

Réalisation de pièces structurales de technicité croissante pour le nautisme de compétition à partir de fibres de carbone recyclées

Pieces of increasing technical performance manufactured with recycled carbon fibers for competitive boating

Olivier Mantaux¹, Arnaud Gillet¹, Gilles Cazaurang, Eric Lacoste¹

1 : Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295
15 rue Naudet CS 10207, 33175 Gradignan Cedex, France
e-mail : {gilles.cazaurang, arnaud.gillet, olivier.mantaux, [eric.lacoste](mailto:eric.lacoste@u-bordeaux.fr)}@u-bordeaux.fr

Résumé

Le chaînon manquant du recyclage de composites à fibres de carbone est la réalisation de pièces de hautes performances avec la fibre de carbone recyclée. La maîtrise des caractéristiques et de la qualité des composites à fibres recyclées donnera la preuve de l'intérêt des fibres de carbone recyclées. Dans cette étude, les propriétés des composites à fibres recyclées sont comparées aux composites classiques à fibres de verre ou de carbone. Il est montré que l'alignement important et la grande longueur des fibres sont des points clés permettant de conférer des propriétés très intéressantes aux composites à fibres recyclées. Quatre types de pièces pour bateau de compétition ont été conçus et réalisés afin de démontrer le potentiel et la simplicité de mise en œuvre de ces matériaux. Toutes ces pièces naviguent avec succès depuis un an sur le bateau *Cassiopee* de la navigatrice Marie Gendron. Ce travail utilise des fibres de carbone recyclées réalignées par la technologie de réalignement I2M-Bordeaux.

Abstract

The missing link in the recycling of carbon fiber composites is the production of high performance parts with recycled carbon fibers. Only a high quality of the recycled fiber composites will prove the value of recycled carbon fibers. In this study, the properties of recycled fiber composites are compared to conventional glass or carbon fiber composites. It is shown that alignment and fiber length are key points to generate very interesting properties to recycled fiber composites. Four types of racing boat parts have been designed and built to demonstrate the potential and simplicity of these materials. All these parts sail successfully for a year on the navigator Marie Gendron's *Cassiopee* racing boat. This work uses recycled carbon fibers reshaped by the I2M-Bordeaux realignment technology.

Mots Clés : fibres de carbone – recyclage – nouveaux matériaux – propriétés spécifiques – alignement

Keywords : carbon fiber - recycling - new materials - specific properties - alignment

1. Recyclage de fibres de carbone

1.1 Introduction

Le recyclage de fibres de carbone à partir de déchets composites n'est plus un verrou technique. En effet il existe aujourd'hui plusieurs solutions qui permettent de dissoudre la matrice organique du composite : la pyrolyse [1,2], la solvolysse en fluide supercritique [3-5], la puissance pulsée [6] ou encore la vapo-thermolysse [7]. Chacune de ces technologies permet de récupérer des fibres de carbone saines sans perte de propriétés notable (inférieure à 15%). L'enjeu principal consiste maintenant à démontrer que ces fibres de carbone peuvent être utilisées pour réaliser de nouvelles pièces composites. Puisque les fibres recyclées n'ont que très peu perdu en performances (module de Young et résistance à rupture par exemple) il est donc possible de réaliser des pièces de hautes performances à la condition de savoir remettre en forme les fibres recyclées. Pour réaliser cette remise en forme des fibres, nous avons utilisé le dispositif breveté de l'I2M/Université de Bordeaux [8,9] sur des chutes de découpe aéronautiques sèches. Marie Gendron (association Marie-Océan) est une jeune navigatrice qui s'est construit un bateau de compétition transatlantique mini 6.50 « Cassiopee » 100% composite Carbone. Pour des raisons de coût, de facilité de mise en œuvre

et aussi de performances, ce bateau constitue un véritable laboratoire flottant pour les composites à fibres de carbone recyclées.

1.2 Mise en évidence de l'intérêt de la remise en forme des fibres de carbone recyclées

Vu la relative petite taille du gisement (quelques milliers de tonnes par an en Europe) et le coût potentiel des étapes de stockage, transport, pyrolyse ou solvolysé et remise en forme, il est illusoire de penser que la fibre de carbone recyclée (FCR) pourra concurrencer la fibre de verre sur le plan du coût (quelques euros / kg). En conséquence, la fibre de carbone recyclée n'aura d'intérêt que si elle apporte des performances nouvelles pour justifier son coût, probablement intermédiaire entre celui de la fibre de verre et celui de la fibre de carbone vierge.

