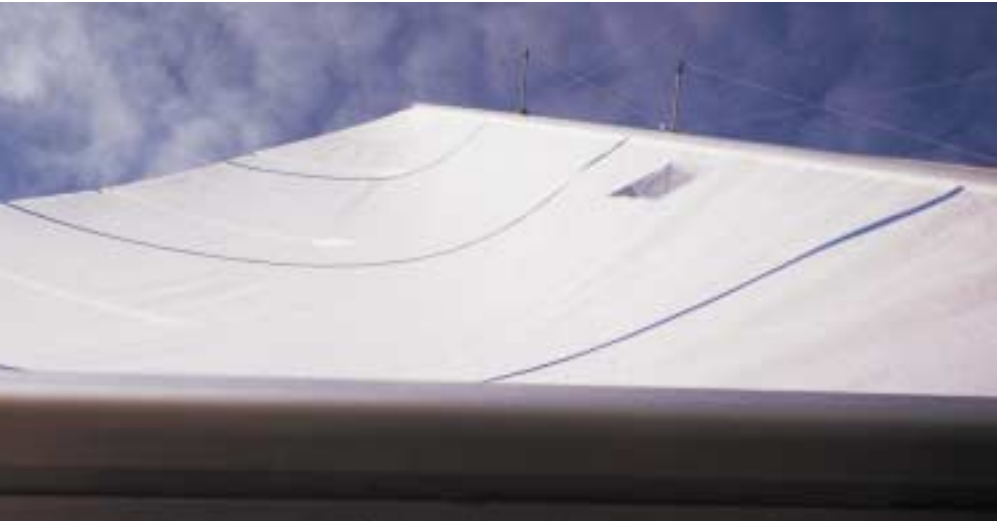




teurs de tissus pour voiles ajoutèrent au composite une seconde couche de renforcement avec des fibres croisées par rapport aux fibres primaires supportant les efforts.

Le *Kevlar* reste la fibre la plus couramment utilisée pour les voiles de bateaux de course, mais bien d'autres matériaux ont été adoptés dans des cas spécifiques. La fibre *Spectra*, produite par la Société *Allied Signal*, est un matériau en polyéthylène qui apparut vers le milieu des années 1980. Plus résistant que les autres matériaux de hautes performances, il dure en général plus longtemps. Néanmoins, comme il se détend progressivement sous l'effet des contraintes, on utilise des tissus plus lourds, qui se détendent moins ; c'est pourquoi on limite l'utilisation de cette fibre aux bateaux de croisière dont la durabilité prime sur la performance.

Le *Vectran*, un polymère de cristaux liquides mis au point récemment par la Société *Hoechst Celanese*, était initialement trop cher, excepté pour les bateaux de course les plus spécialisés. La baisse progressive de son prix le rend maintenant accessible aux plaisanciers. La fibre de carbone fit son apparition dans les tissus laminés lors de la préparation de la Coupe de l'*America* de 1992. Le carbone pèse environ 40 pour cent de moins que le *Kevlar* pour une résistance égale, mais il est trop cassant et difficile à incorporer dans les tissus des voiles. En s'usant, les premières voiles à fibres de carbone laissaient sur le pont une sorte de suie noire. Aujourd'hui encore, le coût élevé et la fragilité de la fibre de carbone limitent son utilisation aux bateaux les plus chers.

Durant les années 1980 et jusqu'au début des années 1990, les tissus laminés se sont constamment améliorés, mais les techniques de fabrication des voiles ont pris du retard. Les fabricants ont continué à couper, à coudre

