

I- Introduction :

I-1 Historique :

L'industrie de la construction a été historiquement dominée par quatre matériaux traditionnels : La pierre, le bois, le béton et l'acier. Il y a quelques centaines d'années la pierre et le bois étaient les principaux matériaux utilisés pour la construction des structures.

Durant les deux derniers siècles, l'acier et le béton armé sont devenus les principaux matériaux de construction et la plupart des paysages urbains modernes sont maintenant définis en grande partie par ces deux matériaux.

L'acier et le béton ont bien servi la communauté du génie civil, ils ont permis la construction des réseaux d'infrastructures mondiaux qui ont considérablement contribué à la santé et à la prospérité économiques du monde moderne. Cependant ces deux matériaux souffrent de diverses formes de dégradations.

Après plusieurs décennies de négligence et d'abus, nos infrastructures vieillissantes se détériorent, Figure (I-1). [1]



Figure I-1 : corrosion sévère des armatures d'acier dans ces poteaux de pont causant l'écaillage de l'enrobage de béton et l'exposition des barres d'armatures. [1]

Dans le but de ralentir et/ou empêcher la détérioration des infrastructures, les ingénieurs recherchent des nouveaux matériaux qui peuvent être employés afin de prolonger la vie en service des structures existantes tout en permettant la conception et la construction de nouvelles structures durables.

Les polymères renforcés de fibres une classe relativement nouvelle de matériaux résistant à la corrosion, de hautes résistances mécaniques et légères ont été de plus en plus considérées au cours de 15 dernières années en tant que matériaux pratiques pour les usages structuraux.

Les polymères renforcés de fibres (PRF) sont utilisés, depuis des décennies en aéronautique, en aérospatial, dans le secteur de l'automobile et dans d'autres domaines, leur utilisation dans les travaux de génie civil date des années 50. [2]

Où les barres d'armatures à base de fibres de verre (PRFV) ont été étudiées pour la première fois dans une structure en béton, mais ce n'est que dans les années 70 que les PRF ont finalement été considérés dans des applications en génie civil et que leurs performances supérieures à l'acier recouvert d'époxy ont été reconnues.

Les premières applications des PRFV n'ont pas été un succès en raison des pauvres performances des matrices thermodurcissables dont les cures étaient faites à des pressions de moulage élevées. [2]



Figure I-2 : produit en PRF disponibles. [2]

Depuis leurs premières utilisations, plusieurs produits en PRF avec différents types de fibres ont été développés. Les fibres sont faites d'aramides, de polyvinyle, de carbone ou de verre amélioré.

Les produits en PRF sont fabriqués sous différentes formes : barres, feuilles, treillis de deux dimensions, treillis de trois dimensions, ou encore des formes structurales standard comme montrés à la figure I-2. [2]

Dans ce chapitre les deux composantes majeurs des produits en PRF, les fibres et les matrices (ou résines), leur propriétés ainsi que les propriétés mécaniques des barres d'armatures en PRF, seront discutées. [2]

I-2 définition d'un matériau composite (PRF) :

Toute matière première comportant des charges peut être appelée au sens général composite. Par définition, un matériau composite est formé d'éléments très différents.

C'est le résultat du mélange d'au moins deux composantes, différentes par leur nature, leur forme et leur fonction, et dont les performances globales sont supérieures à celles des éléments le constituant.

Les matériaux composites sont utilisés par l'homme depuis des millénaires dans le domaine de la construction, le pisé de paille et d'argile est un des plus anciens matériaux dont l'idée première est exactement celle des composites : exploiter la résistance à la rupture des fibres, en laissant à une matrice de « qualité mécanique » inférieure le soin de maintenir ces fibres dans la forme voulue.

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres « PRF » sont des produits de synthèse constitués principalement de renforts fibreux, supportés par un liant appelé matrice.

Leur comportement dépend principalement du pourcentage de fibres et des propriétés mécaniques des constituants.

