

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

faculté de technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Etude d'un composite sergé verre-époxy pour construction navale

Présenté par : BENCHETTAH SAIF EDDINE

Encadreur : Dr MNAÏL YOUNES

Grade MC-A- Université Badji Mokhtar ANNABA

Jury de Soutenance :

BEY KAMEL	Professeur	Université D'Annaba	Président
MENAIL YOUNES	Docteur	Université D'Annaba	Encadrant
BENAMIRA MOHAMED	Docteur	Université D'Annaba	Examineur
BOUARICHA AMOR	Docteur	Université D'Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

## ***Remerciements***

Je tiens à remercier Dieu qui m'a donné le courage pour réaliser ce modeste travail et le mener jusqu'au bout. Aussi à ne pas oublier de remercier ma famille, père, mère et frères de leurs aides et soutien morale et leurs encouragements.

Ensuite, pour ce qui a trait au long déroulement de cette recherche, je ne peux pas manquer de remercier très vivement en premier lieu le **Dr. Menail Younès**, directeur de ce mémoire, pour son encadrement, sa compréhension et son soutien.

Je souhaite également remercier les membres du jury de mon mémoire composé de : **Pr. BEY KAMEL** professeur au département de génie mécanique, Université D'ANNABA, **Dr. BENAMIRA MOHAMED** Docteur au département de génie mécanique, Université D'ANNABA, et **Dr. BOUARICHA AMOR** Docteur au département de génie mécanique, UNIVERSITE D'ANNABA, pour l'importance qu'ils ont accordé à mon travail en acceptant d'être membre de ce jury et pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier mademoiselle Siham du laboratoire d'essais mécaniques du département de métallurgie au bloc E de l'Université d'Annaba. Sans oublier les enseignants, personnels technique et administratif et les étudiants du département de Génie Mécanique pour leur collaboration et leur compréhension ainsi qu'à tous ceux qui me connaissent de près ou de loin, je leur exprime ma reconnaissance et je leur offre ce travail

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail,*

*À mes chers parents, pour leur soutien leur patience et sacrifices pour me  
voir réussir.*

*À mes frères et ma sœur, qui m'avez toujours soutenu et encouragé.*

*À mes aimable amis, collègues d'étude qui m'ont accompagné durant mon  
chemin d'études supérieures*

*Sans oublier mon cher binôme Remdani Mohamed Ali*

BENCHETTAH Saif Eddine

## ***Résumé***

Le présent travail est le fruit de plusieurs années de formation à l'université d'Annaba, et de plusieurs essais mécaniques et microscopiques au sein des départements de l'université d'Annaba et de plusieurs mois de préparations et d'interprétation des résultats.

Pour cela nous avons réalisé des éprouvettes en matériaux composites fibres de verre sergé, et résine époxy. Puis nous les avons découpés et préparés au niveau du département du Génie Mécanique de l'université d'Annaba. L'essai mécanique (traction) a été réalisé au sein du département de métallurgie au bloc E.

Et enfin le suivi par microscopie électronique a été réalisé au sein de l'Ecole Nationale Supérieure de Mines et Métallurgie ENSMM d'Annaba.

Nous avons réalisé deux éprouvettes (verre/époxy) dans chaque éprouvette a une longueur différente, pour les essais de traction.

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction universelle avec une vitesse de 1 mm/min et ont été menés sur une machine à essais Rockwell. Les résultats obtenus ont été traité par Excel.

Les résultats de la microscopie électronique ont montré une morphologie très hétérogène avec des décohésions et des délaminages.

Ses résultats sont le fruit de la nature des fibres de verre et surtout de la technique de moulage.

# Table des matières

- ❖ Remerciements
- ❖ Dédicace
- ❖ Résumé
- ❖ Introduction général

---

## Chapitre I – Etude théorique

---

I-1-introduction : .....	1
I-2-Définition d'un matériau composite .....	1
I-2-1- Caractéristiques générales .....	2
I-3- La composition d'un matériau composite.....	2
I-3-1- 1Les renforts.....	3
I-3-1-1- Les divers types de fibres .....	5
I-3-2-La matrice .....	8
I-3-2-1 Les résines .....	8
I-3-2-1.1-Les résines thermodurcissables : .....	9
I-3-2-1.2-Les résines thermoplastiques .....	13
I-3-2-1.3-Les résines thermostables .....	13
I-4- Les charges et les additifs .....	14
I-4-1- Introduction.....	14
I-4-2- Les charges .....	14
I-4-2-1-Charges renforcâtes .....	14
I-4-2-2-Charges sphériques .....	14

I-4-2-3-Charges non sphériques.....	16
I-4-2-4-Charges non renforcées.....	16
I-4-2-5-Charges de faible coût.....	16
I-4-2-6- Charges ignifugeantes.....	17
I-4-2-7-Charges conductrices et antistatiques.....	17
I-4-3-Les additifs.....	17
I-4-3-1-Lubrifiants et agents de démoulage.....	17
I-4-3-2-Pigments et colorants.....	17
I-4-3-3-Agents anti-retrait et agents de fluage.....	18
I-4-3-4-Agents anti-ultraviolets.....	18
I-5-Essais de traction.....	18
I-5-1-Étude des caractéristiques classiques :.....	19
I-5-2-Caractéristiques fondamentales :.....	20
I-6- Différents endommagements des matériaux composites.....	20
I-6-1-Fissuration matricielle.....	21
I-6-2-Délaminage :.....	22
I-6-3- Décohésion fibre-matrice :.....	22
I-6-4-Rupture des fibres :.....	23
I-7-Endommagement en fatigue des composites stratifiés tissés à armure simple.....	23

---

## Chapitre II – Mise en forme

---

II Introduction : .....	25
II-1- Moulages sans pression.....	25

II-2- Moulage au contact .....	25
II-3- Moulage par projection simultanée .....	26
II-4- Moulage sous vide .....	27
II-5- Moulage par compression .....	28
II-5- 1-Moulage par injection de résine .....	28
II-5-2-Moulage par compression à froid (figure 2.5.1) .....	29
II-5-3-Moulage par compression à chaud .....	29
II-5-4Moulage par injection .....	30
II-6-Moulage en continu.....	31
II-7-Moulage par pultrusion .....	32
II-8-Moulage par centrifugation.....	33
II-9-Moulage par enroulement filamentaire.....	34
II-9-1-Principe.....	34
II-9-2-Enroulement circonférentiel .....	35
II-9-3-Enroulement hélicoïdal .....	35
II-9-4-Enroulement polaire .....	36
II-10-Structure des matériaux composites .....	37
II-10-1Introduction.....	37
II-10-2Les monocouches .....	37
II-10-3-Les stratifiés.....	38
II-10-4-Composites sandwiches .....	39
II-10-4-1-Autres architectures.....	40
II-10-4-1-1Plastiques renforcés.....	40

II-11-Secteurs industriels utilisateurs .....	41
II-11-1 Aéronautique et espace .....	41
II-11-1-1- Aviation .....	41
II-11-1-2-Espace .....	42
II-11-2-Construction navale .....	43
II-11-3-Sports et loisirs .....	44
II-11-4-Automobile.....	45
II-11-5-Génie civil .....	46

---

## Chapitre III- Matériel et méthodes expérimentale

---

III-1-La machine de traction : .....	47
III-2-Réalisation des éprouvettes en fibre de verre d'armure sergé et résine époxy.....	47
III-2-1-Les constituants de base : .....	48
III-2-1-1-Tissu de verre sergé : .....	48
III-2-1-2-Résine époxy : .....	48
III-2-1-3-Additifs : .....	49
III-2-2-L'éprouvette : .....	50
III-3-Normes utilisées : .....	51
III-4-Résultats des essais de traction des éprouvettes : .....	54
III-4-1-Discussion : .....	55
III-5-Essais de traction comparaison entre éprouvette verre sergé/époxy et verre unidirectionnel/époxy : .....	56
III-5-1-Discussion : .....	57
III-6-Conclusion : .....	58

---

## Chapitre IV : Etude microscopique des faciès des endommagements

---

IV-1 Microscopie électronique :.....	59
IV-2 Microscopie après tronçonnage.....	60

---

## Chapitre V – Hygiène et sécurité du travail

---

V-1-introduction.....	63
V-2-Hygiène et sécurité du travail .....	65
V-2-1-La certification ou l’agrément des hygiénistes du travail .....	65
V-3-Consignes de sécurité.....	66
IV-3-1-LES CONSIGNES DE SÛRETÉ ET DE SÉCURITÉ .....	66
IV-4-les risque chimiques des matériaux composites .....	69
IV-4-1-Mesures de protection individuelle .....	69
IV-4-1-1-Définition des équipements de protection individuelle (EPI) : .....	69
IV-4-1-2-Protection individuelle.....	70
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>72</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>73</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>75</b>

## Liste de figures

FIGURE 1.1 : Constituants d'un matériau .....	2
Figure 1.2 – Graphe non exhaustif des renforts .....	3
FIGURE 1.3 : Les différentes types de renforts .....	3
FIGURE 1.4 : Les principaux types d'armatures 2D de renforts de fibres continues.....	5
Figure 1.5 – Les différentes matrices des matériaux composites .....	8
Figure 1.6 : courbe contrainte déplacement en traction .....	19
Figure 1.7 : Fissures transverses dans un stratifié $[0_n, 90_m]_s$ .....	21
Figure 1.8: Rupture de la fibre .....	23
Figure 2.9 : moulage au contact.....	26
FIGURE 2.10. Principe du moulage par projection simultanée.....	27
FIGURE 2.11. Moulage sous vide. ....	28
FIGURE 2.12 : Moulage par injection de résine. ....	28
Figure 2.13.1. À froid.....	29
Figure 2.13.2. À chaud.....	29
FIGURE 2.13. Principe du moulage par compression. ....	29
FIGURE 2.14. Moulage par injection. ....	31
FIGURE 2.15. Moulage en continu de plaques.....	32
FIGURE 2.16. Moulage en continu de panneaux ondulés. ....	32
FIGURE 2.17. Moulage par pultrusion.....	33
FIGURE 2.18. Moulage par centrifugation. ....	34
FIGURE 2.19. Principe de l'enroulement circonférentiel. ....	35
FIGURE 2.20. Principe de l'enroulement hélicoïdal. ....	36

FIGURE 2.21. Enroulement hélicoïdal continu.....	36
FIGURE 2.22 : Tissages Multidirectionnels volumiques 3D.....	37
FIGURE 2.23 : Matériau composite stratifié à plis UD .....	39
Figure 2.24 Matériaux sandwiches à âmes pleines .....	40
FIGURE 2.25. Matériaux sandwiches à âmes creux .....	40
Figure 2.26 : Part des composites dans la masse de structure (EADS,9 A.D.) .....	42
Figure 2.27: Assemblage d'un bras de multicoque océanique 60 pieds ORMA. Fabrication carbone – nid d'abeille – époxy (source Mer et Projets) (Casari P.,2008).....	43
Figure 2.28 : Fabrication de canne à pêche par drapage étuvé (ReyneM.,1998).....	44
Figure 2.29 : Exemple de composite stratifié (fibres de verre et de carbone).....	45
Figure 2.30: Exemple de renforcement d'une dalle de plancher (Luyckx J.,1999).....	46
Figure 3.31 : La machine de traction Zwick /Roell/Z050.....	47
Figure 3.32 : Tissu verre sergé.....	48
Figure 3.33 : résine époxy .....	49
Figure 3.34: durcisseur .....	50
Figure 3.35 : Dimensions de l'éprouvette de traction .....	50
Figure 3.36 : Eprouvettes pour l'essai.....	51
Figure 3.37 : Sections de différentes éprouvettes proposées pour l'essai de traction .....	53
Figure 3.38 : Eprouvettes avant et après rupture .....	54
Figure 3.39: Courbes contrainte allongement des éprouvettes .....	55
Figure 3.42 : Courbes contrainte allongement des éprouvettes verre sergé et unidirectionnel ....	57
Figure 4.43: l'outil microscope électronique à balayage MEB .....	59
Figures 4.44: Coupe longitudinale (a), (b) et (c) .....	61

Figures 4.45 : Coupe transversale (a), (b) et (c) .....	62
Figure 5.46 Interactions entre l'individu et l'environnement.....	64
Figure 5.47: exemples Panneaux consignes de sécurité .....	68
Figure5.48 : combinaison de laboratoire.....	70
Figure5.49 : lunette et casque de sécurité .....	70

### **Liste des tableaux**

Tableau 3-1 : caractéristique mécanique de verre sergé .....	48
Tableau 3.2 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes .....	56
Tableau 3.3 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes verre sergé etunidirectionnel.....	57

## ***Introduction générale***

La fabrication de structures et des pièces en composites à base de fibres de verre et de résine époxyde, qui ne se faisait jusqu'à un passé très récent qu'à l'usine de Chlef (Algérie), commence à se développer à travers notre pays en général et les régions côtières en particulier. Ainsi, plusieurs moyennes entreprises se sont spécialisées dans la fabrication et la réparation des bateaux de pêche et de loisirs (construction navale). La fabrication se résume à la pose de coupons en fibres de verre (sergé ou unidirectionnel) sur des moules puis de les imbiber de résine. Plusieurs couches sont ainsi stratifiées jusqu'à avoir l'épaisseur voulue de la pièce ou de la structure, puis laissées sécher, dans des hangars à l'air ambiant. De plus, la pose est faite en général par la main d'œuvre non qualifiée et parfois instable qui n'assure pas de mise en place selon une procédure établie et stricte. De ce fait, le matériau peut avoir des singularités altérant ainsi le transfert des efforts entre la matrice et le renfort. C'est pourquoi, les caractéristiques physiques et mécaniques du produit fini sont très dispersées et varient d'une manière aléatoire d'un point à un autre de la surface de la structure. Et dire qu'avec un mode de fabrication aussi médiocre, ce produit est censé résister aux conditions très sévères auxquelles il est soumis sans qu'on ait pris la peine de vérifier son bon comportement ne serait-ce qu'à travers de simples essais de caractérisation mécanique.

Par la présente étude, nous voulons rapprocher l'université du monde professionnel à travers une contribution dans la prise en charge des problèmes techniques que connaît le secteur industriel national. Pour cela, nous cherchons à déterminer l'influence des conditions d'élaboration sur le durcissement de la résine et de remonter par la suite au comportement mécanique des composites stratifiés verre /époxy utilisés par nos fabricants de bateaux.

---

## *Chapitre I – Etude théorique*

---

### **I-1-introduction :**

Au cours de ces dernières années, l'usage des matériaux composites dans différents secteurs industriels (sport, transports, etc.), ne cesse d'augmenter. Cette croissance est motivée principalement par les nombreux avantages qu'offrent ces composites. Ces avantages sont liés à leur excellente résistance à la corrosion et aux solvants, à leur résistance aux chocs élevée, à leur bonne résistance à la fatigue et à leur rapports résistance/masse et rigidité/masse élevés par rapport aux matériaux traditionnels (alliages, aluminium, etc.).

Ces qualités sont très prisées dans le secteur des transports en particulier aéronautique où un gain de masse associé aux différents équipements et structures se traduit directement par une baisse de la consommation de carburant, et une augmentation de l'autonomie et de la charge transportable.

En outre, l'utilisation de ces matériaux composites apporte aussi une meilleure tenue au feu et une liberté de conception de formes complexes. Ces atouts remarquables ont encouragé leur croissance rapide dans le domaine des transports.

Dans ce chapitre, qui vise à donner les notions de base sur lesquels portent les travaux de la présente thèse, nous présenterons d'abord les matériaux composites dans leur généralité en exposant brièvement leurs caractéristiques principales (définition, constitution, structures, etc.).

### **I-2-Définition d'un matériau composite**

Un matériau composite résulte par définition de l'association, à l'échelle microscopique, d'au moins deux constituants de natures différentes non miscibles avec une forte capacité de pénétration dont les propriétés physiques intrinsèques respectives se complètent avec osmose.

Le nouveau matériau à microstructure hétérogène ainsi constitué, possède à l'échelle macroscopique un ensemble de propriétés physiques, qu'il serait impossible d'obtenir avec chacun de ces constituants pris séparément.

### **I-2-1- Caractéristiques générales**

Un matériau composite est constitué d'une ou de plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue et appelée la matrice, la phase discontinue et appelée le renfort (FIGURE 1.1). Le renfort, qui est une sorte d'armature ou squelette, assure l'essentiel de la tenue mécanique du composite. La matrice, qui joue le rôle de liant, protège le renfort de l'environnement, le maintien dans sa position initiale et assure la transmission des efforts. Par conséquent, les propriétés physiques des matériaux composites résultent des propriétés physiques intrinsèques de ces constituants (matrice et renfort), de leur interaction, de leur distribution, de leur nature, de leur forme, de leur fraction volumique (ou massique), etc.

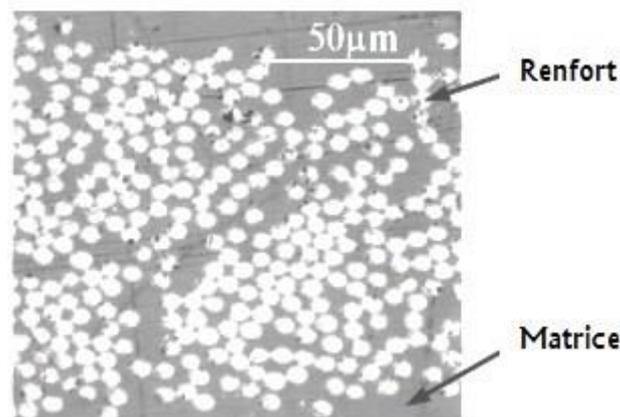


FIGURE 1.1 : Constituants d'un matériau

### **I-3- La composition d'un matériau composite**

Les constituants de base d'un matériau composite sont la matrice et le renfort. Le renfort est fréquemment de forme fibreuse (ou filamentaire) ou sous forme de particules. La matrice est couramment de nature organique ou minérale. Les matrices faisant le plus d'objet de recherches et développements dans l'industrie sont celles de nature organiques (les résines thermodurcissables et thermoplastiques).

Dans certains composites polymères des « charges » et/ou des additifs peuvent être incorporés au sein de la matrice, comme agent anti-UV ou/et pigments de coloration, pour assurer l'adhérence renforts/matrice, pour diminuer les coûts de production, etc.

En outre, ils peuvent aussi modifier considérablement les propriétés mécaniques, thermiques, électriques, magnétiques, etc., de la matrice polymère.

### I-3-1- 1 Les renforts

Les renforts sont majoritairement de nature organique (aramide, etc.) ou minérale (carbone, verre, bore, carbure de silicium, etc.) et de formes diverses. En fonction de leur forme (voir la FIGURE 1.3), ils peuvent être réunis en deux grands groupes : les renforts sous forme de particules (ou de fibres courtes) et les renforts sous forme de fibres longues.