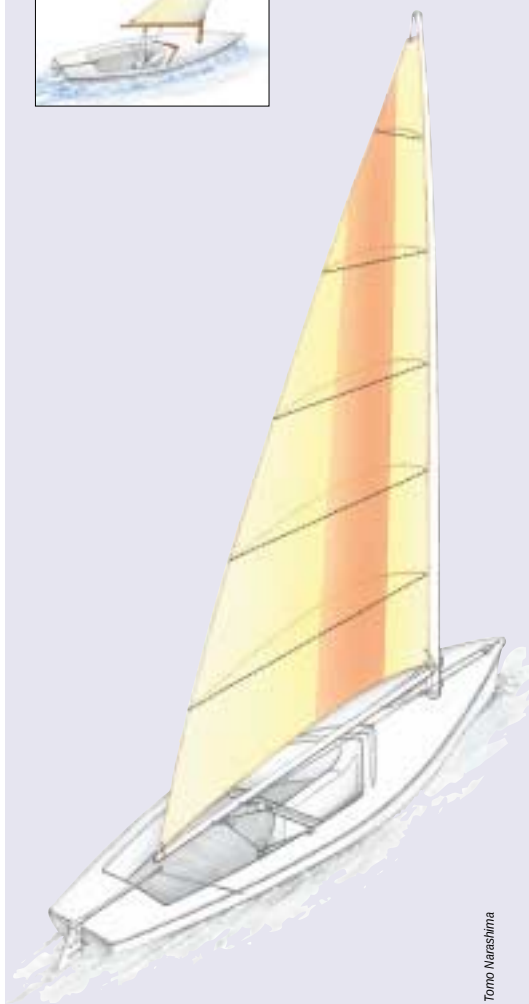
ou à coller les nouveaux composites laminés renforcés par des fibres, compromettant ainsi leur résistance exceptionnelle par l'introduction de raccords fragiles. Alors que les performances mécaniques des tissus augmentaient, il devenait de plus en plus difficile de réaliser des coutures suffisamment résistantes. C'est pour y remédier que L. DuBois et J.-P. Baudet ont inventé leur nouvelle technique de fabrication, le 3DL. La technique est simple : en donnant à la voile sa forme et en façonnant le film de composite sur des moules préformés, on élimine toutes les coutures.

Des structures plus solides

En 1990, ils présentèrent le concept à la Société *North Sails*, où j'étais consultant. Le projet était séduisant, mais se heurtait à des difficultés de mise en œuvre. Les voiles étant pratiquement toujours faites sur mesure, les moules, dont certains seraient gigantesques, devraient être transformables facilement et rapidement. Les bords des voiles attachés au gréement devraient comporter des parties correspondant aux points de fixation des mâts. Pour que la profondeur du moule soit réglable, il fallait donc que sa surface varie en longueur entre ces points fixes. De surcroît, le robot utilisé pour appliquer les fibres sur le moule devait «reconnaître» la forme du moule pour ne pas le heurter. Enfin, le système de collage et de feuillette devait être compatible avec le reste du processus.

Malgré ces difficultés, la Société *North Sails* invita les inventeurs à montrer la faisabilité de leur idée et leur fournit un local et un financement. Ils construisirent un moule en contre-plaqué et, suspendus au plafond par un harnais mobile, posèrent les fibres à la main. Il leur fallut près de trois semaines pour

La manière dont une voile tourne et se vrille au vent aide à définir sa forme tridimensionnelle. La courbure, ou cambrure, de la voile est un paramètre important. Les fabricants de voiles photographient souvent les voiles par dessous pour mieux faire ressortir leur courbure (à gauche). La zone de courbure maximale (ou partie de la voile présentant le creux maximum) détermine en partie la puissance que peut développer la voile (schéma du bas). Un autre paramètre crucial pour une voile est son vrillage (les deux schémas du haut). En principe, plus on s'élève au-dessus de l'eau, plus le vent est fort et change de direction. Grâce au vrillage de la voile, l'angle sous lequel le vent frappe la voile reste constant.



Tomo Narashima

4. LA FABRICATION 3DL (à droite) est plus complexe que l'ancienne méthode de coupe et de couture (ci-dessous). Les concepteurs définissent tout d'abord la forme d'une voile à l'aide d'un ordinateur. La machine transmet les paramètres à de petits moteurs situés sous un moule géant pour lui donner la forme désirée. On dépose ensuite une couche de Mylar. Les ouvriers suspendus dans un harnais mobile vérifient l'absence de plis ou de déchirures dans le film de plastique. Puis un portique applique les fibres de renforcement dans le sens des contraintes qui s'exerceront sur la voile. On étend ensuite une seconde couche de Mylar et l'on crée un vide entre les deux films pour coller le feuilletage.



terminer leur première voile : elle était si légère et si solide que la Société *North Sails* décida de construire la première installation fondée sur ce principe, dans l'espoir de fabriquer les voiles pour la Coupe de l'*America* de 1992. L. DuBois et J.-P. Baudet travaillèrent secrètement avec une petite équipe d'ingénieurs et de techniciens sur l'usine prototype et parvinrent à monter une usine avec deux moules surmontés d'un portique équipé d'outils robotisés.

La production en une seule fois de toutes les pièces se révéla délicate. Ainsi, il fallait sans cesse coordonner les ordinateurs qui commandaient les moules et le portique. Même lorsque les fils étaient disposés correctement, le feuilletage échouait souvent, gâchant ainsi une voile entière. Le système de plastification consistait à créer un vide entre les films pour les presser ensemble sans bulles. Le moindre trou dans le Mylar empêchait de faire le vide. On parvint finalement à produire des voiles utilisables, mais trop tard pour la Coupe de l'*America* de 1992.