Ce sont les renforts fibreux qui donnent aux composites leurs propriétés hautement directionnelles, leur imposant un comportement anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture. [3]

I-3 : constituants des PRF :

Les produits en PRF sont des matériaux composites constitués d'une matrice (résine) et de fibre. Comme il est montré à la figure I-3, les fibres sont plus résistantes que la matrices, afin d'assumer correctement leur fonction de renfort.

Le volume de fibre devrait être supérieur à 55% dans les barres et les tendons en PRF et à 35% pour les treillis en PRF [4].

Les propriétés mécaniques du produit final dépendent de la qualité des fibres, de leur orientation, de leur forme, du rapport volumique en fibre, de l'adhésion à la matrice, et du procédé de fabrication. Ce dernier aspect est significatif, car un simple mélange de fibre de qualités.

Par conséquent, des produits en PRF faits avec les mêmes fibres, résines et rapports volumique en fibres peuvent présenter des propriétés mécaniques très différentes.

Des additifs et des charges adaptés aux systèmes de fibres et de résines sont ajoutés pour moduler la polymérisation et d'autres raisons. La conception des diluants, tels que les styrènes, et celle des additifs anti-retrait ne doivent pas excéder, respectivement, 10% et 20% de la masse de la résine de base. [4]

Des charges inorganiques peuvent être ajoutées mais leur concentration ne doit pas excéder 20% de la masse de la résine de base d'autres additifs, tels que des agents de couplage, des agents de démoulage, des initiateurs, des durcisseurs, des accélérateurs, des catalyseurs ultra-violet, des ignifugeants, des agents de mouillage, des agents moussants et des pigments peuvent être ajoutés

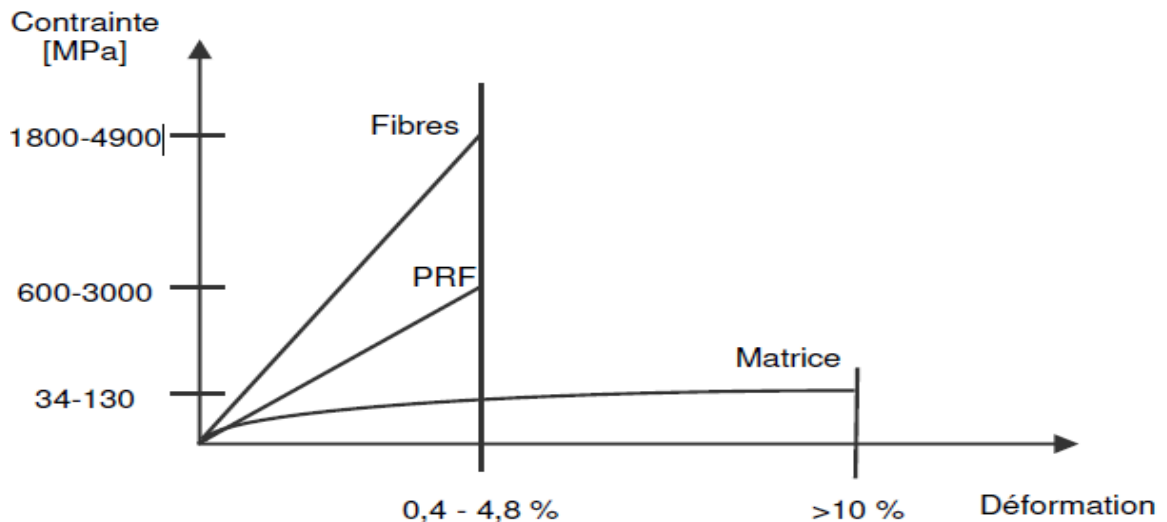


Figure I-3 : Courbes contrainte/ déformation des PRF, des fibres et de la matrice. [2]

I-3-1 les fibres :

Les fibres utilisées pour la fabrication des PRF doivent avoir une résistance élevée, une bonne rigidité et une grande ténacité.

Elles doivent aussi être durables et de faible coût, les performances des fibres sont affectées par leur longueur, la forme de leur section transversale et leur composition chimique, les fibres sont disponibles sous différentes sections transversales et en différentes tailles. [2]

Les fibres les plus communément utilisées pour les PRF sont le carbone, le verre et l'aramide.