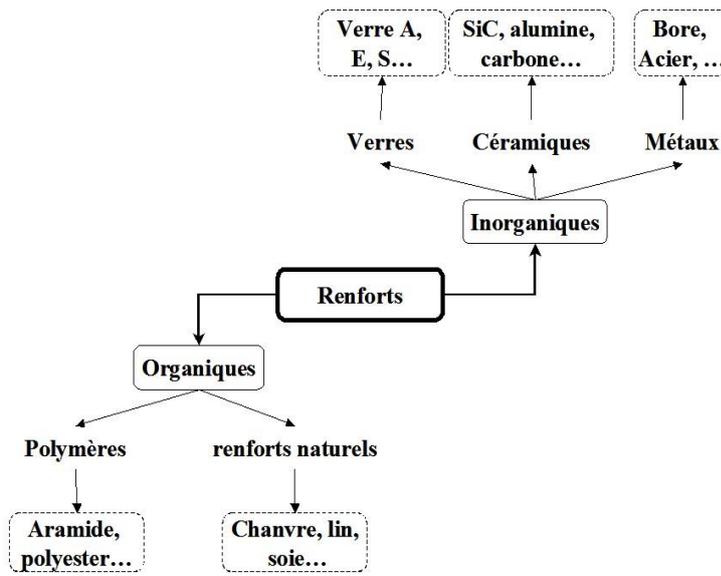


Figure 1.2 – Graphe non exhaustif des renforts

a) **Les renforts en forme de particules ou de fibres courtes** : ils sont généralement constitués de charges conductrices (graphite, nanotubes de carbone, noir de carbone, Au, Ag, Cu, silice, BaTiO3..., par exemple) de formes variées et additifs, ou de fibres discontinues

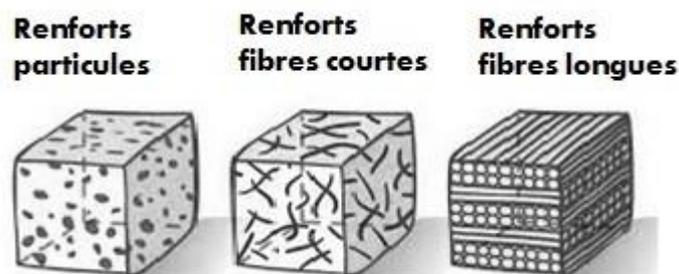


FIGURE 1.3 : Les différents types de renforts

(Fibres courtes, coupées, broyées ...), etc. (FIGURE 1.3), dispersés de manière aléatoire ou orientés dans une matrice. L'usage de ce type de renfort dépend des propriétés physiques

souhaitées, il permet d'améliorer certaines propriétés des matériaux composites ou des matrices polymères (rigidité, tenue en température, etc.). Ils sont aussi utilisés comme charge pour réduire les coûts de production de certains matériaux composites.

b) **Les renforts en forme de fibres longues** : Ils sont continus et, d'ordinaire, en carbone ou en verre, introduits dans une matrice polymère, pour améliorer principalement les propriétés mécaniques du matériau composite global. De surcroît, comme les fibres de carbone sont conductrices de courant électrique, leurs arrangements et leurs orientations dans la matrice permettent d'améliorer les propriétés électriques tout en modulant les propriétés mécaniques, du matériau composite final. Par ailleurs, on peut agir sur l'arrangement et l'orientation des renforts dans des directions privilégiées pour réaliser différentes armures de renforts (2D ou 3D) adaptées aux propriétés physiques souhaitées, allant des renforts placés dans une seule direction, dits Unidirectionnels (UD), à des bidirectionnels (tissés, tressés, ...) et enfin des renforts multiaxiaux. Quelques-unes de ces armures sont représentées sur la FIGURE 1.4. Ces armures sont commercialisées sous forme de nappes (ou plis unitaires) qui peuvent être imprégnées de résine (« pre-pregs »), on parle alors de nappes pré-imprégnées, ou sèches. De ce fait, lors de l'élaboration du matériau composite définitif la matrice (résine polymère, par exemple) vient imprégner les renforts selon le procédé de fabrication (injection, thermocompression, extrusion, ...).

Les armures sont réparties en deux grandes familles :

- **Armures Unidirectionnelles (UD)** : les fibres sont orientées dans une même direction qui sera la direction principale de contrainte. De ce fait, les propriétés physiques sont plus élevées dans la direction principale par rapport aux autres directions (transverses au sens d'orientation des fibres) ;
- **Armures tissées** : elles se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux, obtenues par tissage (bi ou tri directionnel) ou par superposition de nappes unidirectionnelles. Le mode d'entrecroisement des fibres continues caractérise les différents tissus.

On distingue parmi ces tissus (en 2D) : le satin, la sergé, le taffetas, etc.

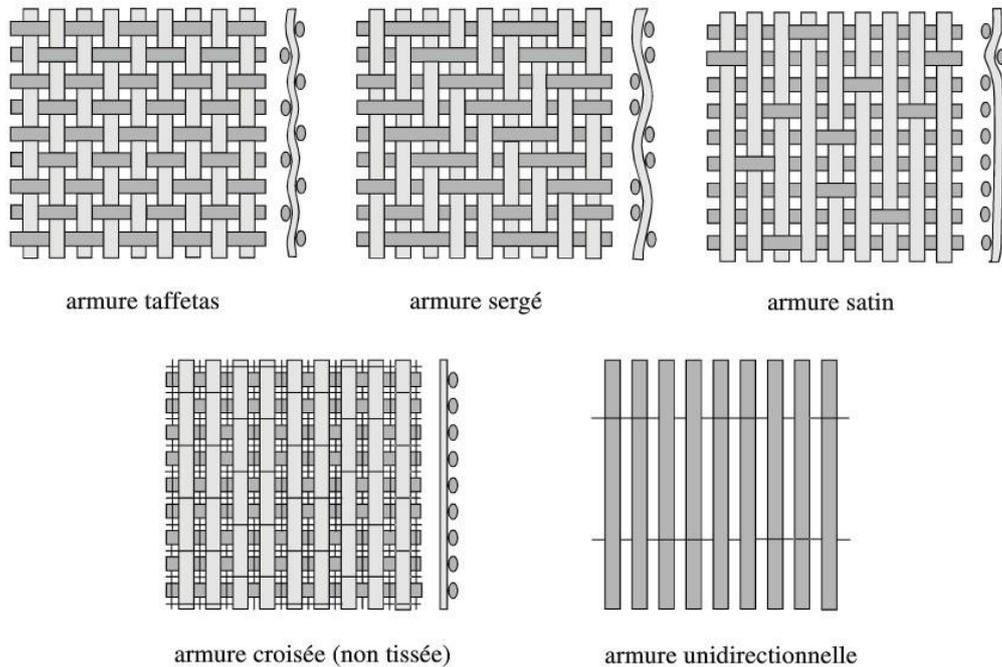


FIGURE 1.4 : Les principaux types d'armatures 2D de renforts de fibres continues

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou en superposant des tissus ou des nappes de fibres de natures différentes. Ainsi, sur la présentation des différents renforts, on retiendra que les matériaux composites à renforts en forme de fibres longues de carbone ont globalement un comportement macroscopique anisotrope.

Ceux à renforts en forme de particules distribuées aléatoirement ont un comportement macroscopique isotrope tandis que ceux orientées suivant une direction privilégiée ont un comportement macroscopique anisotrope.

### I-3-1-1- Les divers types de fibres

#### a) Les fibres de verre

Elles sont obtenues à partir de la silice et d'ajout d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). Les fibres sont classées par type à l'aide d'une lettre en se référant à la propriété majeure apportée par la fibre. Des fibres à bas coût, de type A ou C, aux fibres hautes performances de type H, S, D, en passant par les verres avec ou sans bore.

Une fois la fibre fabriquée lors de l'étape du fibrage, celle-ci subit un ensimage pouvant se présenter sous différentes formes, afin d'améliorer les caractéristiques générales du renfort et d'optimiser la compatibilité entre la fibre et la matrice.

#### b) **Les fibres de carbone**

Leur fabrication est le fruit d'une pyrolyse d'un précurseur organique. Parmi les précurseurs, la rayonne, le brai et le Poly acrylonitrile (PAN) sont distingués. Les fibres dites hautes résistances sont obtenues après une phase de carbonisation, alors que les propriétés des fibres hauts modules apparaissent après graphitisation.

Après la fabrication, un traitement de surface et un ensimage sont appliqués en fonction des applications auxquelles les fibres sont destinées, et selon la matrice en présence. Ces fibres comportent de bonnes propriétés de compression par rapport aux aramides et au verre, et d'excellentes propriétés en traction. La bonne conduction de la chaleur et de l'électricité en fait des fibres utilisées dans les applications de pointe. Pourtant, le carbone reste onéreux et génère un couple galvanique en présence de métaux.

#### c) **Les fibres d'aramide**

Les fibres d'aramide (ou para-aramide) sont plus connues sous leurs noms commerciaux (Kevlar, Nomex, Twaron...) et présentent de très bonnes propriétés de rupture en traction et possèdent une faible densité. Pourtant, elles sont très mauvaises en compression et attestent d'une reprise d'humidité importante. Leur utilisation dans les matériaux composites constitue environ 5% de leur consommation totale. Toutefois leur résistance aux chocs en fait des produits phares pour la conception de gilets par balle et les applications de blindage.

#### d) **Les fibres métalliques**

Elles se distinguent par leur propriétés électriques et thermiques variant suivant la nature des métaux et alliages utilisés (acier, bore...).

#### e) **Les fibres céramiques**

Ces fibres sont destinées à des applications mécaniques hautes températures auxquelles les fibres de verre ne peuvent pas répondre. Parmi celles-ci, les fibres d'alumine, de silice, ou de carbure métallique peuvent être citées.

f) **Les fibres synthétiques thermostables**

Les fibres synthétiques thermostables sont des fibres organiques obtenues par synthèse, et qui conservent leurs caractéristiques mécaniques à températures élevées. Associées à des résines thermostables, elles permettent d'obtenir des matériaux dont les caractéristiques mécaniques en température sont conservées. Les caractéristiques mécaniques de ces fibres sont toutefois nettement plus faibles que celles des fibres usuelles. Elles sont utilisées dans les isolants électriques et thermiques, les protections thermiques : boucliers de missiles, cônes de rentrée de véhicule spatial, etc.

g) **Autres fibres**

Il existe diverses autres fibres utilisées pour des applications particulières. Ces fibres sont généralement à faibles module et contrainte à la rupture, excepté les fibres métalliques. Généralement, leur utilisation est réservée à une recherche de :

- produits à bas prix de revient,
- produits à haute isolation thermique,
- produits à bonne conductibilité thermique ou électrique,
- produits à haute absorption acoustique,

Parmi ces fibres nous avons :

1. **Les fibres d'origine végétale**, telles que le bois utilisé sous forme de fibres orientées, le sisal, le jute, le lin, etc.
2. **Les fibres synthétiques**, telles les fibres polyester (tergal, dacron, térylène, etc.), les fibres polyamides, les fibres polyéthylène, les fibres polypropylène, etc.
3. **Les fibres métalliques**, comme les fibres d'acier, de cuivre, d'aluminium. Ces fibres sont utilisées avec des matrices métalliques pour leurs bonnes conductibilités thermique et électrique et leurs caractéristiques thermomécaniques élevées

### 1-3-2-La matrice

Communément appelée le liant, la matrice a pour rôle de transférer les efforts mécaniques aux renforts et de les protéger de l'environnement extérieur tout en assurant la cohésion de la structure du matériau. Elle apporte une tenue mécanique à la structure et donne la forme finale au produit. Elle est généralement composée de matériaux de nature polymères (résines) organiques ou minéraux.

Ceux de nature organique sont les plus employés, notamment les résines **thermodurcissables** (TD) et les résines **thermoplastiques** (TP).

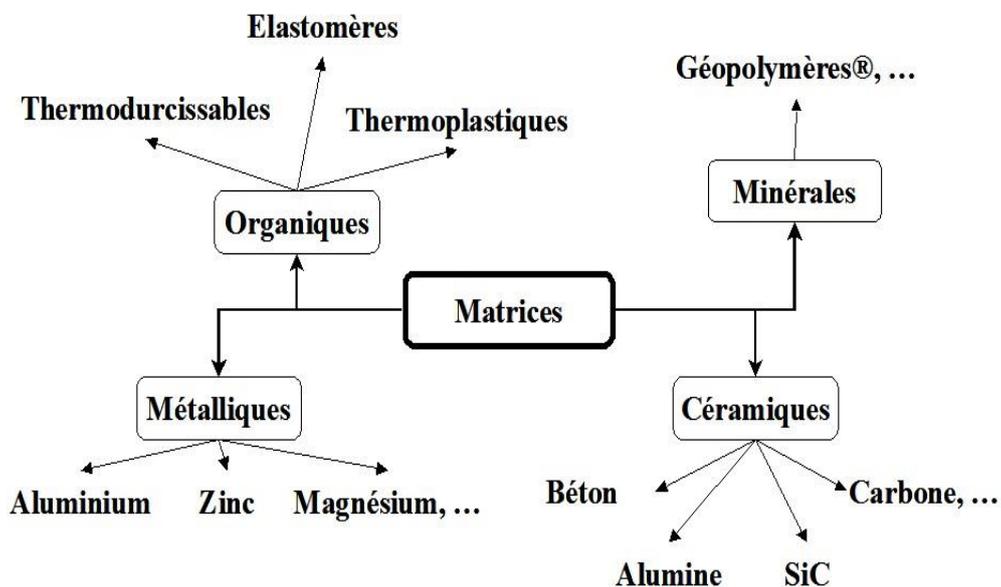


Figure 1.5 – Les différentes matrices des matériaux composites

#### I-3-2-1 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.

Compte tenu de ces contraintes, les résines utilisées sont des polymères, modifiés par différents adjuvants et additifs : agents de démoulage, stabilisants, pigments, etc. Les résines sont

livrées en solution, sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules repolymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes du prépolymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle. Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables. 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. Deux autres classes de résines à usages spécifiques sont également utilisées, ce sont :

- les résines thermoplastiques qui peuvent résister en service continu à des températures de l'ordre de 200 °C et plus,
- les élastomères dont le renforcement par différentes fibres conduit à diverses applications dans le domaine de l'automobile.

### I-3-2-1.1-Les résines thermodurcissables :

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

- 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.

#### **Parmi les avantages des polyesters insaturés, nous retiendrons :**

- une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé,
- une bonne stabilité dimensionnelle,
- une bonne mouillabilité des fibres et des tissus,
- la facilité de mise en œuvre,
- une bonne tenue chimique,
- un faible coût de production,
  - une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante.

#### **Parmi les inconvénients, nous noterons :**

- Une tenue médiocre en température : inférieure à 120 °C en service continu,
- Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs,
- Un retrait important de l'ordre de 8 à 10 %,
- Un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de "gelcoat" de manière à les rendre Étanches,
- Une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets,
- Une inflammabilité.

## **b) -Les résines de condensation**

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques. Les résines phénoliques sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite.

### **Parmi les avantages, nous citerons :**

- une excellente stabilité dimensionnelle,
- une bonne tenue à la chaleur et au fluage,
- une bonne résistance aux agents chimiques,
- un faible retrait,
- de bonnes caractéristiques mécaniques,
- un faible coût.

### **Parmi les inconvénients, nous noterons :**

- une mise en œuvre sous pression, donc à faibles cadences,
- les couleurs foncées des résines,
- une non adaptation à des utilisations alimentaires.

Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques.

Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques.

### **Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :**

- la possibilité d'utilisations alimentaires,
- la possibilité de colorer les résines.

Les résines furaniques sont assez peu utilisées en France à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyesters.

### **Parmi leurs avantages :**

- un durcissement plus rapide que les résines phénoliques,
- une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc.

**c) -Les résines époxydes**

Les époxy sont des résines thermodurcissables qui réticulent de façon irréversible. Elles polymérisent à l'aide d'un durcisseur et d'un accélérateur et ont une structure macromoléculaire tridimensionnelle. La polymérisation a lieu à température ambiante également. La faible absorption d'eau et l'absence de post-retrait assurent au polymère une bonne résistance aux divers agents chimiques. Ces deux propriétés permettent d'obtenir une protection importante contre la corrosion chimique. Les polymères époxy ont de bonnes propriétés en traction, en flexion, en compression et une excellente tenue à la fatigue. Seule, la résistance aux chocs est un point faible.

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons :

- 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 :

- 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-3-2-1.2-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, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection.

Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, 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). Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles.

### **I-3-2-1.3-Les résines thermostables**

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, les résines bismaléimides et polyimides sont les plus utilisées. Les résines bismaléimides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200°C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde.

Les résines polyimides sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à haute résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent d'obtenir des composites de résistance supérieure, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium.

## **I-4- Les charges et les additifs**

### **I-4-1- Introduction**

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des Caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits ajoutés peut varier de :

- Quelques dizaines de % dans le cas de *charges*,
- À quelques % et moins dans le cas d'*additifs*.

L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre. Nous donnons dans ce paragraphe des exemples de charges et d'additifs.

### **I-4-2- Les charges**

#### **I-4-2-1-Charges renforcâtes**

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

- charges sphériques.
- charges non sphériques.

#### **I-4-2-2-Charges sphériques**

L'intérêt essentiel de ces charges réside dans leur forme sphérique qui évite les concentrations de contraintes et, par conséquent, diminue la susceptibilité à la fissuration de la matrice par rapport à des charges non sphériques.

Les charges sphériques se présentent sous forme de sphères, appelées généralement microbilles ou microsphères. Ces sphères pleines ou creuses ont un diamètre généralement compris entre 10 et 150  $\mu\text{m}$ . Elles peuvent être en verre, en carbone ou en matière organique (époxyde, phénolique, polystyrène, etc.).

Les microbilles de verre creuses représentent plus de 99 % des charges sphériques utilisées.

- **Les microbilles de verre creuses :**

Le principal avantage des microbilles de verre creuses réside dans une masse volumique faible (100 à 400 kg/m<sup>3</sup>), apportant une augmentation du module spécifique de la résine chargée et de sa tenue en compression. La fabrication des microbilles de verre creuses se fait par passage dans une zone à haute température, de fines particules de verre contenant un gaz d'expansion (généralement un mélange d'azote et de gaz carbonique). Lors de l'élévation de température des particules, le gaz est expansé dans la particule de verre en fusion.

Les particules sont ensuite refroidies rapidement, provoquant une solidification de la paroi des microbilles avant que la pression du gaz ne diminue. Les microbilles ainsi obtenues ont un diamètre de l'ordre de 20 à 130 µm, avec une épaisseur de paroi de 0,5 à 2 µm. Les microbilles peuvent être ensuite sélectionnées en fonction de leurs dimensions. Les microbilles sont enfin soumises à des traitements de surface permettant d'améliorer la liaison des microbilles avec la résine. Les microbilles de verre creuses sont le plus souvent incorporées à des résines époxydes ou polyesters.

Leur usage est limité à des mises en œuvre à basse pression du fait de la faible résistance à l'écrasement des sphères creuses.

Les avantages essentiels de leur incorporation dans une résine sont :

- la diminution de la masse volumique,
- l'augmentation du module de la résine,
- l'amélioration de la tenue en compression.

- **Autres microbilles :**

Il existe d'autres microbilles creuses :

- Microbilles de carbone.
- Microbilles organiques (époxyde, phénolique, etc.).

Ces microbilles sont généralement plus chères (jusqu'à 5 fois pour les microbilles de carbone) que les microbilles de verre. Parmi les autres microbilles utilisées figurent les microbilles de verre pleines. Par rapport aux microbilles de verre creuses, les caractéristiques des microbilles pleines sont :

- Masse volumique élevée : 2 500 kg/m<sup>3</sup>,

- Prix plus faible,
- Possibilité de mise en œuvre avec les résines à des pressions élevées.

### **I-4-2-3-Charges non sphériques**

Parmi les charges renforçantes non sphériques, le mica est le matériau le plus utilisé. Il est alors incorporé sous forme d'écaillés de dimensions de 100 à 500  $\mu\text{m}$ , et d'épaisseur de 1 à 20  $\mu\text{m}$ . Le mica est ajouté à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables, pour des applications électriques ou électroniques.

### **I-4-2-4-Charges non renforçâtes**

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

### **I-4-2-5-Charges de faible coût**

Ces charges sont extraites de roches ou de minerais, d'où leur faible coût. Généralement, l'incorporation de ces charges conduit à :

— **une augmentation :**

- De la masse volumique de la matrice,
- Du module d'élasticité,
- De la dureté,
- De la viscosité,
- De la stabilité dimensionnelle.

— **une diminution :**

- Du prix,
- De la résistance à la traction et à la flexion.

Les principales charges sont :

- les carbonates : craies ou calcites ( $\text{CaCO}_3$ ). Ce sont les charges les plus utilisées,
- les silicates: talc, kaolin, Felds path, wollastonite,
- les silices, obtenues par broyage et tamisage de sable de quartz.