Plusieurs technologies ont été mises au point afin de remettre en forme les fibres de carbone recyclées. Les techniques les plus simples consistent à réaliser des granulés préimprégnés de fibres courtes [10] : elles présentent l'avantage d'être facilement industrialisables, en particulier pour réaliser des formes complexes en moulage par compression. Toutefois, en raison de la faible longueur des fibres (5mm) et du faible taux de fibres (10-20%), les caractéristiques mécaniques restent faibles, à peine supérieures à celles de la résine seule. Les auteurs et les industriels [7-11] travaillent beaucoup sur des techniques dérivées de techniques papetières et sur le cardage [12-15] des FCR afin de réaliser des voiles pseudo 2D (figure 1.) de fibres semi longues (40-100mm). Cette technique de remise en forme présente l'avantage d'être déjà utilisée à l'échelle industrielle dans le domaine textile. Les voiles peuvent alors être superposés et enduits de résine thermoplastique (PP, PA) ou thermodurcissable (époxy) pour réaliser des nouveaux matériaux composites. Ces matériaux présentent des résistances très intéressantes mais des raideurs faibles, notamment avec résine thermoplastique qui impliquent de faibles taux de fibres (20-30%). La solution développée à l'I2M de Bordeaux [8,9] consiste à réaliser des pseudo-UD avec un fort alignement de FCR semi longues (écart type 11° / 80 - 150mm). Cette technologie a pour intérêt de permettre de réaliser des pièces de formes complexes grâce à une bonne déformabilité des préformes et des matériaux de grandes raideur et résistance [16].

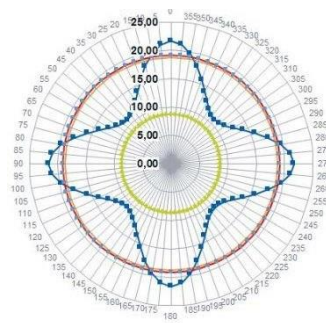


Fig. 1. Répartition angulaire des fibres dans un voile cardé [17]

Les modules et résistances spécifiques de différents types de composites à fibres recyclées obtenus à une échelle proche du niveau de production industriel, sont récapitulés dans le tableau 1, en fonction du taux de réalignement et de la longueur des fibres.

Type de semi-produit	Longueur des fibres (mm)	Alignement ($^\circ$)	résine	Taux de fibres Vf	densité	Module (GPa)	Résistance (MPa)
fibres courtes [10,12]	0.5-10	non	PP, PA ou Epoxy	10%-30%	1.05-1.2	5-25	90-350
Voiles [12-15]	20-100	Voiles pseudo 2D	PP, PA ou Epoxy	20%-40%	1.4	25-35	150-450
2 plis Pseudo UD 0-90 [8,9]	80-150	95% à $\pm 8^\circ$	Epoxy	55%-62%	1.55	45-55	300-400

Tab. 1. Caractéristiques de matériaux composites FCr en fonction de la forme des fibres

Afin de mesurer le potentiel des matériaux composites à fibres de carbone recyclées, leurs propriétés spécifiques ont été comparées à d'autres matériaux performants sur la figure 2.

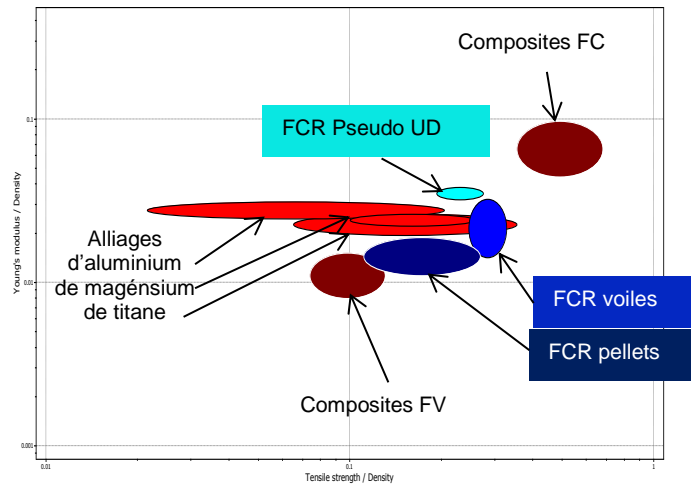


Fig. 2. Propriétés spécifiques comparées de différents matériaux hautes performances

