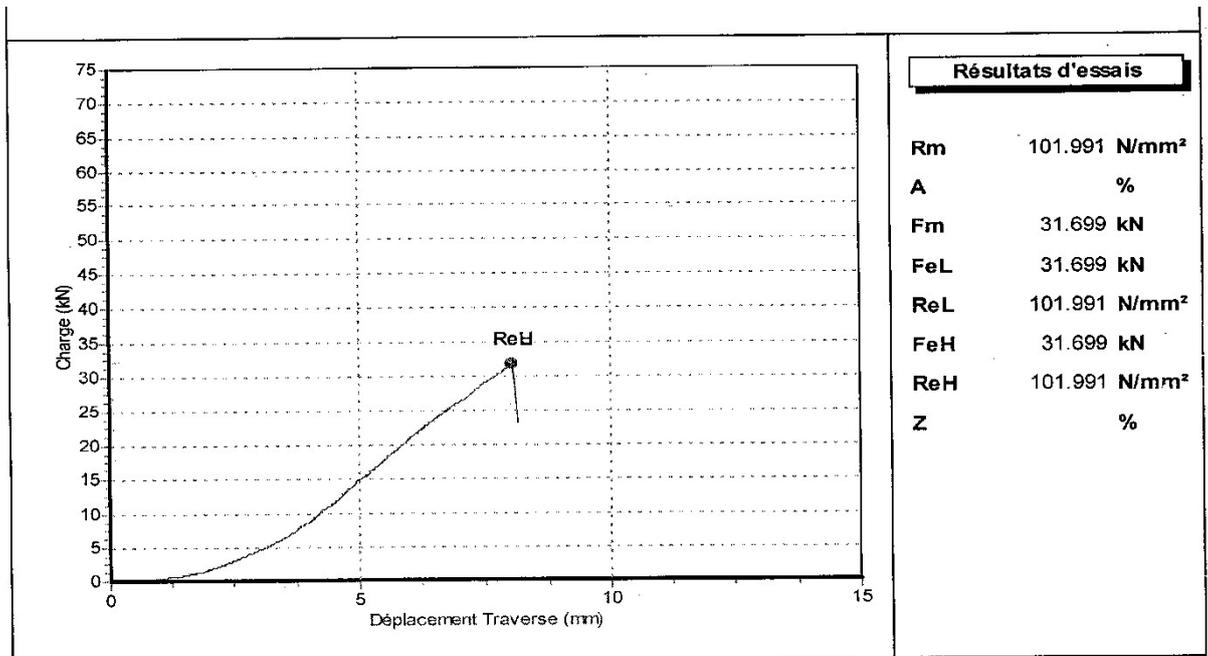
Résultats d'essais	
Rm	98.800 N/mm ²
A	%
Fm	30.707 kN
FeL	30.707 kN
ReL	98.800 N/mm ²
FeH	30.707 kN
ReH	98.800 N/mm ²
Z	%

