

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département du Génie de l'Environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement

**Valorisation de la biomasse locale dans  
l'élaboration de nouveaux matériaux composites**

Lydia BOULKROUNE et Ibtissem CHEKKAL

Sous la direction de M. Zouheir BELOUADEH Maître de conférences B

Présentée et soutenue publiquement le 03/07/2019

**Composition du Jury :**

Président	M .Abdelmalek CHERGUI,	Professeur	ENP
Promoteurs	Mme .Naima BELHANECHÉ,	Professeur	ENP
	M .Ahmed KECHIDA	Maître de recherches	CRTI
Examineur	M .Brahim Khalil BENAZZOUZ	Maître de conférences B	ENP



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département du Génie de l'Environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement

**Valorisation de la biomasse locale dans  
l'élaboration de nouveaux matériaux composites**

Lydia BOULKROUNE et Ibtissem CHEKKAL

Sous la direction de M. Zouheir BELOUADEH Maître de conférences B

Présentée et soutenue publiquement le 03/07/2019

**Composition du Jury :**

Président	M .Abdelmalek CHERGUI,	Professeur	ENP
Promoteurs	Mme .Naima BELHANECHÉ,	Professeur	ENP
	M .Ahmed KECHIDA	Maître de recherches	CRTI
Examineur	M .Brahim Khalil BENAZZOUZ	Maître de conférences B	ENP

## **Remerciements**

*On tient en premier lieu à remercier ici les personnes sans qui ce travail n'aurait pas été possible :*

*Tout d'abord, Mr. Zouheyr BELOUADAH de nous avoir encadré pour ce projet. Merci également à nos co-encadreurs Pr. N.BELHANECHÉ pour les divers cours et conseils qu'elle nous a dispensé tout au long de notre cursus à l'Ecole Nationale Polytechnique et Mr KECHIDA, On a bien apprécié leur rigueur scientifique ainsi que leurs conseils plus intéressants les uns que les autres; merci à eux pour leur encadrement quotidien, pour leur patience et pour nous avoir transmis le goût du détail.*

*Monsieur A CHERGUI, Professeur à l'E.N.P, pour l'honneur qu'il nous a fait en présidant le jury qui aura à juger le présent travail.*

*Madame S.AROUA et Mr B.K.BENAZZOZ maîtres de conférences à l'ENP, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner.*

*Un remerciement très spécial à Mr Akram, Mr Hichem, Mr Ismail et Mr Madjid les ingénieurs qui nous ont beaucoup aidé dans la réalisation de notre projet au sein du centre de recherche des technologies industrielles « CRTI » et leurs conseils mêlés à une si bonne humeur qu'ils en ont rendu le travail très agréable ainsi que Mr Reda l'ingénieur du laboratoire QHSE à l'ENP, sans oublier Mr Mahieddine , ingénieur du laboratoire LSTE , pour leurs aides.*

*Nos remerciements vont particulièrement à nos familles qui ont su nous soutenir, nous aider et surtout nous encourager.*

*On tient à remercier tous les enseignants du département Génie de l'environnement pour leurs aides et leurs conseils et tous les enseignants qui ont contribué, de loin ou de près, à notre formation. Merci également à tout le personnel du département de Génie de l'environnement.*

*Enfin, on tient à remercier tous les étudiants de la promotion 2016/2019 du département génie de l'environnement qui nous ont permis de nous surpasser pendant ces trois dernières années de formation et de tirer le meilleur de nous-mêmes.*

## ملخص :

استبدال الألياف الاصطناعية بالألياف الطبيعية في المواد المركبة يؤدي إلى توفير منتجات صديقة للبيئة مع التقليل من تكلفة الإنتاج، الوزن، التلوث، واستهلاك الطاقة. وفي هذا السياق، يمكننا تحديد موقع عملنا الذي يتمثل هدفه الرئيسي في تطوير مركبات هجينة تعتمد على راتنج اللدائن الصلبة بالحرارة (الايوكسي) ، والتي تم تعزيزها بمزيج من الألياف النباتية المحلية (ألياف الحلفا) و الألياف الاصطناعية (ألياف الزجاج). في هاته الدراسة، تم استبدال 20 % من الألياف الزجاجية بألياف الحلفا، في حين أن النسبة الكلية للمعززات كانت 25 % من حجم المركبات الهجينة.

لقد تمكنا من تحضير وتطوير مركبات هجينة بعدة أشكال هندسية: متناظرة، غير متناظرة، ومتناوبة وهذا لتسليط الضوء على التأثير المفيد لألياف الحلفا على المركبات من حيث الخصائص الفيزيائية، الحرارية والميكانيكية. النتائج المتحصل عليها تم مقارنتها مع تلك المذكورة في دراسات سابقة. لقد أثبتت ألياف الحلفا فعاليتها كمعززات بجانب الألياف الزجاجية، وأن المركبات الهجينة ذات الشكل المتناظر هي الأحسن في الخصائص من حيث الصلابة مقارنة بأشكال المركبات الأخرى.

**كلمات البحث:** مركبات هجينة ، ايبوكسي ، ألياف زجاجية ، ألياف الحلفا ، المركبات الجوية

### Abstract:

It is in this context that we can situate our work which its main objective is to develop hybrid composites based on Epoxy thermosetting resin, which a combination of vegetable and synthetic fibres.

Alfa fibre has never been studied in the literature as a hybrid reinforcement a long with fiberglass for applications in the field of aircraft.

Hybrid composites with several architectures have been developed; symmetrical, asymmetrical, alternating; to highlight the beneficial effect of Alfa fibre in terms of physical, mechanical and thermal properties. The results obtained are compared with those cited in the literature.

Alfa fibre has proved its effectiveness as a reinforcement next to fiberglass and the alternating architecture offers the best rigidity properties compared to other architectures.

**Keys words:** Hybrid Composites, Epoxy, Glass Fiber , Alfa Fiber ,Aircraft .

### Résumé :

Le remplacement des fibres synthétiques par des fibres naturelles dans les matériaux composites permet d'avoir un produit respectueux de l'environnement et de réduire les coûts, le poids, la pollution, et la consommation d'énergie. C'est dans ce contexte que se situe notre travail dont l'objectif principal consiste à élaborer des composites hybrides à base de résine thermodurcissable époxy, dont le renfort est une combinaison d'une fibre locale qui est la fibre d'Alfa et d'une fibre synthétique qui est la fibre de verre en vue d'une application dans le domaine de l'aéronef.

Dans cette étude, le remplacement des fibres de verre par les fibres d'Alfa est de l'ordre de 20% du taux de renfort qui est de 25% par rapport au composite.

Pour cela des composites hybrides ont été élaborés avec plusieurs architectures ; symétrique, asymétrique et alternée pour mettre en évidence l'effet bénéfique de la fibre d'Alfa en termes propriétés physiques, thermiques, et mécaniques.

La fibre d'Alfa a prouvé son efficacité en tant que renfort associé à la fibre de verre , les composites hybrides d'architecture symétrique offre les meilleures propriétés de rigidité par rapport aux autres architectures.

**Mots clés :** Composite Hybride, Epoxy, Fibre De Verre , Fibre d'Alfa , Aéronef .

## Table des matières

### Liste des tableaux

### Liste des figures

<b>Introduction générale</b> .....	10
------------------------------------	----

### **Chapitre I : Revue bibliographique**

I. 1	Généralités sur les matériaux composites .....	13
I.1. 1	Composites à fibres .....	13
I.1. 2	Composites à particules.....	14
I. 2	Éléments Constitutifs d'un matériau composite.....	14
I.2. 1	Les résines .....	14
A.	Les résines thermoplastiques .....	15
B.	Les résines thermodurcissables .....	16
I.2. 2	Le renfort.....	18
A.	Les fibres .....	18
a.	Les fibres de verre .....	18
b.	Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées.....	19
c.	Les fibres céramiques .....	19
d.	Les fibres de carbone.....	19
e.	Les fibres d'origine naturelle .....	19
I. 3	Extraction des fibres végétales .....	21
I. 4	Composites à base de fibres végétales.....	22
I. 5	La fibre d'Alfa .....	24
I. 6	Plis composites .....	25
I.6.1	Les plis unidirectionnels (Monocouches).....	25
I.6.2	Les plis équilibrés (tissés équilibrés).....	26
I. 7	Classification des matériaux composites.....	27
I. 8	Composites hybrides .....	28

I. 9	Architecture des matériaux composites.....	29
I.9.1	Stratifiés .....	29
I.9.2	Composites sandwiches .....	29
I. 10	Mise en œuvre des matériaux composites.....	30
I. 10 .1	Moulages sans pression .....	30
I.10 .2	Moulage sous vide .....	31
I.10 .3	Moulage par compression :.....	32
I.10 .4	Moulage en continu .....	32
I.10 .5	Moulage par pultrusion.....	32
I.10 .6	Moulage par centrifugation.....	32
I.10 .7	Moulage par enroulement filamentaire.....	32
I. 11	Application des matériaux composites :.....	33
I. 12	Applications des composites à base de fibres naturelles .....	33

## **Chapitre II : Méthodologie expérimentale**

II. 1	Présentation des éléments constitutifs du matériau composite .....	37
II.1. 1	Epoxy STR .....	37
II.1. 2	Fibres de verre .....	37
II.1. 3	Fibres de <i>Stipa Tenacissima</i> .....	37
II. 2	Elaboration des plaques composites.....	41
II.2. 1	Les architectures choisies .....	41
II.2. 2	Le moulage .....	44
II.3. 1	Choix des techniques de caractérisation.....	47
II.3. 2	Mesure de densité :.....	48

II.3. 3	Mesure d'absorption d'eau : .....	49
II.3. 4	Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier en mode ATR.....	49
II.3. 5	Analyse thermogravimétrique .....	50
II.3. 6	Analyse calorimétrique différentielle à balayage .....	50
II.3. 7	Caractérisation mécanique.....	51
A.	Test de traction : .....	51
B.	Test de flexion trois points : .....	53

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

III. 1	Mesure de la densité .....	56
III. 2	Test d'absorption d'eau .....	57
III. 3	Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier en mode ATR.....	59
III. 4	Analyse ATG : .....	62
III. 5	Analyse DSC .....	64
III. 6	Etude du comportement mécanique .....	66
III .6. 1	Comportement en traction.....	66
III .6 .2	Comportement en flexion.....	69
III. 7	Valorisation du travail .....	72
	<b>Conclusion générale</b> .....	73
	<b>Bibliographie</b> .....	75
	<b>Annexe</b> .....	77

## Liste des tableaux :

<b>Tableau I.1</b> Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes [4] .....	18
<b>Tableau I.2</b> Les types de verres filables [4].....	19
<b>Tableau I.3</b> Classification et exemples de fibres naturelles [21] .....	21
<b>Tableau I.4</b> Propriétés physiques et mécaniques de quelques fibres naturelles comparées aux fibres de verre et aux fibres de carbone [23].....	22
<b>Tableau I.5</b> Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [10] .....	24
<b>Tableau I.6</b> Comparaison de la composition chimique des différentes fibres végétales [10] .....	25
<b>Tableau III.1</b> Résultats de test densité. ....	56
<b>Tableau III.2</b> Comparaison entre la densité de la fibre d'Alfa et celles d'autres types de fibres citées dans la littérature.....	57
<b>Tableau III.3</b> Identification des bandes les plus importantes du spectre IR de l'Alfa[7] .....	60
<b>Tableau III.4</b> Identification des bandes les plus importantes du spectre IR de la résine [8].....	61
<b>Tableau III.5</b> Comparaison des températures maximales de stabilité et les températures maximales de décomposition des composites hybrides et non-hybride avec un autre type de composite.....	64
<b>Tableau III.6</b> Comparaison des propriétés mécaniques en traction des composites hybrides et non-hybrides avec d'autres résultats citées dans la littérature.....	68
<b>Tableau III.7</b> Comparaison des propriétés mécaniques en flexion de la résine Epoxy et des quatre composites avec celles citées dans la littérature.....	70

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> Les classes de composite : a) composites à particules et, b) composites à fibres [4] .....	15
<b>Figure I.2</b> différentes fibres végétales ainsi que leurs fibres et tissus (A) Plante de Sisal , (B) Plante de jute, (C)Plante de Kénafe, (D) Plante de Chanvre , (E) Plante de coco. [9].....	23
<b>Figure I.3</b> la plante d'Alfa .....	26
<b>Figure I.4</b> Pli unidirectionnel .....	26
<b>Figure I.5</b> Pli équilibré [4].....	27
<b>Figure I.6</b> Toile taffetas .....	27
<b>Figure I.7</b> Toile Sergé .....	27
<b>Figure I.8</b> Toile Satin .....	28
<b>Figure I.9</b> Tissu multiaxial à gauche et Tresse ou Tissu 3D à droite.....	28
<b>Figure I.10</b> Couche en composite hybride intrapli (a), et (b) interpli [32].....	28
<b>Figure I.11</b> Architecture stratifiée ] .....	30
<b>Figure I.12</b> Architecture Sandwich .....	31
<b>Figure I.13</b> Principe du moulage au contact .....	32
<b>Figure I.14</b> (a) Pièces de Mercedes Classe S fabriquées à partir de différents matériaux composites renforcés de fibres naturelles [5](b) Les matériaux composant un avion, 50% de matériaux composites [13] (c) planche a base de bomboo[11], (d)éolienne renforcée par des fibres de lin[12].	35
<b>Figure II.1</b> Les tiges d'Alfa .....	38
<b>Figure II.2</b> Immersion des tiges d'Alfa dans le bain .....	38
<b>Figure II.3</b> Brossage des tiges d'Alfa .....	39
<b>Figure II.4</b> Séchage des fibres d'Alfa .....	39
<b>Figure II.5</b> Etuvage des fibres d'Alfa .....	40
<b>Figure II.6</b> Dispositif pour le tissage.....	40
<b>Figure II.7</b> Les étapes de tissage .....	41
<b>Figure II.8</b> les architecture choisis .....	44
<b>Figure II.9</b> Protocole de l'élaboration par moulage au contact des composites.....	46
<b>Figure II.10</b> Drone quadrirotors.....	47
<b>Figure II.11</b> Drone à ailes .....	47
<b>Figure II.12</b> Un drone volant sous la pluie [15] .....	48
<b>Figure II.13</b> Mesure de densité .....	48
<b>Figure II.14</b> Test d'absorption.....	49
<b>Figure II.15</b> Eprouvette de traction (Norme ASTM D638) .....	51
<b>Figure II.16</b> Eprouvettes pour les essais de traction et flexion de gauche à droite .....	52
<b>Figure II.17</b> Machine d'essai de traction « MTS Criterion » .....	52
<b>Figure II.18</b> le principe d'essai de flexion.....	53
<b>Figure II.19</b> Test de flexion .....	53
<b>Figure II.20</b> Echantillon d'éprouvette en flexion .....	54
<b>Figure III.1</b> Evolution de l'absorption d'eau des composites en fonction du temps en jours .....	58
<b>Figure III.2</b> Spectre IR de la fibre d'Alfa, de la résine pure, du composite verre et du composite hybride .....	59
<b>Figure III.3</b> Superpositions des spectres FTIR du composite verre et la Résine pure.....	61
<b>Figure III.4</b> La superposition des courbes thermogravimétriques d'Alfa, composite verre et du composite hybride .....	62

<b>Figure III.5</b> Courbe DSC de la fibre d'Alfa , du composite Epoxy/Verre et du composite hybride Epoxy/Verre/Alfa .....	65
<b>Figure III.6</b> Superposition des courbes de traction des composites CH-S, CH-AS, CH-S, CV, RP .....	66
<b>Figure III.7</b> Propriétés mécaniques en traction de la résine Epoxy et des quatre composites .....	68
<b>Figure III.8</b> Superposition des courbes en flexion de la résine Epoxy et des quatre composites .....	69
<b>Figure III.9</b> Propriétés mécaniques en flexion de la résine Epoxy et des quatre composites .....	71
<b>Figure III.10</b> Profiles d'ails, a) architecture CH-S, b) architecture CV.....	72

## Introduction générale

Le développement et les changements rapides dans le secteur industriel sont accompagnés par des nouvelles générations de matériaux. Parmi ces matériaux, les matériaux composites qui sont de plus en plus adoptés lorsque le domaine s'y prête bien. La recherche sur les composites a débuté en 1900 et elle fait l'objet d'un grand intérêt. Le premier matériau composite naturel utilisé a été le bois, ensuite le torchis qui est utilisé habituellement dans la construction pour l'isolation et qui est considéré comme un matériau pas cher. Actuellement, les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit le moins coûteux possible, soit les plus performants, ou bien les deux à la fois.