Il apparaît que l'utilisation de fibres de carbone recyclées permet de réaliser des matériaux avec des propriétés spécifiques très intéressantes. De plus, la réalisation de pseudo UD pour mettre les FCR en forme de Non Crimp Fabrics (NCF) de fibres de longueur supérieure à 80mm permet de réaliser de nouveaux matériaux composites aux propriétés inédites qui n'entrent pas en concurrence frontale avec les matériaux existants. Il sera ainsi certainement possible de générer de l'innovation en utilisant ces matériaux tout en conservant un faible impact environnemental et -nous l'espérons- un coût raisonnable. C'est ce que nous allons illustrer dans la partie suivante à l'aide de 4 exemples de pièces positionnées sur le bateau de course *Cassiopée*.

2. Reconception de pièces sollicitées en flexion

2.1 Matériaux composites à fibres de carbone recyclées réalignées

Les fibres recyclées sont issues de chutes de découpe sèches de diverses tailles et formes provenant d'un équipementier aéronautique. Ces chutes de tissus sont redécoupées en carrés 150x150 pour obtenir des fibres recyclées d'une longueur 150mm ; elles sont détissées et remises en forme par la technologie de réalignement I2M [8] afin de réaliser des bandes continues de fibres recyclées réalignées (FCrR) discontinues (figure3a ; tableau 2). En fonction des paramètres de réalignement, la dispersion d'orientation peut être choisie entre 8° et 15°. Les bandes sont consolidées à l'aide de 2% en masse d'un liant polyamide. Les bandes sont assemblées en préformes UD (figure3b), enduites de résine époxy Araldite LY 5052 ou Epolam 2020. L'ensemble est ensuite polymérisé sous vide ou sous pression en moule fermé. Une plaque UD réalisée avec cette technique présente un taux volumique de fibres de 60%.



Fig. 3a. Bande continue de fibres réalignées discontinues



Fig.3b. Préforme « UD » réalisée par assemblage de bandes

Les caractéristiques des préformes de fibres recyclées FCrR « UD » sont répertoriées dans le tableau 2

Longueur des fibres	150 mm
Largeur des bandes	35 mm
Dispersion d'alignement	$\pm 8^\circ$ à $\pm 15^\circ$
Masse surfacique	400 à 600g/m ²
Nature des fibres	T700 ou IM7

Tab. 2. Caractéristiques des préformes de fibres recyclées UD réalignées par le procédé I2M (FCrR)

Les propriétés de matériaux composites constitués de plis « UD » de FCrR imprégnés de résine époxy sont maintenant maîtrisées [9] et sont répertoriées dans le tableau 3.

Epaisseur d'un pli	e_{pli}	0.5 mm
Taux volumique de fibres	V_f	55%
Résistance à rupture en traction (sens longi 0°)	σ_{max}	600 à 800 MPa
Module d'Young (sens longi 0°)	E_{fl}	98 GPa
Module d'Young (sens transverse 90°)	E_{ft}	8 GPa
Coef. De Poisson	ν_{lt}	0.37
Module de cisaillement	G_{lt}	5.16 GPa

Tab. 3. Caractéristiques mécaniques d'un matériau composite à fibres recyclées UD réalignées par le procédé I2M (FCrR)

Ce matériau composite sera utilisé pour réaliser les 4 types de pièces du bateau *Cassiopée*.

2.2 Dimensionnement de la porte de roof

La porte de roof sert à isoler l'intérieur du bateau des projections d'eau. Cette fonction pourrait parfaitement être réalisée en utilisant une structure sandwich avec 2 fines peaux de mat de verre. Dans notre cas, nous avons décidé de tirer parti de la raideur des fibres de carbone recyclées en réalisant une pièce multifonctions : la porte en position ouverte devient un marchepied pour descendre dans le roof (figure 4). C'est cette dernière fonction qui a servi de base de dimensionnement.