#### **I-4-2-6-. Charges ignifugeantes**

Ces charges ajoutées aux résines ont pour rôle de réduire ou d'empêcher les phénomènes de combustion. Parmi les charges solides utilisées dans les résines thermodurcissables, nous citons:

- l'hydrate d'alumine, produit le plus utilisé dans les résines thermodurcissables,
- l'oxyde d'antimoine.

#### **I-4-2-7-Charges conductrices et antistatiques**

Les résines organiques sont des isolants thermiques et électriques. Pour certaines applications, il est donc nécessaire d'ajouter un élément conducteur. Les principales charges utilisées sont :

- des poudres ou paillettes métalliques : cuivre, fer, aluminium, etc.,
- des microbilles de verre métallisées (cuivre, argent),
- des particules de carbone (noir de carbone),
- des filaments métalliques.

#### **I-4-3-Les additifs**

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage,
- pigments et colorants,
- agents anti-retrait,
- agents anti-ultraviolets.

##### **I-4-3-1-Lubrifiants et agents de démoulage**

Ces additifs ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules, aux mandrins, etc.

##### **I-4-3-2-Pigments et colorants**

Les pigments sont des produits insolubles se présentant sous forme de poudres ou de paillettes. Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques. À partir de ces pigments, il est

possible d'obtenir des pâtes colorantes constituées de dispersions de pigments dans une pâte (résine, plastifiant), pour une utilisation aisée.

Les colorants sont des composés organiques solubles dans un solvant adapté. Leur emploi est limité, du fait d'une mauvaise tenue chimique et thermique.

### **I-4-3-3-Agents anti-retrait et agents de fluage**

La polymérisation des résines conduit à une diminution des distances interatomiques du monomère initial. Il s'ensuit un retrait de la résine polymérisée, qui peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement ou à des microfissurations des pièces moulées.

Bien que l'incorporation des charges à la résine en limite le retrait, il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti retrait (additifs dits "Löw profile" et "Löw shrink"), qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait.

Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage. Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentant sous forme de poudre ou en solution dans du styrène.

### **I-4-3-4-Agents anti-ultraviolets**

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines de l'action des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et d'éviter ainsi une détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation (phénomène de photo-oxydation).

## **I-5-Essais de traction**

L'essai de traction constitue l'essai mécanique le plus classique et le mieux étudié, il consiste à exercer sur une éprouvette, une force croissante ou une déformation constante qui va la déformer progressivement et la rompre.

C'est Léonard de Vinci dans les années 1500 qui aborde la notion de résistance des matériaux et en 1729, la première machine de traction est construite en Hollande.

Le début du 19ème siècle et l'essor de l'acier contribue à la fabrication de machines plus sophistiquées : La machine de Riehlé en 1906 (25 T) et la machine horizontale de Buckton en 1914 (100 T).

Les premiers extensomètres « modernes » basés sur une mesure optique apparaissent en 1920.

La première machine dite de « recherche » de 50 T apparaît en 1947 : « Denison machine » pour des essais sur des turbines à Gaz pour la construction navale, elle dispose déjà d'extensomètre à jauges de contrainte.

La marque Tinius Olsen apparaît en 1880, Galdabini en 1890, Denison Hydraulics en 1900, Roell & Korthaus apparaît en 1920, ZWICK en 1937 et INSTRON en 1946.

### I-5-1-Étude des caractéristiques classiques :

Sur un diagramme Contrainte-Déformation, on observe les phases successives suivantes comme le montre la figure ci-dessous :

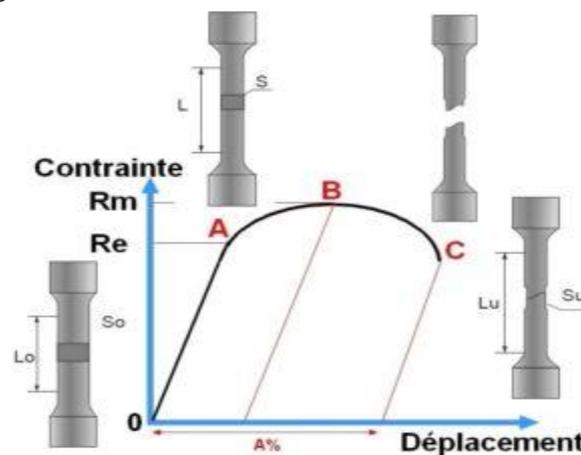


Figure 1.6 : courbe contrainte déplacement en traction

- **Entre l'origine et le point A** : une phase élastique où la déformation est réversible.
- **Le point A** : est la limite d'élasticité apparente (en général, on détermine la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % de déformation de  $L_0$ ).
- **De A à B** : une déformation permanente homogène appelée aussi déformation plastique répartie.
- **Le point B** correspond à la charge maximale et correspond à la résistance mécanique du matériau.

- **De B à C** : la déformation plastique se localise dans une portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction et on aboutit à la rupture en C.

### **I-5-2-Caractéristiques fondamentales :**

- Le module de Young **E** ou module d'élasticité longitudinale, **E = (σ / ε)**.
- La résistance élastique **Re** qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ Avec } R_e \text{ en Mpa, } F_e \text{ en N, } S_0 \text{ en mm}^2$$

- La résistance à la rupture **Rr** ou **Fr** est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction.

$$R_r = \frac{F_r}{S_0}$$

- L'allongement relatif total ou A pour cent de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100. \text{ Où } L_u \text{ est la longueur de l'éprouvette après rupture. Qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous la charge avant sa rupture,}$$

- **La loi de Hooke** : **σ = E × ε**

**E**[MPa], Le module de Young ou module d'élasticité longitudinale.

**ε** = **DL/L** [sans unité], L'allongement à la rupture.

**σ** = **F/S** [MPa],

### **I-6- Différents endommagements des matériaux composites**

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui consiste en l'apparition de micro-défauts locaux. Ceux-ci se multiplient par coalescence et conduisent à la création de fissures ou de défauts de taille macroscopique. La conséquence de cet endommagement est en général une diminution notable des caractéristiques mécaniques du matériau. La connaissance de l'évolution de l'endommagement dans les structures permet de mieux évaluer les sollicitations critiques que peut subir le matériau. Pour ce faire, il faut prendre en compte dans le cas des composites d'une part leur hétérogénéité et d'autre part la multiplicité de leurs modes d'endommagement, ces derniers étant liés soit à la matrice (microfissures), soit au renfort (rupture de fibres), soit à l'interface fibre/matrice (décohésion à l'interface).

L'expérience montre que l'on peut distinguer quatre principaux modes d'endommagement

:

### I-6-1-Fissuration matricielle

Dans la matrice, la fissuration peut être transverse ou longitudinale (Figure 1.7). La première se produit lorsque la contrainte en traction dans la matrice atteint la contrainte de rupture de la matrice, alors que la seconde a lieu lorsque la contrainte de cisaillement dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier mode de rupture appelé « Splitting » se produit lorsque la contrainte de décohesion est supérieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice. Dans le cas des composites industriels à fibres de verre, les performances à la rupture peuvent être limitées par une déformabilité trop faible de la matrice. Il apparaît donc nécessaire d'adapter au mieux les propriétés de la matrice à celles des fibres pour optimiser les performances à la rupture des matériaux composites.

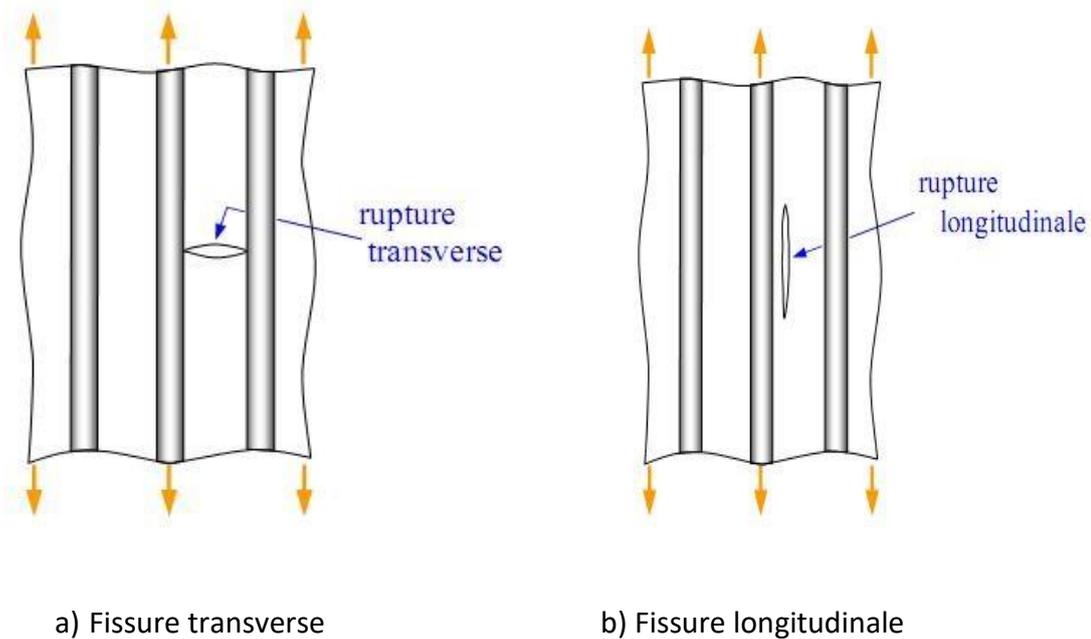


Figure 1.7 : Fissures transverse dans un stratifié  $[0_n, 90_m]_s$

### **I-6-2-Dé laminage :**

Dans le cas d'un stratifié ou multicouche, aux mécanismes élémentaires précédemment décrits s'ajoute un mécanisme de rupture entre couches appelé rupture par « dé laminage » ce type d'endommagement dépend de la nature de constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé (Figure. 1.5). Le dé laminage qui apparaît après la phase d'endommagement intra laminaire commence souvent sur les bords avant de s'étendre sur toute l'éprouvette. Il correspond d'une fissuration qui a tendance à séparer les plis ou les couches du composite

### **I-6-3- Décohésion fibre-matrice :**

Dans la pratique même après avoir choisi les constituantes fibres et matrice avec soin en les soumettant à des contrôles précis, dont leur interface issue de leur interaction ne peut être totalement maîtrisée par les efforts d'analyse et de prévision. Dans le cas particulier où les fibres sont discontinues, la zone inter faciale est le siège d'initiation de fissures devient critique à l'accumulation de l'endommagement. Cela est dû essentiellement à l'efficacité du transfert de charges à l'interface fibre-matrice ainsi qu'à la concentration des contraintes aux extrémités des fibres. Le comportement de l'interface fibre-matrice dépend essentiellement de ses propriétés mécaniques comparées à celles des fibres et de la matrice. Généralement la décohésion a lieu dans deux cas :

- ✓ Lorsque la cohésion est inférieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice.
- ✓ Lorsque l'adhérence fibre-matrice est faible : dans ce cas, la rupture de la matrice traverse sans qu'il y ait rupture de fibre mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice

Dans le cas d'une adhérence fibre-matrice élevée la rupture initiée soit par rupture de fibre soit par rupture de la matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans les matrices.

### I-6-4-Rupture des fibres :

Dans certains cas, l'endommagement dans les composites est initié par une rupture de la fibre. Cela se produit en générale lorsque l'orientation des fibres coïncide plus ou moins avec l'axe de sollicitation du matériau composite. La rupture aura lieu lorsque la contrainte de rupture de la fibre est atteinte. L'endommagement se produit et ne cesse de se progresser à mesure que la contrainte est appliquée ce qui provoque ainsi la rupture de la matrice et de la fibre jusqu'à la rupture totale du matériau

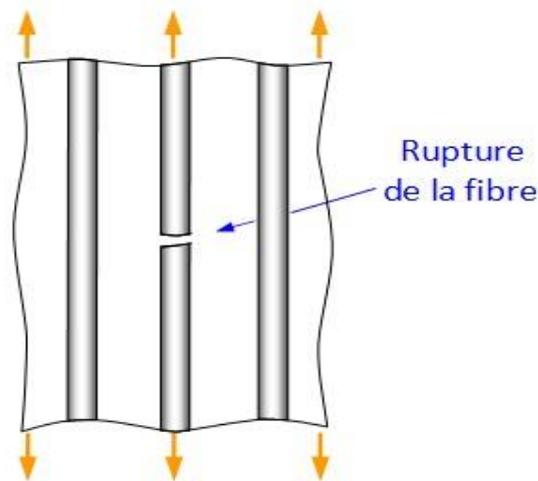


Figure 1.8: Rupture de la fibre

### I-7-Endommagement en fatigue des composites stratifiés tissés à armure simple

Les matériaux composites tissés se composent de trois éléments structurels, à savoir, des mèches longitudinales (chaînes), des mèches transversales (trames) et des régions de matrice pure. Les éléments structurels (chaînes et trames) peuvent être considérés comme des composites UD équivalents.

Les principaux mécanismes d'endommagement observés pendant le chargement en fatigue peuvent être classés en endommagements microscopiques dans les mèches et macroscopiques dans le composite tissé. Les mécanismes d'endommagement microscopiques sont similaires à ceux observés dans les composites stratifiés UD croisés (fissuration matricielle, décollement

fibre/matrice, et rupture de fibres). Alors que les mécanismes d'endommagement macroscopiques sont (Naik, 2003) :

- La fissuration transversale dans la trame,
- La rupture en cisaillement dans la chaîne,
- La fissuration dans les régions à matrice pure,
- La délamination entre la trame et la chaîne (méta-délamination),
- La délamination entre plis adjacents,
- La rupture de la trame et enfin rupture totale du stratifié.

---

## Chapitre II – Mise en forme

---

### II Introduction :

L'objectif de ce chapitre n'est pas de faire une étude approfondie de la technologie de mise en œuvre des matériaux composites. Il se propose simplement de dégager les principes de différents processus de mise en œuvre, et de constituer une introduction à l'étude du comportement mécanique des matériaux composites.

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique générale appelée *stratification*, conduisant à l'élaboration de *stratifiés*, nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites.

### II-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. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.

### II-2- Moulage au contact

Moulage par contact (ou moulage au contact), est une technique de moulage de matériaux composites **relativement ancienne**. Si elle est simple en théorie, elle demande en pratique un savoir-faire précis, et doit être mise en place par des personnes expérimentées. Idéal pour la fabrication de pièces lourdes ou volumineuses, le moulage par contact est principalement utilisé pour les petites séries.

**Comment fonctionne le moulage par contact ?**

- Le moulage par contact **fonctionne avec un seul moule**. C'est sur ce moule que seront déposées les différentes couches de résines et de matériaux, pour leur permettre d'en prendre la forme.
- Le moule est tout d'abord enduit d'un agent de démoulage, puis d'un gelcoat qui permettra d'obtenir une surface parfaitement lisse. Ensuite, des couches successives de résine liquide époxy et de renforts (fibre de verre sergé) sont déposées à la main. L'opérateur vient donc presser la matière avec un rouleau pour supprimer les bulles d'air éventuellement incrustées entre les couches. Enfin, lorsque la pièce est dure, elle peut être démoulée et détournée.

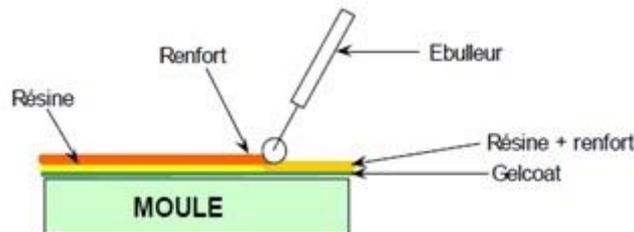


Figure 2.9 : moulage au contact

### Avantages

- Faible niveau d'investissement.
- Facilité de réalisation des prototypes ou des petites séries.
- Bel aspect de surface du côté du Gelcoat.

### Limites :

- L'importance du facteur humain sur la qualité de la pièce.
- Obtention d'une seule face lisse.
- Les conditions de travail peu agréables dues au dégagement des vapeurs de styrène

## II-3- Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet

projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

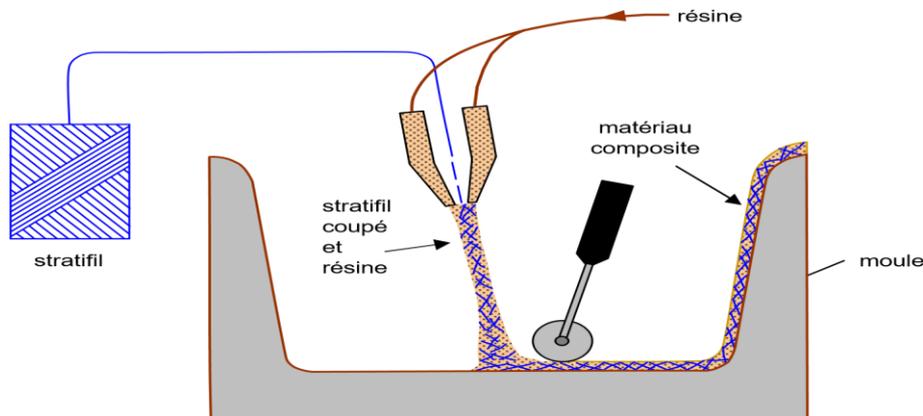


FIGURE 2.10. Principe du moulage par projection simultanée.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques.

## II-4- Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gelcoat, 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. Dans le cas de l'utilisation d'un contremoule

rigide un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois, assez lentes.

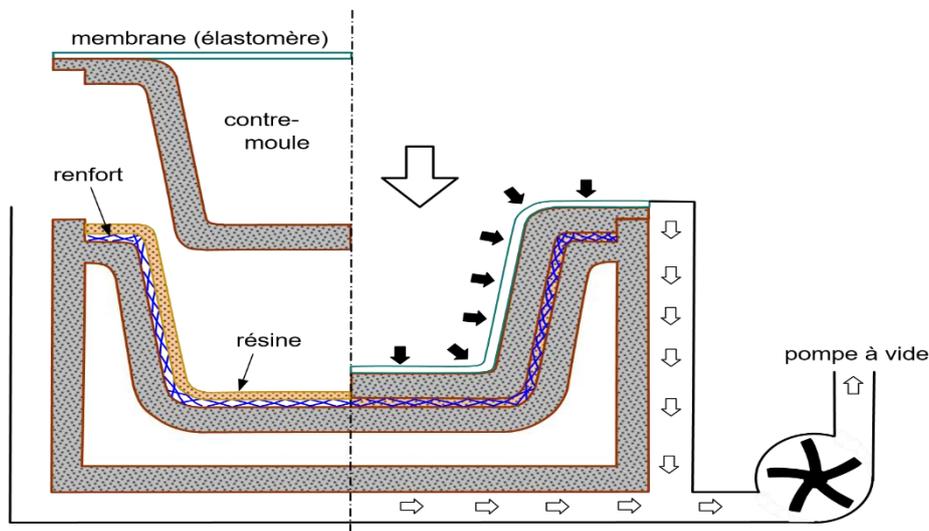


FIGURE 2.11. Moulage sous vide.

## II-5- Moulage par compression

### II-5- 1-Moulage par injection de résine

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées.

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

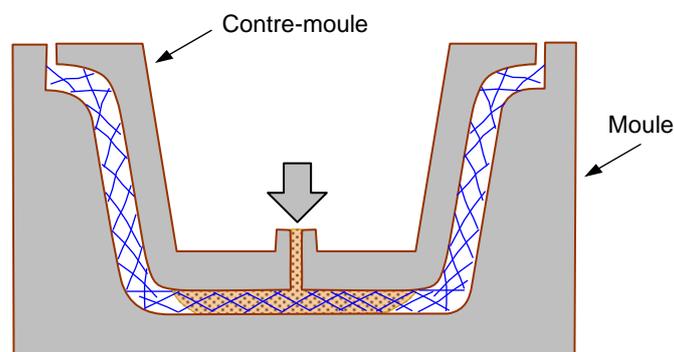


FIGURE 2.12 : Moulage par injection de résine.

