



## Deliverable n°4.3.1

### Compte rendu technique du dimensionnement de la structure du Voilier

8 octobre 2021

PP LEADERS: KAIROS



European Regional Development Fund



## Partenaires

KAIROS, TEILLAGE VANDECANDELAERE

## Travail réalisé

### 1) Objectifs :

L'objectif de ce rapport est de présenter la démarche suivie pour le dimensionnement des éléments en biocomposite intégrés dans le voilier à foil.

Ce rapport présente la démarche suivie, les problématiques rencontrées et les voies adoptées pour les résoudre. Les contraintes du cahier des charges et les critères ayant permis de choisir les matériaux retenus y sont présentés. Les notes de calcul et les résultats obtenus sont également présentés sous forme de tableaux. Ce rapport présente les optimisations effectuées au cours des étapes itératives de la conception. Il présente les sous-traitants impliqués dans l'étude et la conception des éléments du voilier. Ce rapport technique s'appuie sur les livrables du module de travail *MT 3 - Semi-produits cousus et tissés, exclusivement constitué de fibres*.

### 2) Démarche

#### Sélection du voilier à foil et du partenaire

Pour valider l'utilisation des préformes multiaxial développées par Teillage Vandecandelaère (TVDC) dans le module de travail *MT 3 - Semi-produits cousus et tissés, exclusivement constitué de fibres*, Kairos a sélectionné le voilier Birdy Fish ([www.birdyfish.com](http://www.birdyfish.com)). Les voiliers Birdy Fish actuels (nommé ci-après Birdy Fish conventionnels) sont réalisés en composite à base de fibre de verre, résine polyester, mousse PVC et non tissé de polyester (Soric).



Figure 1 : Voilier birdy fish conventionnel en navigation



Ce voilier a la particularité d’être un voilier à foil. Le principe des voiliers à foil n’est pas récent. Les premiers voiliers de ce type datent du milieu du 20<sup>ème</sup> siècle (voir figure 1).



Figure 2 : Le Monitor conçu dans les années cinquante par l’Américain Gordon Baker

Les foilers se développent lentement pendant toute la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle et jusqu’à la coupe de l’Amérique de 2013 où s’affrontent deux catamarans volant équipé de foils. Par la suite Les développement s’accélèrent. Les embarcations à foil se multiplient et les foils apparaissent sur des dériveurs de quelques mètres comme ceux de la classe Moth International jusqu’au trimarans géant de la classe Ultim qui mesure 32 m de long. Les foils sont aussi présents sur des surfs, stand-up paddle, embarcations motorisées, etc.

A ce jour ces embarcations volantes sont principalement réalisées avec de matériaux composites hautes performance intégrant des fibres de carbone et des fibres de verre.

L’enjeu du module de travail MT4 est de démontrer que les fibres naturelles, moins impactantes pour l’environnement, peuvent également être utilisées dans la réalisation d’un voilier à foil.

Kairos a procédé à une étude comparative des différents voiliers à foil disponibles sur le marché et est entré en contact avec les entreprises concernées. Le tableau ci-dessous présente les voiliers et entreprises qui ont été considérées dans le choix du partenaire pour la réalisation du voilier à foil.

Nom du bateau	Type de voilier	Pays de fabrication	Nature des échanges avec les constructeurs
BirdyFish	Monocoque	France	Bateau retenu
easy to fly	Catamaran	France	Hors budget
epoh	Monocoque	France	Intégration foil à faire
The foiling dinghy	Monocoque	Allemagne	Pas intéressé
Befoil	Catamaran	France	Pas intéressé
F101	Trimaran	UK	Pas intéressé
Skeeta	Monocoque	Australie	Non joignable
waszp	Monocoque	Australie	Non joignable
UFO	Catamaran	USA	Non joignable
whisper	Catamaran	UK	Non joignable
Ifly 15	Catamaran	Allemagne	Non joignable



Une sélection de 3 candidats a été effectuée pour sélectionner l'entreprise la plus pertinente pour le projet. Les trois entreprises sélectionnées sont Birdy Fish, Easy To Fly et EPOH. L'entreprise Birdy Fish a été retenue car en tête du classement faisant intervenir des critères techniques et de coût. Le détail de cette étude est disponible dans le document analyse des offres foiler.

### 3) Cahier des charges :

Le cahier des charges pour le dimensionnement du voilier à foil Birdy Fish est basé sur deux aspects :

- La norme de dimensionnement ISO 12215-5-2008-Petit navires, construction de la coque et échantillonnage.
- Le retour d'expérience des voiliers Birdy Fish conventionnels.

### 4) Dimensionnement

#### Coque et pont

La coque et le pont du voilier Birdy Fish sont réalisés dans deux outillages différents (voir ci-dessous). Chacune de ces deux zones bénéficie d'un échantillonnage spécifique.