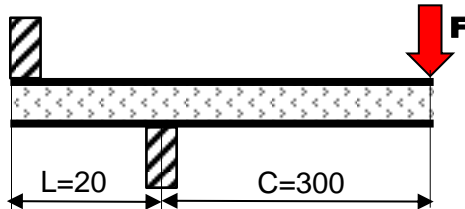


Fig. 4a. Schéma de la sollicitation de la porte de roof en position « marchepied »

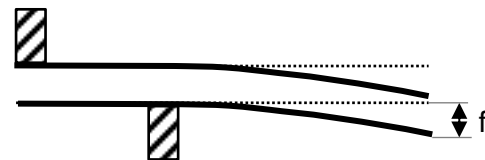


Fig. 4b. Flèche maximale de la porte de roof en position « marchepied »

Cahier des charges :

La porte (500x500mm²) est constituée d'une mousse haute densité d'épaisseur 10mm, encadrée de 2 peaux composites orthotropes. Pour des raisons de stabilité, il est demandé que la flèche ne dépasse pas $f = 10\text{mm}$ sous une charge $F = 1000\text{N}$. Une porte de roof classique (sans la fonction

marchepied) pour ce type de bateau, réalisée avec des peaux en mat de verre, pèserait environ 1,5kg. Afin que l'utilisation de fibres de carbone recyclées s'accompagne d'un gain de performances, il était demandé que cette porte-marchepied pèse moins de 1kg.

Pour minimiser la masse, chaque peau sera composée d'un pli UD à 0° et un pli UD à 90°. Pour les calculs, nous avons utilisé la théorie des plaques sandwichs avec les hypothèses suivantes : (1) l'âme ne transmet que des contraintes de cisaillement et (2) contraintes normales uniformes dans l'épaisseur des peaux. La raideur en flexion d'un sandwich est donnée par l'équation 1 :

$$E.I_x = E_p \frac{e_p}{2} e_c (e_c + e_p) l \quad (\text{Eq1})$$

où E_p est la raideur en traction de la peau composite, e_p l'épaisseur de la peau, e_c l'épaisseur du cœur (mousse HD) et l la largeur de la porte

La flèche à l'extrémité sous une charge F est donnée par la relation 2 :

$$f = \frac{FC^2(L+C)}{3E.I_x} \quad (\text{Eq2})$$

La contrainte dans une peau est donnée par la relation 3 :

$$\sigma = \frac{FC}{e_p(e_p + e_c)l} \quad (\text{Eq3})$$

Les caractéristiques d'une porte satisfaisant au cahier des charges sont comparées dans le tableau 4 pour 3 renforts de peaux différents : mat de verre 300g/m², tissus de verre 600g/m² et UD0/90 500g/m² de fibres de carbone recyclées réalignées. L'épaisseur de l'âme est imposée à 10mm et on cherche l'épaisseur de peau la plus fine (i) permettant d'obtenir une flèche inférieure à 10mm et (ii) comportant un nombre entier de plis.

	Mat de verre	Tissus de verre	Carbone recyclé
Raideur de la peau E_p (GPa)	13.6	20.2	53
Masse surfacique du renfort (g/m ²)	300	600	500
Taux de renfort volumique	25%	45%	55%
Masse volumique du composite (kg/m ³)	1606	1775	1485
Epaisseur d'un pli (mm)	0,46	0,26	0,55
Epaisseur d'une peau (mm)	3,68	2,6	1,1
Nb de plis/peau	8	10	2
$E.I_x$ (MPa.mm ²)	1,645 E9	1,656 E9	1,617 E9
Flèche (mm)	9,11	9,05	9,27
Contrainte (MPa)	12	18	52
Masse des peaux (kg)	2,95	2,31	0,82
Masse du cœur (Airex T92-200) (kg)	0,5	0,5	0,5
Masse de la porte (kg)	3,46	2,81	1,32

Tab. 4. Caractéristiques de la porte en fonction des matériaux de peaux utilisés

Il apparaît que l'utilisation de FCR réalignées sous forme de préformes unidirectionnelles permet, dans le cas de la porte à raideur équivalente, une diminution de masse de 62% par rapport à l'utilisation de mats de verre et de 53% par rapport à l'utilisation de tissus de verre. L'objectif d'une porte inférieure à 1kg n'est pas atteint mais cette porte est toutefois plus légère qu'une porte classique (1,5kg), tout en apportant une fonction supplémentaire : la fonction marchepied. Ainsi il est démontré que les composites utilisant de la fibre de carbone recyclée réalignée peuvent apporter un gain de performances important et de nouvelles fonctions par rapport à des structures composites classiques (CRFV).

3. Réalisation de pièces de technicité et criticité croissantes en fibres de carbone recyclées réalignées (FCrR) pour un bateau de compétition.

