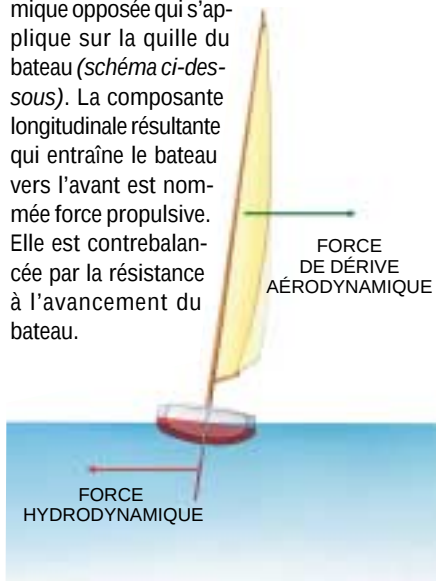


portance et de la traînée. Cette force aérodynamique totale est orientée légèrement vers l'avant du bateau, d'autant plus que la forme de la voile est performante. La composante latérale de cette force, la dérive (flèche verte), est contrebalancée par une force hydrodynamique opposée qui s'applique sur la quille du bateau (schéma ci-dessous). La composante longitudinale résultante qui entraîne le bateau vers l'avant est nommée force propulsive. Elle est contrebalancée par la résistance à l'avancement du bateau.



sur toute sa longueur, un vrillage de la voile est nécessaire.

Alors que la plupart des autres surfaces portantes, telles les ailes d'avions, sont rigides et ont donc une forme fixe,

les forces externes (dus au vent et au gréement) et la coupe d'une voile déterminent sa forme. Or la forme de la voile détermine l'écoulement de l'air. Les concepteurs de voiles se sont longtemps heurtés à cette interdépendance de la forme de la voile et de l'écoulement de l'air. Avec l'informatique, le calcul des différents paramètres d'une voile s'est considérablement simplifié. À l'aide d'un programme géométrique, on calcule d'abord sa forme statique, puis, en tenant compte des caractéristiques mécaniques de la voile, on calcule les modifications de cette forme qu'entraînent le vent et la tension du gréement. On compare cette forme dynamique à la forme idéale que doit avoir la voile pour être le plus efficace possible. Si la forme dynamique diffère trop de la forme idéale, on modifie la voile initiale et l'on recommence le calcul.

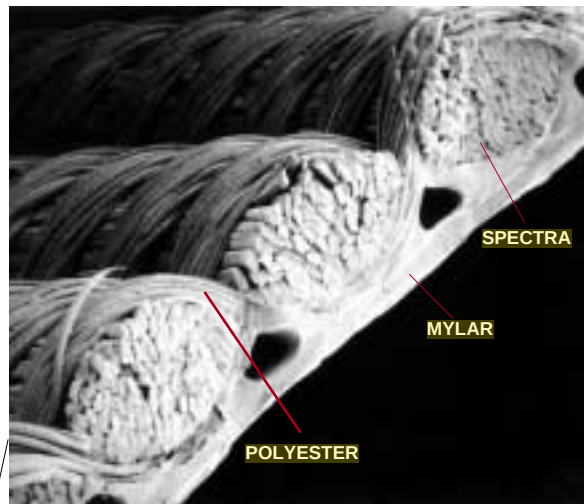
Grâce aux ordinateurs, les concepteurs prévoient également la construction d'une voile de la dimension voulue en utilisant un moule virtuel. Cet outil informatique aide à la détermination de la forme et de la configuration des différentes laizes de la voile. Un programme spécialisé permet également de calculer la courbure des coutures d'assemblage des panneaux. Les fabricants utilisant des

systèmes récents entrent directement ces données calculées dans des ordinateurs qui pilotent des coupeuses, d'où résulte une accélération de la fabrication de voiles plus précises.