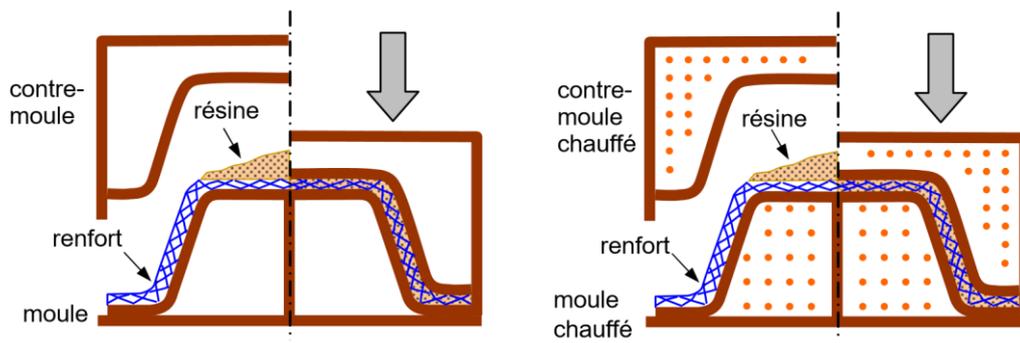


Figure 2.13.1. À froid

Figure 2.13.2. À chaud

FIGURE 2.13. Principe du moulage par compression.

### II-5-2-Moulage par compression à froid (figure 2.5.1)

Le moulage est effectué à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70 °C, en fonctionnement permanent.

Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gelcoat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud.

### II-5-3-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. Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contremoule.

Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse.

La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule.

#### **II-5-4 Moulage par injection**

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.). Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques.

Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé "plastiques renforcés" que matériaux composites.

En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries.

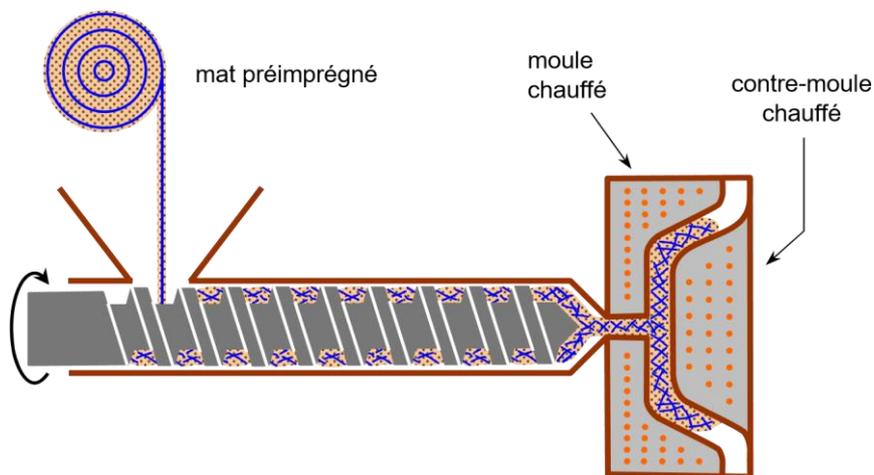


FIGURE 2.14. Moulage par injection.

## II-6-Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches (figure 2.15), de panneaux ondulés pour toitures (figure 2.16), plaques nervurées, etc.

Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases :

1. Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.).
2. Une phase de mise en forme.
3. Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).
4. Une phase de refroidissement et découpage.

Dans le cas de la fabrication de plaques planes (figure 2.7), la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation (figure 3.8), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel.

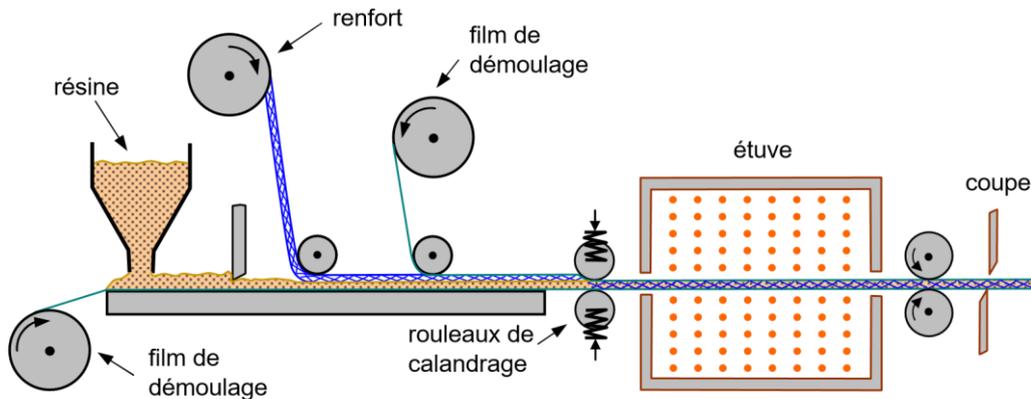


FIGURE 2.15. Moulage en continu de plaques.

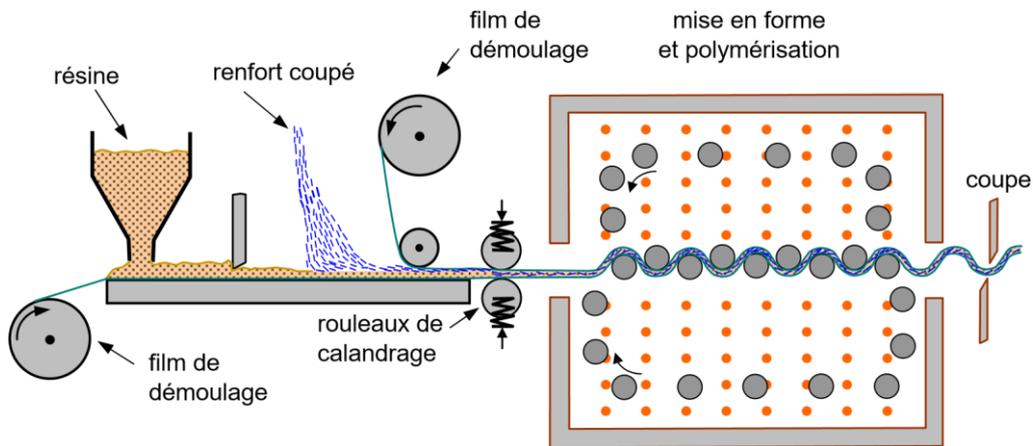


FIGURE 2.16. Moulage en continu de panneaux ondulés.

## II-7-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.

Dans cette technique, les renforts : fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu

simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume. Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement important de matériel. Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc.

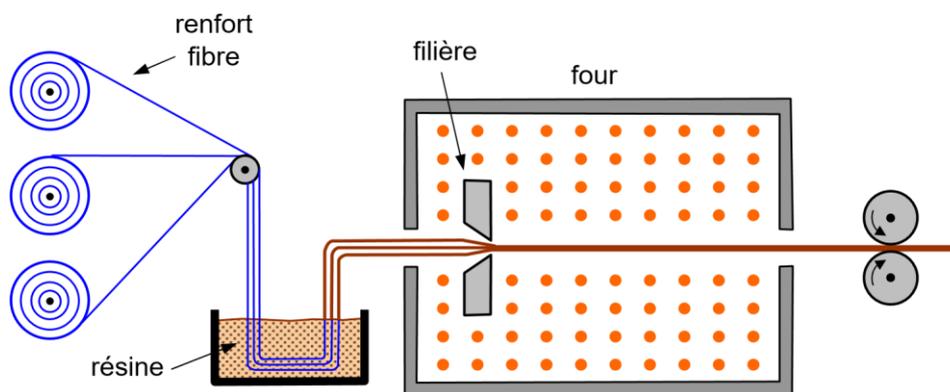


FIGURE 2.17. Moulage par pultrusion.

## II-8-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. Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min).

Après dépôt éventuel de gel Coat, on introduit simultanément en continu :

- le renfort : fibres coupées ou stratifil coupé ;
- la résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La

polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.

Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule.

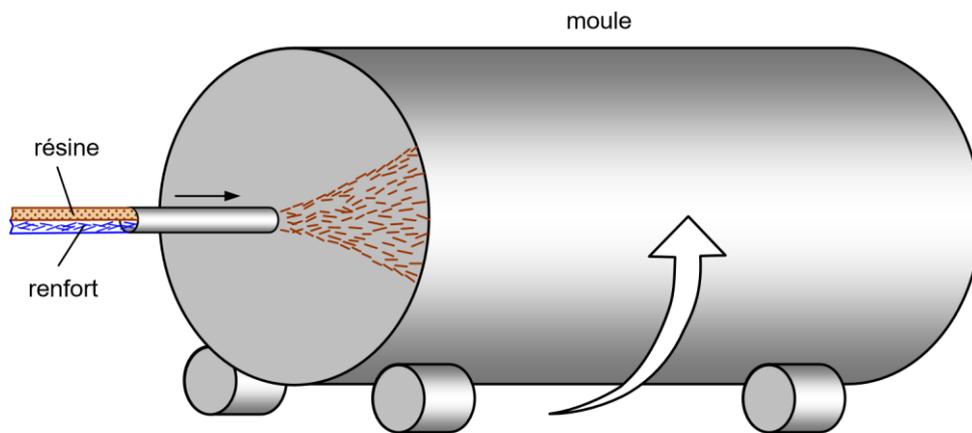


FIGURE 2.18. Moulage par centrifugation.

## II-9-Moulage par enroulement filamentaire

### II-9-1-Principe

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. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important.

Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire.

## II-9-2-Enroulement circonférentiel

Le bobinage est effectué à  $90^\circ$  par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée. Pour obtenir une résistance longitudinale satisfaisante, il est nécessaire d'intercaler des couches de tissus unidirectionnels dans le sens axial du mandrin.

Ce type d'enroulement est assez peu utilisé.

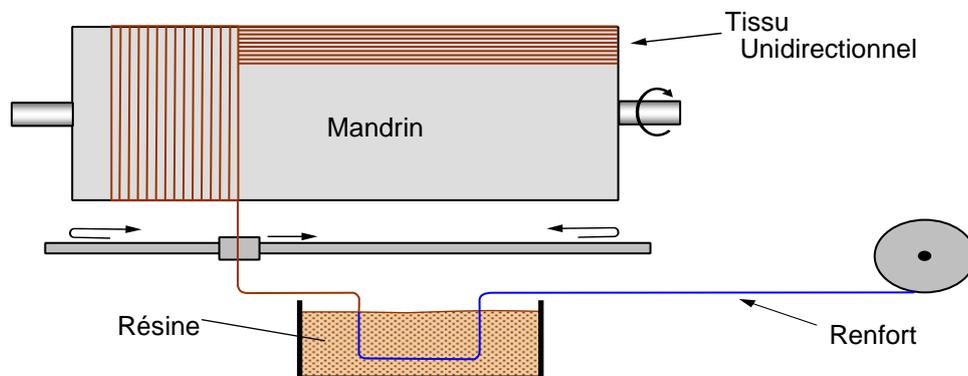


FIGURE 2.19. Principe de l'enroulement circonférentiel.

## II-9-3-Enroulement hélicoïdal

### 1. Enroulement discontinu

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fil par rapport à la rotation du mandrin. La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la surface du mandrin par des mouvements alternatifs du guide-fils parallèlement à l'axe du mandrin. Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

Ce procédé d'enroulement a de nombreuses applications pour la fabrication de pièces de grandes dimensions comme des conteneurs, la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tubes de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc.

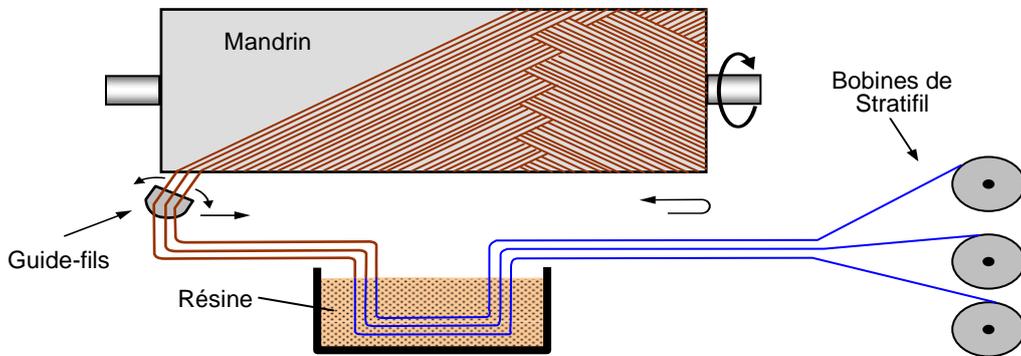


FIGURE 2.20. Principe de l'enroulement hélicoïdal.

## 2. Enroulement continu

L'enroulement continu (figure 2.13) permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs.

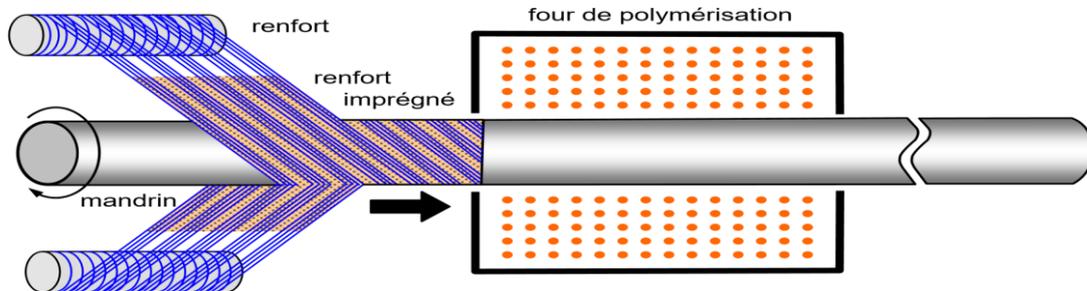


FIGURE 2.21. Enroulement hélicoïdal continu.

### II-9-4-Enroulement polaire

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques sans discontinuité de l'enroulement. Dans ce type d'enroulement, le mandrin doit posséder trois degrés de liberté en rotation, permettant de commander 3 rotations simultanées ou non.

Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc.

## II-10-Structure des matériaux composites

### II-10-1Introduction

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- par surface : plaques, coques,
- par stratification de couches successives

### II-10-2Les monocouches

Ils sont généralement constitués de résines ou matrices dans lesquelles sont introduits des renforts en forme :

- De fibres courtes ou de particules (par exemple, poudres : métalliques, de graphite) dispersées aléatoirement (FIGURE 2.22) pour réaliser des plaques de composites en plastiques renforcés.
- De tissus multidirectionnels volumiques (3D,4D, etc.) pour concevoir des plaques de composites volumiques. Ils ont été introduits pour des besoins spécifiques de l'aéronautique. En plus des intérêts spécifiques, ils permettent d'obtenir des caractéristiques mécaniques très élevées, avec un comportement physique approximativement isotrope en volume.

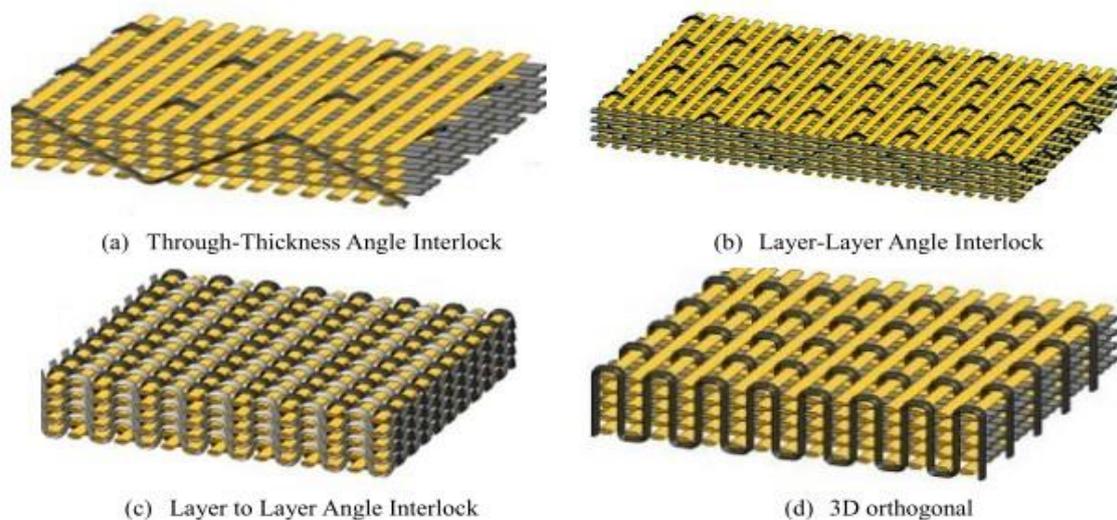


FIGURE 2.22 : Tissages Multidirectionnels volumiques 3D

### II-10-3-Les stratifiés

Les stratifiés sont constitués d'un empilement successif de plusieurs plis (ou couches) orientés par rapport à un référentiel commun aux plis et désigné comme référentiel stratifié. L'orientation  $\vartheta$  des plis est obtenue par rapport à ce référentiel, c'est l'opération de drapage.

Le pli (strate) est l'élément de base de l'architecture d'un matériau composite stratifié, avec une épaisseur d'environ 140  $\mu\text{m}$ .

Il est considéré comme un semi-produit du matériau composite composé de renforts imprégnés de matrice (résine polymère, etc.).

On distingue plusieurs types de plis : le pli unidirectionnel (armure unidirectionnelle) et le pli tissé (armure tissée).

De ce fait, compte tenu des propriétés des renforts, de leur l'orientation et de l'empilement des plis, ces matériaux composites stratifiés possèdent des propriétés physiques fortement anisotropes.

De plus, ils permettent de créer des matériaux composites aux propriétés mécaniques orientées de façon optimale afin de mieux répondre aux sollicitations mécaniques de la structure.

On distingue différents types de stratifiés :

- Les stratifiés symétriques, dont les couches empilées sont disposées symétriquement par rapport à leur plan médian (plan de symétrie) ;
- Les stratifiés avec des séquences, successifs comprenant un indice qui indique le nombre de répétitions ;
- Les stratifiés hybrides, constitués d'un empilement successif de plis, avec des renforts de nature différente (par exemple, carbone, kevlar, etc.), etc.

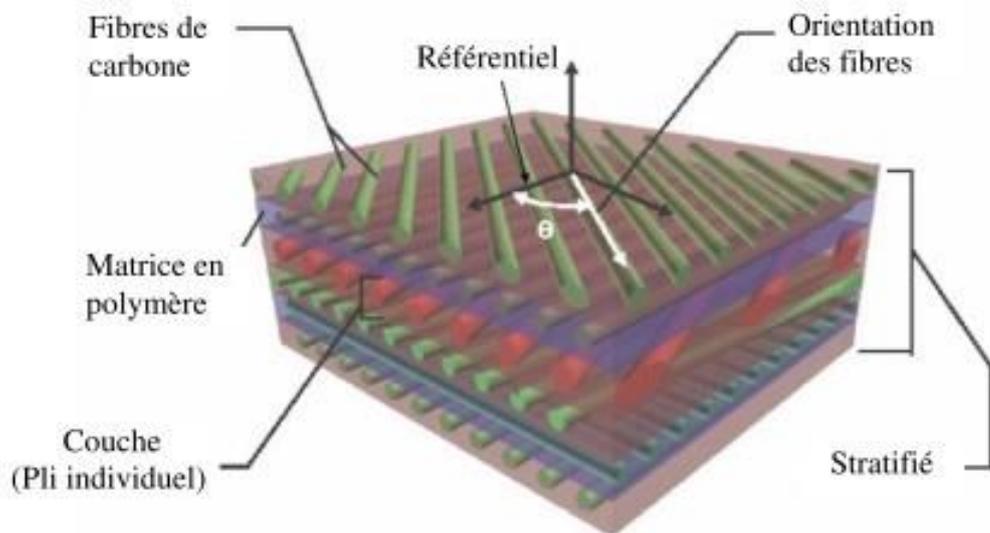


FIGURE 2.23 : Matériau composite stratifié à plis UD

#### II-10-4-Composites sandwiches

Le principe de la technique sandwich 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 avec pour objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

— pour les âmes pleines :

- Le balsa ou bois cellulaire ;
- Diverses mousses cellulaires ;
- Des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques.