Dans le domaine de la construction aéronautique, les progrès réalisés ces dernières années ont été considérables, notamment grâce à la conception de structures de plus en plus légères. La réduction du poids des avions apporte des avantages essentiels pour améliorer leurs performances, en matière de consommation d'énergie, d'émission sonore, mais également pour augmenter leur capacité de transport. L'utilisation des matériaux composites a grandement contribué à atteindre ces objectifs de gain de masse tout en conservant la fiabilité mécanique et la longévité de l'avion. L'association de fibres de verre et de résine époxyde est un exemple de ces matériaux légers et anisotropes présentant, de par l'association d'un renfort fibreux et d'une matrice organique, de remarquables atouts mécaniques et physico-chimiques. Depuis environ une quarantaine d'années, l'évolution des techniques de fabrication rend aujourd'hui possible la conception de pièces de fortes épaisseurs, de formes complexes et de dimensions de plus en plus grandes. Il est ainsi possible de trouver ce type de matériau dans des parties de la voilure, du fuselage, mais aussi sur des structures primaires fortement chargées, comme le caisson central ou la poutre ventrale de l'avion [1].

Cependant, aujourd'hui nous constatons que, pour le développement de ce domaine, la société devra de plus en plus se tourner vers des ressources renouvelables, et l'utilisation des fibres végétales comme renfort des matériaux composites organiques s'inscrit dans cette logique [2].

Les chercheurs portent beaucoup d'intérêt pour les composites à renfort végétal, ceci est due à la variété et à la multiplicité de leurs caractéristiques telles que la biodégradabilité, la faible densité, la non-toxicité, le faible coût et la recyclabilité [3].

En revanche, les fibres naturelles, bien qu'elles possèdent de nombreuses qualités, présentent certains défauts majeurs lorsqu'il s'agit de leur structure anisotrope, leur nature hydrophile empêchant la bonne adhésion avec les matrices polymères.

L'objectif de cette étude est d'évaluer le remplacement de composites synthétiques, par une nouvelle version utilisant un matériau composite hybride à base de la biomasse locale (*Stipa Tenacissima*), de fibres synthétiques qui sont les fibres de verre, et de résine époxy pour l'utilisation dans des applications légères, plus particulièrement, les matériaux de structure des drones (domaine Aéronef). Ce remplacement permettra d'avoir un produit respectueux de l'environnement et de réduire les coûts et le poids. Un poids inférieur pour les Aéronef et pour un drone signifie une consommation d'énergie réduite, moins de pollution et moins de coûts.

La fibre de *Stipa Tenacissima* (Alfa) et la fibre de verre sont associées pour la première fois en tant que renfort d'un composite afin d'aboutir à une solution pour le problème de poids, de pollution de l'environnement et de performance rencontré dans le domaine de l'aéronef et particulièrement dans les drones.

Ce travail portera essentiellement sur : i) la valorisation de la plante locale, ii) la méthode d'extraction qui est 100% naturelle sans l'utilisation de produits chimiques, iii) l'élaboration pour la première fois des tissus 2D d'Alfa, iv) le protocole d'élaboration des plaques composites à base d'une matrice de type époxy renforcées par les deux types de fibres, verre et Alfa, ainsi que, v) la variété de l'architecture des composites (symétrique, asymétrique, et alternée).

C'est dans ce cadre qu'on peut situer notre travail dont l'objectif principal consiste à élaborer et caractériser une nouvelle combinaison de renfort pour les composites hybrides entre les fibres naturelles et synthétiques qui permettra de caractériser une alternative écologique tout en gardant de bonnes propriétés mécaniques et physico-chimiques.

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur les matériaux composites de manière générale et, en particulier, les composites hybrides renforcés par des fibres végétales, un rappel sur les fibres synthétique et végétales, les différents types de matrices utilisées, les architectures des composites et leurs domaines d'application.

Le second chapitre contiendra deux parties, en premier, nous présenterons la méthode d'extraction des fibres naturellement ainsi que le protocole de fabrication des composites au sein du « COMPOSITE LABORATORY » du CRTI (Centre de Recherche de la Technologie

Industrielle). La deuxième partie portera sur la présentation des techniques de caractérisation physico-chimiques et mécaniques de la fibre d'Alfa et des différentes plaques composites élaborées.

Le dernier chapitre présentera les différents résultats des techniques de caractérisation de la fibre d'Alfa, composites hybrides et non-hybrides avec des comparaisons des résultats cités dans la littérature.

Enfin, une conclusion sera donnée.

**CHAPITRE I**  
**Revue bibliographique**

## **I. 1 Généralités sur les matériaux composites**

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue.

La phase continue est appelée « matrice ». Elle assure la cohésion et l'orientation des fibres, garantit le transfert des chargements, protège le renfort contre les diverses conditions environnementales et permet de donner la forme voulue à la pièce réalisée.

La phase discontinue est appelée « renfort » ou matériau renforçant. Elle constitue l'armature reprenant l'essentiel des efforts mécaniques et possède généralement une bonne résistance en traction et une faible résistance en compression [4].

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- la nature des constituants et leurs propriétés,
- la géométrie du renfort et sa distribution,
- la nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc.

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse). La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à fibres et les matériaux composites à particules (Fig I.1) [4]

### **I.1. 1 Composites à fibres**

Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur possède donc là, un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécaniques et physiques en jouant sur :

- la nature des constituants,
- la proportion des constituants,
- l'orientation des fibres, suivant le cahier des charges imposées.

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leur comportement mécanique [4].

### I.1.2 Composites à particules

Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées [4].



**Figure. I.1** Les classes de composites : a) composites à particules et, b) composites à fibres [4]

## I.2 Éléments Constitutifs d'un matériau composite

### I.2.1 Les résines

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

Il existe différents types de matrices : métallique, céramique ou organique (polymère). Dans les résines polymères, il existe deux grandes catégories : résine thermodurcissable et résine thermoplastique.

Ces deux types de résine possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée.

Les résines thermoplastiques dont la fabrication atteint de loin le plus gros tonnage du fait d'un faible coût possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs. Ces résines peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

Par contre, les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique. Ainsi, les résines thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites.

Cependant, l'amélioration des caractéristiques des résines thermoplastiques conduit à une utilisation qui ne cesse de croître [4].

### **A. Les résines thermoplastiques**

La famille des résines thermoplastiques (on parle de "plastiques") est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno polymères).

Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, ou par compression à chaud, etc.

Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le polyamide (PA), le polycarbonate (PC), le polyéthylène basse densité (LDPE), le polyéthylène linéaire basse densité (LLDPE), le polyéthylène haute densité (HDPE), etc. L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication (injection, extrusion) [4].

## **B. Les résines thermodurcissables**

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage [4] :

- les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylesters, dérivés allyliques, etc.,
- les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques ,etc.,
- les résines époxydes.

### **a. Les résines polyesters**

Les résines polyesters insaturées viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites Leur développement est le résultat :

- d'un faible coût de production,
- de leur diversité offrant de multiples possibilités,
- d'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser.

D'où un développement industriel sans cesse croissant.

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont du type rigide [4].

### **b. Les résines de condensation**

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques.

1. Les résines phénoliques sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite.
2. Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques.
3. Les résines furaniques sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyesters [4].

### **c. Les résines époxydes**

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.) [4].

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont données dans le tableau

**Tableau. I. 1** Caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes [4]

Masse volumique	1 100 à 1 500 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	2 à 5 %
Résistance au cisaillement	30 à 50 MPa
Température de fléchissement sous charge	290 °C

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de re-cuisson très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100 °C).

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons [4] :

- de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters,
- une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu.
- une excellente résistance chimique.
- un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1 %).
- une très bonne mouillabilité des renforts.
- une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

Parmi les inconvénients, nous citerons [4] :

- un temps de polymérisation long,
- un coût élevé,
- la nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre,
- une sensibilité à la fissuration.

## I.2. 2 Le renfort

Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont: des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une bonne facilitée de mise en œuvre, un faible coût, etc. En fonction des utilisations, les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. Toutefois, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées, et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7 [4].

### A. Les fibres

#### a. Les fibres de verre

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, 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. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites [4]

Suivant leur composition, différents types de verres filables peuvent être obtenus (Tableau I.2) :

**Tableau. I. 2** Les types de verres filables [4]

<i>Type</i>	<i>Caractéristiques générales</i>
<i>E</i>	<i>A usage général ; bonnes propriétés électriques</i>
<i>D</i>	<i>Hautes propriétés diélectriques</i>
<i>A</i>	<i>Haute teneur en alcali</i>
<i>C</i>	<i>Bonne résistance chimique</i>
<i>R,S</i>	<i>Haute résistance mécanique</i>

Autres types de fibres :

**b. Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées**

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de “Kevlar”, nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours (USA), et commercialisée en 1972 [4].

**c. Les fibres céramiques**

Diverses fibres de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, itrures, etc.) peuvent être élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support [4].

**d. Les fibres de carbone**

Le graphite a une structure hexagonale d'atomes de carbone, disposés en plans cristallographiques parallèles [4].

**e. Les fibres d'origine naturelle**

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines : animale, végétale et minérale (Tableau I.3). Les fibres d'origine végétale sont constituées majoritairement de cellulose et possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles d'origine animale. Ces dernières, telles que la laine et la soie, sont largement utilisées dans le domaine du textile. Les fibres d'origines végétales peuvent être classées en sous familles selon d'où elles ont été extraites ; graines, fruits, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne [5].

**Tableau. I. 3** Classification et exemples de fibres naturelles [5]

<b>Origine</b>	<b>Provenance</b>	<b>Exemples</b>
Végétale	Graines	Cotton, kapok, Asclépiade
	Fruits	Noix de coco
	Ecorces	Lin, chanvre, jute, ramie, kénaf
	Feuilles	Sisal, henequen, abaca, Ananas
	Bois	-
	Tiges	Blé, maïs, orge, seigle, avoine, riz
	Cannes et roseaux	Bambou, bagasse, alfa, roseau
Animale	Laine/poil	Laine, poils, Cachemire
	Vers à soie	Soie de tussah, soie de mûrier
Minérale	-	Amiante, Wollastonite

Les fibres naturelles ont réussi à acquérir un intérêt croissant en tant que renfort dans les composites. Cela est dû à leurs propriétés mécaniques, leurs densités particulièrement faibles et les coûts de production bas. Les rendements de plantes en fibres sont assez hauts. Le prix de la main d'œuvre est relativement bon marché dans les pays de culture des plantes sources qui peuvent être dans certains cas récoltées plusieurs fois dans l'année.

Comparées aux fibres classiquement utilisées dans le renforcement des composites telles que les fibres de verre, les fibres naturelles possèdent des propriétés mécaniques plus faibles (Tableau I.4). Cependant, ces fibres ont des densités moins élevées, et donc des rapports spécifiques propriétés/densité comparables aux fibres de verre.

De telles propriétés peuvent toujours convenir pour des applications où les niveaux de sollicitations sont limités et où le souci de légèreté combiné à un gain des coûts est recherché.

De plus, l'utilisation de ces fibres dans des matériaux composites, surtout à matrices thermoplastiques, présente un atout écologique [5].

**Tableau. I. 4** Propriétés physiques et mécaniques de quelques fibres naturelles comparées aux fibres de verre et aux fibres de carbone [5]

<b>Fibre</b>	<b>Densité (g.cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Diamètre (µm)</b>	<b>Limite de traction (MPa)</b>	<b>Module d'Young (GPa)</b>	<b>Allongement (%)</b>
Fibre de verre	2,55	17	3400	73	2,5
Carbone	1,78	5-7	3400-4800	240-425	1,4-1,8
Jute	1,3-1,49	25-200	393-800	13-26,5	1,16-1,5
Lin	1,5	40-600	345-1500	27,6	2,7-3,2
Chanvre	1,47	10-100	650-900	30-70	1,6
Sisal	1,47	50-200	468-700	9,4-22	3-7

### **I. 3 Extraction des fibres végétales**

Les techniques d'extraction des fibres végétales ont un effet significatif sur la qualité et les performances des fibres obtenues. Ces techniques peuvent être effectuées par différents procédés tels que : méthodes chimiques (à la soude, Kraft, bisulfite, soude ...), mécaniques (décortication, teillage, peignage ...) et biologiques (rouissage à l'eau, à terre ...). En revanche, certains chercheurs ont également recouru la combinaison entre deux ou plusieurs procédés afin d'améliorer la qualité de la fibre finale. Toutes les techniques d'extraction précédentes ont un objectif commun : obtenir des fibres longues, non endommagées avec de bonnes propriétés mécaniques à travers l'élimination des composants non celluloseux, notamment, ceux qui composent la lamelle mitoyenne, qui à son tour joue le rôle de maintien de la cohésion des cellules fibreuses [3]. Des tissus sont ensuite élaborés en utilisant ces fibres (Figure I.2) .



**Figure. I. 2** *Différentes fibres végétales ainsi que leurs fibres et tissus ; (A) Plante de Sisal , (B) Plante de jute; (C)Plante de Kéna; (D) Plante de Chanvre; (E) Plante de coco. [9]*

#### **I. 4 Composites à base de fibres végétales**

De nos jours, l'utilisation des ressources renouvelables dans les matériaux composites devient de plus en plus fréquente. Ces matériaux possèdent la capacité de se renouveler naturellement. Leur utilisation est devenue une nécessité car, avec l'épuisement des ressources fossiles, l'émission des gaz à effet de serre et le problème de la gestion des déchets, il est indispensable de trouver des solutions pour le respect de l'environnement. Parallèlement, l'industrie plastique est en pleine expansion. C'est dans ce cadre que de nouveaux matériaux résultant du mélange de constituants provenant de la biomasse avec les matières plastiques, de plus en plus performants sont mis au point. Ces matériaux ont l'avantage d'être biodégradables et issus de renouvelables.

Autrement dit, ces fibres constituent une alternative aux fibres synthétiques (verre, carbone, aramide, ...) en raison de leur recyclabilité. Néanmoins, leurs propriétés doivent être encore améliorées.

Les fibres naturelles telles que le lin, le chanvre, la banane, le sisal, le jute et le palmier ont certains avantages technico-économiques et écologiques par rapport aux fibres synthétiques (fibres de verre, ...). La combinaison intéressante de leurs propriétés mécaniques et physiques ainsi que leur caractère respectueux de l'environnement a suscité un intérêt dans un certain nombre de secteurs industriels, notamment l'industrie automobile. Les avantages et les inconvénients de l'utilisation de fibres naturelles dans les composites sont donnés dans le Tableau I.5 [10]. La composition chimique des différentes fibres végétales est donnée dans le Tableau I.6.

**Tableau. I. 5** Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [10].

Avantage	Inconvénients
faible coût	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO <sub>2</sub>	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
Pas de résidus après incinération	Faible anisotropes
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour de l'application industrielle, demande de la gestion d'un stock
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour outillages	

**Tableau. I. 6** Comparaison de la composition chimique des différentes fibres végétales [10].

<b>Fibre</b>	<b>Pectines</b>	<b>Hémicelluloses</b>	<b>Cellulose</b>
<b>Zostère</b>	10 ± 2	28 ± 5	57 ± 3
<b>Lin</b>	6 ± 3	7 ± 3	82 ± 5
<b>Chanvre</b>	2,5	5,5	78,3
<b>Jute</b>	0,2	12	64,4
<b>Ramie</b>	1,9	13,1	68,6
<b>Sisal</b>	0,8	12	65,8

### I. 5 La fibre d'Alfa

Alfa (de l'arabe Halfa) est une plante herbacée vivace de la famille des graminacées, originaire des régions arides de l'ouest du bassin de la méditerranée (Figure I.3). Les grands foyers s'étendent sur les grands plateaux Algéro-Marocains, au-delà elle déborde sur le Maroc occidental, le Portugal méridional, l'Espagne orientale et méridionale. C'est dans les zones les plus sèches de la région méditerranéenne qu'on trouve l'Alfa. Au sud, sa limite naturelle est déterminée par la sécheresse. Au nord et à l'ouest, c'est l'humidité croissante du climat qui élimine la flore.

Cette graminée est indifférente à la structure et la nature chimique du sol, les milieux humides ou hydromorphes lui sont défavorables. Son développement est optimal si le taux d'argile dans le sol ne dépasse pas 10 à 12% et si le terrain est bien drainé et filtrant.

Elle ne supporte pas la salinité du milieu et se développe mieux sur des sols neutres ou légèrement basiques. Elle joue un rôle essentiel dans la lutte contre l'érosion.

La production alfatière dépend étroitement du climat. Ainsi, on peut noter des productions de 6 à 700 000 hectares si l'année est sèche. Le taux d'utilisation est de 50 %.

L'Alfa était utilisée pour la fabrication des nattes, rideaux, tapis, paniers, corbeilles, plateaux, chaussures, gargoulettes, ficelles et liens divers. A la fin du 19ème siècle et début du 20ème siècle est apparu le papier d'Alfa, un papier de qualité qui allait donner une grande importance économique à cette plante.

La plante d'Alfa est composée approximativement de 50 à 54 % de cellulose, 27 à 32% d'Hémicellulose, 17 à 19% de lignine, 0.5% de cire et 2% de cendre. La plante est cylindrique, possédant approximativement 1 m de longueur. Sa structure est formée par plusieurs paquets

de filaments, approximativement circulaires, alignés le long de la longueur de la plante. Les filaments de cellulose sont rendus compacts à l'intérieur de ces paquets, en liaison avec la lignine, pour former un composite unidirectionnel aligné le long de la longueur de la plante. Les filaments de la cellulose ont un diamètre de 5–10  $\mu\text{m}$  et de dimension qui varie de 2 à 5mm [7].