I-3-1-1 Les types de fibres :

A/ Les fibres de carbone :



Figure I-4 : Bobine en fibre de carbone [5]

Les fibres de carbone ont un haut module d'élasticité, de 200 à 800 GPa.

L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 %. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et elles résistent à plusieurs solutions chimiques. Elles présentent une résistance excellente à la fatigue, et une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles précontraints.

La fibre de carbone est un conducteur électrique et, par conséquent, peut donner la corrosion galvanique si elle est en contact direct avec l'acier. Il faut signaler également le mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone.

Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité.

On trouvera des fibres dites « à haute résistance » HR et des fibres « à haut module » HM ou même « à très haut module » THM, et des fibres intermédiaires. [3]

a-1/ les avantages et les inconvénients de fibre de carbone :

- **Avantage :**

- ✚ bonne résistance à la traction
- ✚ dilatation thermique nulle
- ✚ absorption des vibrations (amortissement)
- ✚ excellentes résistances aux chocs et à la fatigue
- ✚ bon comportement chimique vis-à-vis des carburants
- ✚ très faible densité (1.45 g/cm³)

- **Inconvénient :**

- ✚ prix élevé.
- ✚ faible tenue en compression.
- ✚ reprise d'humidité importante (4%) donc.
- ✚ étuvage avant utilisation.
- ✚ faible adhérence avec les résines.
- ✚ sensibilité aux UV.
- ✚ usinabilité difficile.
- ✚ tenue au feu, décomposition à 400 C.

B- les fibres de verre :

Les fibres de verre sont moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide, par conséquent, les composites en fibres de verre sont devenu la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles.

Les modules d'élasticité des fibres sont de 70 à 85 GPa avec un allongement ultime de 2 à 5 % [3] selon la qualité.

Par contre les fibres de verre peuvent avoir des problèmes de relaxation. Elles sont aussi sensibles à l'humidité, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées. [3]

- ✚ Type E : pour des matériaux grand diffusion.
- ✚ Type D : pour ses propriétés diélectriques.
- ✚ Type R : pour des matériaux hauts performances.



Figure I-5 Bobine en fibre de verre [6].

b-1 les avantages et les inconvénients de fibre de verre :

- **Avantage :**
 - ✚ rapport performance mécanique/prix
 - ✚ bonne résistance spécifique
 - ✚ bonne adhérence avec toutes les résines
 - ✚ tenue à température élevée (50% de la résistance conservée à 350 °C)
 - ✚ incombustibilité
 - ✚ dilatation et conductivité thermiques faibles
 - ✚ bonnes propriétés diélectriques
- **Inconvénient :**
 - ✚ faible module (par rapport à carbone et aramide)
 - ✚ vieillissement au contact de l'eau.

C - Les fibres d'aramides :

Appelés aussi polyamide aromatique, une marque bien connue des fibres d'aramide est « kevlar » mais il existe d'autres marques aussi tel que « Twaron », « Technora », et « SVM ».

Les modules d'élasticité de ces fibres sont de 70 à 200 GP, [3]a avec une haute énergie de fracture et un allongement ultime de 1,5 à 5 % , [3] selon la qualité.

Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées, à l'humidité et aux radiations « ultra violet » et par conséquent, ne sont pas largement utilisées dans les applications de génie civil.

Plus loin, les fibres d'aramide ont des problèmes avec la relaxation et la corrosion, mais avec une bonne résistance au choc et à la fatigue.

C-1 les avantages et les inconvénients des fibres d'aramide :

- **Avantage :**

- + bonne résistance à la traction
- + dilatation thermique nulle
- + absorption des vibrations (amortissement)
- + excellentes résistances aux chocs et à la fatigue
- + bon comportement chimique vis-à-vis des carburants
- + très faible densité (1.45g/cm³)

- **Inconvénient :**

- + prix élevé
- + faible tenue en compression
- + reprise d'humidité importante (4%) donc
- + étuvage avant utilisation
- + faible adhérence avec les résines
- + sensibilité aux UV
- + usinabilité difficile
- + tenue au feu, décomposition à 400 °C.