Afin de continuer de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser des FCrR, 4 types de pièces pour un bateau de course transatlantique (mini 6.50) ont été réalisées. L'objectif est de démontrer que la FCrR est un matériau nouveau, intermédiaire entre la fibre de carbone et la fibre de verre et que son potentiel d'innovation est grand. Nous avons réalisé des pièces de difficulté et de technicité croissantes afin d'acquérir l'expérience et la confiance dans ce matériau nouveau. Des pièces très simples ont tout d'abord été réalisées : renforts de pont (1) et raidisseurs/cale-pieds (2), puis des pièces sollicitées et essentielles pour la navigation : porte de roof (3) et barre franche (4) (figure 5).

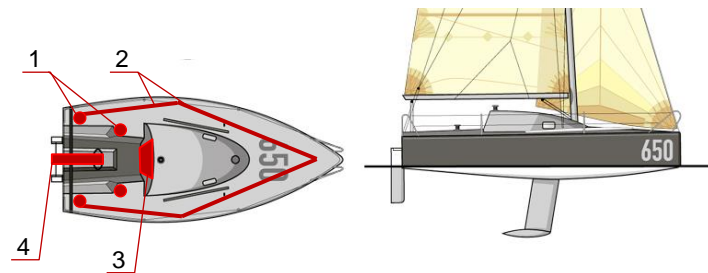


Fig. 5. Schéma du bateau Cassiopée avec ses pièces en fibres de carbone recyclées et réalignées

3.1 Renforts et cale-pieds/raidisseurs de pont

a) Renforts de pont

Un bateau de compétition possède un pont très allégé et très fin. Il convient donc de le renforcer au droit des éléments d'accastillage. Le cahier des charges des renforts de pont imposait de réaliser des plaques de forte épaisseur (400x400x1,8) afin de répartir les efforts dans la coque et d'offrir une possibilité de serrage des équipements sans risque d'endommager la structure du bateau.

Mise en œuvre : un alignement imparfait des bandes de FCrR a été réalisé (dispersion angulaire 15°) afin de diminuer la compacité des préformes tout en limitant l'anisotropie du matériau. Ainsi des plis d'épaisseur 0,6 mm ont pu être obtenus, ce qui nécessite donc seulement 3 plis pour une épaisseur de 1,8mm. La discontinuité des fibres a permis de réaliser des plaques de composite non équilibrées (0°-90°-0°) sans déformation. Afin de conserver une épaisseur maximale, les plaques ont été compactées à basse pression (sous vide). Huit plaques de renfort ont été réalisées au total. (figure 6a)

b) Cale-pieds-raidisseurs de pont

Un bateau monocoque navigue souvent avec une forte gîte ; pour faciliter les déplacements et pour des raisons de sécurité (éviter de glisser hors du bateau) des profilés sont disposés le long du bord extérieur de la coque. En donnant à ces profilés une section en oméga, ils peuvent également jouer le rôle de raidisseur de pont.

Mise en œuvre : les bandes de FCrR avec un bon alignement des fibres (dispersion d'alignement 8°) ont été utilisées afin de maximiser la rigidité. Les bandes issues du procédé de réalignement ont été assemblées en préformes 2mx155mm. Une préforme à 0° et deux préformes à 45° ont été réalisées. La réalisation des préformes à 0° se fait simplement par assemblage, côte à côte, de 4,5 bandes, la demi bande longitudinale étant gardée pour une autre préforme ; si la réalisation des préformes à 45° a été fastidieuse elle reste possible sans aucune complication. Il est à noter que grâce à la forme de bandes continues des FCrR, le procédé de mise en œuvre ne génère pratiquement aucun rebut ni chutes de découpe.

Les bandes ont été pré-imprégnées de résine époxy à plat puis insérées dans un moule. Le moule est constitué de simples tôles pliées pour s'emboîter avec un entrefer de $3 \times 0,5 = 1,5\text{mm}$ (figure 9). L'ensemble est placé dans une bâche à vide et polymérisé sous vide.

La mise en œuvre par compression sous vide a permis de réaliser des profilés très raides et très légers (340g/m). 3 profilés de 2 m ont été réalisés (figures 6.b.c.).