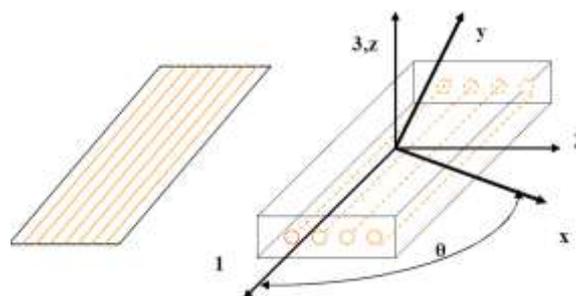


**Figure. I. 3** la plante d'Alfa de la région de M'sila

## I. 6 Plis composites

### I.6.1 Les plis unidirectionnels (Monocouches)

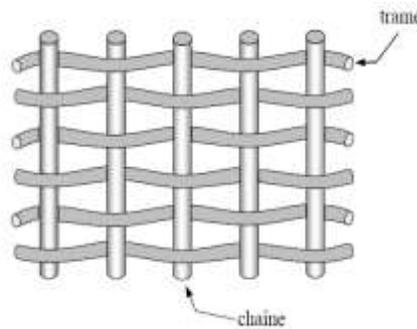
Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes. Dans une nappe UD (Figure I.4), les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Le taux de déséquilibre est très grand [8].



**Figure. I. 4** Pli unidirectionnel

### I.6.2 Les plis équilibrés (tissés équilibrés)

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise (Figure I.5) [8].

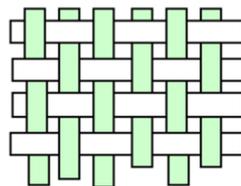


**Figure. I. 5** *Pli équilibré* [4].

Dans l'industrie on peut trouver plusieurs types de ces tissés, parmi eux on distingue :

#### a. Toile ou taffetas

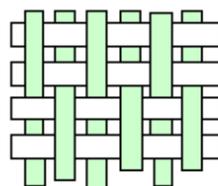
Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame en alternant (Figure I.6) . Les tissus présentent une bonne planéité et une relative rigidité, mais sont peu déformables pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques [8]



**Figure. I. 6** *Toile taffetas*

#### b. Sergé

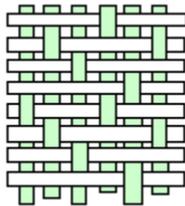
Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne (Figure I.7). Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils [8].



**Figure. I. 7** *Toile Sergé*

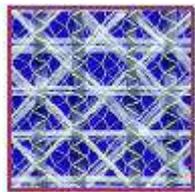
### c. Satin :

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement (Figure I.8). Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique [8].



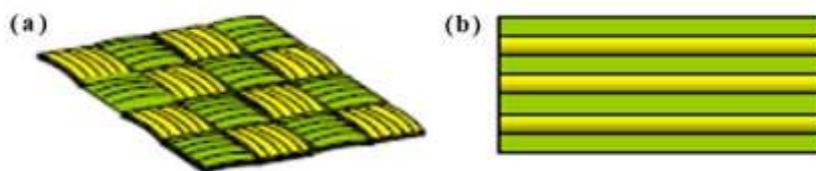
**Figure. I. 8** *Toile Satin*

On peut réaliser également pour des utilisations spécifiques des armures bi ou tridimensionnelles (Figure I.9).



**Figure. I. 9** *Tissu multiaxial à gauche et Tresse ou Tissu 3D à droite*

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides (Figure I.10) en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes [8].



**Figure. I. 10** *Couche en composite hybride intrapli (a), et (b) interpli*

## I. 7 Classification des matériaux composites

Les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale.

Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer [4] :

A. Composites à matrice organique (résine, charges), avec :

- des fibres minérales : verre, carbone, etc.
- des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

B. Composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

- des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
- des fibres métalliques : bore,
- des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).

C. Composites à *matrice minérale* (céramique), avec :

- des fibres métalliques : bore,
- des particules métalliques : cermets,
- des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

## I. 8 Composites hybrides

Il s'agit des plastiques renforcés conjointement par des fibres végétales et des fibres synthétiques (verre ou carbone). En effet, les plastiques renforcés essentiellement de fibres végétales n'atteignent les propriétés physiques des systèmes verre/plastiques que dans certaines conditions particulières. On peut cependant améliorer ces caractéristiques par l'élaboration des composites hybrides. Ces composites hybrides atteignent les caractéristiques mécaniques quasi-identiques à celles des composites traditionnels. A cause de la résistance à l'eau des fibres de verre, l'hygro-dépendance de ces propriétés devient négligeable. L'absorption d'eau est en fait réduite quand les fibres de verre remplacent une partie des fibres cellulosiques [10].

## I. 9 Architecture des matériaux composites

### I.9.1 Stratifiés

Un stratifié (Figure I.11) est constitué d'un empilement de plis ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques [4].

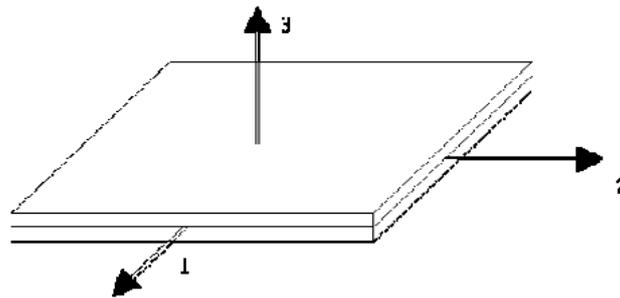


Figure. I. 11 Architecture stratifiée

#### a. Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes.

Ils permettent d'être plus performants en utilisant au mieux les propriétés des diverses fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer [4] :

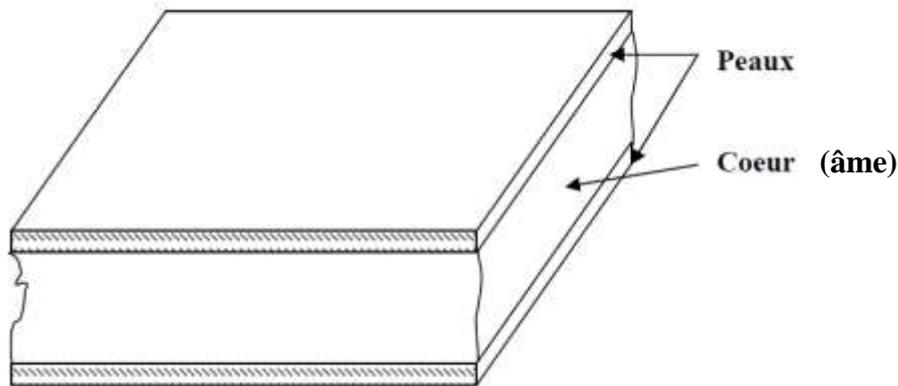
- des hybrides inter-couches, constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente;
- des hybrides intra-couches, constitués par une séquence de couches identiques, chaque couche étant constituée de renforts différents;
- des couches métalliques peuvent également être intercalées entre les couches.

### I.9.2 Composites sandwichs

Le principe de la technique sandwich (Figure I.12) consiste à appliquer sur une âme (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux "feuilles", appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité.

Généralement, le choix des matériaux est fait pour objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

Pour que les structures sandwich jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux (fibre-matrice), de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence [4].



**Figure. I. 12** Architecture Sandwich

## **I. 10 Mise en œuvre des matériaux composites**

### **I. 10 .1 Moulages sans pression**

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions [4].

#### **A. Moulage au contact**

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface [4].

Le moulage (Figure I.13) est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

1. Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
2. Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
3. Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.

4. Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.

5. Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).

6. La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).

7. Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc [4].

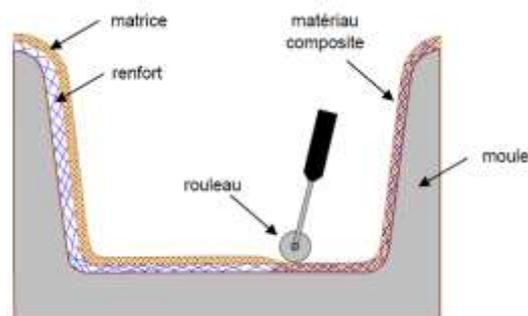


Figure. I. 13 Principe du moulage au contact

### I.10 .2 Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité. Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air.

### **I.10 .3 Moulage par compression :**

- **Moulage par injection de résine :** Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.
- **Moulage par compression à froid :** Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries et les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face.
- **Moulage par compression à chaud :** Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants.
- **Moulage par injection :** La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés.

### **I.10 .4 Moulage en continu**

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches, de panneaux ondulés pour toitures, plaques nervurées, etc.

### **I.10 .5 Moulage par pultrusion**

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale.

### **I.10 .6 Moulage par centrifugation**

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

### **I.10 .7 Moulage par enroulement filamentaire**

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation. Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces.

### **I. 11 Application des matériaux composites :**

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres-résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisés pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer. Leurs domaines d'application sont les suivants :

- électricité et électronique,
- bâtiment et travaux publics,
- transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- santé (instrumentation médicale),
- sports et loisirs (skis, raquettes de tennis, planches à voile, surf, clubs de golf, ...).

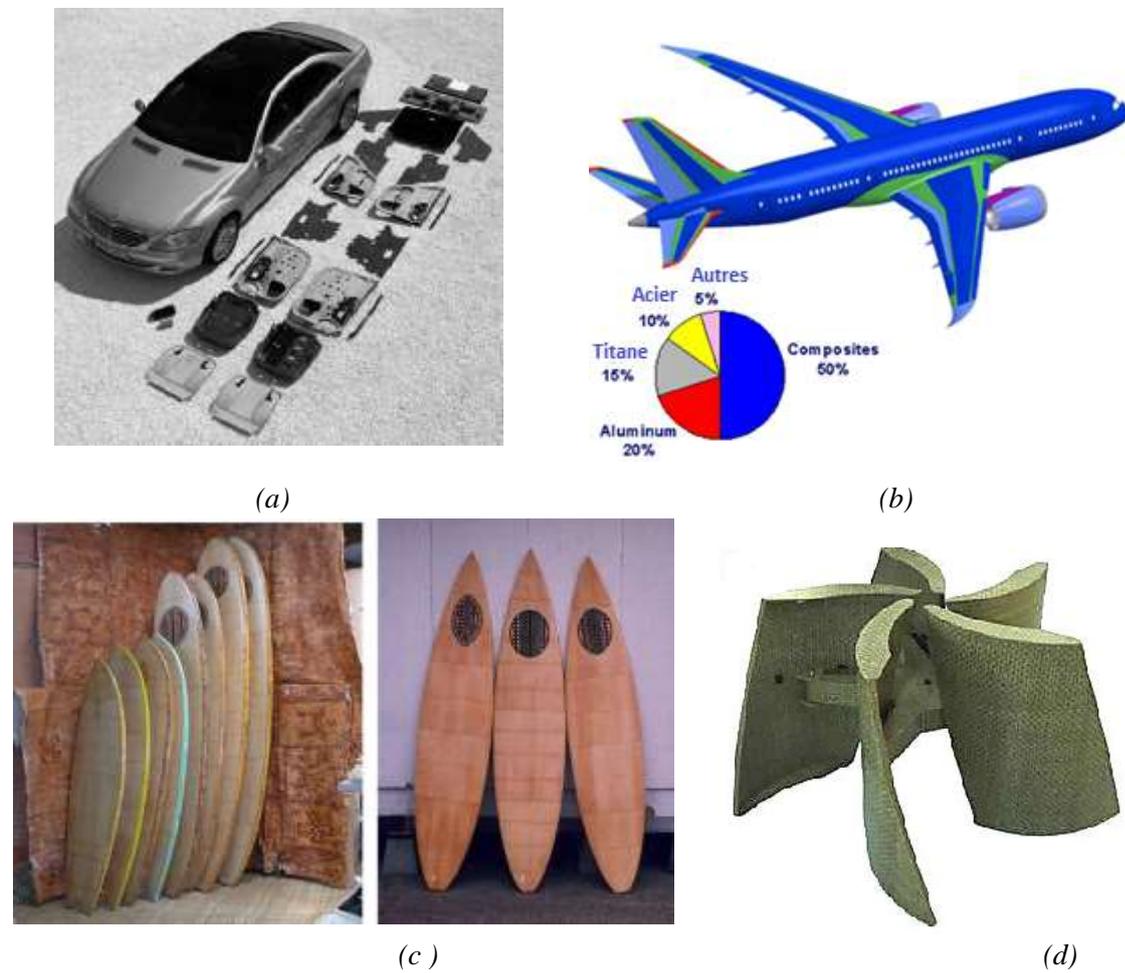
### **I. 12 Applications des composites à base de fibres naturelles**

La principale application des composites à renforts fibres naturelles est dans le domaine de l'industrie automobile qui a développé divers nouveaux composants à base de fibres naturelles. L'application des composites renforcés par des bio-fibres dans des composants d'automobile augmente de façon régulière avec les différents modèles. Mais la nouvelle invention est que, de nos jours, les composites à bio-fibres sont également utilisés dans les composants extérieurs de l'automobile.

En matière de construction, l'utilisation des matériaux à base de végétaux n'est pas une idée nouvelle. Le secteur de la construction se présente comme l'un des plus grands consommateurs de ressources naturelles et d'énergie, ce qui en fait une des sources les plus importantes de production de gaz à effet de serre. Face à ce problème, une des solutions réside dans la redécouverte et le développement de l'utilisation des matériaux à base de végétaux.

Dans le domaine du génie civil, par exemple, on utilise du béton à base de bois ainsi que du béton à base de chanvre (classé dans la catégorie des éco-matériaux en raison de ces atouts environnementaux). De la tige de chanvre on extrait la chènevotte connue par ses propriétés

d'isolation, La chènevotte est mélangée avec le béton qui sera utilisé pour différents usages comme les blocs préfabriqués, l'isolation et la rénovation, etc.... Ses bonnes performances thermiques et acoustiques ont fait l'objet de divers travaux de recherche [6]. La figure I.14 illustre différentes applications des composites renforcés de fibres naturelles.



**Figure. I. 14** (a) Pièces de Mercedes Classe S fabriquées à partir de différents matériaux composites renforcés de fibres naturelles [5] (b) Les matériaux composant un avion, 50% de matériaux composites [13] (c) Planches à base de fibre de bambou [11] (d) éolienne renforcée par des fibres de lin [12]

## **CHAPITRE II**

# **Méthodologie expérimentale**

## II. 1 Présentation des éléments constitutifs du matériau composite

### II.1. 1 Epoxy STR

Les polyesters, les époxydes, les vinyle-esters et les phénols insaturés classés comme résines thermodurcissables sont les plus couramment utilisés dans la fabrication des composites.

Dans notre travail, nous avons utilisé une résine époxy pour élaborer les plaques composites. Cette résine de dénomination commerciale « MEDAPOXY STR » est fournie par l'entreprise GRANITEX –Algérie. Elle se présente sous forme de kit pré dosé de deux composants : Elément A : Résine, Elément B : Durcisseur [14]. Cette résine présente les propriétés suivantes :

- Très bonne tenue aux produits chimiques.
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier.
- Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre.

### II.1. 2 Fibres de verre

Nous avons utilisé un tissu de fibre de verre type E « E-Glass » avec une densité de  $2.50 \text{ g/cm}^3$  pour élaborer les plaques de composites [4].

### II.1. 3 Fibres de *Stipa Tenacissima*

#### A. Présentation de la plante *Stipa Tenacissima* (Alfa)

La plante « *Stipa Tenacissima L* », appelée aussi « Alfa » est une touffe d'herbe, constituée de tiges de forme cylindrique d'une hauteur maximale d'environ 1m avec une surface spécifique de  $3\text{m}^2/\text{g}$ .

#### B. L'extraction des fibres :

La méthode d'extraction biologique de la fibre d'Alfa est une méthode simple , économique , écologique et permet de produire des fibres de très bonne qualité sans utilisation de produit chimique .