I-3-2 La matrice :

La matrice a pour rôle de :

- ❖ lier les fibres de renforts,
- ❖ répartir les contraintes,
- ❖ apporter la tenue chimique de la structure,
- ❖ donner la forme désirée au produit final.

Les deux types de matrices qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés foncièrement différentes :

✚ **Les résines thermodurcissables (TD)** qui sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée.

✚ l'emploi des polymères **thermoplastiques (TP)**, renforcés avec des fibres courtes (et, prochainement, avec des fibres longues) se développe fortement.

Les **polymères thermoplastiques** ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent).

[9]

Tableau I-1 : Principales différences entre matrices TP et TD. [9]

Matrices	TD	TP
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité	des renforts Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

I-3-2-1 Résines thermodurcissables (TD) :

Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- Les **polyesters insaturés**, ce sont les résines les plus utilisées dans les applications GD. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.
- Les **vinylesters**, ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles.
- Les **résines époxy** (ou époxydes) constituent la résine type des composites HP.
- Les **résines phénoliques** sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.
- Les **polyuréthannes** ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule.

Tableau I-2: Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées [9]

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polyester (UP)	1,2	-	3	120
Vinyl-ester	1,15	-	3,5	140
Phénolique	1,2	40-50	3	120-150
Epoxyde	1,1-1,4	50-90	3	120-200
Polyuréthane (PU)	1,1-1,5	20-50	1	100-120
Poly-imide	1,3-1,4	30-40	4	250-300

I-3-2-2. Résines thermoplastiques (TP)

Les thermoplastiques (TP) présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une Bonne stabilité dimensionnelle.

Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

- Les polyamides (PA).
- Les poly téréphtalates éthylénique (PET) et butylénique (PBT).
- Les polycarbonates (PC).
- Les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE).

- Les polyoxyméthylène (POM).
- Le polypropylène (PP) est un polymère semi-technique, peu onéreux, assez stable en température, mais combustible.

D'autres résines TP commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo-stabilité (tenue thermique supérieure à 200°C) et de bonne tenue mécanique :

- Les polyamide-imide (PAI).
- Le polyéther-imide (PEI).
- Le polyéther-sulfone (PES).
- Le polyéther-éther-cétone (PEEK).

Tableau I-3 : Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées [9]

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Modu le de flexion (Gpa)	Tenue à la Chaleur continue (°C)
Polypropylène (PP)	1,1-1,2	20-30	1-1,6	85-115
Polytéréphtalate butylénique (PBT)	1,5	45-55	2,2-2,6	120
Polytéréphtalate éthylénique (PET)	1,6	55-75	2-2,2	105-120
Polyoxide de phénylène (PPO-)	1,3	55-65	2,4-2,6	80-105
Polyoxyméthylène (POM)	1,6	60-70	7-9	95-105
Polyamides (PA)	1,3-1,4	60-90	6-9	80-120
Polyamide-imide (PAI)	1,3-1,4	195	4,9	275
Polyéther-imide (PEI)	1,5	105	3	170
Polyéther-sulfone (PES)	1,6	85	2,6	180
Polyéther-éther-cétone (PEEK)	1,5	100	3,7	>240

I-3-3. Principales combinaisons de résines et de renforts.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des combinaisons matrices/renfort les plus couramment utilisées donnant lieu à des composites hautes performances (HP) ou grand diffusion (GD).

Tableau I-4 : Synthèse de l'utilisation des résines et renforts non renforcées [9]

Résines		Fibres de renfort				
		Verre E	Verre D	Verre R	Carbone	Aramide
Thermodurcissables TD	Polyesters	GD	GD	-	-	-
	Phénoliques	GD	-	-	-	-
	Polyuréthannes	GD	-	-	-	-
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
Thermoplastiques TP	Polypropylènes	GD	-	-	-	-
	PA6 et 6-6	GD	-	HP	-	-
	PA 12, PEEK	-	-	HP	HP	HP

I-4 Domaine d'utilisation des matériaux composites :

Péchiney a développé des matériaux composites réfractaires pour le coulage en toute sécurité d'alliage très corrosif aluminium/lithium (Al/Li) à l'état liquide



La société française aéronautique Dassault Aviation emploie un moule et de l'outillage en matériau composite dans le développement de l'avion de chasse Rafale.



