Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 133 (2007)
Heft: 09: Corps et matériaux

Artikel: Plus léger, plus résistant
Autor: Michaud, Véronique / Costantini, Daniele / Vuilliomenet, Pascal
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-99571

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 01.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Véronique Michaud, Daniele Costantini et Pascal Vuilliomenet
Propos recueillis par Anna Hohler et Jacques Perret

Plus léger, plus **résistant**

Quatre ans ont passé, l'*America's Cup* est de retour. Qu'est-ce qui a changé ? En termes de matériaux, quels sont les développements les plus importants dont bénéficient les deux bateaux du défenseur suisse ? Petit tour d'horizon avec Véronique Michaud, Daniele Costantini et Pascal Vuilliomenet, personnages clés du partenariat EPFL - *Alinghi*.

TRACÉS : Quatre ans ont passé. En quoi la coque d'*Alinghi* a-t-elle changé ?

Véronique Michaud : En gros, notre objectif est resté le même. Il s'agit toujours d'obtenir un matériau à la fois plus léger et plus rigide. Donc, la coque est toujours composée d'un composite extrêmement résistant baptisé « sandwich », puisqu'il s'agit de deux « peaux », de deux couches de fibres de carbone et de résine qui enveloppent un nid d'abeilles (fig. 1). Les différences entre le bateau de 2003 et celui d'aujourd'hui résident dans le processus de fabrication et dans la qualité des assemblages. Nous portons un soin particulier au suivi de la fabrication.

1

Pour s'approcher des valeurs limites, il s'agit d'utiliser, lors de la fabrication des peaux, le moins de résine possible. Il est aussi primordial de disposer de fibres de carbone de première qualité. Mais nos possibilités sont limitées par le règlement. Celui-ci impose par exemple l'utilisation de fibres commercialisées, afin d'éviter une surenchère financière, c'est-à-dire la confection de fibres artisanales à un prix exorbitant. Par ailleurs, la rigidité maximale des fibres pour des pièces comme le mât ou la coque est elle aussi dictée par le règlement. Cela dit, nos recherches nous autorisent d'admettre aujourd'hui des facteurs de sécurité plus faibles qu'en 2003. Nous avons pu quantifier les limites acceptables en laboratoire, et nous maîtrisons de mieux en mieux la mise à l'échelle d'une grande pièce.

T. : En quoi consiste un « sandwich » composite ? Quels sont les éléments fabriqués sur mesure ?

V. M. : Le seul composant préfabriqué est le carbone préimprégné, c'est-à-dire des feuilles très fines de fibres et de résine époxy. Le reste est fait sur mesure : les différentes couches de feuilles sont déposées dans un moule avant d'être cuites et d'atteindre leur rigidité finale. Même de faibles imperfections dans la manière de déposer les couches, des variations dans la pression ou la température, peuvent s'avérer néfastes (fig. 3-5). De même, une liaison imparfaite entre le nid d'abeilles et les couches qui constituent les deux peaux peuvent influencer le comportement du bateau lors de la navigation.

T. : Et les fibres optiques (voir encadré page suivante) ? N'est-ce pas là la véritable nouveauté ?

Daniele Costantini : Des parties sensibles du bateau sont effectivement équipées de fibres optiques, mais nous ne pouvons pas donner plus de précisions. Pendant la première phase du projet, notre mission consistait avant tout à fournir des mesures précises et en temps réel de la déformation des structures à des endroits voulus, puis à analyser les changements de forme. Par contre, l'utilisation de mesures pendant les régates relève de la responsabilité de l'équipe. Nous avons

Fig. 1 : La structure « sandwich » de la coque : deux couches de fibres de carbone et de résine enveloppent un nid d'abeilles

Fig. 2 : L'un des deux nouveaux bateaux pour l'America's Cup 2007 (Photo Ivo Rovira)

bien sûr des échanges quotidiens avec les ingénieurs à Valence, mais nous ne faisons pour ainsi dire que fournir les briques. En effet, la façon d'exploiter la technologie de mesure est décidée par *Alinghi*.

Cela dit, les capteurs à fibres optiques peuvent équiper le bateau de façon permanente, étant donné leur poids dérisoire, critère essentiel. De plus, les instruments, qui permettent d'interroger les capteurs et de traduire les données brutes en informations utiles pour les ingénieurs et l'équipage, ont un poids et une consommation d'énergie aujourd'hui suffisamment petits pour en justifier l'utilisation à l'entraînement et en course.