Dans cette étude, une technique d'extraction écologique a été réalisée comme suit :



**1/ Récolte** : La plante a été récoltée dans la région de M'sila en février 2019. Elle a été coupée en tiges de 34 cm de longueur. (Figure II.1)



**Figure. II. 1** *Les tiges d'Alfa*

**2/Ébullition (rouissage)** : Les tiges sont immergées dans un bain rempli d'eau à 100°C pendant 2 heures pour assurer la dégradation microbienne. (Figure II.2)



**Figure. II. 2** *Immersion des tiges d'Alfa dans le bain*

**3/Brossage** : l'extraction des fibres est réalisée à l'aide d'une brosse métallique. (Figure II.3)



**Figure. II. 3** *Brossage des tiges d'Alfa*

**4/Lavage** : Les fibres obtenues sont plongées dans de l'eau distillée pendant environ 1 heure.

**5/Séchage** : Les fibres sont séchées à l'air libre sur une surface propre pendant 12 heures. (Figure II.4)



**Figure. II. 4** *Séchage des fibres d'Alfa*

**6/ Etuvage :** Les fibres sont placées dans l'étuve à 75°C pendant 6 heures. (Figure II.5)

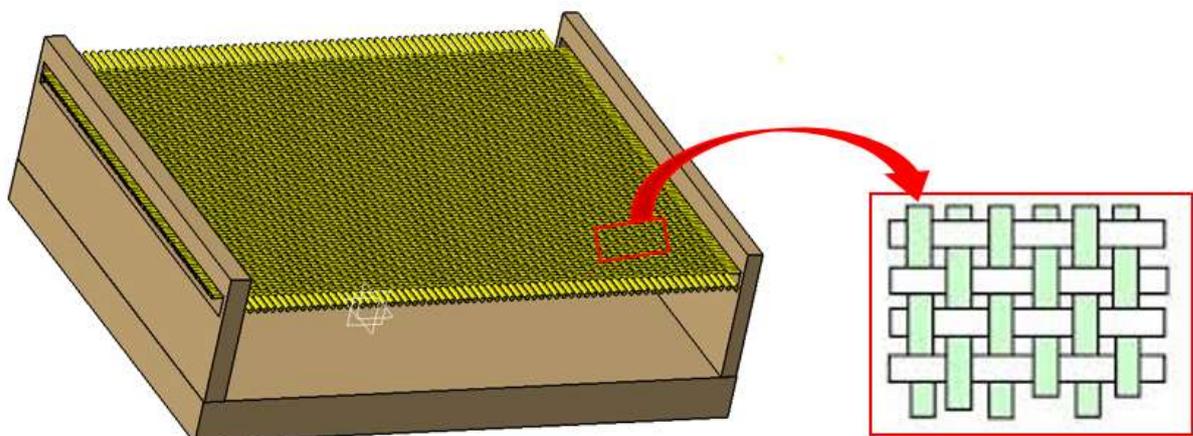


**Figure. II. 5** *Etuvage des fibres d'Alfa*

### C. Elaboration des tissus

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés (fils simples, mèches, etc.), par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaîne et des fils de trame. Plusieurs armures classiques sont utilisées : toile ou taffetas, sergé, satin, armure croisée, armure unidirectionnelle. Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à l'élaboration des tissus du type taffetas.

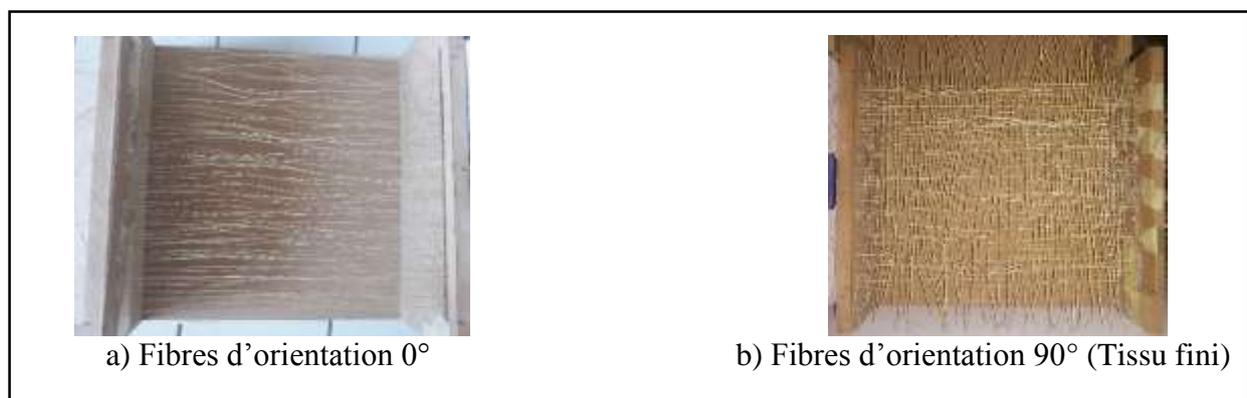
Un dispositif a été conçu spécialement pour le tissage de fibres (Figure II.6), la technique de tissage est très traditionnelle et prend beaucoup de temps



**Figure. II. 6** *Dispositif pour le tissage*

Le tissage est réalisé selon les étapes suivantes :

- Triage des fibres étuvées obtenues après l'extraction.
- Réalisation de la 1<sup>ère</sup> orientation du tissu ( $0^\circ$ ) (Figure II.7, a)
- Réalisation de la 2<sup>ème</sup> orientation du tissu ( $90^\circ$ ) à l'aide d'une aiguille en vue d'obtenir une armure taffetas. (Figure II.7, b)
- Séparation du tissu et refaire de même pour chaque tissu.
- Obtention des tissus de dimension 19cm x 22 cm



**Figure. II. 7** Les étapes de tissage

## II. 2 Elaboration des plaques composites

Le choix de la technique de mise en forme des matériaux composites hybrides renforcés par des fibres d'Alfa et de verre dépend du type de la matrice (thermoplastique ou thermodurcissable ...) et de la qualité du renfort (fibres courtes, longues ...). Ces techniques ont un effet significatif sur la qualité et les performances du produit final [3].

### II.2. 1 Les architectures choisies :

Avant de passer au moulage, théoriquement, il faut que le taux de fibres (Fibres de verre et fibres d'Alfa) soit identique dans toutes les plaques. Pour ce faire, le calcul du taux de renfort est nécessaire d'où la déduction du nombre de tissus auquel il correspond, en prenant en considération la densité de la fibre de verre, d'Alfa et de la résine et le volume de la plaque souhaité.

Les performances diffèrent d'un composite à un autre lorsqu'on change l'ordre des empilements des tissus dans les composites hybrides, donc nous avons élaboré des composites avec toutes les combinaisons possibles tout en gardant le même taux de renfort.

Selon la littérature[8], le renfort synthétique fibre de verre utilisé est doté d'une meilleure résistance par rapport à la fibre végétale, quant à la fibre d'Alfa, elle est caractérisée par une densité inférieure et son faible coût par rapport à la fibre de verre. C'est pour cela que nous avons opté pour l'hybridation afin d'obtenir un composite à la fois résistant, léger, plus écologique et moins coûteux.

De nombreux essais d'élaboration des composites ont été réalisés en utilisant diverses proportions de fibres afin d'atteindre le pourcentage optimal du renfort dans les composites qui est de 25%, et de 20 % de fibres d'Alfa et 80 % de fibres de verre par rapport au renfort, pour des plaques de dimensions : 22 x 19 x 0.2 cm<sup>3</sup>.

Le taux de fibres est déterminé comme suit :

Considérons le volume  $v_c$  du matériau composite, composé d'un volume  $v_r$  de renfort et d'un volume  $v_m$  de matrice. Par la suite, les indices c, r, a, v et m seront systématiquement utilisés comme indices respectifs des caractéristiques du matériau composite, du renfort, de l'Alfa, du verre et de la matrice. La fraction volumique du renfort est :

$$V_r = \frac{v_r}{v_c} = 0,25$$

Nous avons :

$$v_c = 22 \times 19 \times 0.2 \text{ cm} = 83,6 \text{ cm}^3 ; \quad \text{Donc : } v_r = v_c \times 0.25 = 20,9 \text{ cm}^3$$

Tel que :

La fraction volumique de la fibre d'Alfa est :  $V_a = 0,2$

La fraction volumique de la fibre d'Alfa relative est :  $V_{a \text{ relative}} = V_a \times 0,25 = 0,05$

La fraction volumique de la fibre de verre est :  $V_v = 0,8$

La fraction volumique de la fibre de verre relative est :  $V_{v \text{ relative}} = V_v \times 0,25 = 0,2$

D'où :

$$v_a = V_a \times v_r = V_{a \text{ relatif}} \times v_c = 4,18$$

$$v_v = V_v \times v_r = V_{v \text{ relatif}} \times v_c = 16,72$$

$$v_m = v_c - v_r = 62,7$$

$M_a$  : masse des tissus d'Alfa,  $M_v$  : masse des tissus de verre

$d_a$  : densité de la fibre d'Alfa,  $d_v$  : densité de la fibre de verre

$$M_a = v_a \times d_a, M_v = v_v \times d_v$$

Nous avons donc utilisé une combinaison de fibres de verre et de fibres d'Alfa afin d'optimiser les propriétés de l'assemblage.

Plusieurs composites hybrides (Figure II.8) avec plusieurs séquences d'empilement (architecture) ont été élaborés afin d'analyser l'influence de l'addition de fibres d'Alfa sur le comportement mécanique, en traction et en flexion, et sur l'absorption d'eau, en fonction de leur position dans le stratifié

- **Les plaques hybrides :**

Architecture CH-A : [V A V A V A V] ; Architecture CH-AS : [V V V V A A A];

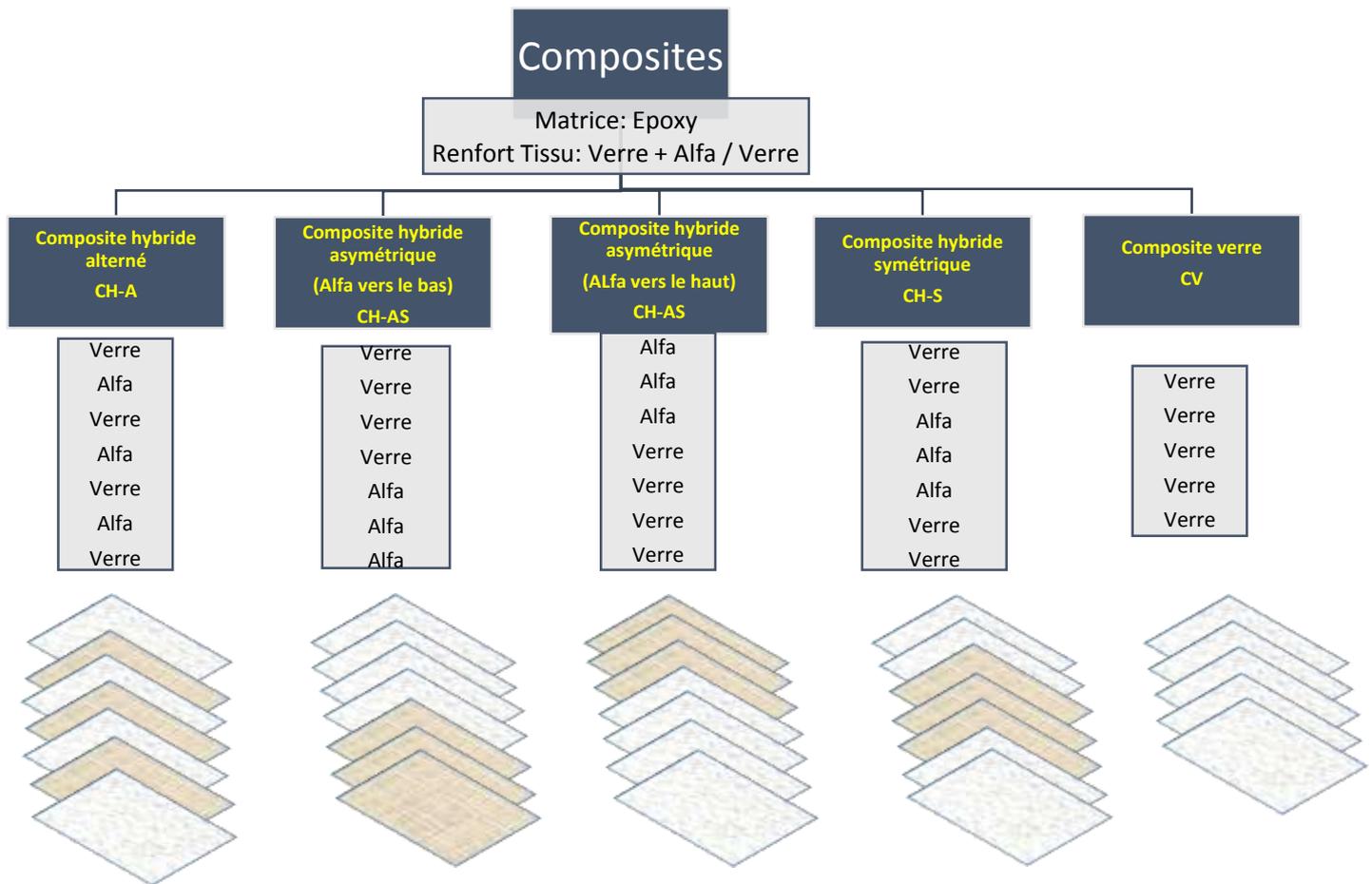
Architecture CH-S : [V V A A A V V]

Pour avoir le même taux de fibres, 5 tissus de fibres de verre sont utilisés dans CV

**Les plaques non hybrides :**

Architecture CV: [V V V V V]

Architecture RP :résine pure.



**Figure. II. 8** Les architectures choisies

Chaque formulation est ensuite soumise à un moulage

### II.2. 2 Le moulage :

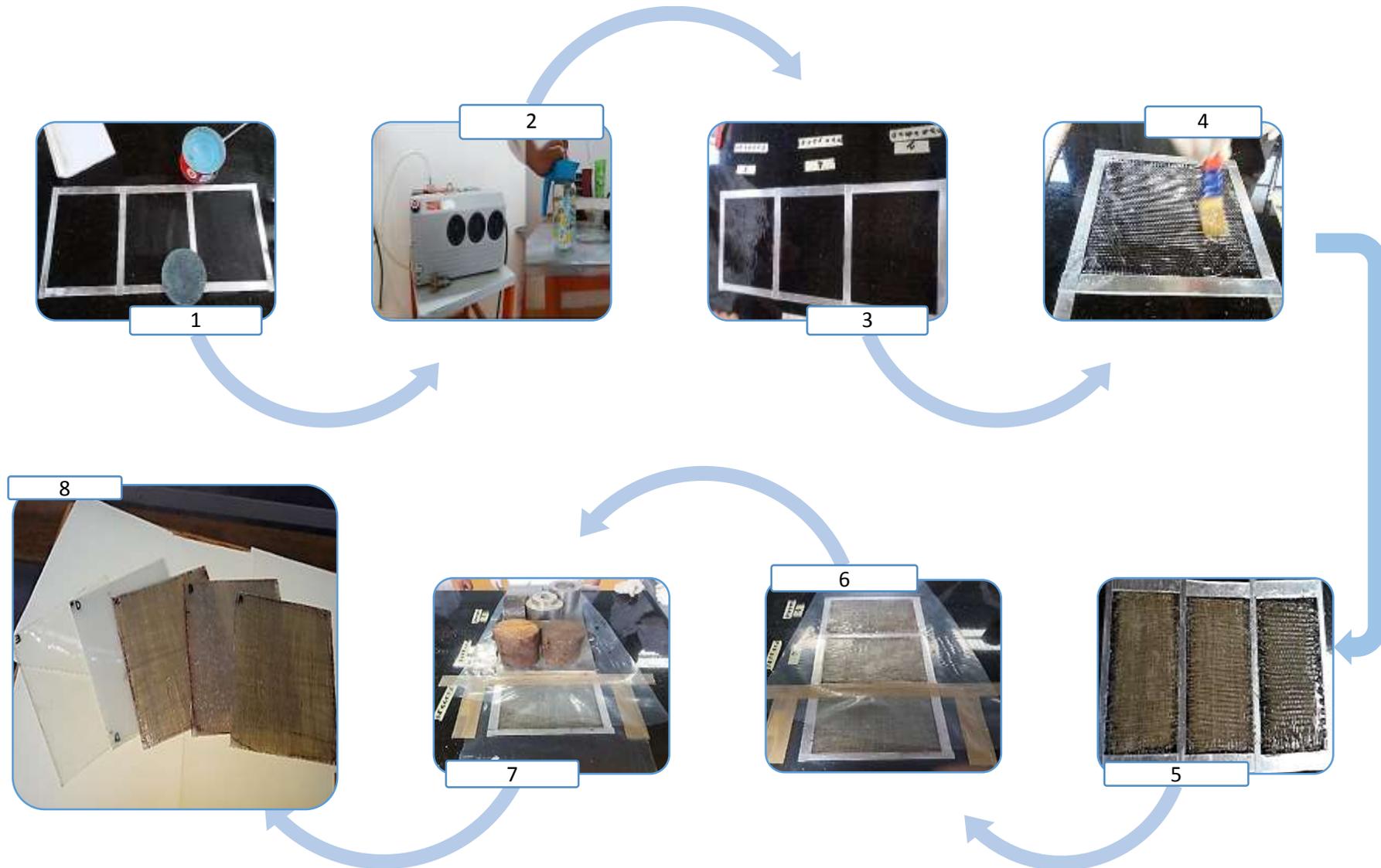
En général, les techniques utilisées pour la mise en forme des composites à renforts hybrides sont les mêmes que celles utilisées dans la mise en forme des composites à renforts synthétiques. Dans notre cas, la technique utilisée pour l'élaboration des composites est le moulage au contact (figure II.9).