— pour les *âmes creuses*, essentiellement nid d'abeilles et profilés :

- Des alliages métalliques légers ;
- Du papier kraft (enduit ou non de résine) ;
- Du papier polyamide, type papier Nomex ;

Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, Kevlar) ou des feuilles d'alliages légers. Pour que les structures sandwichs jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux.

### II-10-4-1-Autres architectures

Les autres architectures des matériaux composites peuvent être schématiquement classées en : plastiques renforcés et composites volumiques.

#### II-10-4-1-1Plastiques renforcés

Ces matériaux sont constitués de résines ou matrices dans lesquelles sont introduits des renforts de type :

- fibres courtes,
- billes pleines ou billes creuses,
- poudres : métalliques, de graphite.

Les renforts permettent généralement d'augmenter le module d'élasticité d'un facteur 2 à 5.

Le comportement mécanique de ces matériaux peut être homogénéisé, et son étude est ramenée à celle d'un matériau usuel isotrope.

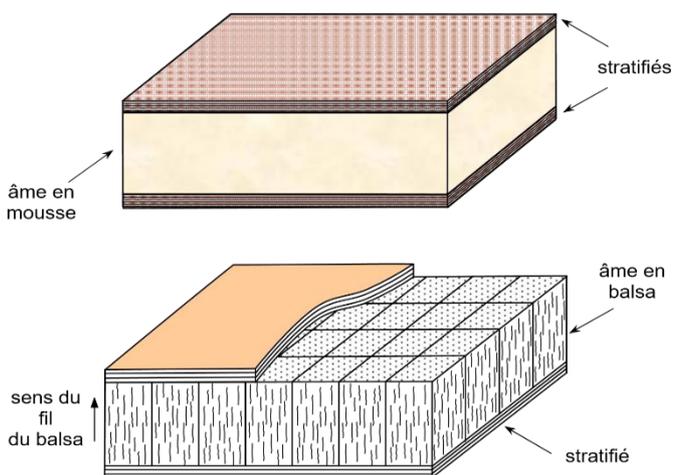


Figure 2.24 Matériaux sandwichs à âmes pleines

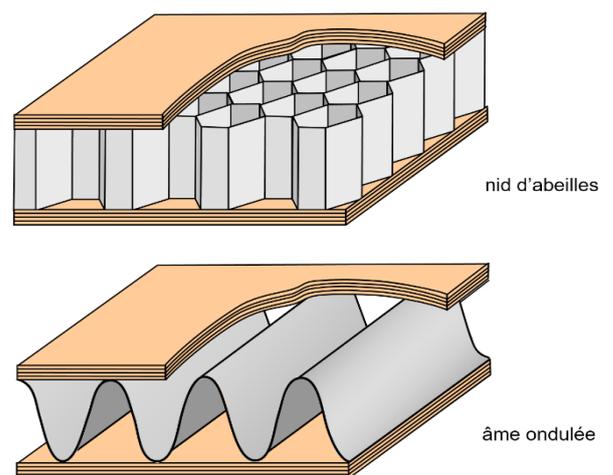


FIGURE 2.25. Matériaux sandwichs à âmes creux

## **II-11-Secteurs industriels utilisateurs**

### **II-11-1 Aéronautique et espace**

#### **II-11-1-1- Aviation**

Sur les avions commerciaux, les premiers appareils produits industriellement en grande série utilisaient essentiellement des alliages d'aluminium, de l'acier et du titane. Aujourd'hui, les avions commerciaux les plus récents utilisent en masse encore 54 % d'alliage d'aluminium, mais 20 % de matériaux composites ont été introduits dans la structure.

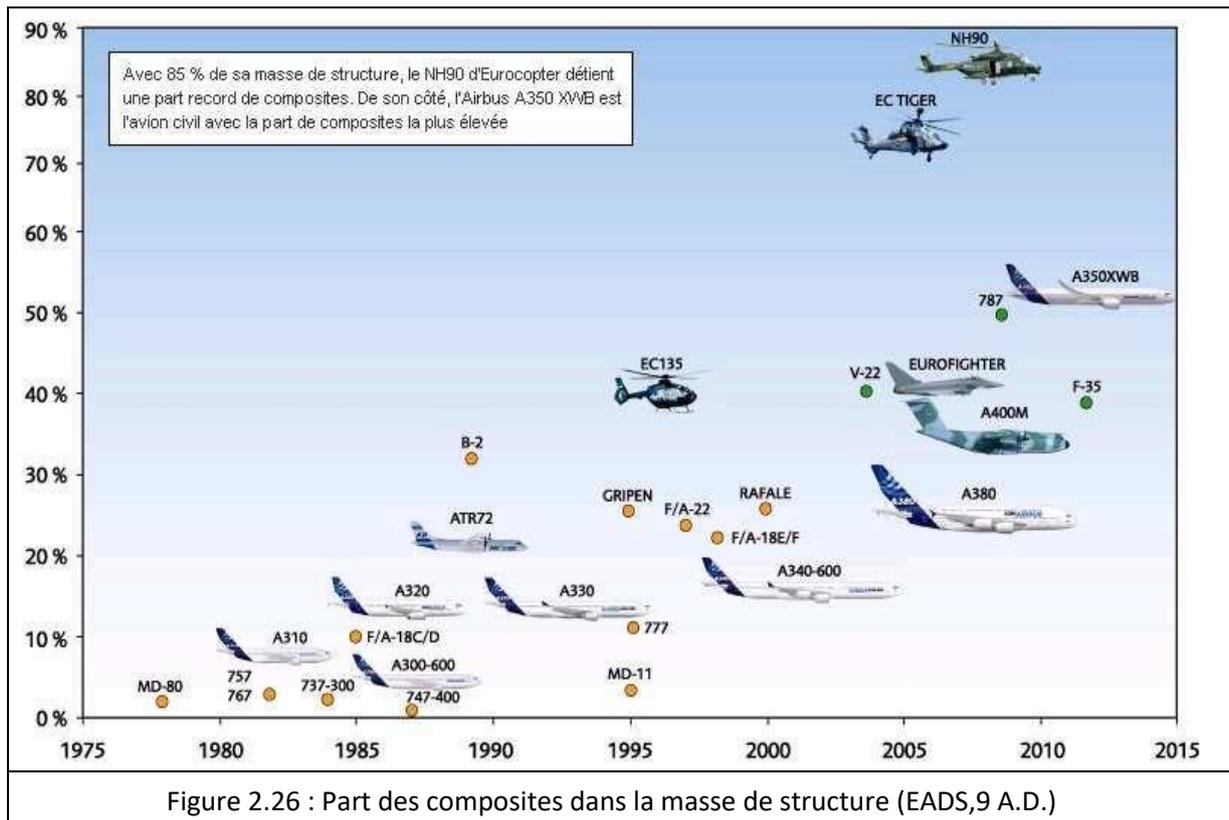
La principale motivation d'utilisation des matériaux composites pour la réalisation de structures sur les produits aéronautiques est essentiellement le gain de masse apporté tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques.

Les premières applications des composites renforcés avec des fibres de carbone sont apparues au début des années 1970 avec des pièces secondaires comme les portes de nacelles sur le Vautour, ou des parties mobiles de voilure sur Concorde.

L'utilisation intensive du carbone comme fibre de renfort sur les composites pour avions civils débute dans la fin des années 1970 avec les aérofreins et les bielles de support plancher sur Airbus A310. À la fin des années 1980, les composites à base de fibres de carbone ont été introduits pour la première fois en production sur une voilure d'avions civils ATR72, avion de transport d'une capacité de 70 personnes (Cinquin J.,2002).

Les matériaux composites occupent une place de plus en plus importante dans la construction d'avions, d'hélicoptères, de missiles, de lanceurs et de satellites, avec, en tête, les composites renforcés par des fibres de carbone (CFRP), dont la masse est composée à 60 % de fibres et à 40 % de résine (EADS,9 A.D.).

L'Airbus A380 est le premier avion commercial doté d'un caisson central de voilure construit presque entièrement en CFRP. Cet élément important de la structure primaire de l'avion permet de fixer la voilure sur le fuselage. Malgré une épaisseur atteignant par endroits 4 centimètres, l'utilisation de ce type de matériaux a permis de gagner une masse de 1,5 tonnes



## II-11-1-2-Espace

Les premières pièces composites sont introduites sur les satellites dans la fin des années 1970. Les matériaux utilisés sont essentiellement des fibres de carbone haut module avec résine époxyde. Des fibres de carbone classiques haute résistance sont aussi utilisées pour certaines pièces :

- Les armatures des panneaux solaires sont en général constituées de composites à partir de fibres de carbone avec des matrices cyanates ou époxydes ;
- Les structures tubulaires sont fabriquées à partir de fibres de carbone dans une résine époxyde ou bismaléimide ;
- Les réflecteurs d'antenne comportent également des fibres de carbone dans une matrice époxyde ou cyanate (Cinquin J.,2002).

D'autres matériaux composites sont ou seront employés dans la construction de moteurs de fusées et de satellites : les composites à base de fibres céramiques.

C'est le cas, par exemple, des chambres de combustion à tuyères expansives en carbure de silicium renforcé en fibres de carbone (C/SiC), actuellement en cours de développement (EADS,9 A.D.).

## II-11-2-Construction navale

Les utilisations des composites de carbone dans le secteur nautique représentent une part minoritaire : la fibre de verre est majoritaire. Les coques et mats en carbone sont hauts de gamme et se retrouvent plutôt sur des bateaux de compétition ou des bateaux de plaisance haut de gamme.

Les matériaux utilisés pour la fabrication des voiliers de compétition sont proches de ceux utilisés en aéronautique (structure sandwich, nid d'abeille et composite carbone) : différents éléments du bateau (mâts, coques, quille, etc.) peuvent être constitués de composites à base de fibres de carbone et résines époxydes.

Ces fibres sont fournies, soit sous forme de nappes sèches imprégnées, pendant la fabrication, de la structure par voie humide, infusion ou enroulement filamentaire, soit sous forme de préimprégné. Ces derniers sont transformés, soit au four sous vide, soit en autoclave (Casari P., 2008). Il y a peu d'usinage mais plutôt du moulage.



Figure 2.27: Assemblage d'un bras de multicoque océanique 60 pieds ORMA.

Fabrication carbone – nid d'abeille – époxy (source Mer et Projets) (Casari P.,

2008)

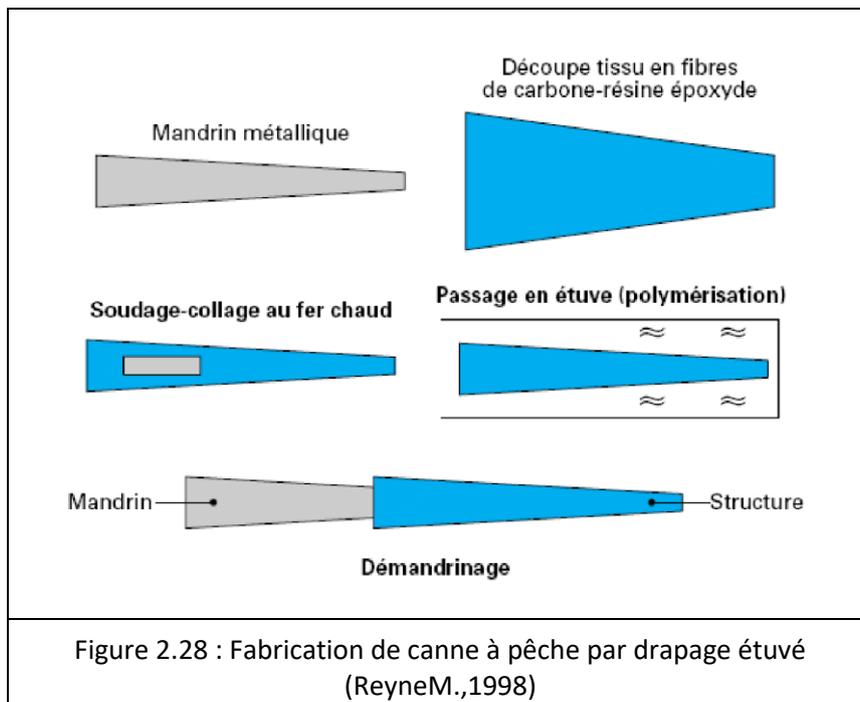
Outre le prix, un inconvénient possible de ce type de matériau est leur « musicalité » (résonance des coques par exemple). D'après la Fédération des Industries Nautiques (FIN), en 2006, sur les 2600 bateaux à voile produits en France seule une trentaine contenait du carbone.

### II-11-3-Sports et loisirs

Ce secteur d'activité est pratiquement le seul où l'on emploie des composites de hautes performances (HP) pour des articles de très grande consommation (cannes à pêche, raquettes, skis...).

Les renforts employés sont des fibres de verre ou de carbone, les fibres de carbone associées à une matrice époxyde étant plutôt utilisées pour les matériels utilisés en compétition (ReyneM.,1998).

Plusieurs produits sont fabriqués par drapage spécifique par roulage sur un mandrin de forme adaptée. Les cannes à pêche sont fabriquées à partir d'un renfort en tissu de carbone préimprégné de résine époxyde qui sera découpé en forme de trapèze correspondant au développement du tronc de cône de l'élément de canne.



D'autres produits sont fabriqués par le même procédé ou par des techniques voisines : clubs de golf (à l'origine de l'utilisation des fibres de carbone au Japon), cadres de vélos de course, etc.

La fédération française des industries du sport et des loisirs (FIFAS) indique que, selon une marque de raquettes (tennis et squash), il n'existerait aucune production de ce type de produits en France (la délocalisation de la production de ces types de matériels en Asie du Sud-Est date d'une vingtaine d'années).

Les composites de carbone sont employés couramment dans ce type de matériel, en raison de leur bon rapport poids/performance et ce depuis la fin des années 1980. Le pourcentage massique des fibres de carbone contenues dans chaque composite représente 47 à 63 %.

La fabrication de skis de compétition met en œuvre également des stratifiés composés de fibres de verre et de carbone associées à une matrice époxyde, pour un volume de production en France très faible d'après un fabricant adhérent de la FIFAS.



Figure 2.29 : Exemple de composite stratifié (fibres de verre et de carbone)

#### **II-11-4-Automobile**

Les matériaux composites à matrices thermoplastiques ou thermodurcissables renforcés par des fibres, généralement de verre, ont fait leur apparition dans l'automobile durant les années 1960-1970. Même s'ils sont aujourd'hui utilisés presque exclusivement pour satisfaire certaines fonctions, leur taux d'utilisation ne dépasse pas 10 à 15 % selon les véhicules (Giocosso A.,1999).

SOTIRA (Société de Transformation Industrielle de Résines Armées), contactée sur les conseils de la FIEV, produit des pièces de plastique renforcées en fibres de verre ou en fibres de carbone pour l'industrie automobile.

La fibre de carbone a été introduite à la fin des années 1990 pour la formation de cabine de camions (matrice de type époxyde).

La même technique (carbone/époxyde) a été ensuite utilisée pour la carrosserie et le châssis des voitures haut de gamme.

Un procédé lié au très haut de gamme (voiture de compétition) utilise également des composites carbone/carbone.

Les matériaux composites sont très utilisés pour la fabrication de véhicules de compétition, la Formule 1 étant au premier plan : les éléments de carrosserie, caractérisés par leur légèreté et leur aérodynamisme, sont constitués entre autres de composites de carbone. Les freins haute performance sont par ailleurs constitués de composites carbone/carbone.

### **II-11-5-Génie civil**

Les fibres de carbone possèdent un ensemble de propriétés physiques ou mécaniques qui en font un matériau de renforcement de toute première qualité dans certaines applications liées au bâtiment et aux ouvrages de génie civil.

Plusieurs procédés de renforcements sont apparus au cours de ces dix dernières années. Les principaux utilisent directement les fibres de carbone sous forme de fil continu et d'autres font appel à un semi-produit plus ou moins sophistiqué, tel que : les tissus secs, les tissus préimprégnés ou des produits pultrudés (Luyckx J.,1999).



Figure 2.30: Exemple de renforcement d'une dalle de plancher (Luyckx J.,1999)

Ces matériaux servent également à la fabrication de câbles « de précontrainte » servant notamment à la construction de ponts suspendus ou à haubans.

---

## *Chapitre III- Matériel et méthodes expérimentale*

---

### **III-1-La machine de traction :**

La machine de traction Zwick/Roell Z050 est une machine de traction universelle à un seul poste de travail, c'est une machine à vis sans fin. Elle est constituée des parties essentielles suivantes : la traverse sur colonnes et la partie électronique de commande. Elle est dotée d'extensomètre avec les deux palpeurs. La machine de traction est rapide et simple d'utilisation.



Figure 3.31 : La machine de traction Zwick /Roell/Z050

### **III-2-Réalisation des éprouvettes en fibre de verre d'armure sergé et résine époxy**

### III-2-1-Les constituants de base :

#### III-2-1-1-Tissu de verre sergé :

C'est un filament à haute résistance, produit par étirement à très grande vitesse (60m/s) de verre en fusion à plus de 1500°C. Il représente 99% des verres textiles. Les fibres de verre textiles sont peu coûteuses en raison de la nature des produits entrant dans leur composition (silice, kaolin, chaux, ...) et de la relative simplicité des procédés de fabrication. Pour nos expériences, nous avons utilisé un rouleau de diamètre 20cm et de grammage 300g/m<sup>2</sup>.



Figure 3.32 : Tissu verre sergé

Fibre	Densité [g/m2]	Charge de rupture en traction (Mpa)	Module d'élasticité (Mpa)	Allongement à la rupture (%)
Verre sergé	300	3400	73000	4.8

Tableau 3-1 : caractéristique mécanique de verre sergé

#### III-2-1-2-Résine époxy :

La résine époxy est un polymère liquide thermodurcissable constitué de deux composants la résine elle-même et le durcisseur. Elle se travaille sous forme liquide entre 20 et 25°C, et après polycondensation avec un durcisseur, conduisant à des produits thermodurcis dont les principales applications concernent le collage et les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone). Le matériau

durcit lorsqu'il est introduit à une température minimale de 10 à 15°C, parvient à catalyser et puis devient solide.,

Elle est étanche par nature, ce qui écarte tout problème liée à son immersion ou sa présence dans un milieu humide, c'est pour ça qu'elle est notamment très utilisée pour les réparations en dessous de la ligne de flottaison dans le milieu nautique. Elle présente également une adhésion maximum : c'est à dire qu'elle tient sur tout type de support que ce soit, du métal, du bois, du béton, une stratification polyester, en procurant une résistance plus importante aux contraintes mécaniques et chimiques. Industrie aéronautique et automobile (collages de structures et de panneaux) ;

#### **Les avantages :**

Les résines époxy sont importantes et recherchées en raison de caractéristiques uniques par rapport aux autres polymères, qui sont :

- L'adhésion excellente et rapide, la faible contraction,
- La force physique et la résistance,
- Les bonnes propriétés électriques,
- L'excellente résistance chimique,
- Son absence de résidu volatile pendant l'application.