V. M. : Il est vrai que nous faisons une véritable chasse aux grammes, avant tout aux extrémités du bateau. Chaque gramme qu'on enlève à tel endroit, on peut choisir où on le met comme leste. Si l'on gagne une centaine de kilos sur une coque qui pèse près de trois tonnes, c'est tout à fait significatif. C'est valable pour tous les éléments du bateau : les porte-boissons des marins sur le pont du bateau par exemple sont en tubes de carbone, au lieu d'être en métal ou plastique.

T. : N'est-ce pas un handicap de devoir tout décider, tout construire en amont ? Vu qu'un bateau doit affronter des conditions instables, on peut imaginer qu'il serait avantageux que certaines de ses parties soient adaptatives et puissent être modifiées en cours de navigation.

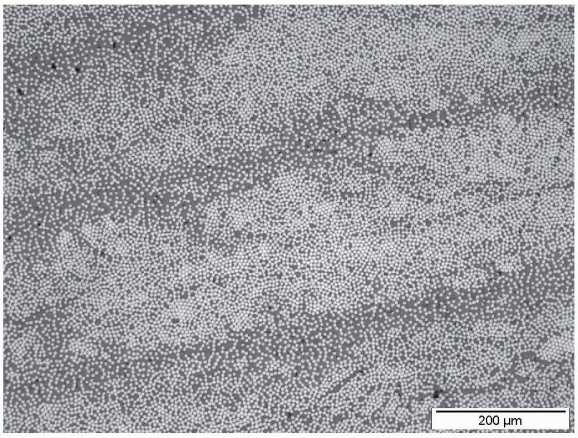
Pascal Vuilliomenet : C'est juste, mais notre raisonnement va dans l'autre sens. L'équipe va dessiner et concevoir ses voiliers en fonction de la fenêtre météo attendue pour les compétitions (force de vent, type de mer). Ensuite, en fonction des résultats et des observations lors des essais, il est également possible de modifier des éléments, voire même des portions de la coque pour améliorer les performances.

De manière générale, les échanges avec le *Design Team* d'*Alinghi* et les marins ont permis d'obtenir très rapidement des retours d'information de grande valeur sur les dévelop-

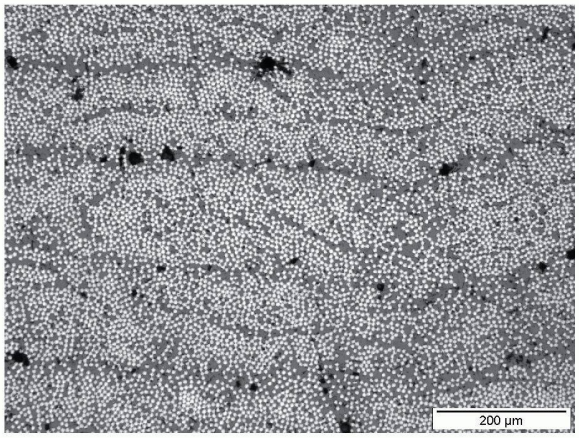
2

Fig. 3 à 5 : Trois microscopies montrant la structure d'une peau en fibres de carbone et résine epoxy avec trois niveau de qualité : excellent (3), bon (4) et très mauvais (5). Les fibres apparaissent en blanc, la résine en gris et le noir correspond à des inclusions d'air. Le niveau de qualité des échantillons dépend du choix des matériaux et de l'optimisation du cycle de leur mise en œuvre (température et pression appliquée).

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)



3



4

Capteurs à réseau de Bragg

Un réseau de Bragg dans une fibre optique – « Fiber Bragg Grating » dans la littérature anglo-saxonne – consiste à créer une structure périodique par la modulation de l'indice de réfraction du cœur de la fibre. Cette structure agit comme un miroir pour une bande spectrale très fine autour d'une longueur d'onde caractéristique (λ_B) et reste transparente pour toutes les autres. Cette longueur d'onde caractéristique, appelée longueur d'onde de Bragg, est définie par : $\lambda_B = 2\ n_e\ \Lambda$, avec n_e l'indice effectif de la fibre et Λ la période du réseau d'indice.

Pour inscrire un réseau de Bragg dans une fibre, on met à profit les propriétés de photosensibilité de la silice dopée qui constitue la fibre, c'est-à-dire la propension de la matière à subir une modification de son indice de réfraction par irradiation UV. La structure périodique du réseau est obtenue grâce à l'exposition du cœur à une succession de franges d'interférences sombres et brillantes.