Le moulage est effectué selon les opérations suivantes :

- Un moule en aluminium de dimension (22 x 19 x 0,2 cm) est mis en place, et pour faciliter le démoulage des composites, une couche de la cire est appliquée sur la surface du moule
- La résine époxy chauffée est mélangée avec le durcisseur en respectant la proportion en poids de (3 :1). Ensuite, le mélange obtenu a subi un dégazage à l'aide d'une pompe à vide et une enceinte en verre pour éliminer les bulles d'air (Figure II.9 (2)).

- Une couche du mélange est appliquée sur la surface intérieure du moule. Ensuite, les tissus sont posés selon l'architecture de chaque composite (Figure II.9 (4)).
- Un contre moule est mis en place pour assurer à la fois l'élimination des bulles d'air, la bonne adhésion des tissus avec la résine, et un bon état de surface. (Figure II.9 (7))
- Les plaques sont laissées sécher. Ensuite démoulées après 24 heures .
- Les plaques sont ensuite mises dans une étuve à 75°C pendant 6 heures.

La Figure II.9, montre des photos prises pendant l'élaboration des composites.



**Figure. II. 9** *Protocole de l'élaboration par moulage au contact des composites*

### II.3. 1 Choix des techniques de caractérisation

Le choix du type d'analyse des matériaux préparés n'est pas aléatoire, il est fait en sorte de répondre aux exigences des applications visées dans le domaine des aéronefs.

Par exemple, un phénomène de flexion est observé dans les aéronefs au décollage et l'atterrissage verticaux (Drone **quadrirotors**) (figure II.10), à cause de la concentration de la charge dans le milieu et les forces latérales des quatre rotors. Ce phénomène est observé aussi dans les autres types de drones.

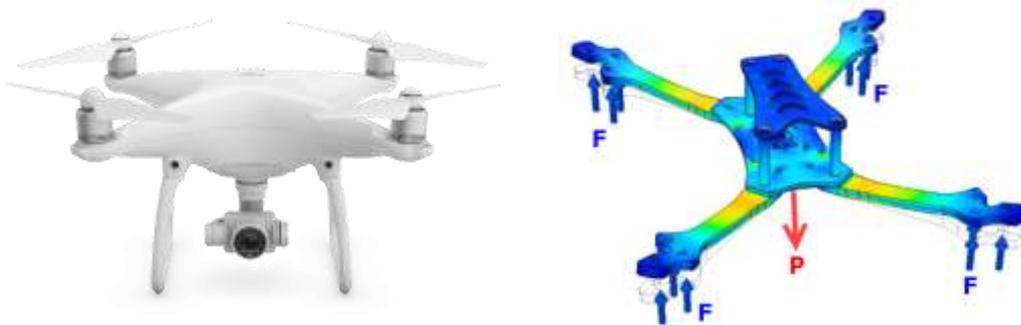


Figure. II. 10 *Drone quadrirotors*

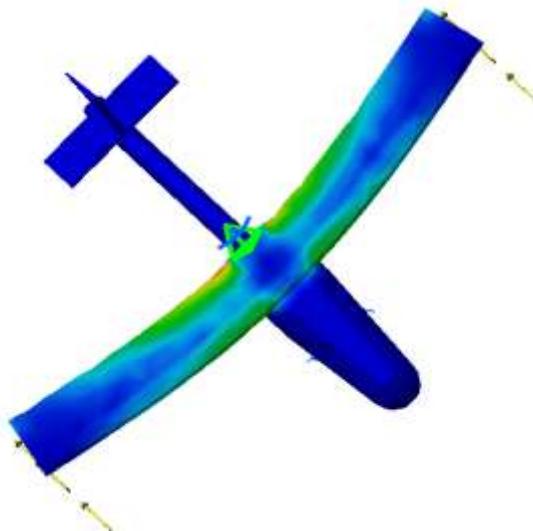


Figure. II. 11 *Drone à ailes*

Malheureusement, le mauvais temps, comme la pluie (Figure II.12), le taux d'humidité élevé, les chutes de neige ou le brouillard, sont les causes les plus courantes qui provoquent plusieurs problèmes parmi lesquels le court-circuit dans le moteur, le changement de poids...etc, ce qui conduira à la perte du drone et pour cela, un test d'absorption d'eau est nécessaire pour étudier la cinétique d'absorption.

Les test ATG et DSC sont nécessaires pour étudier la stabilité et le comportement thermique des composites et de la fibre d'Alfa en particulier .

Les tests de traction et de flexion nous donnent des informations sur le comportement mécaniques des composites .



**Figure. II. 12** *Un drone volant sous la pluie [15]*

### **II.3. 2 Mesure de densité :**

La densité apparente est mesurée par la méthode pycnométrique (figure II.13) selon la norme NFT51-063. L'éthanol est le solvant de déplacement utilisé qui assure une bonne mouillabilité de l'échantillon.

$$d = \frac{\rho \text{ éthanol } (m_2 - m_1)}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} [2]$$

$\rho$  : Densité du liquide de déplacement ;

$m_1$ : Poids du pycnomètre à vide ;

$m_2$ : Poids du pycnomètre contenant la prise d'essai ;

$m_3$  : Poids du pycnomètre contenant la prise d'essai et le liquide de déplacement ;

$m_4$  : Poids du pycnomètre contenant le liquide de déplacement.



**Figure. II. 13** *Mesure de densité*

### II.3.3 Mesure d'absorption d'eau :

Le test d'absorption d'eau consiste à immerger des éprouvettes (Figure II.14) dans de l'eau distillée à une température de 25°C. Avant l'immersion, les éprouvettes ont été étuvées à 110°C pendant 1h selon la norme ASTM-D 570-98, puis essuyées avec du papier absorbant pour éliminer l'excès d'eau. Ensuite, elles sont pesées ( $m_0$ ) sur une balance analytique de précision 0.0001g. Un suivi périodique de la variation du poids est effectué ( $m$ ) chaque 3 jours [7]. L'opération continue pendant 10 jours pour étudier la cinétique d'absorption.

La variation de masse est donnée par la formule suivante :

$$\Delta m (\%) = \frac{m - m_0}{m_0} * 100$$

Avec :

$m_0$  : La masse des échantillons avant immersion

$m$  : La masse des échantillons après immersion.

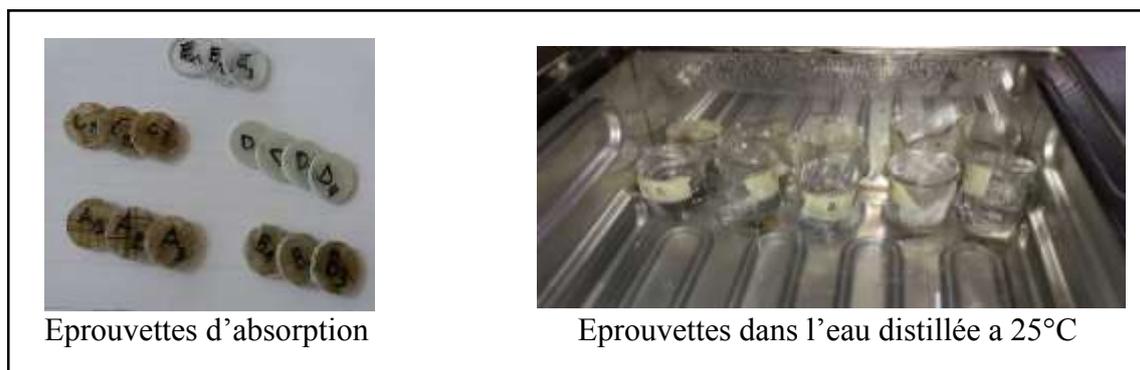


Figure. II. 14 Test d'absorption

### II.3.4 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier en mode ATR

La composition chimique des fibres d'Alfa, des composites hybrides, non-hybrides et résine pure est obtenue à la température ambiante au moyen de la technique de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode Réflexion Totale Atténuée (FTIR-ATR).

L'équipement utilisé est un appareil FTIR SHIMADZU IRTracer-100 piloté par ordinateur. La résolution est de 4  $\text{cm}^{-1}$  dans une gamme spectrale de 4000-40 $\text{cm}^{-1}$

Pour la préparation des échantillons, les fibres et les plaques ont été découpées puis broyées afin d'obtenir une poudre [2].

### **II.3. 5 Analyse thermogravimétrique**

L'analyse thermogravimétrique (ATG) a pour but d'évaluer la perte de masse, la stabilité thermique et la vitesse de décomposition que subit un échantillon au cours d'un traitement thermique en fonction de la température. Les thermogrammes des différents échantillons ont été enregistrés à l'aide d'un appareil thermogravimétrique de type **STA NETZSCH** piloté par un micro-ordinateur. Une masse est introduite dans un creuset en platine. La perte de masse est mesurée à l'aide d'une thermobalance sous atmosphère inerte d'azote dans un intervalle de température de 25 à 550°C avec une vitesse de chauffe de l'ordre de 10 °C/min [7].

### **II.3. 6 Analyse calorimétrique différentielle à balayage**

La calorimétrie à balayage différentielle (DSC) est une technique utilisée pour étudier le comportement thermique d'un matériau. Elle permet de déterminer des transitions de phase comme :

- La température de transition vitreuse (l'intervalle de température à travers lequel la matière passe d'un état caoutchouteux à un état vitreux, solide phase amorphe).
- La température de fusion et de cristallisation. (Transition du 1er ordre caoutchouteux à liquide. Partie cristalline seulement concernée)
- L'enthalpie de réaction.

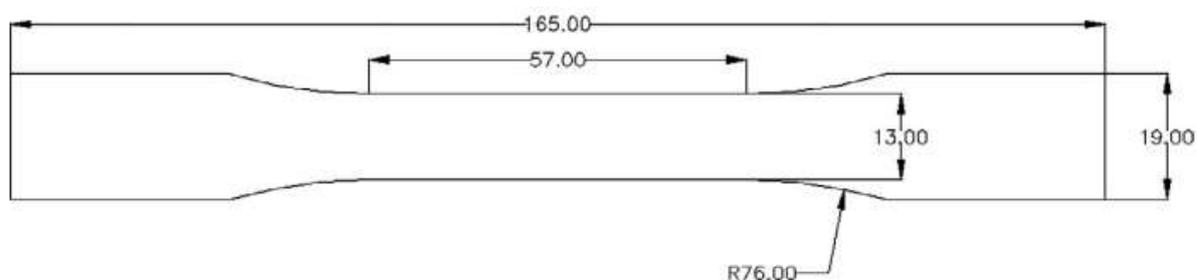
L'appareil renferme deux creusets, l'un comme référence et l'autre contient l'échantillon à analyser. Ces deux creusets sont placés dans un four que l'on chauffe jusqu'à la température choisie habituellement à 10°C/minute. Ces creusets sont reliés à un thermocouple qui lit la température et la transmet à un ordinateur [16].

La caractérisation DSC, nous avons utilisé une machine de marque **NETZSCH STA 409PC/PG**. Les spectres ont été enregistrés dans une gamme de température 25-550C° avec une vitesse de chauffage de 10°C/min. Les expériences sont effectuées sous atmosphère neutre d'argon.

### II.3. 7 Caractérisation mécanique

#### A. Test de traction :

Le test de traction permet de déterminer l'allongement, la contrainte à la rupture et le module d'Young des matériaux. Ces essais permettent d'établir une relation entre les contraintes et les déformations et de déterminer la nature du matériau (rigide ou souple). Le test de traction est réalisé sur des éprouvettes normalisées (Figure II.15) sous forme d'haltère de type « I » selon la norme ASTM D638-10. Des éprouvettes normalisées sont découpées en forme d'halter selon la norme à l'aide d'une Scie à Ruban [7].

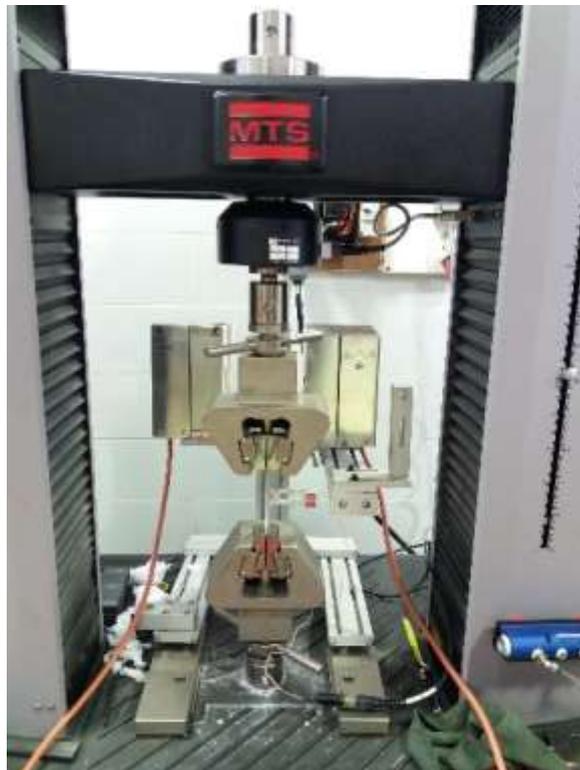


**Figure. II. 15** *Éprouvette de traction (Norme ASTM D638)*



**Figure. II. 16** *Eprouvettes pour les essais de traction*

Ces essais ont été réalisés sur une machine de traction (Figure II.17) de marque type « **MTS Criterion** », pilotée par un microordinateur selon la norme « **ISO 527, juin 1993** » à la température ambiante avec une vitesse de déplacement 2 mm/min. Ce test consiste à soumettre l'éprouvette à un étirement avec une vitesse constante, et on relève la force de traction nécessaire en fonction de l'allongement.



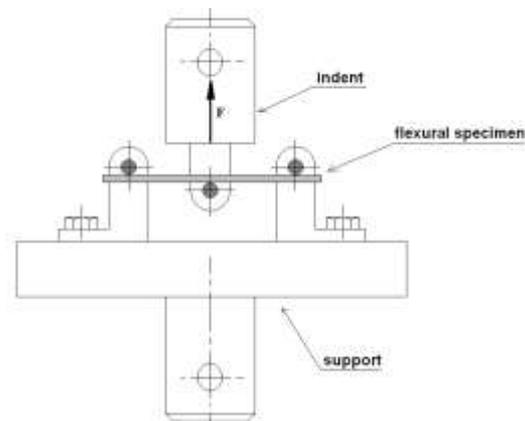
**Figure. II. 17** *Machine d'essai de traction « MTS Criterion »*

### B. Test de flexion trois points :

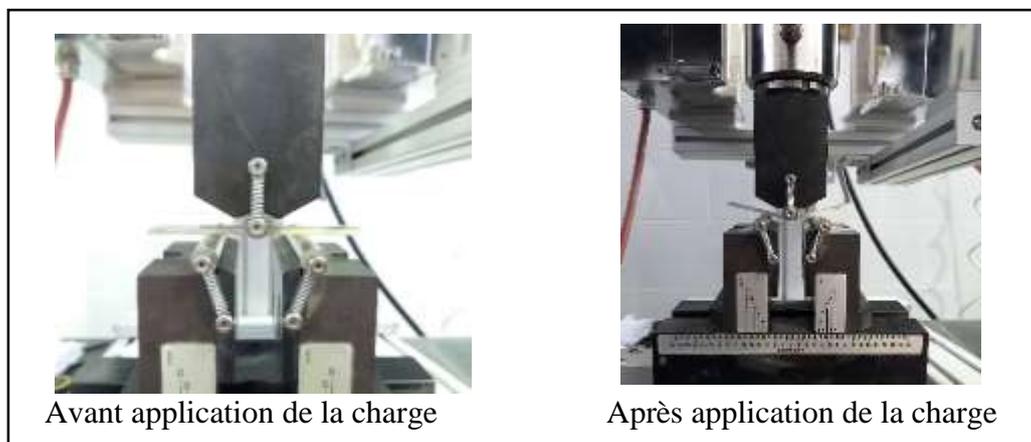
Le module de flexion est utilisé pour indiquer la rigidité d'un matériau lorsqu'il est fléchi, étant donné que les propriétés physiques de nombreux matériaux (notamment les thermoplastiques) peuvent varier en fonction de la température ambiante.

Les essais de flexion trois points sur les différentes éprouvettes d'essais (figure II.20) en flexion sont effectués selon la norme **ASTM D790-10**. (Figure II.18)

Un dispositif de flexion trois points est adapté dans la machine de traction de type MTS Criterion (figure II.19) avec une vitesse de 2 mm/min.



**Figure. II. 18** *le principe d'essai de flexion*



**Figure. II. 19** *Test de flexion*



**Figure. II. 20** *Echantillon d'éprouvette en flexion*

La contrainte à la flexion est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3 FL}{2 bh^2}$$

Avec :

F : charge appliquée exprimée en newtons (N)

L : distance entre les deux appuis en millimètres (mm)

b : largeur de l'éprouvette en millimètres (mm)

h : Hauteur de l'éprouvette en millimètres (mm)

La déformation à la flexion est calculée par la formule suivante :

$$\varepsilon_f = \frac{6h}{L^2} \cdot S$$

Avec :

s : Flèche, exprimée en millimètres (mm)

L : Distance entre les deux appuis en millimètres (mm)

h : Hauteur de l'éprouvette en millimètres (mm)

$\varepsilon_f$  : Déformation en flexion en (%) [3].