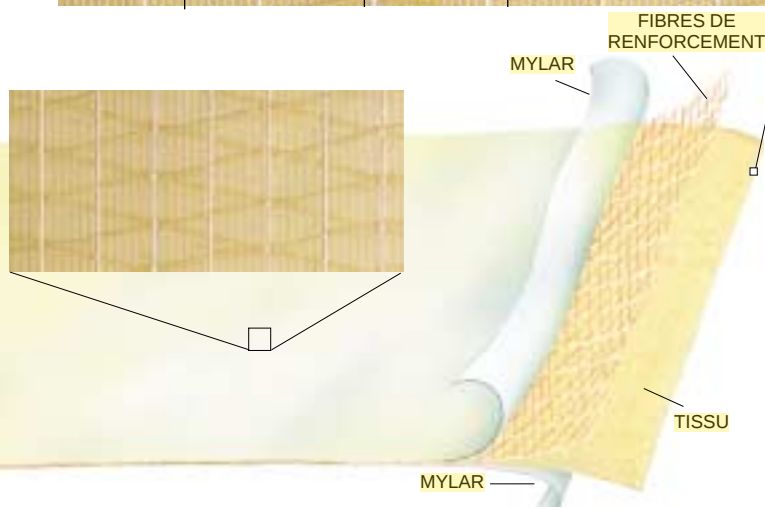
Un poids réduit

Ayant décidé du mode d'assemblage des diverses pièces d'une voile, le concepteur doit choisir le type de tissu. Celui-ci devra être le plus léger possible, car les performances du bateau en dépendent. Par vent faible, les voiles se déforment sous l'effet de leur propre poids. En outre, les voiles lourdes contribuent au «moment de gîte», ce qui nécessite, pour éviter le chavirement, d'équilibrer le poids des voiles et du mât par une quille plus massive. Des voiles légères permettent donc d'alléger les bateaux, qui seront ainsi plus rapides. Sur une mer agitée, des voiles lourdes accroissent également le moment d'inertie, ce qui augmente l'enfoncement de la proue dans les vagues et ralentit la progression (même les voiles de réserve augmentent le poids ; c'est pourquoi, en course, l'équipage cherche toujours à les regrouper vers le centre du bateau). Enfin

	Résistance à la rupture relative	Module d'élasticité relatif	Nom générique
Polyester	1,0	1,0	
Vectran	2,9	6,0	Polymère de cristaux liquides
Kevlar	3,1	9,0	Aramid
Spectra	4,5	11,8	Polyéthylène au poids moléculaire élevé
Carbone	2,8	15,0	
PBO	5,3	22,0	



Brian E. Doyle



2. LES TOILES DES VOILES MODERNES sont composées de plusieurs couches de films plastiques, de fibres et de tissus (photographie de gauche). En général, une couche de tissu et une toile de fibres sont prises en sandwich entre deux films dont les chaînes de polymères sont orientées, le Mylar (schéma de gauche). Dans le tissu, les fils de chaîne (longitudinaux) sont parfaitement rectilignes à l'échelle microscopique (micrographie ci-dessus). Les fibres de renforcement principales sont constituées de matériaux résistants, tels que le Kevlar, le Spectra ou le carbone. En fabriquant des voiles en toiles composites, les ingénieurs alignent des panneaux de manière que les fils de chaîne du tissu et les fibres de renforcement supportent l'essentiel des forces s'exerçant sur la voile. Les fibres de renforcement secondaires s'entrecroisent avec les fibres primaires et protègent ainsi la voile contre les dommages qu'occasionnent les efforts qui s'exercent lorsque la voile claque au vent lors des manœuvres.

l'équipage manipule des voiles légères plus rapidement, plus efficacement et avec un risque d'accroc moindre. Malgré cela, on ne peut trop alléger les voiles, sans risque de déformation et de déchirement.

Depuis longtemps déjà, on cherche à mettre au point des matériaux à la fois légers et résistants. Les artisans voiliers utilisèrent des tissus de coton et de lin bien avant la victoire de l'*America* en 1851, jusqu'à la veille de la Seconde Guerre mondiale. Puis, au cours des années 1950, ils abandonnèrent les fibres naturelles au profit des nouveaux textiles synthétiques comme le polyester et le *Nylon*. Lorsque l'on cherche la durabilité à faible coût, on utilise des voiles principales et des focs (petites voiles situées à l'avant du mât) en fibres de polyester tissées très serrées. Les spinnakers, ces voiles triangulaires, légères et creuses, utilisées pour naviguer par vent arrière, sont très souvent en *Nylon* léger ou en polyester.