Après cette usine prototype, la Société *North Sails* construisit une usine de plus grande production. Située dans le Nevada, cette seconde usine produit maintenant des voiles depuis près de deux ans. Pour fabriquer une voile, le concepteur définit d'abord, à l'aide



d'un ordinateur et d'un logiciel spécialisé, la forme désirée pour le produit fini. L'ordinateur commande les mouvements des moteurs qui ajustent la surface d'un énorme moule en bois (dont la surface totale peut atteindre 300 mètres carrés) de façon à prendre la forme souhaitée. On dépose d'abord sur le moule une feuille de Mylar qui épouse sa forme.

Un portique géant dispose ensuite les fibres de renforcement suivant un schéma préétabli. Ces dernières sont recouvertes d'un adhésif à mesure qu'elles sont déposées, afin d'être maintenues en place. Les fibres suivent des trajectoires courbes correspondant à la direction des contraintes auxquelles la voile sera soumise. On produit ainsi des voiles en utilisant toutes sortes de

combinaisons de fibres. On dépose ensuite deux autres couches de Mylar sur les fibres, puis on crée un vide entre les films, et la pression atmosphérique les presse l'un contre l'autre. En chauffant, on active un adhésif appliqué sur le face interne des premier et second films. Le troisième, qui ne sert qu'à coller le feuilletage, est ôté. Les deux premières couches de Mylar constituent ainsi les deux surfaces externes de la voile finie.

Les voiles 3DL sont plus légères que celles fabriquées selon l'ancienne méthode de coupe et de couture, et leur forme varie moins, même quand les contraintes appliquées sont importantes. Il n'est donc pas surprenant que les voiles 3DL dominent maintenant le marché des voiles pour la course. Elles



North Sails



doivent leur supériorité à la disposition des fibres de renforcement, qui suivent des courbes continues d'un bord à l'autre de la voile. La densité et l'orientation des fibres varie légèrement sur l'ensemble de la surface de la voile pour s'adapter aux contraintes, conférant ainsi une résistance maximale en chaque point pour un minimum de poids.

Des parachutes et des ballons légers

En janvier 1996, au cours d'une conférence de l'Institut américain d'aéronautique et d'astronautique, j'ai rencontré plusieurs ingénieurs de la NASA qui travaillaient sur des ballons stratosphériques à hélium, destinés à emporter des instruments scientifiques à des altitudes d'environ 45 000 mètres lors de missions qui devaient durer 100 jours. Connaissant l'intérêt qu'ils portaient aux tissus très résistants, je les ai invités à visiter l'usine 3DL, afin qu'ils sachent s'ils pourront adapter les techniques de fabrication de voiles à leurs ballons. Un autre groupe travaillant sous contrat avec la NASA souhaite utiliser les techniques de fabrication 3DL dans la mise au point des parachutes ultra-légers. Selon leurs estimations, des toiles sans coutures ne pèseraient que le tiers des parachutes actuels en Nylon. Certains scientifiques ont même envisagé d'utiliser la technologie 3DL pour fabriquer des antennes gonflables destinées à être envoyées dans l'espace.

Dans un proche avenir, les concepteurs ont de nombreux objectifs plus «maritimes»... Aujourd'hui, les fabricants cousent et collent des pièces élaborées sur les angles des voiles pour y attacher les filins de fixation. On allègerait et on renforcerait les voiles en produisant des voiles laminées souples à accessoires intégrés. Les ingénieurs envisagent de réaliser des voiles 3DL de croisière qui durent plus longtemps en utilisant des nouveaux films qui résistent mieux à l'exposition aux rayons ultraviolets. Ils prévoient d'introduire des voiles de compétition moins exotiques, accessibles pour un grand nombre de bateaux, en travaillant sur des structures plus solides et plus durables tissées à partir de combinaisons de plusieurs types de fibres. De telles améliorations diminueront le prix des voiles laminées souples, les mettant ainsi à la disposition des nombreux passionnés de voile.

Brian DOYLE est consultant pour la Société North Sails.

John ROUSMANIERE, *America's Cup Book*, W.W. Norton, 1983.

Manfred CURRY, *L'aérodynamique de la voile*, Chéron-FFV, 1991.

Une révolution nommée 3DL, in *Voiles et voiliers*, mai 1995.

Emiliano MARINO, *The Sailmaker's Apprentice: A Guide for the Self-Reliant Sailor*, illustré par Christine Erikson, International Marine, Camden, Me., 1994.