# **CHAPITRE III**

## **Résultats et discussions**

### III. 1 Mesure de la densité

Le problème du poids pour les composites est souvent rencontré dans le domaine de l'aéronef. On a essayé de trouver un compromis entre un meilleur poids et une bonne résistance mécanique et cela par l'intégration des fibres naturelles dans les composites destinés à l'usage aéronef. La faible densité est parmi les facteurs qui caractérisent les fibres naturelles par rapport aux fibres synthétiques. Le tableau III.1 présente les valeurs des trois essais sur les fibres d'Alfa.

**Tableau. III. 1** Résultats du test densité de la fibre d'alfa.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
pycnomètre vide (g)	24,5010	24,4750	24,7880
pycnomètre + éthanol (g)	43,3103	43,1537	43,6520
pycnomètre + solide (g)	24,5637	24,5390	24,8487
Pycnomètre +éthanol +solide (g)	43,3488	43,1613	43,6806

$$d = \frac{\rho_{\text{éthanol}} (m_2 - m_1)}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} = 1,4000 \text{ g/cm}^3$$

avec :  $\rho_{\text{éthanol}} = 0,75 \text{ g/cm}^3$

La densité de la fibre d'Alfa obtenue en utilisant un pycnomètre est une moyenne de trois essais. Il est remarquable que la valeur obtenue soit en concordance avec les densités de certaines fibres naturelles telles que le Sisal, le Jute et le Flax.

Les différences de densité qui se présentent peuvent être dus aux plusieurs facteurs comme les conditions climatiques, la porosité, le procédé d'extraction des fibres et le taux de croissance de la plante [3]. La valeur obtenue de la densité de la fibre d'Alfa avec d'autres types de fibres citées dans la littérature sont rassemblées dans le tableau III.2.

**Tableau. III. 2** Comparaison entre la densité de la fibre d'Alfa et celles d'autres types de fibres citées dans la littérature.

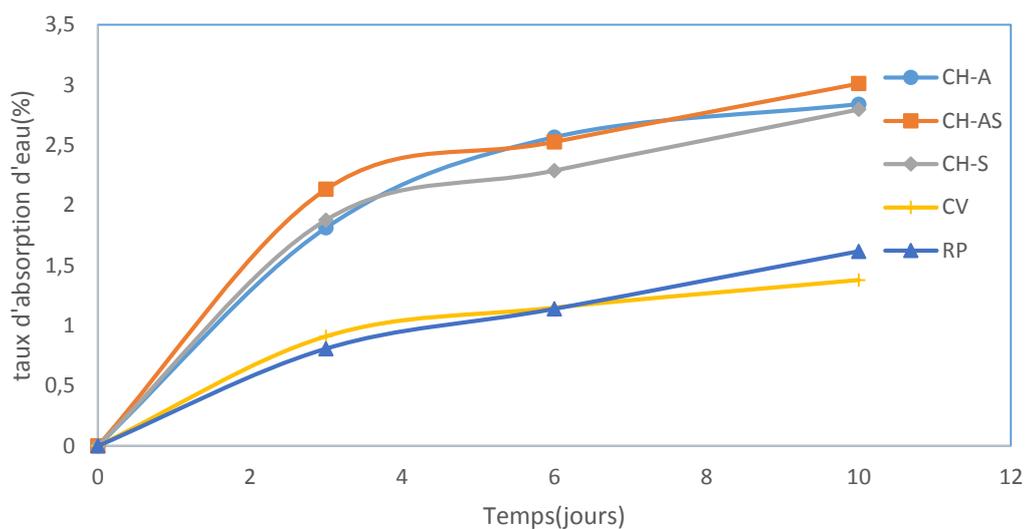
Type de fibre		Densité (g/cm <sup>3</sup> )
Végétale	Alfa	1,40 [travail actuel]
	Alfa	1,4631 [3]
	Alfa	1,43-1,52 [17]
	Lin	1,5-1,5 [18]
	Sisal	1,45 [18]
	Jute	1,56 [17]
	Coton	1,55 [17]
Synthétique	Verre	2,5 [2]
	Carbone	1,70 [2]
	Aramide	1,40 [2]

La densité apparente obtenue de la fibre d'Alfa est nettement plus petite que celle de la fibre de verre qui est de 2,5g/cm<sup>3</sup> [19] et avec un taux de fibre pareil (volumique) pour le composite hybride et le composite verre, le composite hybride est celui qui présente une densité inférieure. Par conséquent, en termes de poids, le composite hybride est meilleur avec des propriétés mécaniques assez importantes qu'on va traiter dans le reste du chapitre.

### III. 2 Test d'absorption d'eau

Les analyses d'absorption d'eau sont effectuées pour déterminer l'influence de l'architecture des composites hybrides (CH-A, CH-AS, CH-S) et non-hybrides (CV) sur le pouvoir d'absorption d'eau.

Le comportement en absorption d'eau des composites est comparé à celui de la résine époxy pure (RP) et les résultats sont rapportés en figure III.1.



**Figure. III. 1** Evolution de l'absorption d'eau des composites en fonction du temps en jours

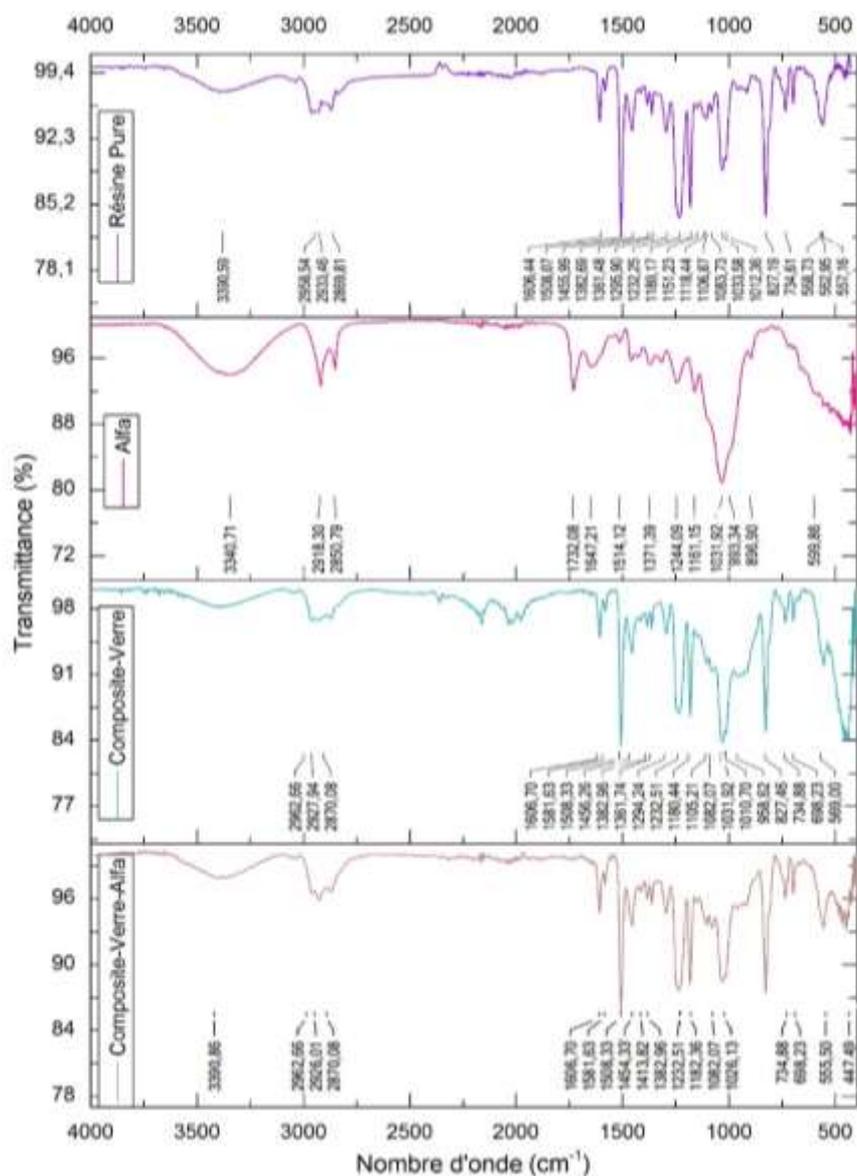
A partir de ces courbes, on constate que les taux d'absorption d'eau chez des composites hybrides CH-A, CH-AS et CH-S croissent linéairement en les comparant à celui de la résine pure et du composite non-hybride CV qui enregistrent un taux faible de (0,80%) et (0,90%) respectivement pendant 3 jours. Cela est dû à la nature apolaire de ces polymères qui leur confère le caractère hydrophobe.

Les composites hybrides, CH-A, CH-AS et CH-S enregistrent des taux d'absorption relativement plus élevés de 1,81%, 2,13%, 1,87% respectivement.

La plaque CH-AS représente le taux d'absorption le plus important et cela est lié au fait que tous les tissus d'Alfa sont mis à l'extérieur, contrairement aux autres plaques, où les tissus d'alfa sont protégés par des tissus de verre des deux côtés (architecture sandwich). Ce comportement peut être expliqué par le fait que la fibre d'Alfa est très hydrophile à cause des groupements hydroxyles qu'elle contient qui vont interagir avec les molécules d'eau environnantes en formant des liaisons hydrogènes [7].

### III. 3 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier en mode ATR

L'analyse par spectroscopie FTIR de l'Alfa, de la résine, du composite de verre et du composite hybride a permis d'obtenir des indications qualitatives concernant la structure chimique de la fibre d'alfa, de la résine et de la fibre de verre.



**Figure. III. 2** Spectres IR de la fibre d'Alfa, de la résine pure, du composite verre et du composite hybride.

D'après le spectre obtenu de la fibre d'Alfa (figure III.2), une large bande d'absorption autour de  $3340\text{ cm}^{-1}$ , attribuée aux groupes hydroxyles (OH) est observée. Les deux bandes autour de  $2918\text{ cm}^{-1}$   $2850\text{ cm}^{-1}$  sont associées aux groupes (CH<sub>2</sub>) de la cellulose et de

l'hémicellulose. Les bandes  $1732\text{cm}^{-1}$  et  $1647\text{cm}^{-1}$  correspondent aux groupements carbonyles (C=O) de la lignine et de l'hémicellulose tandis que la bande à  $1514\text{cm}^{-1}$  de très faible intensité correspond au groupe (C=C) de la lignine. La bande de  $1371\text{cm}^{-1}$  est lié aux groupes (C-H) de la cellulose.

La bande à  $1244\text{cm}^{-1}$  est relative aux groupes (-COO) de l'hémicellulose. En outre, les bandes à  $1161\text{cm}^{-1}$  qui correspond à C-O-C et à  $1031\text{cm}^{-1}$  qui correspond à C-O sont liées à la cellulose et l'hémicellulose. La dernière bande qui est autour de  $869\text{cm}^{-1}$  est attribuée aux groupes (C-O) qui sont associés aux liaisons glycosidique- $\beta$ . Le tableau III.3 récapitule toutes les bandes des indentifications dans le spectre de l'Alfa

**Tableau. III. 3** Indentification des bandes les plus importantes du spectre IR de l'Alfa [7]

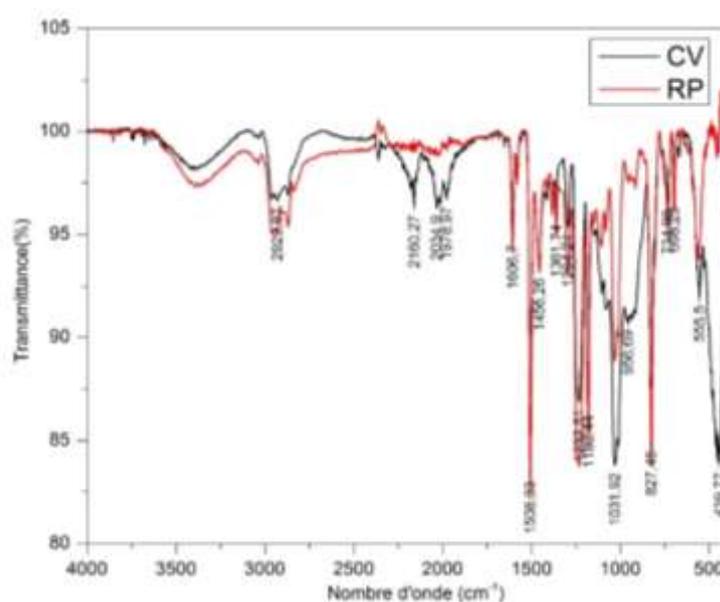
Nombre d'onde $\text{cm}^{-1}$	Groupement fonctionnel	Source
3340,71	Oh* étirement	Cellulose, Hémicellulose
2918,3 / 2850,79	CH <sub>2</sub>	//
1732,08 / 1647,21	C=O	Lignine, Hémicellulose
1514,12 / 993,34	C=C	Lignine
1371,39	C-H	Cellulose
1244,09	-COO	Hémicellulose
1161,15	C-O-C	Cellulose, Hémicellulose
869,90	Liaisons glycosidique- $\beta$	//

Pour le spectre de la résine pure, on a obtenu grâce à l'analyse FTIR plusieurs bandes caractérisant la structure polyépoxyde de la résine rassemblée sur le tableau III.4.

**Tableau. III. 4** Identification des bandes les plus importantes du spectre IR de la résine [20]

Nombre d'onde $\text{cm}^{-1}$	Groupe fonctionnel	Source
3340,71	OH	Ester
2958,54 / 2933,46 / 2896,81 / 1232,25 / 1180,17 / 1083,73 / 827,17	CH	Cycle Benzène
1606,44 / 1382,69 / 1382,69 / 1361,48 / 734,61	$\text{CH}_2$	Cycle Benzène
1606,44	C=C	//
1455,99	$\text{CH}_3$	//
1295,90 / 1012,36	C-O-C	Ether
1180,17 / 1151,23 / 1106,87 / 1012,36	C-O	Ester
869,90	Liaisons glycosidique- $\beta$	//
568,73 / 562,95 / 557,16	Région empreinte	

La figure III.3 montre une superposition du spectre de la résine Epoxy vierge et du composite-Verre. Les spectres sont focalisés dans la région spectrale entre 4000 et 400  $\text{cm}^{-1}$ .

**Figure. III. 3** Superposition des spectres FTIR du composite verre (CV) et la Résine pure (RP).

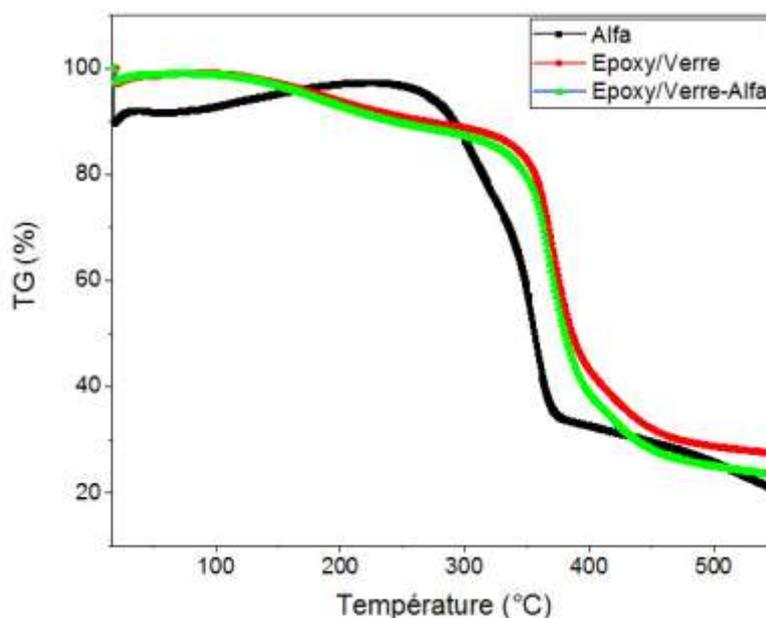
Le spectre FTIR de l'échantillon résine Epoxy vierge enregistre différentes bandes d'absorption qui caractérisent ce polymère.

La comparaison des quatre spectres met en évidence le déplacement de la bande à  $1732\text{cm}^{-1}$  de l'Alfa après le renforcement ce qui signifie la forte adhésion interfaciale entre la fibre et la matrice.

Le renforcement provoque une augmentation d'intensité de certaines bandes, qui sont associées respectivement à la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et les constituants de la fibre de verre ce qui confirme l'hybridation réalisée et la bonne adhésion.

#### III. 4 Analyse ATG :

La stabilité thermique des composites est un paramètre important pour leurs transformation et usage. Leur préparation demande un mélange de ces constituants à des hautes températures. Cependant, à ces conditions la dégradation peut engendrer des effets indésirables qui se répercutent sur leurs propriétés.