La plupart des voiles de course modernes sont toutefois constituées de matériaux laminés souples encore plus légers. Ces toiles composites comprennent plusieurs couches de tissu, des fibres de renforcement telles que le *Kevlar* (utilisé pour les gilets pare-balles) et du *Mylar*, un film de polyester (*Mylar* et *Kevlar* sont des marques déposées de la Société Du Pont de

Nemours). Grâce à des techniques de tissage adaptées, les fabricants veillent à ce que les fils principaux soient rigoureusement droits. Des fibres de renforcement confèrent à la voile davantage de résistance à la traction, et le film de *Mylar* assure la liaison, tout en résistant au cisaillement. En sélectionnant chaque couche, les artisans voiliers choisissent les propriétés mécaniques des matériaux composites créés et, en particulier, la résistance du tissu à l'étirement et à la déchirure, deux paramètres essentiels de la voile. La limite élastique est un paramètre crucial, car même si, au-delà de ce seuil, les voiles ne sont pas déchirées, elles sont irrémédiablement déformées.

Du Kevlar au carbone

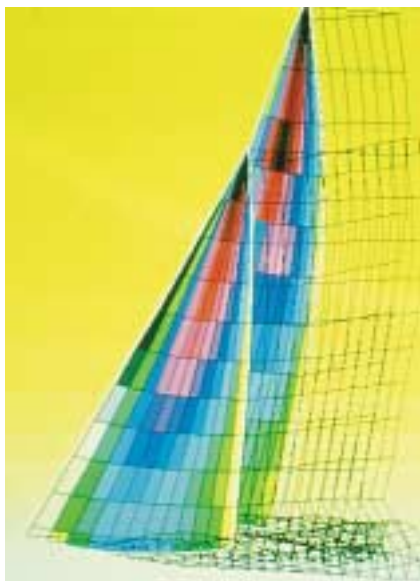
Au fil des ans, les concepteurs ont utilisé divers types de fibres, avec plus ou moins de succès. Les couches de renforcement en polyester apparurent dans les années 1970. Puis on essaya le *Kevlar*, qui venait d'être mis au point. Les premières tentatives échouèrent, car les fabricants de voiles et de tissus pour voiles n'étaient pas habitués à travailler des fibres aussi solides, mais intrinsèquement cassantes. Les tissages obtenus étaient auto-abrasifs : les fibres de *Kevlar* qui se croisaient et s'usaient mutuellement. En outre, certaines

La courbure et le vrillage des voiles

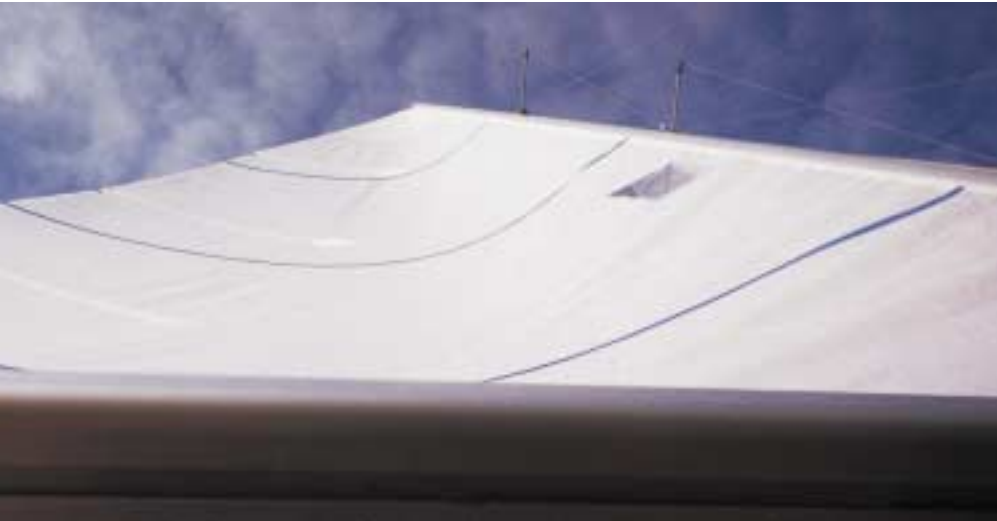
des premières voiles renforcées au *Kevlar* étaient si solides qu'elles pouvaient arracher le gréement.