Fig. 6.a Plaques de renfort de pont
400x400x1.8



Fig. 6.b.c. Cale-pieds
(2mx125mmx30mm)



Intérêt des FCrR pour la réalisation de pièces peu sollicitées :

La masse d'une plaque de renfort en FCrR a été comparée à celle de plaques équivalentes (400x400x1,8) réalisées en mats de verre ou en tissus de verre (Tableau 5). Il est à noter que nous disposons de morceaux de chutes de tissus de carbone à recycler assez grands (400x500) et qu'il était donc possible de réaliser les plaques de renfort en réutilisant directement ces chutes de tissus.

	Mat de verre	Tissus de verre	FCrR	Chutes tissus carbone
Masse surfacique du renfort (g/m ²)	300	300	450	260
Taux de renfort volumique	25%	45%	40%	45%
Masse volumique du composite (kg/m ³)	1606	1775	1450	1500
Epaisseur d'un pli (mm)	0.46	0.26	0.6	0.3
Nb de plis	4	7	3	6
Epaisseur plaque (mm)	1.84	1.82	1.8	1.8
Masse de renfort (g)	192	336	198	250
Masse plaque (g)	473	517	418	432

Tab. 5 masses comparées des plaques de renfort en fonction des fibres utilisées

- la FCrR permet de réaliser des matériaux composites de faible densité ; le gain de poids est de 12% par rapport à l'utilisation d'un mat de verre et de 19% par rapport à l'utilisation de tissus de verre. Il est à noter qu'en raison de l'enchevêtrement de fibres dans les UD de FCrR, la FCrR permet également un gain de masse de l'ordre de 3% par rapport à de la fibre de carbone tissée.
- La consolidation des préformes de FCrR (avec 2% environ de poudre PA) permet de les manipuler aussi facilement que des tissus et les outillages peuvent être les mêmes que lors de l'utilisation de fibres vierges sous forme de mats, tissus ou NCF.
- Les FCrR, disponibles sous forme de bandes continues UD, ont permis de réaliser des profilés de grande longueur.
- L'assemblage de bandes de fibres discontinues pour réaliser des préformes permet de ne générer que très peu de rebuts de découpe.
- La discontinuité des fibres procure de la déformabilité aux préformes pour réaliser des formes complexes (profilé en oméga) qui se conforment sans plis sur un outillage classique.
- Grâce à la grande longueur (150mm) des FCrR des profilés de très grande rigidité spécifique ont été réalisés.

3.2 Porte de roof

Le succès dans la réalisation des pièces précédentes nous a encouragé à poursuivre notre étude en réalisant une pièce plus sensible du bateau : la porte de roof. En position fermée, la porte protège classiquement l'habitacle des projections d'eau et en position ouverte elle sert de marchepied pour descendre dans le roof (figure 4). La porte (500x500mm²) est constituée d'une mousse haute densité d'épaisseur 10mm, encadrée de 2 peaux composites orthotropes (figure 7b). Chaque peau est composée d'un pli UD à 0° et un pli UD à 90° formant un « pseudo-NCF ». (figure 7a)



Fig. 7.a bandes de FCrR assemblées pour réaliser un pseudo NCF 0°-90°

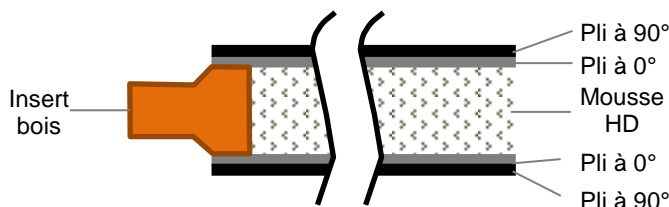


Fig. 7.b Schéma de drapage de la porte de roof

Mise en œuvre : Pour chaque peau, des bandes de FCrR avec un alignement moyen (dispersion d'alignement 11°) ont été assemblées en préformes 500mmx500mm à 0° et 90°. Les préformes ont été imprégnées de résine époxy à plat sur une plaque de mise en œuvre en verre suivant le schéma suivant : pli à 90°, pli à 0°, mousse Airex® T92-320, pli à 0°, pli à 90° puis sous une tôle 500x500mm garantissant la planéité de la couche supérieure. L'ensemble est placé sous une bâche à vide et polymérisé sous vide. Encore une fois, le procédé de mise en œuvre ne génère pratiquement aucun rebut ni chute de découpe. Deux portes ont été réalisées, la première (1,32 kg) respectant le cahier des charges en termes de raideur (flèche < 10mm) et la seconde allégée (1,20 kg) avec des préformes de FCrR moins denses (480g/m²) pour une meilleure performance sur des régates courtes (figure 8.)