#### **Les inconvénients :**

- L'époxy met du temps à durcir complètement.
- Solution de revêtement de sol temporaire.
- Fissures et éclats sur les zones à fort impact.
- Très glissant lorsqu'il est mouillé.
- Processus d'installation fastidieux.

#### **III-2-1-3-Additifs :**

Ce sont un accélérateur et un durcisseur.



Figure 3.33 : résine époxy



Figure 3.34: durcisseur

### III-2-2-L'éprouvette :

La méthodologie d'élaboration du matériau composite de la présente étude se résume à une imprégnation des quatre plis de renfort verre sergé avec de la résine époxy par la méthode moulage au contact.

Les éprouvettes sont découpées, à partir des plaques décrites ci - dessus, à l'aide d'un disque diamante selon les dimensions préconisées par les normes ISO 527 (reprise par la norme algérienne NA 2175) pour l'essai de traction.

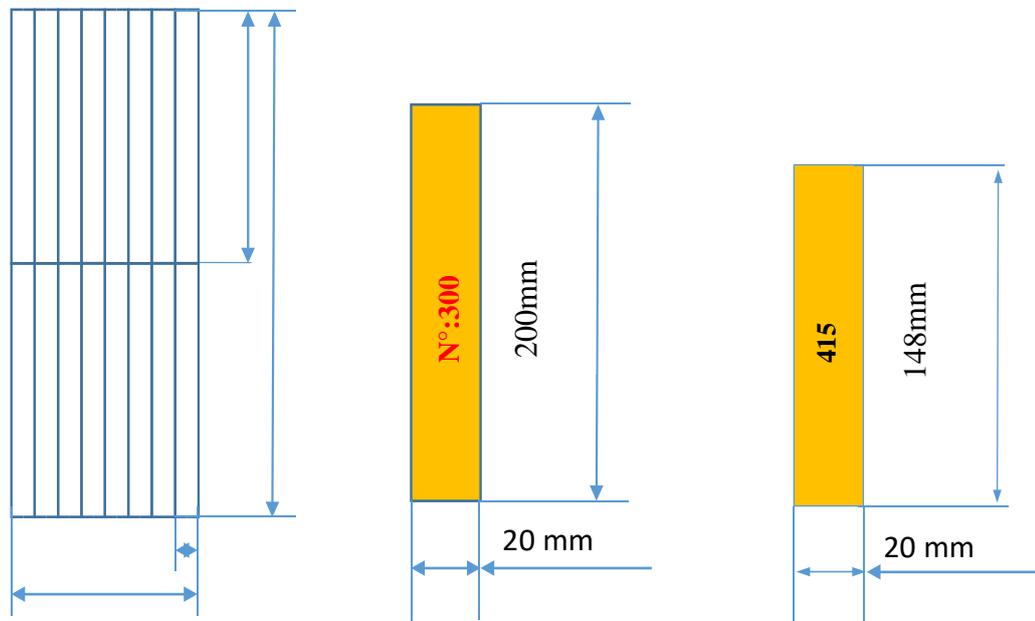


Figure 3.35 : Dimensions de l'éprouvette de traction

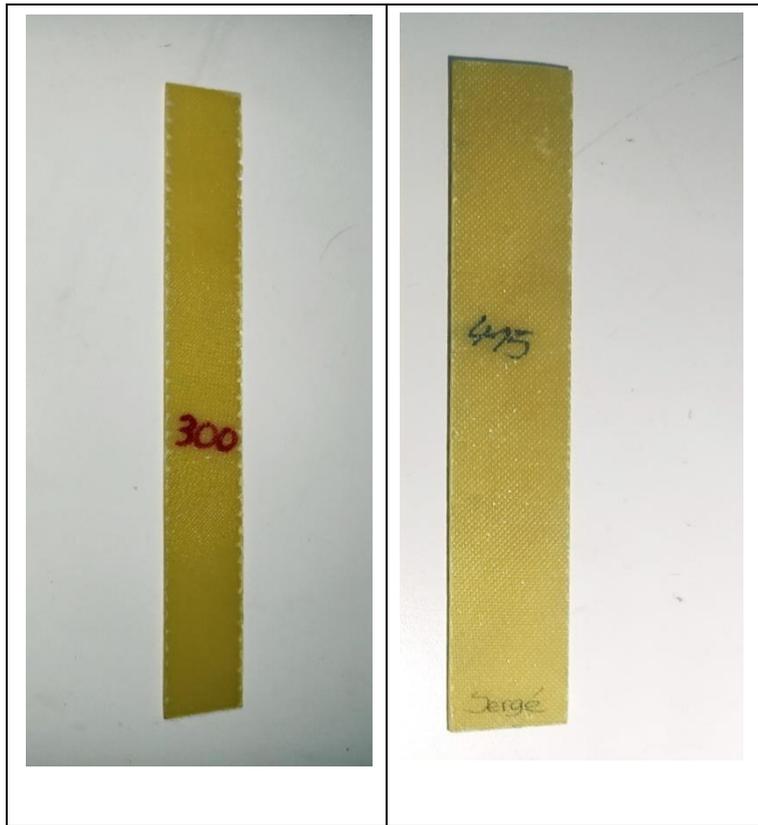


Figure 3.36 : Eprouvtes pour l'essai

### III-3-Normes utilisées :

Les études et les normes concernant l'éprouvette de traction recommandent en général d'utiliser une éprouvette plate dont la longueur de la section utile est un ordre de grandeur (i.e. 10 fois) supérieure à la largeur. En effet, le rapport largeur — longueur doit prendre une certaine valeur pour dissiper les effets de Saint-Venant (i.e. champ de contraintes complexe au voisinage du lieu d'application de la charge).

Toutefois, les différentes normes et études proposent diverses géométries. Par exemple, la norme ASTM D638 propose une éprouvette ayant une section réduite où la transition se fait par un arrondi d'un certain rayon. Cette géométrie, produit généralement des ruptures dans la section utile lorsque employée pour les plastiques. Toutefois, pour des composites unidirectionnels à fibres continues, la rupture s'initie habituellement dans l'arrondi ou à une courte distance de ce dernier (Chatterjee, Adams et Oplinger, 1993). Ceci est principalement attribuable à l'endommagement du matériau causé par l'usinage de

l'arrondi ainsi qu'aux concentrations des contraintes présentes dans cette zone. En effet, il est probable que des fissures se créent entre les différents plis du stratifié lors de l'usinage de l'éprouvette. Ces fissures peuvent entraîner le délaminage de l'éprouvette, conduisant à un mode de rupture complexe. Par conséquent, la norme ASTM D638 ne semble pas être adaptée aux composites unidirectionnels à fibres continues.

Dans le même ordre d'idées, Oplinger, Gandhi et Parker (1982) ainsi que Oplinger, Parker, Gandhi, Lamothe et Foley (1985) ont étudié deux éprouvettes permettant le passage d'une section plus large vers une section réduite. La première éprouvette,

Nommée « Bow tie », réalise cette transition vers la section réduite par un fuseau linéaire. De plus, le fuseau se fait sur une longue distance de sorte que la pente de ce dernier soit inférieure à 5 degrés. Avec un critère de rupture approprié, il est possible de calculer l'angle maximal permettant une rupture en tension avant qu'une rupture en délaminage ou en cisaillement ne survienne. Cependant, bien que supérieurs à ceux de la norme ASTM D638, les résultats expérimentaux obtenus avec cette éprouvette ne sont pas satisfaisants dans tous les cas. En effet, une portion importante des ruptures s'initie à la fin du fuseau, là où une discontinuité géométrique (i.e. la pente passe de 5 à 0 degré sur une très courte distance) est présente. Alors, pour contourner ce problème, Oplinger, Parker, Gandhi, Lamothe et Foley (1985) ont proposé l'éprouvette « streamline ». Cette éprouvette présente aussi une section réduite, mais la transition se fait de manière continue. En effet, la forme de l'éprouvette est basée sur les lignes de courant se formant dans un liquide lors d'un changement brusque de section. Il n'y a donc pas de portion de l'éprouvette où la section est de largeur constante. Toutefois, le changement de largeur est négligeable sur une grande portion de l'éprouvette et une section utile peut être ainsi définie. De plus, théoriquement, les concentrations de contraintes sont relativement faibles en tout point de l'éprouvette. Cependant, même si les résultats expérimentaux obtenus sont supérieurs à ceux produits par l'éprouvette « Bow tie », un certain nombre de ruptures s'est produit en dehors de la section utile. De plus, l'usinage d'une telle éprouvette requiert de l'équipement numérique, entraînant des coûts relativement élevés.

Il semble donc que le développement de ces éprouvettes ne soit pas définitif et que des études supplémentaires soient nécessaires avant leur implantation dans l'industrie.

D'autres auteurs (Clarke, Wisnom et Potter, 1997) ont proposé d'utiliser une éprouvette tubulaire obtenue par pultrusion. Le grand avantage de cette éprouvette est que les problèmes reliés à l'endommagement des côtés lors du découpage sont enrayés. Les auteurs ont comparé les résultats obtenus avec une éprouvette plate avec ceux obtenus avec l'éprouvette tubulaire pour un même matériau. Une amélioration considérable de l'ordre de 37% de la résistance à la rupture a été observée. Toutefois, il est difficile de déterminer si cette augmentation n'est attribuable qu'au changement de géométrie.

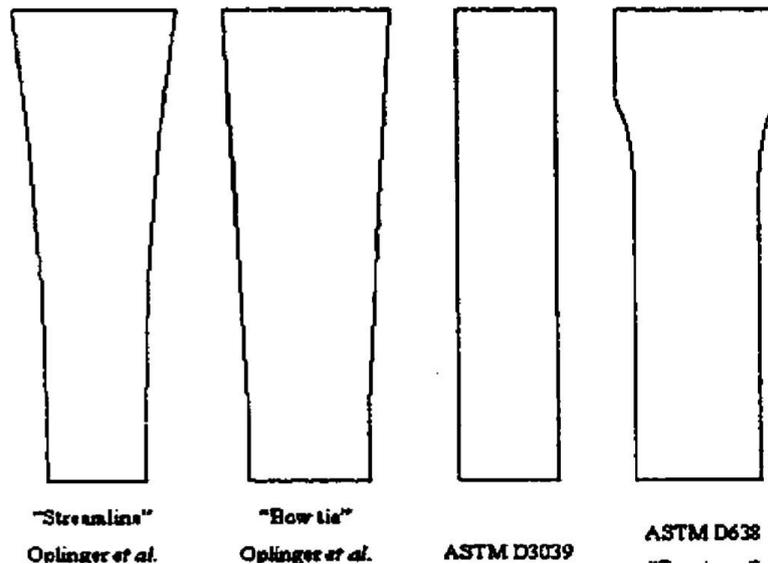


Figure 3.37 : Sections de différentes éprouvettes proposées pour l'essai de traction

En Effet, la pultrusion produit généralement des pièces dont l'alignement des fibres est supérieur à celui des stratifiés (Clarke, Wisnom et Potter, 1997). Est concevable que cette éprouvette soit appropriée à la pultrusion et que son application aux stratifiés demande davantage d'étude. Certains auteurs (Chatterjee, Adams et Oplinger, 1993 ; Chatterjee, Yen et Oplinger, 1997) ont aussi proposé d'utiliser une éprouvette de section constante dans laquelle des plis orientés perpendiculairement à la direction du test sont insérés. Ces plis sont généralement placés dans la partie de l'éprouvette étant en contact avec les mâchoires. L'avantage de cette méthode est que ces plis « protègent » le matériau testé et ne contribuent pas à supporter la charge axiale. Les auteurs ont mesuré des limites ultimes supérieures avec ces éprouvettes, en plus d'obtenir des ruptures claires, i.e. l'éprouvette se divise en deux parties distinctes. Toutefois, à notre avis, le fait de renforcer l'éprouvette de cette façon

change son mode de rupture en tension pure. Les mesures des propriétés du matériau inférées à partir d'un tel essai doivent donc être acceptées avec une certaine réserve.

Finalement, les organismes ASTM et ISO suggèrent d'employer une éprouvette de section rectangulaire constante afin d'éliminer le problème de l'initiation des ruptures au voisinage de la zone de transition. Ces deux organisations suggèrent de mouler les éprouvettes séparément ou d'utiliser une scie à diamant pour découper ces dernières d'un panneau. Cependant, bien que cette éprouvette élimine le problème des ruptures dans la zone de transition, toute contrainte parasite en un point donné favorisera l'initiation de la rupture en ce même point. Alors, d'un point de vue déterministe et par le fait qu'il est pratiquement impossible d'éliminer les contraintes parasites, cette éprouvette sous-estime la résistance ultime du matériau. Toutefois, jusqu'à maintenant, cette éprouvette semble être le meilleur compromis. C'est donc pourquoi cette dernière fait l'objet de cette étude.

### III-4-Résultats des essais de traction des éprouvettes :



Figure 3.38 : Eprouvtes avant et après rupture

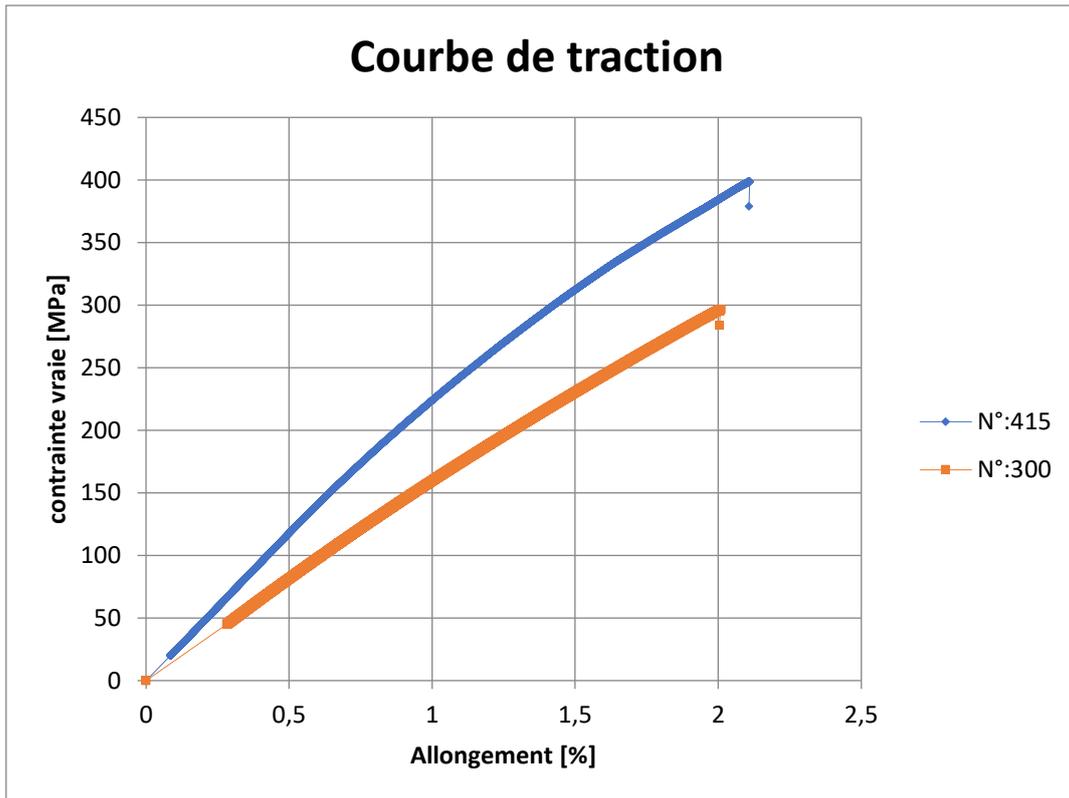


Figure 3.39: Courbes contrainte allongement des éprouvettes

### III-4-1-Discussion :

Les 02 essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes de différentes longueur. Les résultats sont représentés sur des courbes (contraintes – déformations) pour chaque essai.

Les essais de traction ont permis de déterminer les propriétés mécaniques du matériau composite verre sergé/époxy.

On note la présence d'un comportement quasi-linéaire, qui se manifeste par l'augmentation de la valeur de la contrainte proportionnellement à l'augmentation de la valeur de la déformation jusqu'à la rupture. Cette rupture est caractérisée par un arrêt net de l'augmentation de la contrainte et une brusque diminution. Elle est de type fragile, elle est due à la rupture des fibres.

Ce type de rupture dite fragile. Elle se produit après une déformation plastique très faible voire nulle. Elle est caractérisée par la propagation très rapide possible des fissures

**Le tableau rassemble les résultats d'essai de traction pour les deux éprouvettes :**

N°	S <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	E (GPa)	A <sub>e</sub> (%)	R <sub>eL</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)
300	28	16,186	2,0029	288,32378	290,88609
415	20	23,38521	2,1102	314,70604	390,66091

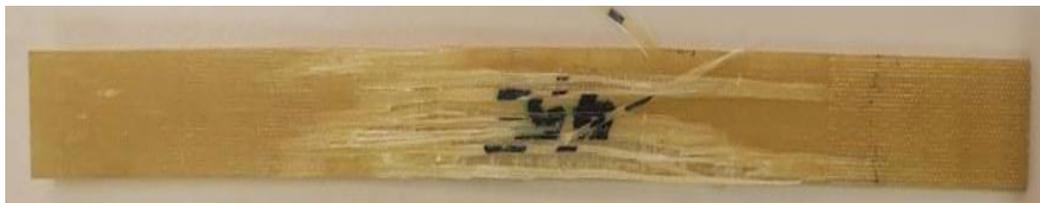
Tableau 3.2 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes

### III-5-Essais de traction comparaison entre éprouvette verre sergé/époxy et verre unidirectionnel/époxy :

Un essai de traction a été réalisée par mon collègue Remdani Mohamed Ali avec des éprouvettes en verre unidirectionnel/époxy avec les mêmes dimensions que mon éprouvette N° :300



Figures3.40 : éprouvette verre sergé de traction



Figures3.41 : éprouvette verre unidirectionnel de traction

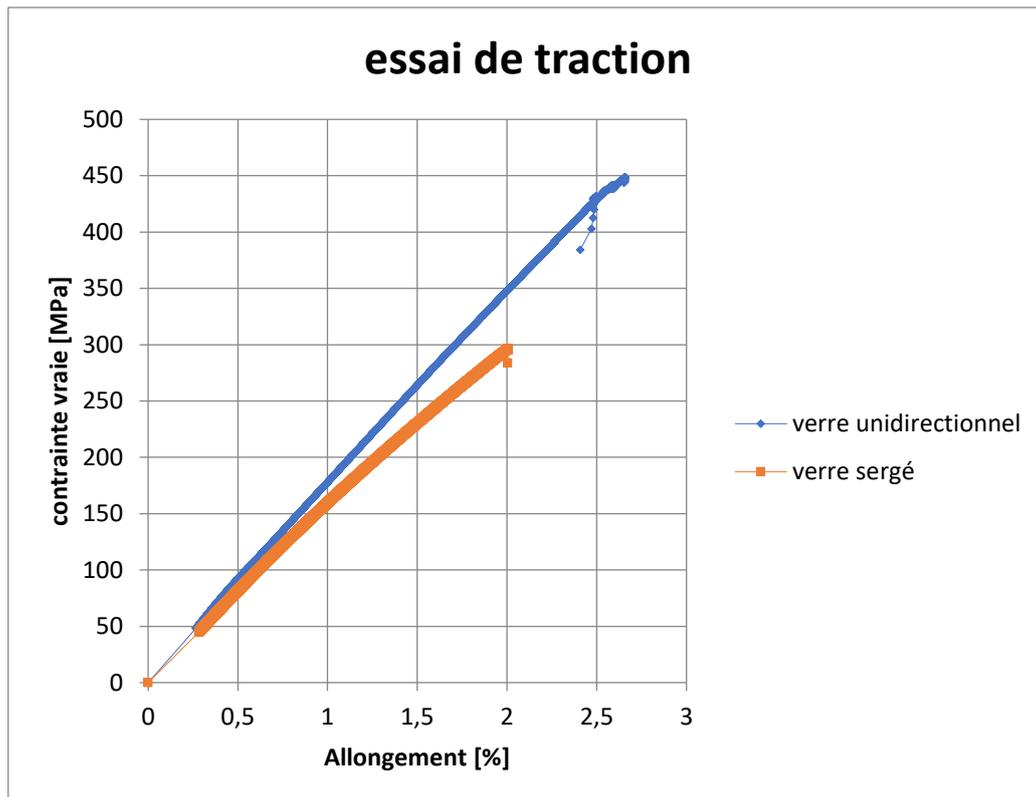


Figure 3.42 : Courbes contrainte allongement des éprouvettes verre sergé et unidirectionnel

**Le tableau rassemble les résultats d'essai de traction pour les deux éprouvettes :**

N°	S <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	E (GPa)	A <sub>e</sub> (%)	R <sub>eL</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)
Verre sergé	28	16,186	2,0029	288,32378	290,88609
Verre unidirectionnel	23,52	17,971	2,6591	430,177005	437,1016

Tableau 3.3 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes verre sergé et unidirectionnel

### III-5-1-Discussion :

L'analyse des résultats est faite en se basant sur l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation. Les deux matériaux ont un comportement quasi-linéaire, qui se manifeste par l'augmentation de la valeur de la contrainte proportionnellement à l'augmentation de la valeur de la déformation jusqu'à la rupture. Cette rupture est caractérisée par un arrêt net de l'augmentation de la contrainte et une brusque diminution. Elle est de type fragile, elle est due à la rupture des fibres.