Durant les années 1970 et 1980, les concepteurs continuèrent à expérimenter le *Kevlar*. Pour supprimer l'abrasion des voiles uniquement en *Kevlar*, ils essayèrent d'autres types de fibres de renforcement, ainsi que des revêtements pour les fibres. La solidité du matériau fut compensée par une meilleure répartition des contraintes qui s'appliquent sur les voiles. Les constructeurs de bateaux apprirent aussi à renforcer gréements, afin que ceux-ci résistent à des efforts supérieurs. Finalement des voiles en *Kevlar* très efficaces apparurent. Ainsi, en 1980, un bateau équipé d'une voile principale en matériau laminé renforcé au *Kevlar* remporta la Coupe de l'*America*, et, en 1983, lorsque les États-Unis perdirent la Coupe, le gagnant australien avait utilisé ce composite au *Kevlar* pour l'ensemble des grand-voiles et des focs.

Le renforcement au *Kevlar* n'était toutefois pas encore tout à fait au point. En 1987, à Freemantle, en Australie, un vent très fort et une mer agitée attendaient les concurrents de la Coupe de l'*America*. La plupart des concepteurs pensaient que le matériau laminé au *Kevlar* serait performant dans de telles conditions, mais ces voiles, qui avaient coûté plus de 150 000 francs, ne résistèrent que quelques heures. Personne ne sut tout d'abord expliquer cet échec, car les matériaux utilisés avaient des limites d'élasticité suffisantes pour supporter les vents prévus. Toutefois on découvrit vite que les efforts aléatoires, dont personne n'avait tenu compte, étaient responsables : les voiles résistaient bien lorsque le vent les gonflait, mais s'endommageaient quand elles fasaient ou lorsqu'elles battaient, au cours des manœuvres. Pour remédier à cette situation, les concep-



3. LA CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR a révolutionné la fabrication des voiles. Certains programmes calculent une répartition approximative de la pression de l'air sur la voile au cours de son utilisation, en fonction de sa forme et de ses caractéristiques mécaniques (à gauche). Les couleurs chaudes correspondent à des pressions élevées. En tenant compte de ces forces, le programme révisé ensuite la forme de la voile et recommence l'ensemble des calculs jusqu'à la convergence vers la voile optimale. Grâce à ces résultats, les ordinateurs permettent aux concepteurs de voiles de déterminer comment couper et aligner les diverses pièces de tissus, comment assembler les panneaux et les renforcer pour créer la surface portante désirée (à droite).



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

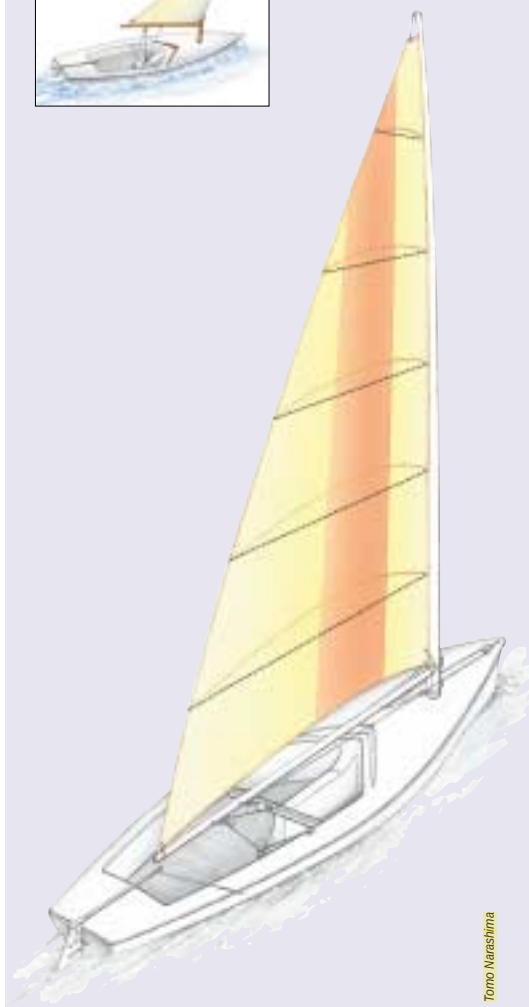
ou à coller les nouveaux composites laminés renforcés par des fibres, compromettant ainsi leur résistance exceptionnelle par l'introduction de raccords fragiles. Alors que les performances mécaniques des tissus augmentaient, il devenait de plus en plus difficile de réaliser des coutures suffisamment 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