Intérêt des FCrR pour la réalisation de la porte de roof :

- Les FCrR, disponibles sous forme de bandes continues UD, ont pu être très simplement assemblées sous forme de préformes et empilées pour constituer un pseudo NCF 0°/90°.
- Le léger foisonnement des FCrR permet de réaliser des plis d'épaisseur plus importante qu'avec des fibres vierges. Cette particularité permet de maximiser la raideur des structures sandwich.
- Le dimensionnement (cf paragraphe 2) a montré que l'utilisation de FCrR a permis un gain de masse de 12% par rapport à une porte simple et de 53% par rapport à une porte de même rigidité réalisée avec des peaux en tissu de verre.

3.3 Barre franche

L'expérience acquise dans la conception et le dimensionnement des pièces précédentes a permis d'envisager la réalisation de la barre franche qui est une pièce critique du bateau (impossibilité de manœuvrer et demande d'assistance en cas de casse). Cette pièce complexe et très sollicitée est constituée d'une structure en caisson avec des peaux composites sur un noyau mousse avec plusieurs inserts pour la fixation des tringleries de safrans, le guidage en rotation sur le bateau et le dispositif de pilotage automatique.

Il est assez difficile d'estimer les efforts subis par la barre franche car elle est soumise à des chocs lors du passage de vagues en travers et à des sollicitations dynamiques, car lors de vents faibles, la barre franche peut servir pour actionner les safrans comme une « godille ».

Comme il était inacceptable que la barre franche puisse casser au cours de l'utilisation, même intensive, nous avons décidé de la concevoir à nombre de plis égal par rapport à une barre franche réalisée en sandwich avec des plis de verre. Ainsi, nous obtenons un composite d'une résistance équivalente mais avec une raideur supérieure et donc une meilleure précision de pilotage.

La barre franche est constituée d'un noyau de mousse haute densité avec inserts et PVC (ou tubes pultrudés carbone pour l'articulation) recouverte de peaux carbone époxy avec le drapage suivant (du noyau vers l'extérieur) : UD 0° - UD90° - UD 0° - UD 45° - UD-45°.

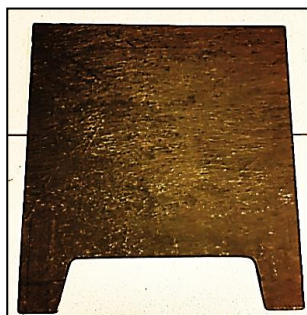


Fig. 8a Porte de roof



Fig. 8b Barre franche



Fig. 8c Montage sur le bateau Cassiopée

Intérêt des FCrR pour la réalisation de la barre franche

- Le dimensionnement « à nombre de plis égal » a permis de réaliser une barre en FCrR d'une masse de 1,030 kg (carbone 337g, résine 220g, 470g mousse Airex® T92-320) alors qu'une barre de résistance équivalente réalisée avec des peaux de fibre de verre aurait eu une masse de 1,25 kg, ce qui représente un gain de masse 18% .
- Le remplacement des fibres de verre par des fibres de carbone a permis d'augmenter la rigidité de la barre franche ce qui donne une plus grande réactivité au bateau et donc un gain de performances. Deux barres équivalentes ont été réalisées (figures 8b et 8c.).

5. Conclusion

Les composites à fibres de carbone recyclées ont été comparés aux composites classiques. Il a été montré que le réalignement de fibres recyclées semi longues (150mm) conférerait à ces composites des propriétés qui les situent dans un domaine intermédiaire entre les composites à fibres de verre (CRFV) et les composites à fibres de carbone (CRFC). Quatre exemples de pièces, simples ou complexes, certaines de grande taille, peu ou fortement sollicitées, ont été présentés. Ces exemples ont permis de montrer l'intérêt des composites FCrR :

- pour les pièces peu sollicitées à géométrie imposée, il a été montré que les FCrR permettent un gain de poids de l'ordre de 12% par rapport à du mat de verre.
- Pour les pièces sandwich sollicitées en flexion, il a été montré que les FCrR permettaient un gain de masse de 53% par rapport à l'utilisation de tissus de verre à rigidité égale. Les FCrR ont été très faciles à utiliser avec une déformabilité élevée grâce aux fibres discontinues. Ces fibres n'ont en outre demandé aucune conception spécifique des outillages et n'ont généré qu'un très faible taux de chutes de découpe grâce à la forme en bandes continues.