Les caractéristiques finales d'un réseau de Bragg dépendent de paramètres liés à la technique d'inscription comme le type de laser et la puissance utilisée, la longueur sur laquelle le réseau est inscrit, l'indice effectif n_e de la fibre, l'amplitude de la modulation d'indice ou encore la période Λ de cette variation d'indice. Ces paramètres déterminent les grandeurs caractéristiques des réseaux – longueur d'onde de Bragg λ_B, réflectivité R à λ_B, largeur à mi-hauteur du pic – ainsi que leur propension à supporter des températures élevées ou de forts allongements, un aspect capital pour leur utilisation en tant que capteurs.

La longueur d'onde de Bragg λ_B dépend de la température et de l'état de déformation de la fibre. Ainsi, une mesure précise de $\Delta\lambda_B$ (variation de λ_B par rapport à une référence initiale) permet de remonter à l'amplitude de la variation du phénomène inducteur. Par exemple, en étirant une fibre dans son domaine élastique, nous obtenons une variation linéaire de l'allongement du réseau et de l'indice par effet élasto-optique, en fonction de la charge. Nous pouvons donc directement relier la variation de la longueur d'onde de Bragg à l'allongement de l'axe de la fibre optique.

Les capteurs de Bragg sont idéaux pour ausculter les matériaux composites stratifiés à matrice organique, c'est-à-dire en résine époxyde renforcée de fibres de carbone. Ils permettent de mesurer *in situ* les composantes de déformations à plusieurs endroits de façon simultanée, peuvent être incorporés au sein de plis aux endroits critiques et, leurs dimensions étant très petites, ils n'ont pas d'influence sur le comportement de la structure.

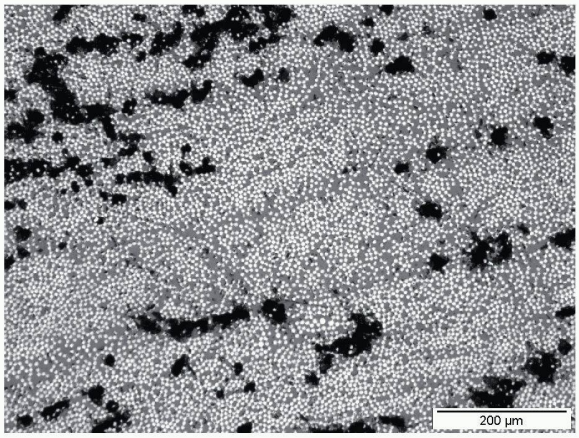
Enfin, les mêmes capteurs peuvent être employés à plusieurs stades lors du développement d'une structure. Les gains engendrés peuvent être conséquents et portent sur divers aspects : fabrication de matériaux, réduction et meilleure prise en compte des risques, développement de performances, maintenance, etc.

pements conduits dans les laboratoires. Ce qui veut dire qu'il est possible de fermer la boucle qui va d'un concept à son expérimentation en grandeur nature, et de répéter la démarche pour affiner et perfectionner les résultats. Cela concerne tous les acteurs du projet : designers, chercheurs, constructeurs et marins – tous bénéficient de l'échange d'informations et peuvent ainsi améliorer leurs compétences.

T. : Dans un autre contexte[1], des chercheurs de l'EPFL viennent de procéder à des tests sur des skis qui intègrent un matériau rhéo-épaississant[2], et qui changent donc de rigidité en fonction de la sollicitation. Est-ce qu'il serait envisageable d'utiliser un tel procédé sur un bateau ?

P. V. : Bien sûr, si le règlement nous en donnait la liberté. D'ailleurs, dans la F1 des gens y ont pensé. Comme une voiture est contrôlée uniquement avant et après la course, une écurie envisageait d'en construire une qui puisse se modifier pendant le parcours, pour retrouver sa forme d'origine à l'arrivée. Mais revenons à la voile. Votre idée est bonne, bien sûr, mais il faut distinguer deux types de projets : ceux qui débouchent sur une course réglementée comme l'*America's Cup*, où le challenge réside dans l'optimisation très pointue des différents paramètres pour augmenter la performance en

1 Voir <http://sre.epfl.ch>
2 En anglais : Shear Thickening Fluid (STF)



5

poussant les voiliers à la limite, et ceux qui ne sont soumis à aucune contrainte et où l'on peut citer, à titre d'exemple, l'Hydroptère. Pour ce dernier, aucun règlement n'impose ses limites au génie inventeur, et les solutions développées peuvent être très variées.

T. : Où *Alinghi* se situe-t-il par rapport à ses adversaires ? Les développements au niveau des matériaux sont-ils sensiblement les mêmes pour tous les bateaux ?