**Figure. III. 4** La superposition des courbes thermogravimétriques d'Alfa, composite verre et du composite hybride

La figure III.4 montre que la fibre d'Alfa présente une stabilité thermique jusqu'à 262°C, à partir de cette dernière on observe une dégradation importante de la masse jusqu'à 380°C, cette perte de masse correspond à la décomposition de la cellulose I et  $\alpha$ -cellulose [7].

Au-delà de 380°C, la perte de masse se poursuit mais faiblement jusqu'à 550°

Le thermo gramme du composite verre « CV » représenté sur la figure III.4 nous permet d'observer un palier de perte de masse. On enregistre une phase de stabilité, qui s'étale entre 10°C et 342°C où l'échantillon est stable thermiquement.

A partir de la température de début de décomposition, l'échantillon subit de 342°C jusqu'à 500°C une perte de masse qui est évaluée à 72,61%. Elle est attribuée aux liaisons aliphatiques qui commencent à se casser pour produire des dérivés phénoliques [7]. Au-delà de 500°C, l'échantillon est de nouveau stable thermiquement, autrement dit l'échantillon ne perd pas de masse dans cette plage de température.

A une telle haute température, la résine commence à se carboniser et seules les fibres de verre subsistent ce qui confirme l'absence d'une autre décomposition sur la courbe obtenue sauf celle de la résine époxy.

En revanche, pour le thermogramme du composite hybride avec un taux de renfort de 25% (20% Alfa et 80% Verre), à partir de 339°C, les chaînes aliphatiques des cycles aromatiques de la résine Epoxy commencent à se rompre pour produire des dérivés phénoliques. Des résultats semblables ont été rapportés par Putun et al [21].

L'introduction de l'Alfa à différents taux induit une diminution de la température de début de dégradation [22]. Par contre, dans notre cas, en comparant avec la courbe obtenue pour le composite non-hybride de Verre « CV », on remarque que la température de début de décomposition reste presque la même que celle du composite de Verre non-hybride (entre 339°C et 342°C) et cela revient au taux de fibre d'Alfa relativement faible (5% de 25% de renfort).

Les valeurs obtenues des températures maximales de stabilité de fibre d'Alfa et des composites sont rassemblées dans le tableau III.5 avec celles citées dans la littérature

**Tableau. III. 5** Comparaison des températures maximales de stabilité et les températures maximales de décomposition des composites hybrides et non-hybride avec un autre type de composite

	Température maximale de stabilité (°C)	Température maximale de décomposition (°C)
Fibre d'Alfa	262°C	380°C
Composite verre	342°C	500°C
Composites hybride	339°C	500°C
Composite PVC-Fibre d'Alfa [2]	239,5°C	460°C

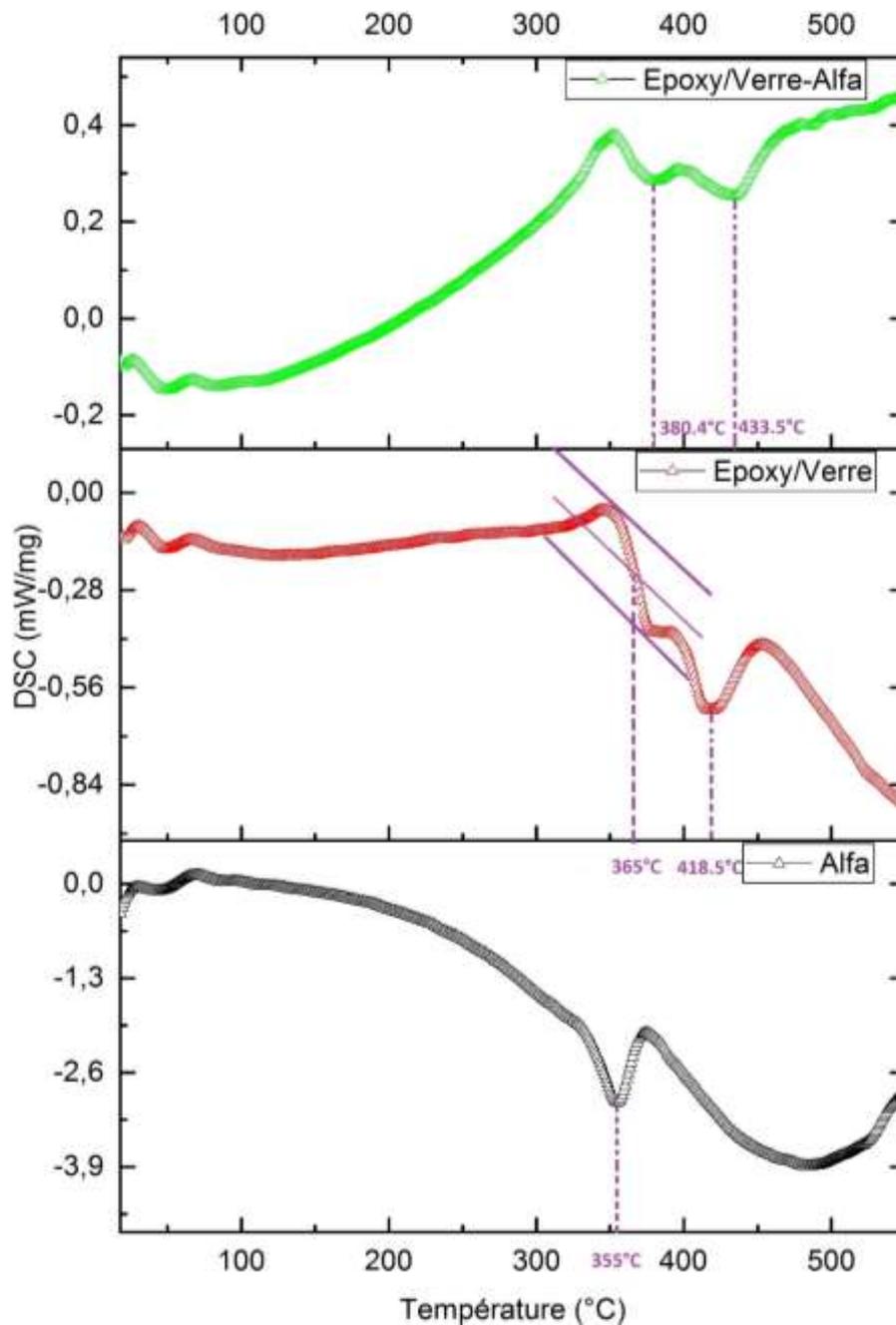
### III. 5 Analyse DSC

Les résultats du test DSC sont schématisés sur la figure III.5. La fibre d'Alfa présente un pic endothermique à 355,1°C lié à la diminution de la cristallinité, à la dégradation complète de l' $\alpha$ -cellulose et à la disparition de la majorité de la lignine [23].

Dans le cas du composite Epoxy/Verre, nous observons une diminution brusque qui correspond à un changement de la capacité calorifique et non pas liée à la chaleur latente. Elle sera donc appelée transition du 2<sup>ème</sup> ordre. Nous en déduisons la température de transition vitreuse du polymère (Résine Epoxy) qui est d'environ  $T_g = 365^\circ\text{C}$ , à cette température le polymère passe de l'état caoutchouteux à l'état solide rigide.

Ensuite nous observons un pic endothermique qui représente la température de fusion du polymère,  $T_f = 418,5^\circ\text{C}$  ; celle-ci est une transition du 1<sup>er</sup> ordre car elle est caractérisée par une chaleur latente.

On remarque l'absence du pic exothermique qui représente la température de cristallisation  $T_c$ , ceci veut dire que notre composite est amorphe ou semi cristallin.



**Figure. III. 5** Courbe DSC de la fibre d'Alfa, du composite Epoxy/Verre et du composite hybride Epoxy/Verre/Alfa

Dans le cas du composite hybride, on obtient deux pics endothermiques aux températures 380.4°C et 433.5°C avec une légère augmentation. La proximité des températures Tg et de la température de cristallinité de la fibre d'Alfa a causé un chevauchement des pics, ce qui explique le fait qu'on obtienne deux au lieu de trois.

### III. 6 Etude du comportement mécanique

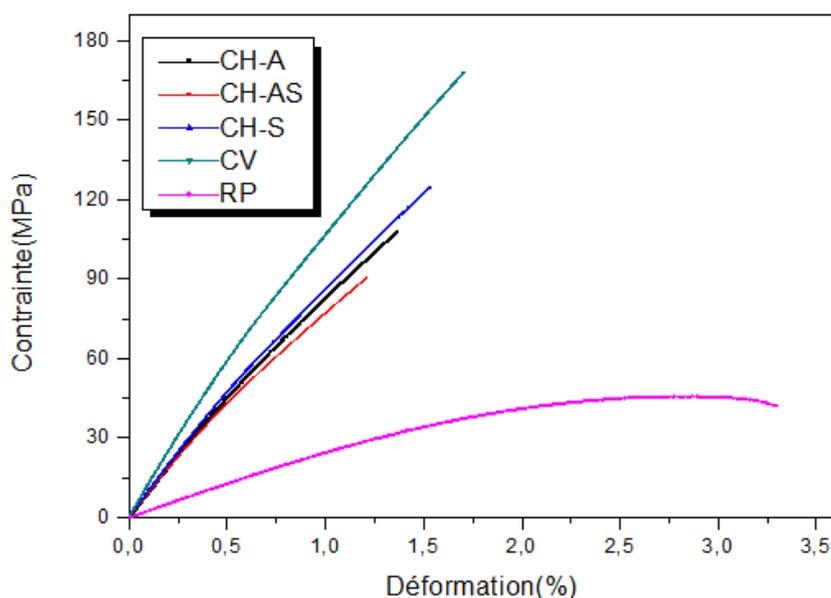
#### III .6. 1 Comportement en traction

Le comportement mécanique d'un matériau composite dépend essentiellement de la nature de la matrice et de la fibre, ce taux de fibres ainsi que de la qualité de l'adhésion interfaciale Fibres/Matrice. La figure III.6 rassemble les courbes typiques contrainte-déformation en traction de la matrice Epoxy et des quatre composites CV, CH-A, CH-S et CH-AS.

Le graphe nous montre que tous les composites testés ont un comportement élastique fragile où la déformation demeure proportionnelle à la contrainte jusqu'à la rupture. Ce comportement en traction de ces composites semble être gouverné par le comportement des deux types de fibres Verre et Alfa qui présentent individuellement un comportement également fragile.

En revanche, la courbe de traction de la résine pure présente un comportement linéaire suivi d'un comportement non linéaire jusqu'à la rupture.

L'effet bénéfique des fibres comme renforts d'un matériau composite à matrice Epoxy est clairement établi au vu de la résistance élevée à la déformation des quatre types de composites CH-A, CH-AS, CH-S, et CV par rapport à la résine pure. Cela est dû aux valeurs plus élevées de la résistance mécanique des fibres et la forte adhésion des deux types de fibres avec la matrice Epoxy.



**Figure. III. 6** Superposition des courbes de traction des composites CH-S, CH-AS, CH-S, CV, RP

Il est remarquable de constater que le composite renforcé par les fibres de verre CV est le plus résistant par rapport aux composites hybrides cela explique le fait que les fibres synthétiques ont une résistance meilleure que les fibres végétales, sachant que tous les composites ont le même taux de fibre.

Les composites hybrides, quant à eux, ont des résistances importantes assez proches à celles du composite synthétique, mais cette résistance varie d'une architecture à une autre.

Les composites hybrides avec stratification symétrique CH-S possèdent le module de Young et la résistance à la traction les plus élevés par rapport aux autres types de composites hybrides. Le composite hybride avec stratification alternée CH-A (VAVAVAV) est légèrement moins résistant que le composite CH-S (VV-AAA-VV). En revanche les composites avec stratification asymétrique CH-AS (AAA-VVVV) sont les moins résistants par rapport aux autres types de composites.

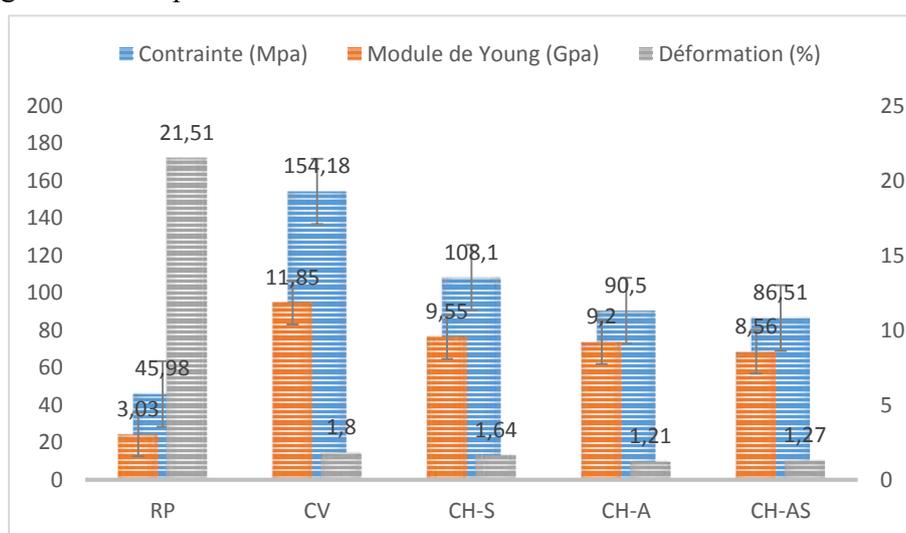
Des observations similaires ont été établies dans la littérature sur l'effet de l'architecture du renfort sur les propriétés des composites hybrides, nos résultats sont en concordance avec ceux de Dalbehera et Acharya [22], où ils ont eu une contrainte à la rupture maximale élevée dans le cas de l'architecture [ G J J G ] qui est l'homologue de CH-S par rapport à l'architecture [ G J G J ] qui est l'homologue de CH-A. De même pour le module d'Young, où on remarque la même valeur pour [ G J J G ] et [ G J G J ] qui explique la proximité des modules d'Young obtenus dans CH-A et CH-S [23].

Le tableau III.6 illustre une comparaison des propriétés mécaniques en traction des composites « CV », « CH-A », « CH-S » et « CH-AS » avec d'autres propriétés de composites à renforts hybrides synthétique-végétale, issues de la littérature.

**Tableau. III. 6** Comparaison des propriétés mécaniques en traction des composites hybrides et non-hybrides avec d'autres résultats cités dans la littérature

Composite	Taux de Renfort-Verre-Alfa (%)	Contrainte Max (MPa)	Module de Young (GPa)	Déformation à la rupture (%)
<i>RP</i>	0	45,98±2,89	3,03± 0,58	21,51±18,12
<i>CV</i>	25-80-20	154,18±14,05	11,85±0,47	1,80±0,33
<i>CH-S</i>	25-80-20	108,1±11,24	9,55±0,34	1,64±0,11
<i>CH-A</i>	25-80-20	90,5±7,44	9,20±0,34	1,21±1,12
<i>CH-AS</i>	25-80-20	86,51±38,08	8,56±1,30	1,27±0,49
<b>Epoxy/Glass/jute</b>				
GJGJ	50-50	40,04	2,95	-
JGGJ	50-50	36	2,41	-
GJJG [23]	50-50	42	2,95	-
Epoxy/Glass/Sisal [23]	-	68,55	-	-

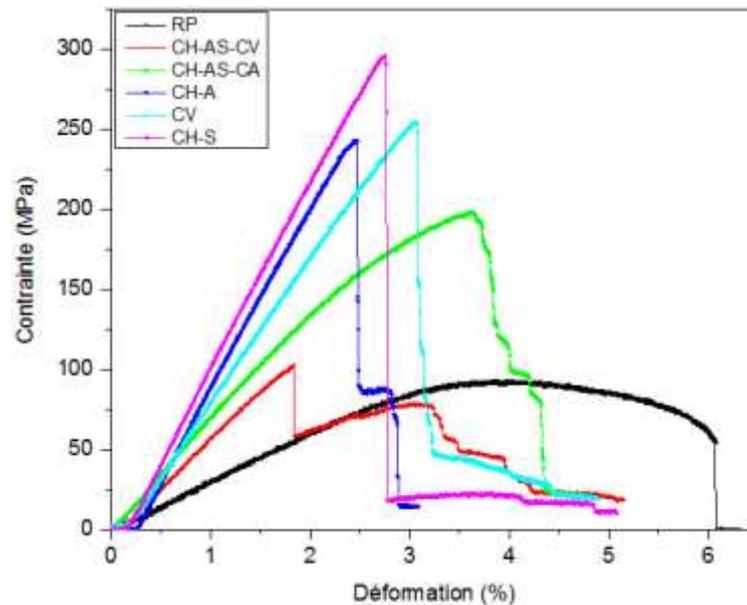
Pour résumer les principales conclusions sur le comportement en traction des cinq types de matériaux composites et sur l'effet de l'hybridation, nous avons rassemblé sous forme d'histogrammes les résultats des propriétés mécaniques en traction de la résine Epoxy et des quatre composites « CV », « CH-A », « CH-S » et « CH-AS » (figure III.7), Ces propriétés concernent la contrainte à la rupture, le module d'Young et le taux de déformation à la rupture, Les résultats sont la moyenne de cinq essais pour chaque type de composite, les barrettes sur chaque histogramme indiquent les barres d'erreur.