Le potentiel d'innovation des fibres de carbone recyclées réalignées (FCrR) a donc été démontré pour les pièces dimensionnées en raideur. Pour les pièces dimensionnées en résistance il reste encore à améliorer la compacité des préformes pour augmenter le taux de fibres au-delà de 60%.

L'ensemble des pièces présentées ici sont montées sur le bateau *Cassiopée* qui a participé à 4 régates en 2018 dont une jusqu'au Açores et 5 autres régates sont programmées pour 2019 dont une transatlantique le 22 septembre 2019.

Le potentiel technique des FCrR étant démontré il conviendra d'adapter le bilan financier de telles fibres de façon à les situer à un coût intermédiaire entre celui de la fibre de verre et de carbone.

Références

- [1] S.J. Pickering « Recycling technologies for thermoset composite materials-current status » ; Composites Part A, Vol. 37, pp 1206-1215, 2006
- [2] L. O. Meyer and K. S Chulte ; « CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials » ; Journal of Composite Material, Vol. 43, No. 9, 2009
- [3] G. Oliveux, J.L. Bailleul A. Gillet, O. Mantaux and G.A. Leeke ; « Recovery and reuse of discontinuous carbon fibres by solvolysis: Realignment and properties of remanufactured materials » ; Composites Science and Technology Vol. 139, pp. 99-108, 2017
- [4] C. Morin, A. Loppinet-Serani, F. Cansell, C. Aymonier ; « Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art » ; The Journal of Supercritical Fluids Vol. 66, pp. 232-240, 2012
- [5] M. Keith, G. Oliveux, and G.A. Leeke « Optimisation of solvolysis for recycling carbon fibre reinforced composites » ; ECCM 17 ; Munich, Germany, 2016
- [6] D. Presse and A. Bentaj ; « Recyclage de déchets composites plastiques à fibre de carbone par l'utilisation d'une technologie à puissances pulsées » ; document ADEME / SUEZ - Xcrusher ; 2017
- [7] S. Jlassi ; « Composites à fibres de carbone recyclées : variabilité des sources et optimisation des performances mécaniques » ; thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2019
- [8] O. Mantaux, A. Gillet et D. Leray ; « Procédé de défilage et de réalignement de fibres de carbone » ; -Brevet FR - BV2014-083 / PJ2011-100 - Réf. CNRS : DI 5804-02 –
- [9] A. Gillet, O. Mantaux, G. Cazaurang, « Characterization of composite materials made from discontinuous carbon fibres within the framework of composite recycling », Composites: Part A 75 (2015) ; pp.89–95
- [10] S. Tröster ; CFRP « Recycling: into the battery instead of the garbage » ; press release ; ILA 2018: Sustainable aircraft production ; April 10, pp1-3, 2018
- [11] S. Pimenta, A. Silvestre, T. Pinho, P. Robinson, and S.J. Pickering ; « Mechanical analysis and toughening mechanisms of a multiphase recycled CFRP » ; Composites Science and Technology Vol. 70, Issue 12, 31 Oct., pp. 1713-1725, 2010
- [12] S. Pimenta and T. Pinho, « Literature review on CFRP recycling operations » ; Journal of Waste Management, 2011, pp. 378-392.
- [13] A. Edge ; « The Role of Recycled Carbon Fibres in Cost Effective Lightweight Structures » ; SPE Automotive Composites Conference & Exhibition ; Novi, 2016;
- [14] G. Gardiner ; « Recycling carbon fiber for structural applications » ; CompositesWorld ; <https://www.compositesworld.com/blog/post/recycling-carbon-fiber-for-structural-applications>
- [15] J. Bakewell ; « Recycle route for carbon fibre » ; Automotive Manufacturing Solutions - ELG ; 30 sept. 2016 <http://www.elgcf.com/assets/documents/ams-Recycle-route-for-carbon-fibre.pdf>
- [16] O. Mantaux, A. Gillet and P. Pomiers ; « Opportunities of achieving performance composite parts with recycled carbon fibres » ; proceedings of ECCM - Seville - june 23rd, 2014
- [17] G. Gardiner ; « Testing used Carbo NXT RCF materials » ; CTC presentation at 2014 CFK Valley Convention