Pendant les grands prix 1994 et 1995, l'équipe de Formule 1 Benetton-Renault a conçu un bouclier thermique unique fait en composite carbone.

Cela permit à Michael Schumacher de gagner deux fois le titre de champion du monde et d'offrir à son équipe technique le championnat du monde des constructeurs de voiture pendant ces deux années.



Cette voiture a un châssis nid d'abeilles, la coque est en fibre de carbone, toutes cécités très légères. Elle a obtenu au Marathon SHELL, le premier prix dans la catégorie Diesel pour les années 1992, 93, 94, 95, 96. Et également un prix de design.



I-5 domaines d'utilisation d'un matériau composite (PRF) en génie civil :

Le génie civil est aussi concerné par ce domaine du composite et leur utilisation contribué dans les différents travaux de construction civiles et industrielles ; notamment au domaine de la réhabilitation des structures et des ouvrages (réparation et/ou renforcement).

En raison de la grande variété dans les types, les formes et les propriétés des matériaux de PRF. Il y a une énorme variété d'utilisation dans les quelle les PRF peuvent être efficacement employée dans d'usages structuraux et dans les infrastructures.

Cette section d'écrite brièvement certaines des utilisations les plus communes des PRF dans l'infrastructure civile. La lecture devrait se rappeler que l'utilisation des matériaux de PRF dans les structures est une discipline évolue rapidement et que beaucoup de nouveaux usages apparaissent chaque année.

Pour plus d'informations la lecture est invite à consulter le site internet suivant : www.isiscanada.com.

I-5-1 Structure entièrement faite de PRF :

L'utilisation la plus évidente des PRF dans les structures est la fabrication de structures entières ou de composantes structuraux spécifiques en PRF.

Ceci est accompli d'une manière simple et économique en utilisant des sections structurales de PRF putrides qui peuvent être fabriquées aisément et économiquement a partir de PRF de verre, les structures entièrement en PRF deviennent de plus en plus fréquentes pour les structures de petites tailles telle que les ponts piétonnière, les poteaux de service publics, les cages d'escaliers de stationnement multi étages et les plateformes en milieu maritime, (la figure I-6) montre un pont routier de petit portée situé aux Etats-Unis et entièrement fait de PRF en plus des structures entièrement faites de PRF.

Les PRF ont été également utilisés pour fabriquer des éléments structuraux spécifiques tels que des panneaux de tabliers de pont (figure I-7) et des poutres, des câbles de supporte pour ponts haubanés, des panneaux anti-déflagrations, des treillis tridimensionnels des systèmes modulaires de bâtiment résidentiel, des écrans de palplanches marins et des systèmes d'ancrage au sol.



Figure I-6 : pont routier de petite portée entièrement fait de PRF



Figure I-7 : section d'un panneau de tablier de pont en PRF de verre soumise à une charge simulée

I-5-2 Les matériaux composites utilisés en Algérie :

L'utilisation des matériaux composites en Algérie, comme de fibres de carbone, et raisonnables en Algérie par SIKa. Il s'agit en effet du tissu mono directionnel SIKa WRAP (tissu de fibres de carbone), SIKa CARBODUR (lamelles de fibres de carbone) et du T.F.C Freyssinet (tissu de fibres de carbone bidirectionnel), autant que des divers produits complémentaires, destinés à obturer et injecter les fissures des poutres à renforcée.

I-5-2-1 Tissu de fibre de carbone unidirectionnel :

Ce matériau est composé du tissu Sika Wrap HEX 230 C et de résine d'imprégnation du tissu appelée Sikadur 330, le tissu et la résine forment le composite [6].