Figure 3 : Outillage de coque



Figure 4 : Outillage de pont

Ces éléments sont soumis à des contraintes dues à différents phénomènes :

- Pression hydrostatique et hydrodynamique
- Efforts globaux dans la poutre navire
- Efforts locaux dues aux encrages de cadènes, foils, safran, déplacement de l'équipage

L'approche de dimensionnement consiste à établir des échantillonnages et à les confronter aux exigences de la norme ISO. Pour être conforme aux exigences de la norme, les échantillonnages doivent respecter des valeurs de rigidité en flexion (EI) et de résistance en flexion ( $\sigma$ ) minimums. D'autres approches de dimensionnement peuvent également être considérées par la norme. Les échantillonnages composites en fibre de verre de la coque et du pont existants ont été évalués avec la norme lors du dimensionnement initial par l'architecte. Kairos a ensuite comparé les échantillonnages composites en fibre de lin du nouveau voilier aux composites en fibre de verre du voilier existant.

Les matériaux composites qui constituent la coque et le pont sont des matériaux sandwich. Ils sont l'assemblage de peaux fabriqués en fibre de lin et résine polyester avec un matériaux d'âme en mousse PET issue du recyclage (pour le pont) et en liège (pour la coque).



Les formules préconisées par la norme pour les critères de rigidité et de résistance sont présentées ci-dessous. Ces critères font intervenir différents aspects de la zone considérée : dimensions, courbure, pression hydrostatique, correction de la pression pour tenir compte des aspects dynamiques.

$$M_d = 83,33 \times k_c^2 \times 2k_2 \times P \times b^2 \times 10^{-6} \text{ Nmm/mm}$$

Figure 5 : Résistance des peaux du matériau sandwich

$$EI \text{ par mm de largeur} = \frac{b^3 \times k_c^3 \times P \times k_3}{12 \times 10^3 \times k_1} \text{ N}\cdot\text{mm}^2/\text{mm}$$

Figure 6 : Rigidité du matériau sandwich

En plus des exigences de la norme et afin de réaliser un voilier performant, le dimensionnement consiste à maintenir la masse du composite la plus faible possible. Les expériences passées ont montré qu'un dimensionnement en composite lin présentait une augmentation de poids comprise entre 10 et 15 % par rapport à un composite verre pour des propriétés mécaniques équivalentes.

Le tableau ci-dessous présente les résultats des dimensionnements de la coque initial en fibre de verre et de la coque en fibre de lin. Deux approches sont présentées pour le dimensionnement de la coque en fibre de lin :

- Lin (CompoCalc) : cette colonne présente les résultats mécaniques (EI et  $\sigma$ ) et la masse de l'échantillonnage issu de la modélisation. Les résultats des propriétés mécaniques issues de l'activité T4.1 sont utilisées pour alimenter les modèles de prédiction des propriétés mécaniques et la masse.
- Lin (Test) : cette colonne présente les résultats issus de tests mécaniques et de pesées réalisés sur des éprouvettes qui ont été fabriquées avec l'échantillonnage retenu.

Localisation	Fond coque		
Version	Verre	Lin (compoCalc)	Lin(tests)
Peau ext.	Verre LT + mat cousu 600/100 gr	2 x Flax - woven roving - 360 g/m <sup>2</sup>	2 x Flax - woven roving - 360 g/m <sup>2</sup>
Ame	2 x Soric LRC, 3 mm	2 x liège NL10 3mm	2 x liège NL10 3mm
Peau int.	Verre LT 600 gr	2 x Flax - woven roving - 360 g/m <sup>2</sup>	2 x Flax - woven roving - 360 g/m <sup>2</sup>
Masse TOT (kg/m <sup>2</sup> )	4.83	5.4	5.51
Comparaison avec référence	0.00%	11.80%	14.08%
Mx max ( $\sigma$ )	458	221	261
Comparaison avec référence	0.00%	-51.75%	-43.01%
EI (Nm <sup>2</sup> /m)	270	457	382
Comparaison avec référence	0.00%	69.17%	41.37%

Tableau 1 : Dimensionnement coque

Les différences entre l'échantillonnage lin retenu et l'échantillonnage verre sont les suivantes :

- Masse supérieure de 14 %
- Résistance en flexion inférieure de 43 %
- Rigidité en flexion supérieure de 41 %



Le lin offre de bonnes propriétés de rigidité ce qui permet d’obtenir une valeur de EI supérieur à celle du verre. En revanche le lin offre de faibles propriétés de résistance, notamment en compression. Cela engendre une résistance en flexion plus faible de 58 % par rapport au verre.

Le dimensionnement proposé est un compromis entre la prise de poids et les propriétés mécaniques. Grâce à l’expérience des composites fibres naturelles de Kairos et aux retours d’expériences de Birdy Fish sur les voiliers conventionnels, la prise de masse de la coque a pu être contenue à +14% car dans cette zone du navire l’élément prédominant le dimensionnement est principalement le critère de rigidité en flexion EI.

Les différences entre la modélisation et les résultats issues des tests sont acceptables.

Le pont du Birdy Fish en lin est dimensionné suivant les mêmes critères que la coque.