Le tableau montre que La résistance maximale est de 290,88 MPa pour le verre sergé et 437,10 MPa pour le verre unidirectionnel. Les deux éprouvettes ont subi une rupture, La déformation est permanente

A dimensions et poids relativement égaux, l'éprouvette en verre unidirectionnel est plus résistante que celle en verre sergé ; en effet, la valeur de la contrainte à la rupture de la première est supérieure à celle de la seconde.

### **III-6-Conclusion :**

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit à plus ou moins grande vitesse par propagations de fissures existant dans le matériau. La rupture est donc fortement influencée par la présence de microfissures, de pores, d'inclusions de particules fragiles (défauts internes) et par la présence d'entailles (macro fissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception.

---

## *Chapitre IV : Etude microscopique des faciès des endommagements*

---

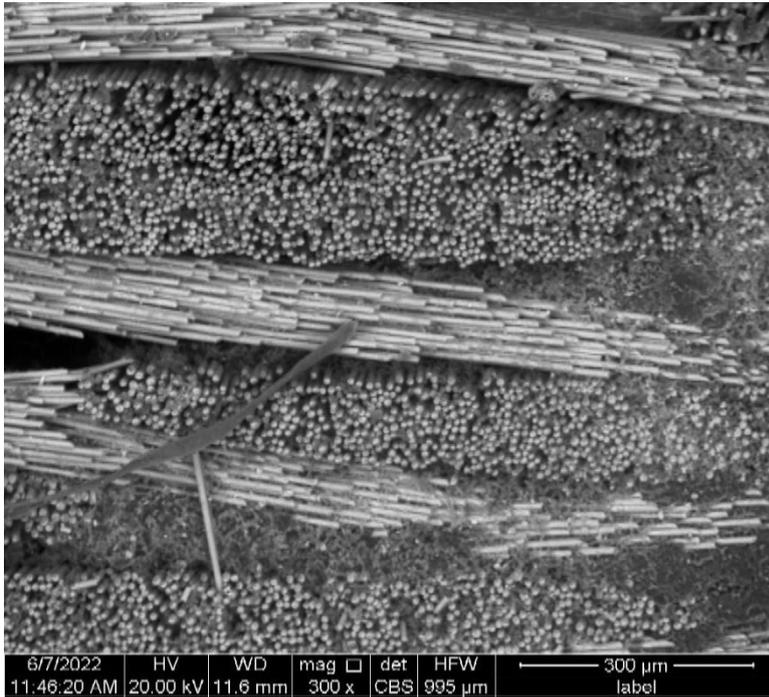
### **IV-1 Microscopie électronique :**

Afin d'affiner nos investigations et mieux comprendre les effets qu'a subi le matériau, nous avons fait appel à l'outil microscope électronique à balayage MEB. Il est sensé compléter les résultats obtenus par traction. Pour cela nous avons réalisé une série de photos pour mettre en relief les effets de la traction sur le matériau composite verre sergé.

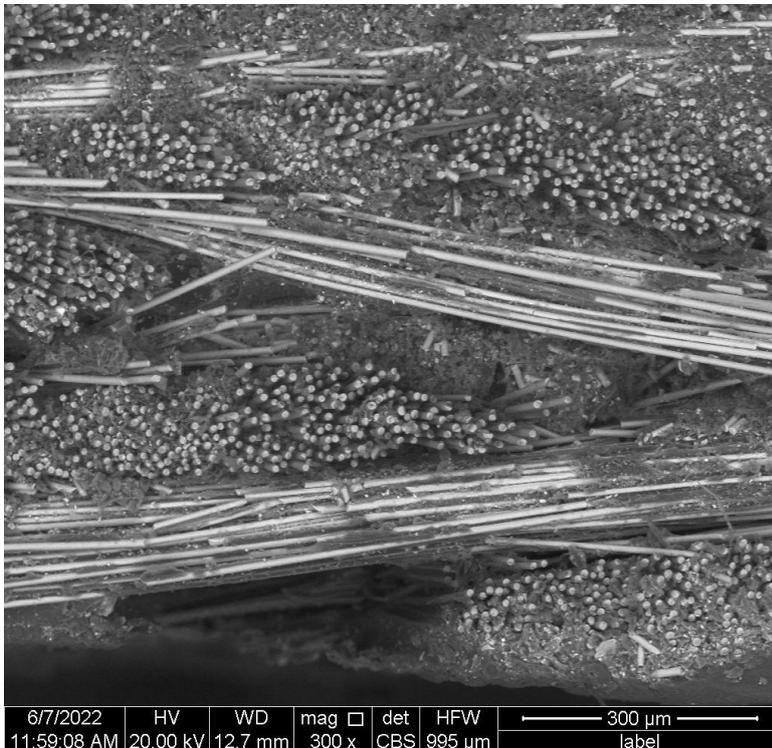


Figure 4.43: l'outil microscope électronique à balayage MEB

## IV-2 Microscopie après tronçonnage



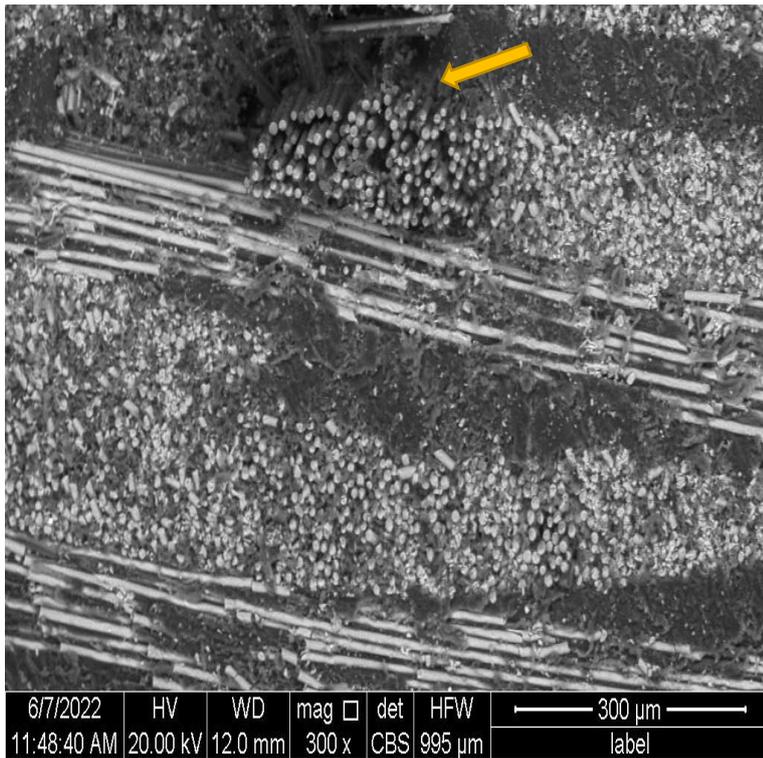
a)



b)

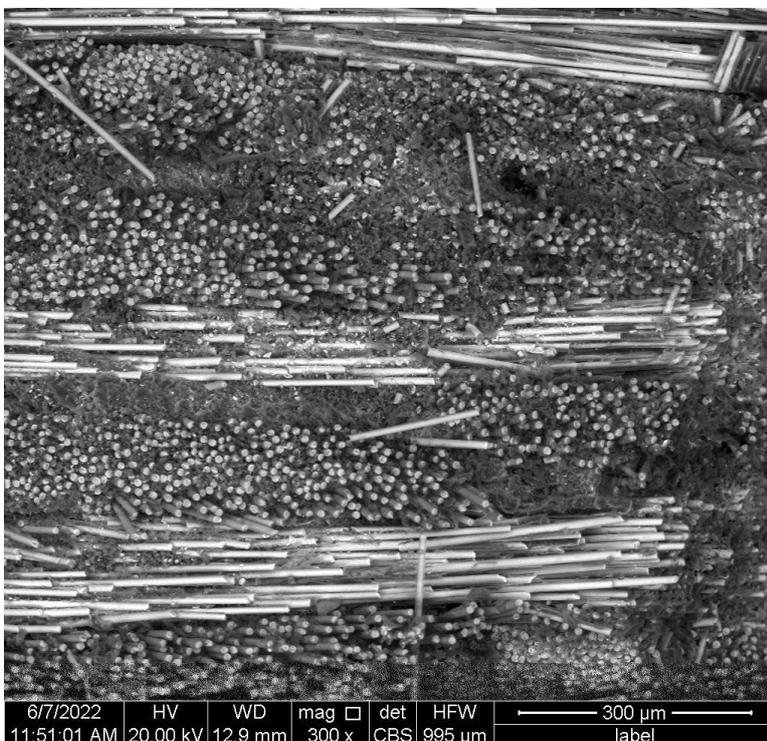
Cette photo montre le croisement des torons de fibres du composite sergé (orientation 0° et 90°). Elle Montre une bonne répartition des torons entre eux, signe d'un bon moulage du composite.

Des évidements montrent un manque de résine, qui peuvent être dus soit à un mauvais drain de la résine au sein du matériau, soit à un arrachement de cette dernière.



c)

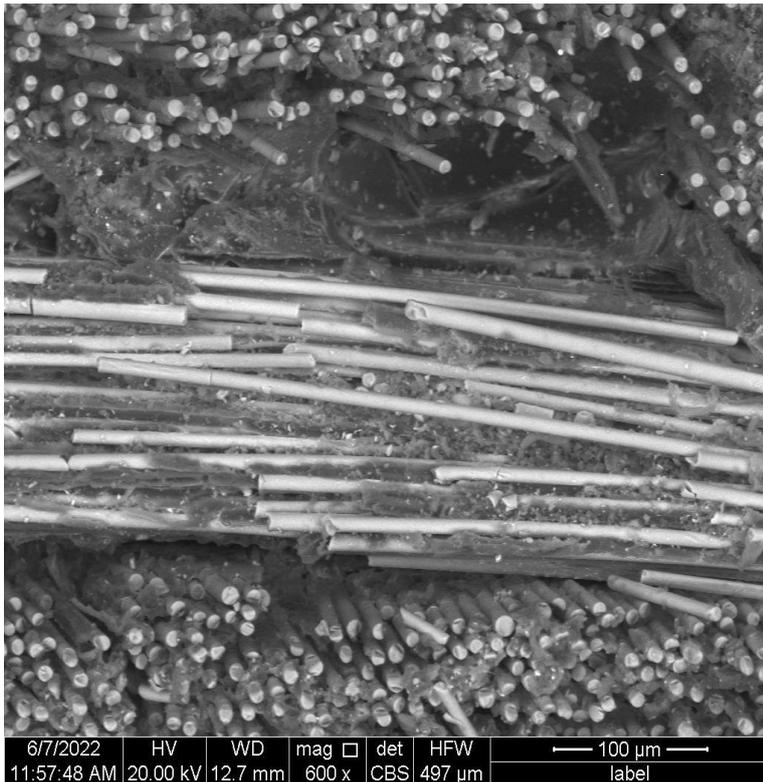
Figures 4.44: Coupe longitudinale (a), (b) et (c)



a)

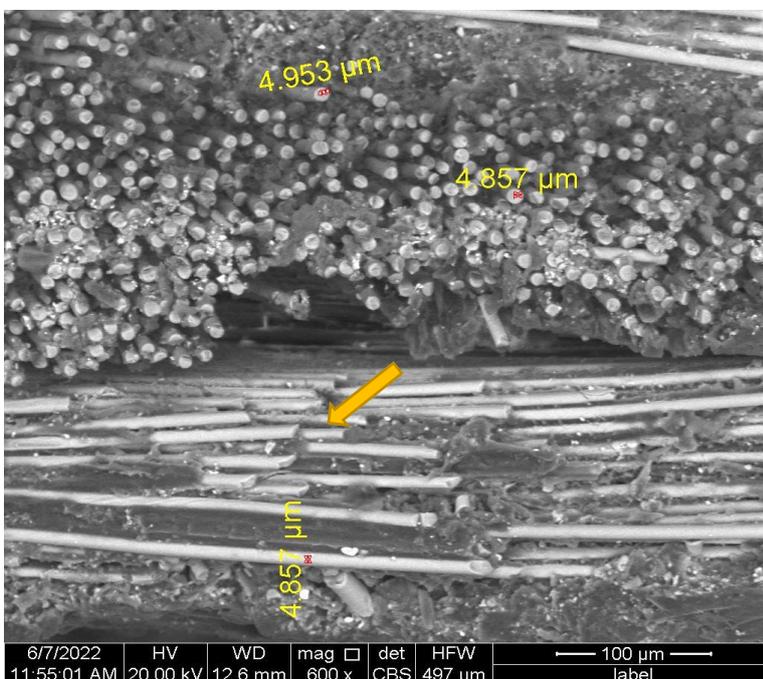
Rupture de matrice :  
 Une rupture de matrice est visible sur la partie supérieure de la photo, entre le toron à 0° et le toron à 90°. Cet arrachement de matrice est dû à l'effort de traction.

Cette photo un bon drainage de la résine dans le composite, ce qui montre un bon pourcentage fibres résine. Les fibres baignent bien dans la résine, ce qui donne un bon matériau.



Un léger délaminage est apparent entre les deux couches perpendiculaires, qui peut s'aggraver avec l'apparition des contraintes dues à l'effort de traction.

b)



Rupture de fibres :

Un arrachement d'un toron de fibres est apparent au milieu du matériau. Il est dû à l'effort de traction. Le diamètre des fibres est de l'ordre de 4.85 micromètres.

c)

Figures 4.45 Coupe transversale (a), (b) et (c)

### **V-1-introduction**

Le travail est essentiel à la vie, au développement et à l'épanouissement personnel. Malheureusement, des activités indispensables telles que la production alimentaire, l'extraction de matières premières, la fabrication de biens, la production d'énergie et les services mettent en œuvre des processus, des opérations et des matériaux qui peuvent, dans une plus ou moins grande mesure, être dangereux pour la santé des travailleurs et des membres des collectivités avoisinantes, ainsi que pour l'environnement dans son ensemble.

Toutefois, il est possible de prévenir la formation et la propagation d'agents nocifs en milieu de travail, grâce à des mesures de maîtrise des risques destinées non seulement à protéger la santé et la sécurité des travailleurs, mais également à limiter les dommages causés à l'environnement qui vont souvent de pair avec l'industrialisation. Si un produit chimique nocif est éliminé d'un processus de production, il ne touchera pas les travailleurs et ne polluera pas non plus l'environnement.

Le rôle de l'hygiène du travail est précisément de prévenir et de maîtriser les risques liés aux activités professionnelles. L'hygiène et sécurité du travail a notamment pour objectif de protéger et de promouvoir la santé des travailleurs, de protéger l'environnement et de favoriser un développement sûr et durable.

On ne saurait trop insister sur l'importance de l'hygiène du travail dans la protection de la santé des travailleurs. En effet, le fait qu'une maladie soit diagnostiquée et soignée ne prévient pas la survenue d'autres cas si l'exposition à l'agent étiologique persiste. Tant que l'environnement de travail reste malsain, les risques potentiels pour la santé subsistent. Seule la maîtrise de ces risques pour la santé peut rompre le cercle vicieux illustré à la figure ---

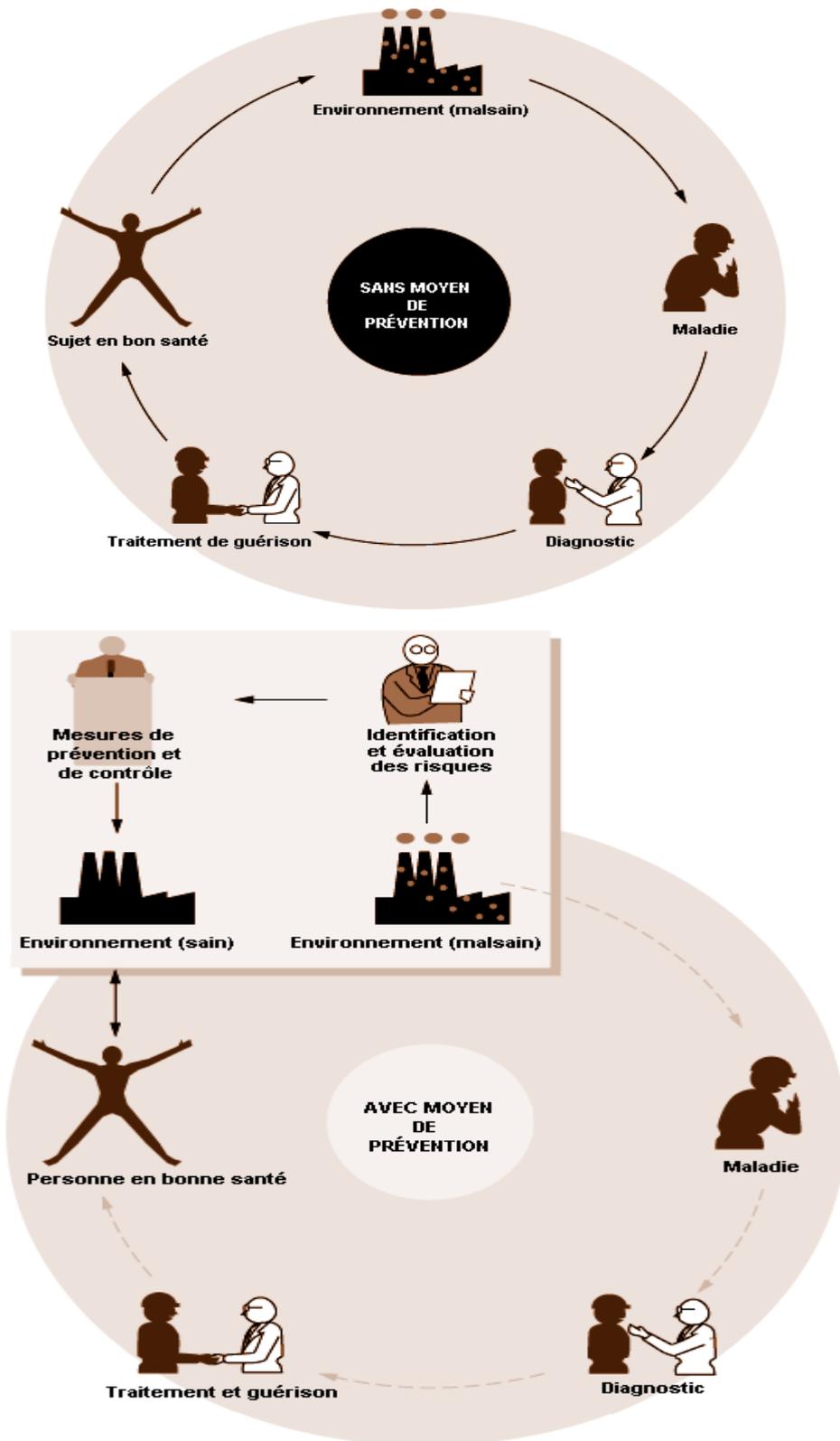


Figure 5.46 Interactions entre l'individu et l'environnement

## **V-2-Hygiène et sécurité du travail**

L'hygiène du travail est la science de l'anticipation, de l'identification, de l'évaluation et de la maîtrise des risques professionnels qui pourraient nuire à la santé et au bien-être des travailleurs. Elle prend également en compte l'impact éventuel de ces risques sur les collectivités avoisinantes et sur l'environnement en général.