Les caractéristiques du tissu Sika Wrap sont distingué au tableau I-5 comme suit :

Tableau I-5 : caractéristiques du tissu Sika Wrap HEX 230 C

Masse surfacique	Epaisseur	Rouleaux de longueur	largeur	Couleur	Résistance à la traction	Module d 'élasticité en traction
225 g/m ²	0,13mm	45,70 m	305mm ou 610mm	noir	3500 Mpa	230 000 Mpa

I-5-2-2 Lamelle de fibre de carbone Sika Carbodur:

Lamelle composée de fibres de carbone, noyées dans une matrice époxydique.

Les lamelles Sika Carbodur est un composite à lamelles de fibres de carbone, dont les caractéristiques sont comme suit :

- Très haute résistance mécanique en traction.
- Epaisseur faible (1,2 mm).
- Excellent comportement à la fatigue.
- Insensible à la corrosion.
- Faible poids propre.
- Croisement aisé des lamelles.
- Facile à transporter grâce à sa présentation en rouleau de 10 ;25 et 250 mètre.
- Densité 1,5 g/cm².

Dimensions du type S 812

- ✚ Largeur 80 mm
- ✚ Epaisseur 1.2 mm
- ✚ Section 96 mm²
- ✚ Module d'élasticité en traction > 165000 MPa
- ✚ Résistance en traction > 2800 MPa
- ✚ Allongement à la rupture > 1.7% [18].

Utilisation avec la colle époxydique SIKADUR 30 COLLE dans le cadre du procédé SIKA CARBODUR pour la réparation et le renforcement des structures en béton,

Les caractéristique de cette colle est résumé dans e tableau suivant :

- Densité 1.8 g/cm²;
- Résistance à la compression > 55 MPa à 2 jours et à 20°C
- Résistance à la flexion > 30 MPa à 2 jours et à 20°C
- Module d'élasticité statique : 12800 MPa
- Adhérence sur béton > 4 MPa (rupture dans le béton)
- Résistance à la traction par cisaillement : > 15 MPa à 28 jours
- Coefficient de dilatation 0.03 mm/m de - 10°C à + 40°C.

I-5-2-3 Matériau Composite de fibres de carbone (bidirectionnel (T.F.C)) :

Le Composite de fibres de carbone (bidirectionnel (T.F.C)), l'ensemble du tissu matricé dans la résine de synthèse.

Le tissu obtenu par la fabrication, est composé d'environ 40% de tissu et 60% de résine. Ces proportions peuvent varier à l'exécution dans une fourchette de plus ou moins 7% selon les conditions d'application sur le chantier (température ambiante, surface spécifique du support etc.). Le composite est constitué donc, du tissu du composite TFC et de la résine de la matrice du composite.

Le tissu est un tissu bidirectionnel à sens de résistance privilégié dans la chaîne, il est constitué de 70 % de fibres dans le sens de la chaîne et de 30% de fibres dans le sens de la trame

Les largeurs nominales de tissu TFC sont : 300mm, 200mm, 150mm, 75mm et 40mm. Le tissu est livré en rouleau à la largeur commandée n'excédant pas 50m, il peut être coupé sur le chantier à la longueur désirée au moyen d'un cutter ou d'une paire de ciseaux [18].

Les caractéristiques mécaniques de TFC :

- ✓ Epaisseur moyenne ; 0.43 (mm)
- ✓ Traction rupture; 1400 (MPa)
- ✓ Module E; 105 (GPa)
- ✓ Traction rupture 1 cm de largeur chaîne ; 600 (daN)

I-6 Avantages et inconvénients des matériaux composites :

I-6-1 Avantages :

- ✓ Gain de masse.
- ✓ Mise en forme de pièce complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interface (boulonnage, rivetage, et soudure sur structures métalliques).
- ✓ Grande résistance à la fatigue.
- ✓ Faible vieillissement sous l'action de la corrosion.
- ✓ Insensibles aux produits chimiques « mécaniques » comme les graisse, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvant, pétrole.

I-6-2 Inconvénients :

- ✓ Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- ✓ Attention aux décapants de peintures qui attaquent les résines époxydes.
- ✓ Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- ✓ Meilleure tenue au feu que les alliages mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
- ✓ cout parfois prohibitifs, le gain en cout est surtout valable pour des grandes séries.