Echantillon 5

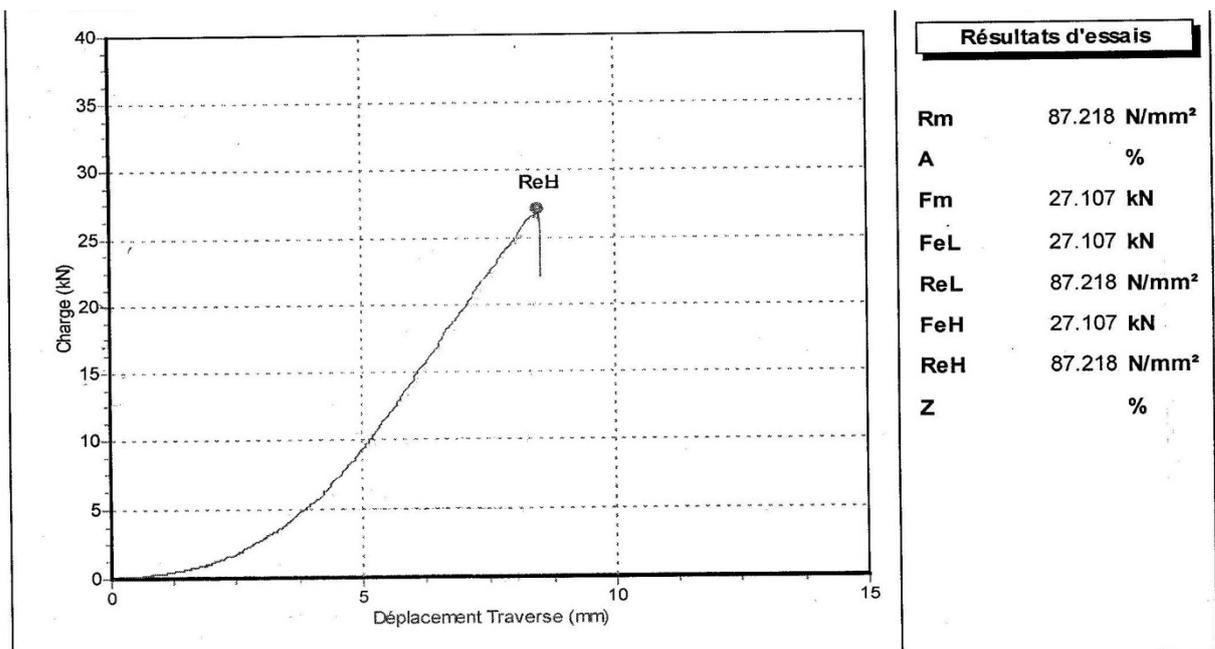


Résultats d'essais	
Rm	98.564 N/mm ²
A	%
Fm	30.634 kN
FeL	30.634 kN
ReL	98.564 N/mm ²
FeH	30.634 kN
ReH	98.564 N/mm ²
Z	%

Echantillon 6



Echantillon 7



Echantillon 8

Figure IV-26 : Courbes charge/déplacement de la plaque composite 3

e) Comparaison entre les trois plaques

Dans la suite de cette étude une comparaison est faite entre les trois composites

Tableau IV-12 : comparaison des propriétés mécaniques des trois composites

	R^*_m (MPa)	R^*_e (MPa)	E^*_1 (MPa)	$A^*\%$
Composite 1	77.329	77.329	2.849	2.8
Composite 2	70.935	70.935	1.523	4.83
Composite 3	95.235	95.235	2.79	3.53

On constate que le composite 3 présente les meilleures caractéristiques mécaniques comparés aux deux autres ($R^*_m = R^*_e = 95.235$), alors que le composite 2 présente les caractéristiques les plus faibles. Cette différence est due aux nombres de couches et la nature des renforts de chaque couche.

Conclusion

Conclusion :

Le sujet de ce mémoire a porté sur la détermination des caractéristiques mécaniques d'un composite utilisés dans la fabrication du thonier réalisé par l'entreprise "Techno naval" du chantier naval de Honaine. Trois composites ont été réalisés et testés le premier un stratifié à cinq couches de Mat, le deuxième un stratifié à sept couches constitué de Mat de verre et de roving et le troisième de huit couches de mat.

Les tests de traction ont été réalisés et ont permis de déterminer la résistance à la rupture, la limite élastique, le module d'élasticité et l'allongement pourcent. Les résultats ont permis de sélectionner la meilleure variante présentant les meilleures performances mécaniques et qui est le composite constitué de huit couches.

En perspective, une étude de traction bi-axiale permettra d'identifier les autres caractéristiques mécaniques du composite utilisés dans la fabrication du thonier.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] J.M. BERTHELOT « Comportement mécanique et analyse des structures Matériaux composites ». Lavoisier (5^e Éd.), 2010.
- [2] J. TABY, B. HOYNING « Utilisation de renforts multi axiaux dans l'industrie marine ». La construction navale en composites. *IFREMER, Actes de colloques n° 15. communication n° 8* Paris, 7-9 décembre, 1992.
- [3] Cours « matériaux composites », département de génie mécanique, université de Tlemcen, 2023.
- [4] J.-P. BAILON, J.-M. DORLOT, *Des Matériaux*, 3^eème édition, ISBN 2-553-00770-1, Presses Internationales Polytechnique, 2000.
- [5] M. K. Buragohain « Composite Structures Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing » CRC Press, 2017.
- [6] P.K. Mallick « **FIBER REINFORCED COMPOSITES** : Materials, Manufacturing, and Design, CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.