L'hygiène du travail peut être définie de différentes façons, mais sa signification et son objectif sont, au fond, toujours les mêmes : protéger et promouvoir la santé et le bien-être des travailleurs et préserver l'environnement dans son ensemble grâce à des actions de prévention sur le lieu de travail.

L'hygiène du travail n'est pas encore universellement reconnue en tant que profession ; cependant, dans de nombreux pays, une législation se met progressivement en place pour aboutir à cette reconnaissance.

### **V-2-1-La certification ou l'agrément des hygiénistes du travail**

Après s'être entendu sur une définition de l'hygiène du travail et du rôle de l'hygiéniste du travail, il est nécessaire de prévoir des systèmes de certification pour garantir un niveau de compétence et de pratique acceptable en la matière. On entend par certification ou agrément l'élaboration d'un système officiel basé sur des procédures visant à établir et entretenir le niveau de connaissances et de compétence des professionnels (Burdorf, 1995).

L'IOHA a fait réaliser une enquête sur les systèmes nationaux de certification existants en la matière (Burdorf, 1995) et a émis des recommandations dans le but de favoriser la coopération internationale pour garantir la compétence des professionnels de l'hygiène du travail. Elle préconise notamment :

- « D'harmoniser les niveaux de compétence et les conditions d'exercice des professionnels en hygiène du travail » ;
- « De créer un organisme international de pairs chargés d'examiner la qualité des systèmes de certification existants ».

Sont également recommandées « la réciprocité » et « l'acceptation mutuelle des définitions nationales dans le but ultime d'établir un cadre général et d'adopter une définition internationalement reconnue ».

## **V-3-Consignes de sécurité**

Le Code du travail (articles R4227-37 à R4227-41) impose un affichage obligatoire des consignes de sécurité incendie pour les entreprises réunissant plus de 50 salariés, ainsi que celles où sont manipulées et mises en œuvre des matières inflammables.

Dans les autres établissements, des instructions sont établies, permettant d'assurer l'évacuation des personnes présentes dans les locaux dans les conditions prévues au 1° de l'article R. 4216-2.

L'affichage de la consigne de sécurité incendie doit indiquer :

- Le matériel d'extinction et de secours
- Les personnes chargées de mettre en action ce matériel
- Les personnes chargées de diriger l'évacuation
- Les mesures spécifiques liées à la présence de personnes handicapées
- Les moyens d'alerte
- Les personnes chargées d'aviser les sapeurs-pompiers
- Les coordonnées du service de secours de premier appel
- Le devoir, pour toute personne apercevant un début d'incendie, de donner l'alarme et de mettre en œuvre les moyens de premier secours, sans attendre l'arrivée des salariés spécialement désignés.

Au-delà de l'affichage légal ou réglementaire, d'autres types de consignes sont indispensables : celles dévolues au service de sécurité, qu'il soit interne ou assuré par une entreprise de sécurité privée.

### **IV-3-1-LES CONSIGNES DE SÛRETÉ ET DE SÉCURITÉ**

En cas d'intrusion, d'acte de malveillance, de départ de feu ou de tout autre situation nécessitant l'intervention potentielle d'un service de sécurité, les consignes de sécurité/sûreté font gagner un temps précieux et permettent de renforcer l'efficacité des actions menées.

Des consignes claires, rédigées par écrit et régulièrement mises à jour sont indispensables pour que les agents de sécurité puissent appréhender et gérer au mieux chaque situation.

Indépendamment de leur champ d'application (sûreté, sécurité, technique), il faut distinguer deux types de consignes : les consignes permanentes et les consignes temporaires.

- CONSIGNES DE SÉCURITÉ PERMANENTES :

La mise en place de consignes de sécurité permanentes, spécifiques à l'établissement considéré, est particulièrement importante dans la prévention :

- Des accidents du travail
- Des intrusions
- Des incendies
- Des défauts techniques

Quelle que soit la nature de l'alarme, de l'anomalie ou de l'événement constaté, l'objectif du service de sécurité est de mettre en place des mesures immédiates pour limiter l'importance des conséquences humaines et matérielles.

Dans le cas d'une alarme incendie, les agents de sécurité ont pour première mission d'effectuer une levée de doute. En cas de feu avéré, ils sont notamment amenés à contacter les services de secours, le ou les responsable(s) désigné(s) par la consigne, circonscrire si possible le feu naissant, et lancer si nécessaire l'évacuation des personnes présentes. Ils seront également chargés de l'accueil et du guidage des secours extérieurs à leur arrivée sur le site.

- CONSIGNES DE SÉCURITÉ TEMPORAIRES :

Lorsqu'un événement particulier est attendu, des consignes complémentaires sont définies : les consignes temporaires. C'est notamment le cas lors de situations impactant possiblement le dispositif de sûreté ou de sécurité :

- Changement ou extension d'horaires de travail
- Intervention d'une entreprise extérieure (ex. [opérations de maintenance](#))
- Ouvriers intervenant temporairement sur un chantier

# CONSIGNES DE SECURITE

<h3 style="text-align: center; background-color: red; color: white; margin: 0;">INCENDIE</h3> <div style="margin-bottom: 10px;">  Fumée anormale, ou odeur de brûlé, prévenir le :  <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  Ou déclenchez l'alarme la plus proche         </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  En cas de fumée baissez-vous ; l'air frais est près du sol         </div> <div>  Attaquez le feu avec l'extincteur approprié le plus proche         </div>	<h3 style="text-align: center; background-color: green; color: white; margin: 0;">ACCIDENT</h3> <div style="margin-bottom: 10px;">  Prévenez le :  <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> </div> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> <h2 style="font-size: 2em; color: blue; margin: 0;">H</h2> <h3 style="margin: 0;">CENTRES DE SECOURS</h3> </div> <div style="height: 40px; border: 1px solid black; margin-top: 10px;"></div>	<h3 style="text-align: center; background-color: green; color: white; margin: 0;">EVACUATION</h3> <div style="margin-bottom: 10px;">  A l'audition du signal d'évacuation ou sur ordre d'un responsable         </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  Respectez les directives du responsable d'évacuation         </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  Dirigez-vous vers l'issue d'évacuation, ne revenez pas en arrière         </div> <div>  N'utilisez pas les ascenseurs ni les monte-charges         </div>	
<b>CLASSES DE FEU</b>			
<b>A : EAU</b> Bois Papier Carton Tissu	<b>AB : EAU + ADDITIF</b> Bois Papier Carton Tissu Essence Fioul Huile Graisse	<b>ABC : POUDRE</b> Bois Papier Carton Tissu Essence Fioul Huile Graisse Gaz	<b>B : CO2</b> Essence Fioul Huile Graisse Origine électrique
<b>EQUIPIERS D'INTERVENTION</b> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>	<b>RESPONSABLES D'EVACUATION</b> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <span><b>POINT DE RASSEMBLEMENT</b></span> </div>			

RESPECTEZ LES CONSIGNES DE SÉCURITÉ

## ENTRÉE INTERDITE AUX PERSONNES NON AUTORISÉES

### UTILISEZ LES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION

### SOYEZ ATTENTIFS AUX RISQUES DE DANGERS

LA SÉCURITÉ EST L'AFFAIRE DE TOUS

Figure 5.47: exemples Panneaux consignes de sécurité

## **IV-4-les risque chimiques des matériaux composites**

Lors de la transformation des matières plastiques et de la polymérisation, l'élévation de la température peut entraîner la libération de produits volatils potentiellement dangereux. Les usines utilisant des matériaux composites se caractérisent par des environnements chimiques très complexes. Les ouvriers des matériaux composites (stratifieurs ou drapeurs) peuvent être exposés à des produits chimiques dangereux en phase liquide (vapeurs d'acétone ...) ou gazeuse (émanations de styrène ...) ainsi qu'à diverses poussières de fibre de verre ou de carbone, ce qui constitue des risques respiratoires. Un contact direct avec les résines, les catalyseurs, ... peut causer des lésions à la peau.

Les technologies de transformation des composites exposent ainsi les stratifieurs aux émissions toxiques des composés organiques volatils (COV), tel le styrène contenu dans les polyesters insaturés, en particulier pour certaines étapes de la fabrication, selon la nature des procédés utilisés : l'utilisation de procédés de transformation en moule ouvert (moulage au contact, projection) peut conduire à une exposition plus importante des opérateurs, de même l'exposition chimique aux composants de résines et aux solvants lors des opérations de stratification humide est bien supérieure à celle de la stratification avec des feuilles pré-imprégnées.

### **IV-4-1-Mesures de protection individuelle**

Les protections individuelles doivent être portées pendant toute la durée d'exposition aux nuisances physiques et chimiques. Le choix des Equipements de Protection Individuelle (EPI) : ils doivent être appropriés aux risques, aux conditions et caractéristiques particulières de travail.

#### **IV-4-1-1-Définition des équipements de protection individuelle (EPI) :**

La définition d'équipement de protection individuelle (EPI) » englobe tout équipement porté par une personne ou relié à elle dans le but de se protéger contre les dangers susceptibles de constituer une menace pour sa santé.

#### IV-4-1-2-Protection individuelle

1. Le port de combinaisons, blouses, sarraus ou uniformes est obligatoire pour le travail au laboratoire.
2. Le port de gants appropriés (Caoutchouc, Neoprene, Nitrile, Vinyle) est obligatoire chaque fois qu'un geste comporte un risque de contact accidentel direct avec du sang ou autres liquides biologiques, du matériel potentiellement infectieux ou des animaux infectés. Après usage, on devra se déganter aseptiquement et se laver les mains.



Figure5.48 : combinaison de laboratoire

3. Le personnel doit se laver les mains après avoir manipulé du matériel infectieux ou des animaux contagieux et avant de quitter le laboratoire.
4. Le port de lunettes de sécurité, d'un écran facial (visière) ou d'un autre dispositif de protection est obligatoire quand il est nécessaire d'assurer la protection des yeux ou du visage contre les projections de liquides, l'impact d'objets ou le rayonnement ultraviolet artificiel.



Figure5.49 : lunette et casque de sécurité

- 5.** Il est interdit de porter les vêtements protecteurs hors du laboratoire, comme par exemple à la cantine, à la cafétéria, dans les bureaux, la bibliothèque, la salle du personnel ou les toilettes.
- 6.** On ne doit pas porter de chaussures à bout ouvert dans le laboratoire.
- 7.** Il est interdit de manger, de boire, de fumer, de se maquiller ou de manipuler des lentilles de contact dans les zones de travail du laboratoire.
- 8.** Il est également interdit d'entreposer des aliments ou des boissons en quelque point que ce soit des zones de travail du laboratoire.
- 9.** Les vêtements de protection qui ont été portés au laboratoire ne doivent pas être rangés dans les mêmes vestiaires ou armoires que les vêtements de ville.

## Conclusion générale

L'objectif fixé pour ce travail entrant dans le cadre de la préparation du mémoire du master en construction mécanique est la caractérisation d'un matériau composite stratifié en verre / polyester préparé par le procédé moulage au contact et utilisé dans la construction navale. Cette mémoire nous a permis de déterminer les propriétés mécaniques du matériau composite verre sergé/époxy en **traction** et l'endommagement **microscopique** du matériau par microscopie électronique après traction

La préparation du mémoire nous a permis de découvrir beaucoup de choses. Le découpage des éprouvettes dans le **département mécanique**, le **département de métallurgie** de notre université pour les essais de traction, ainsi que l'Ecole Nationale Supérieure de mine et de Métallurgie Pour la microscopie électronique.

La préparation de notre mémoire nous a permis de compléter notre formation pratique par l'utilisation de techniques et de machines que nous n'avons pas utilisé durant notre cursus universitaire, tels que le moulage des composites, l'utilisation des machines d'essais mécaniques et de microscopie.

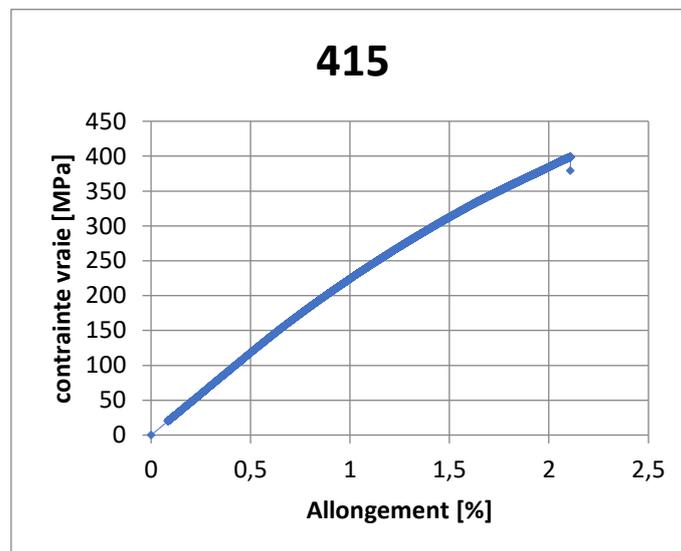
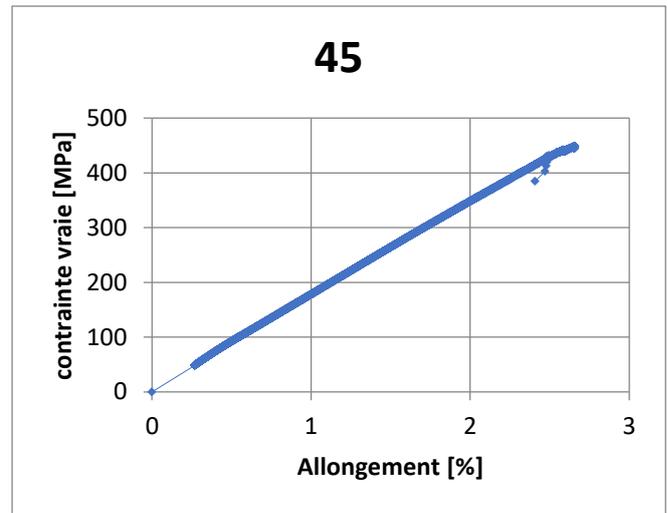
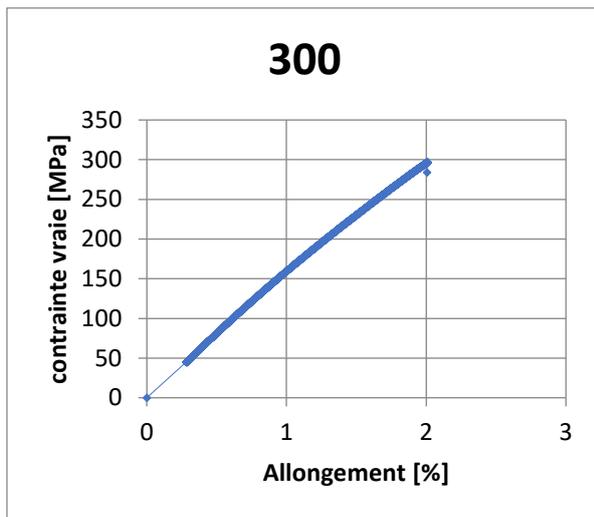
Les résultats des essais mécaniques et de la microscopie électronique obtenus lors de la préparation de notre mémoire sont fortement influencés par la présence de microfissures, de pores, d'inclusions de particules fragiles (défauts internes) et par la présence d'entailles (macro fissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception. Pour cela nous proposons des recherches approfondies et des échanges mieux structurées avec les laboratoires concernés de l'université d'Annaba.

## Bibliographie

- ❖ G. Wasselynck, Etude des interactions entre les ondes électromagnétiques de fréquences moyennes et les matériaux composites. Application à l'assemblage par induction de ces matériaux. PhD thésis, Université Nantes, France, 2011.
- ❖ Hexcel, "Investor presentation," <http://tinyurl.com/b7zsp9> (visité le 16/10/2015).
- ❖ D. Trichet, Contribution à la modélisation, à la conception et au développement du chauffage par induction des matériaux composites. PhD thésis, Université Nantes, France, 2000
- ❖ B. N. Cox and G. Flanagan, "Handbook of Analytical Methods for Textile Composites," Work, vol. 4750, no. March, 1997
- ❖ S.-H. Jang, Y.-L. Park, and H. Yin, "Influence of Coalescence on the Anisotropic Mechanical and Electrical Properties of Nickel," Materials (Basel)., vol. 9, no. 4, p. 239, 2016.
- ❖ Berthereau and E. Dallies. Fibres de verre de renforcement. Techniques de L'Ingénieur, AM 5132.
- ❖ G. Dupupet. Fibres de carbone. Techniques de L'Ingénieur, AM 5134.
- ❖ R. Pinzelli. Fibres aramides pour matériaux composites. Techniques de L'Ingénieur, A 3985.
- ❖ L. Caramaro. Fibres et fils à usage technique. Techniques de L'Ingénieur, N 2510.
- ❖ Baley. Fibres naturelles de renforts pour matériaux composites. Techniques de L'Ingénieur, AM 5130.
- ❖ Tarfaoui.M , Choukri.S and Neme.A, "historique de l'endommagement d'un composite verre/époxy sous chargement dynamique a grandes vitesses de déformations, ENSIETA/MSN, EMI, Département de Génie Mécanique, Rabat, Maroc
- ❖ P. Parneix et D. Lucas, "Les matériaux composites en construction navale militaire," Tech. L'ingénieur, 2000
- ❖ C.DECATHLON « Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs ». Rui Pedro Carreir a. Congrès RFIS, juin -2005.

- ❖ Paris, Christophe. *Étude et modélisation de la polymérisation dynamique de composites à matrice thermodurcissable*. PhD, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2011
- ❖ Berthelot J.-M. 2006. MATÉRIAUX COMPOSITES. Comportement mécanique et analyse des structures, Éditions TEC & DOC, 4ème édition
- ❖ Recommandation ISO R 527' Détermination des caractéristiques en traction ; 1966.
- ❖ Abraham, M.H., Whiting, G.S., Alarie Y. et coll., 1990: «Hydrogen bonding 12. A new QSAR for upper respiratory tract irritation by airborne chemicals in mice», *Quantitative Structure-Activity Relationships*, vol. 9, pp. 6-10.
- ❖ Adkins, L.E. et coll., 1990: «Letter to the Editor», *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 5, n° 1, pp. 748-750.

## ANNEXES



**Zwick / Roell**

**Zwick**  
Materialprüfung

Dies ist ein Beispiel-Export der Prüfvorschrift benchettah 2022 verre .zs2.

Der Export wurde am 23.10.09 um 01:30:04 ausgeführt.

Tableau des résultats :

Nr	Prélèvement	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	E GPa	R <sub>eH</sub> MPa	A <sub>e</sub> %	R <sub>eL</sub> MPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>t (corr.)</sub> %
300	1	28	16,186	-	-	-	288,3232	290,886	2.0029
415	2	20	23,38521	-	-	-	314,7060	390,6609	2,1102
45	3	23,52	17,971	-	-	-	430,177	437,101	2,65915