**Figure. III. 7** Propriétés mécaniques en traction de la résine Epoxy et des quatre composites

### III .6 .2 Comportement en flexion

La figure III.8 rassemble les courbes typiques contrainte-déformation en flexion de la résine Epoxy et les composites « CH-AS », « CH-A », « CV », « CH-S »,



**Figure. III. 8** Superposition des courbes en flexion de la résine Epoxy et des quatre composites

Les quatre courbes typiques de flexion des composites « CH-AS-CV, CH-A, CH-S, CV » montrent un comportement élastique fragile où la déformation demeure proportionnelle à la contrainte jusqu'à la rupture, Ce phénomène est dû essentiellement à l'emplacement des fibres de verre qui sont en contact avec la force appliquée,

Ceci n'est pas le cas pour la courbe de flexion du composite "CH-AS-CA" qui montre une zone linéaire jusqu'à 1,81% de déformation suivie d'une zone non linéaire jusqu'à la rupture de composite,

L'ensemble des composites hybrides et non-hybrides sont caractérisées par un taux de déformation à la rupture de l'ordre de 1,84%, 2,48%, 2,75%, 3,07%, 3,63 % pour respectivement « CH-AS-CV, CH-A, CH-S, CV, et CH-AS-CA »

Le tableau III.7 rassemble les valeurs moyennes avec l'écart type de la contrainte maximale en flexion, module d'Young et taux de déformation pour la résine pure et les composites, Le nombre d'essais de flexion réalisés est de cinq pour la résine pure et pour chaque architecture,

On a ajouté quelques résultats d'autres composites hybrides cités dans la littérature afin d'apprécier et discuter les caractéristiques de nos composites en flexion,

**Tableau. III. 7** Comparaison des propriétés mécaniques en flexion de la résine Epoxy et des quatre composites avec celles citées dans la littérature

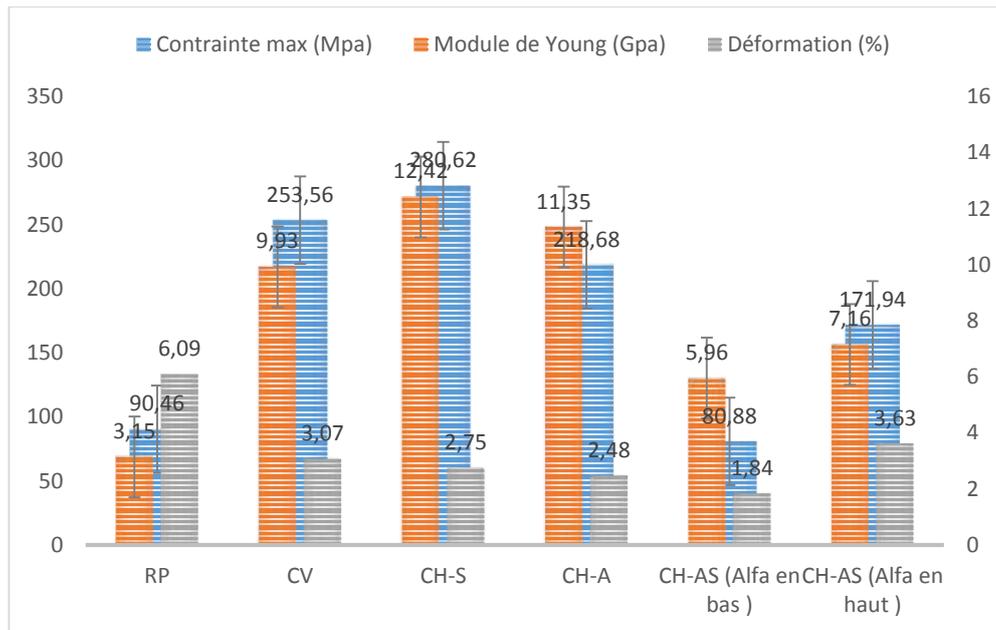
Composite	Taux de Renfort-Verre-Alfa (%)	Contrainte Max (MPa)	Module de Young (GPa)	Déformation à la rupture (%)
<i>RP</i>	0	90,46±2,40	3,15±0,26	6,±2,26
<i>CV</i>	25-80-20	253,56±12,18	9,93±0,26	3,07±0,43
<i>CH-S</i>	25-80-20	280,62±20,90	12,42±0,41	2,75±0,96
<i>CH-A</i>	25-80-20	218,68±10,20	11,35±0,82	2,48±0,82
<i>CH-AS-CV</i>	25-80-20	80,88±21,94	5,96±1,04	1,84±1,05
<i>CH-AS-CA</i>	25-80-20	171,94±12,13	7,19±1,13	3,63 ±0,82
<b>Epoxy/Glass/jute</b>				-
GJGJ	50-50	170	4,029	
JGGJ	50-50	210	9,085	
GJJG [23]	50-50	241,3	13,543	

A noter que le renfort de la matrice Epoxy par les fibres d'Alfa et de verre apporte un gain significatif pour la contrainte maximale et module de Young, En revanche, on enregistre une forte baisse sur le taux de la déformation de rupture par rapport à la résine pure de l'ordre de 38,8%, 35,61%, 52%, 24,11% et 31,70% respectivement pour les composites « CV », « CH-S », « CH-A », « CH-AS-CV » et « CH-AS-CA »

Les résultats obtenus en flexion sont en concordance avec celles de Dalbehera et Achrya [10] où ils ont eu une contrainte maximale pour l'architecture alternée [G J G J] qui est analogue à « CH-S », Ainsi que pour le module d'Young où on remarque que la valeur la plus élevée est attribuée pour l'architecture [G J J G] ce qui le même cas pour « CH-S »[23].

Les principales propriétés mécaniques en flexion de la résine Epoxy pure et des quatre composites sont résumées sur l'histogramme de la figure III.10.

Ces propriétés concernent la contrainte maximale en flexion, le module d'Young et le taux de déformation de rupture.



**Figure. III. 9** *Propriétés mécaniques en flexion de la résine Epoxy et des quatre composites*

En tenant compte des propriétés mécaniques exploitées précédemment sur les composites hybrides, on peut déduire que le comportement en terme de rigidité dépend de l'architecture choisie, et en comparant avec la résine Epoxy pure, les deux architecture hybrides « CH-A », « CH-S » et le composite non-hybrides « CV » présentent les meilleurs contraintes maximales et modules d'Young avec une diminution du taux de déformation de rupture.

### III. 7 Valorisation du travail

Afin de valoriser le travail réalisé sur les composites hybrides de la fibre d'Alfa en application industrielle, on a conçu deux profils d'ailes (Figure III.10) en se basant sur les résultats obtenus. Selon les résultats des comportements mécaniques des composites, on a choisi celles qui présente les meilleures propriétés mécaniques.

Pour cela on a opté pour le moulage sous vide, en utilisant la résine époxy et les tissus de la fibre de verre et de la fibre d'Alfa comme matériel.



**Figure. III. 10** Profils d'ailes , (a) Architecture CH-S , (b) Architecture CV

## Conclusion Générale

Les travaux de cette étude constituent une contribution au grand axe de recherche et développement des matériaux composites hybrides à renfort synthétique et végétal, devenus un enjeu important au vu de leur utilisation dans divers secteurs industriels notamment l'automobile et l'aéronef. La fibre végétale « *Stipa Tenacissima* » connue sous le nom d'Alfa disponible dans la région de M'sila (Algérie) et la fibre synthétique Fibre de verre ont été utilisées pour élaborer des matériaux composites 3D à matrice époxy. En se référant aux données bibliographiques, notre étude sur la combinaison des deux fibres « *Stipa Tenacissima* » et la fibre de verre est considérée comme une première expérience.

Les différentes caractérisations physico-chimiques et mécaniques réalisées sur les matériaux composites permettent de faire les conclusions suivantes :

- Grâce à la faible densité de la fibre d'Alfa, les plaques hybrides, quelle que soit leur architecture sont plus légères que la plaque renforcée en fibre de verre.
- La fibre « *Stipa Tenacissima* » demeure stable thermiquement jusqu'à 262°C, 342°C et 339°C pour, respectivement, composite verre et composite hybride.
- Le composite verre et la résine pure sont les moins absorbants, et dans le cas des composites hybrides, le composite qui absorbe le moins d'eau est celui dont les couches d'Alfa sont à l'intérieur.
- L'analyse de la fibre végétale par la technique ATR-FTIR confirme la présence de la cellulose, hémicellulose et de la lignine, la résine Epoxy est composée chimiquement de cycles benzène et des esters.
- Les tests de flexion ont montré que le composite CH-S est le plus rigide, suivi par le composite CH-A en termes de module de Young et par le composite CV en terme de contrainte. Les deux composites CH-AS présentent un comportement mécanique fragile, où CH-AS-CA est moins fragile que CH-AS-CV et c'est grâce aux couches de fibre de verre qui sont vers le bas. Quant à l'Epoxy pure, elle est la moins résistante.

- Les tests de traction ont montré que le composite CV est le plus résistant et qui présente le meilleur comportement élastique suivi par les composites hybrides CH-S, CH-A et CH-AS respectivement.

Comme perspectives, il serait intéressant d'étudier les aspects suivants :

- Vieillessement naturel et artificiel des composites hybrides réalisés en comparaison avec le composite à base de fibres de verre.
- Traitement chimique de la fibre d'Alfa et comparaison avec la fibre non traitée en tant que renfort.
- Conception d'un nouveau dispositif pour le tissage sur l'échelle industrielle pour rendre le travail plus pratique et rapide et afin d'obtenir des tissus homogènes.
- Faire l'étude sur des taux de fibres végétales plus grands .

## Bibliographie

- [1] LEDRU, Younes, Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronotiques. 203p. Thèse de doctorat : mécanique : Paris : Ecole Centrale, 2009.
- [2] HAMMICHE, Dalila. Synthèse d'un nouvel agent de couplage PVC-g-MA et son utilisation dans les composites PVC/Alfa. 148p. Thèse de magister : Procédés : Béjaia, Université abderrahmane MIRA : 2010.
- [3] BELOUADAH, Zouheyr. Contribution a l'étude d'endommagement et du comportement mécanique des matériaux composites renforcés par des fibres végétales existants dans la région du HODNA. 128p. Thèse de doctorat : mécanique : Tizi Ouzou, Université Mouloud Mammeri : 2017.
- [4] BERTHELOT, Jean-Marie. Mécanique des Matériaux et Structures Composites. Le Mans, 2013. 667p.
- [5] BOUZUITA, Sofian. Optimisation des interfaces fibre/matrice de composites à renfort naturel. 192p. Thèse de doctorat : mécanique : Lyon, Ecole Centrale : 2011.
- [6] ELOUAER, Abdelmounem. Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales. 277p. Thèse de doctorat : mécanique : Reims, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2011.
- [7] HAMMOUR, Noura. Etude de l'introuction des fibres d'Alfa de tailles différentes dans une matrice polychlorure de vinyle en vue d'améliorer ses propriétés physio-mécaniques. 133p. Thèse de magister : procédés : Béjaia : Université Abderrahmane Mira : 2010.
- [8] GHARBI, Abderrezak. Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage en utilisant des capteurs piézo-électriques. 149p. Thèse de doctorat : mécanique : Constantine : Université Mentouri : 2005.
- Mohd Yuhazri Yaakob, Mohd Amirhafizan Husin et Loh Yen Ching<sup>1</sup> et Hearyip Sihombing, ,
- [9] «Potential of Development New Weave Pattern Design using Glass Fiber and Kenaf Fiber for Intrapl,» International Journal of Integrated Engineering , vo., 7, n°2, 2015.
- [10] NTENGA, Richard. Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique des fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites. 184p. Thèse de doctorat : mécanique : Clermont-Ferrand : Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2007..
- [11] K. ABDUL, Bhat , M. Jawaid , A. Zaidon , D. Hermawan , Y.S. Hadi Bamboo fibre reinforced biocomposites ,of [www.elsevier.com/locate/matdes](http://www.elsevier.com/locate/matdes) 2012 , Vol 42, p 353–368.

- [12] Chegiani, Faissal. Analyse multi échelle de l'usinage des matériaux bio sources : Application aux agrocomposites. 157p. Thèse de doctorat : procédés : Paris : 'Ecole Nationale Supérieure d'arts et métiers, 2016.
- [13] <http://aviondufutur.emonsite.com/pages/composites/qu-est-ce-qu-un-composite.html>, avril 2019.
- [14] Granitex, Notice technique, Alger, 2019
- [15] <https://tipsfordrones.com/can-drones-fly-in-rain>, Mai 2019..
- [16] <https://www.usherbrooke.ca/ccm/francais/les-techniques/proprietes-physiques/calorimetrie-a-balayage-differentielle-dsc>, Juin 2019.
- [17] DALLEL, Mohammed. Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil. 145p. Thèse de doctorat : procédés : Mulhouse : Université de Haute Alsace-mullhoise, 2012.
- [18] Sathishkumar, "characterization of natural fibers and composites" chez Journal of reinforced plastics and composites , 2013.
- [19] V, fiore et A, valenza, "Characterization of a new natural fiber from Arundo donax L as potential reinforcement of polymer composites" Carbohydrate polymers, 2014.
- [20] M. Haameem J.A., M.S. Abdul Majid M. Afendi, H.F.A. Marzuki. Fahmi , A.G. Gibson. Mechanical properties of Niper grass Fiber/polyster composites. 2016, vol. 136, 1–10.
- [21] Ersan Puntun, Basak Burcu Uzun et Ayse Eren Puntun J, Anal, Appl, 2007, vol, 79..
- [22] Soma Dalbehera et S.K Acharya. Mechanical properties of natural fiber reinforced woven jute-glass hybrid epoxy composites, Polymer Science and Technology" 2014 .
- [23] M. Ramesh, K. Pkanikumar et K. Helachandra Reddy, "Comparative Evaluation on Properties of Hybrid Glass Fiber-Sisal/Jute Reinforced Epoxy Composites, Procedia Engineering" N°51, 2013 .

## Annexe

## NOTICE TECHNIQUE

3 2 2 6

## MEDAPOXY STR

Classification selon la norme AFNOR NFT36 005 :  
Famille 1 ; Classe 6b

Revêtement époxydique  
par stratification

## DESCRIPTION

Le **MEDAPOXY STR** est une résine époxy destinée à la stratification sur différents supports. Le **MEDAPOXY STR** se présente sous forme de kit pré dosé de 2 composants :

- Élément A : Résine
- Élément B : Durcisseur

## DOMAINES D'APPLICATION

- Stratification à la fibre de verre des réservoirs ou bassins contenant des produits chimiques (acides, bases, solvants, pétrole, etc.)
- Vitrification (sans fibre de verre) des bassins et réservoirs en béton et en acier.

## PROPRIÉTÉS

- Très bonne tenue aux produits chimiques (nous consulter)
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier
- Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre

## CARACTÉRISTIQUES

- Rapport pondéral :  
Élément A : 1kg  
Élément B : 0,666 kg
- Densité (ISO758) : .....1,1 ± 0,05
- Viscosité(NF T76-102) : ..... 11000 mPaS à 25 ° C
- DPU (NFP18 810) : ..... 1h 15mn à 20 °C et 65% HR
- Temps de durcissement à 20 °C et 65% HR  
Hors poisse : ..... 6 h  
Dur : .....16 h
- Rc (NA 427) : .....>70 MPa
- Rf (NA 234) : .....>25 MPa
- Adhérence sur béton (NFP18 858) : .....>3 MPa
- Durée de mise en service .....10 j 20°C

## MODE D'EMPLOI

## Conditions d'utilisation :

- Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 30°C.
- L'humidité relative de l'air doit être inférieure à 80%.

## Préparation du support (NF P 74-203/DTU 59-3):

## Support béton ou mortier :

- Les bétons ou mortiers 'supports' doivent avoir au moins 28 jours d'âge.
- Le support doit être sec, propre et débarrassé des parties non adhérentes. Toutes traces d'huiles, graisses, peintures, laitance ou autres souillures doivent être éliminées. Nettoyer soigneusement et dépoussiérer avant l'application du primaire **MEDAIMPRÉGNATION**

## Supports métalliques :

- Décaper (mécaniquement ou chimiquement)
- Puis dépoussiérer les surfaces avant l'application d'une résine anti-corrosion **MEDAPOXY PRIMAIRE AC**

## Mélange :

- Procéder au mélange des deux composants une fois que la préparation des supports soit terminée.
- Préparer que la quantité de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
- Il est très important de bien remuer les deux éléments constituant le **MEDAPOXY STR** jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.
- Verser l'**élément B** (durcisseur) dans l'**élément A** (résine).
- Vider complètement les récipients afin de respecter le rapport du mélange.
- Remuer pendant 3 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation. Raclez plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de conformance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger  
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82  
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23  
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



149