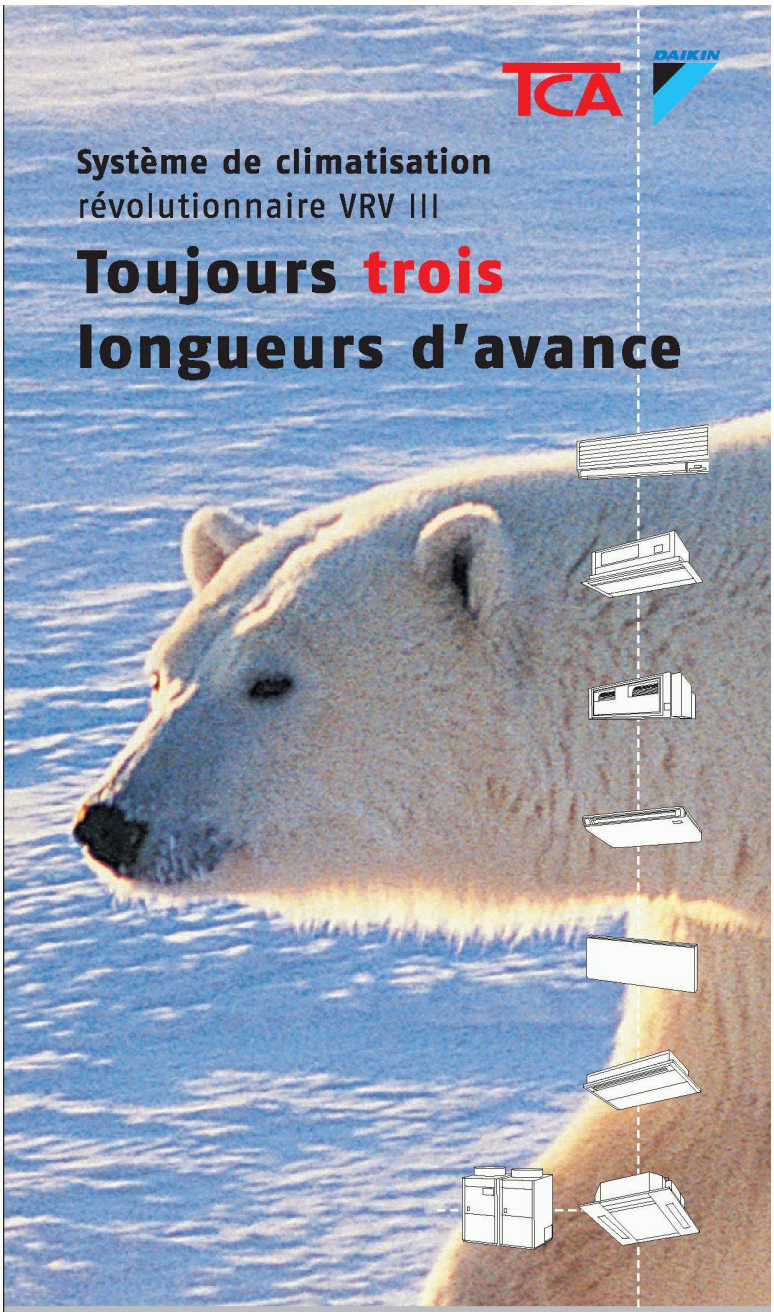
V. M. : A mon avis, un bout de la coque d'*Oracle* ressemble fortement à un bout de celle d'*Alinghi*. Les différences résideront par exemple dans la manière d'assembler les feuilles de pré-imprégné, unidirectionnelles ou non, dans l'épaisseur de chaque feuille – et donc dans le nombre qu'il en faut pour arriver à l'épaisseur de 1mm environ de la peau – et dans la quantité et la formulation de la colle utilisée.

Véronique Michaud, dr, collaboratrice scientifique
Laboratoire de technologie des composites et polymères

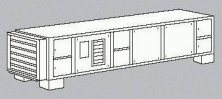
Daniele Costantini, dr, collaborateur scientifique
Advanced Photonics Laboratory

Pascal Vuilliomenet, adjoint du Vice-président pour l'innovation et la valorisation, responsable coordination partenariat EPFL - Alinghi
EPFL, CH – 1015 Lausanne

Propos recueillis par Anna Hohler et Jacques Perret



1. encore plus
de possibilités d'utilisation,
grâce à l'intégration du contrôle d'un monobloc de ventilation



2. encore plus
de fiabilité
grâce à un remplissage automatique du système

3. encore plus
de sécurité,
grâce à un système intégré de détection des fuites

THERMOCLIMA SA
Votre expert en climatisation!

Téléphone: 071 313 99 22
info@tca.ch **www.tca.ch**