Localisation	Pont		
	Verre	Lin (compocalc)	Lin (test)
Peau ext.	Sergé Verre 400 gr , 0/90°	1 x Flax - woven roving - 360 g/m <sup>2</sup>	1 x Flax - woven roving - 360 g/m <sup>2</sup>
Ame	Corecell M80/12 mm PH	1x PET T92.80 15mm SX P30	1x PET T92.80 15mm SX P30
Peau int.	Sergé Verre 400 gr , 0/90°	1 x Flax - woven roving - 360 g/m <sup>2</sup>	1 x Flax - woven roving - 360 g/m <sup>2</sup>
Masse TOT (kg/m <sup>2</sup> )	2.97	3.705	3.24
Comparaison avec référence	0.00%	24.75%	9.09%
Mx max	831	520	442
"Mxmax design"	374	260	221
Comparaison avec référence	0.00%	-30.48%	-40.81%
EI (Nm <sup>2</sup> /m)	561.26	1046	849
Comparaison avec référence	0.00%	86.37%	51.27%

Tableau 2 : Echantillonnage pont

Les différences entre l’échantillonnage lin retenu et l’échantillonnage verre sont les suivantes :

- Masse supérieure de 9 %
- Résistance en flexion inférieur de 41 %
- Rigidité en flexion supérieur de 51 %

### Structure interne

Les éléments de structure interne sont constitués en grande partie des multiaxiaux développés dans le module de travail MT3. Le multiaxial BX 312 est utilisé pour diffuser les contraintes locales et globales (voir les 3 types de contraintes évoquées plus haut) dans des zones du navire les plus grands possibles.

Par exemple, un pic de pression due à un phénomène de slamming dans la zone avant de la coque doit être répartie via le long avant (c.f. Livrable T4.3.2 - plan de fabrication du voilier). Le BX 312 utilisé dans ce longi avant permettent de transférer les contraintes de slamming depuis la coque vers le pont. Cela permet de minimiser le pic d’effort local sur la coque et de le répartir sur une plus grande surface.



Cette démarche est identique dans tous les éléments de la structure interne (cloison de mat, cloisonnettes de bancs, etc.), dans les zones nécessitant des renforts locaux (renfort livet, renforts cadènes, renforts puits foil, etc.), et dans les liaisons entre les différentes zones du voilier (liaison bordé/tableau, marotte/pont, etc.)

Le principe de dimensionnement utilisé pour les zones nécessitant des fibres à +/- 45 via le BX 312 lin est basé un échantillonnage équivalent à la résistance en cisaillement plan ( $\tau_{12}$ ) des BX verre. La formule permettant d'assurer cette correspondance est :

$$\tau_{12} = \frac{F}{S}$$

La contrainte en cisaillement ( $\tau_{12}$ ) est fonction de la force appliquée (F) et de la surface sur laquelle cette force est appliquée (S). Cette formule peut être exprimée de la manière suivante :

$$F = \tau_{12} * S$$

Les BX lin sont dimensionnés pour qu'ils puissent résister aux mêmes efforts que les BX verre. Le dimensionnement est donc réalisé de tel sorte que le produit ( $\tau_{12} * S$ ) soit similaire pour les zones en lin et les zones en verre. Dans ce cas spécifique, la comparaison est faite pour un composite de largeur identique en lin et en verre. La surface (S) peut donc réduite à l'épaisseur du composite (Ep). La formule s'exprime donc :

$$F = \tau_{12} * Ep$$

Le Tableau 3 ci-dessous montre que la force à la rupture d'un pli de BX lin 312 g/m<sup>2</sup> est équivalent à celle d'un pli de BX verre 400 g/m<sup>2</sup>. Les échantillonnages présentés dans le Livrable T4.3.2 - plan de fabrication du voilier ont donc été établi en remplaçant 1 BX verre 400 g/m<sup>2</sup> par 1 BX lin 312 g/m<sup>2</sup>.

Tissus	T12 (Mpa)	Épaisseur du pli (mm)	F=TxS (N/m)
BX verre 400 g/m <sup>2</sup>	39.6	1.69	67
BX lin 312 g/m <sup>2</sup>	27.1	2.4	65

Tableau 3 : Dimensionnement BX en cisaillement

## 5) Réalisation

Les préconisations pour la réalisation sont inscrites dans le cartouche procédé du livrable T4.3.2 - plan de fabrication du voilier. Les détails du procédé de fabrication seront présentés dans le Livrable T4.4.1 – Rapport de réalisation du voilier.

## Conclusion

Ce rapport présente une synthèse des travaux qui ont été réalisés pour le dimensionnement du voilier. Il s'appuie sur les résultats obtenus lors des travaux menés sur les modules MT3 et MT4. Les multiaxiaux développés dans le module de travail MT3 sont techniquement adaptés à la production navale. Des optimisations mineures, notamment sur la possibilité d'obtenir les multiaxiaux en faible largeur, sont en cours avec Teillage Vandecandelaère pour en faciliter l'usage dans certaines circonstances.