

teurs). Il inhibe l'inflammation neurogène et a une action vasoconstrictrice directe, notamment sur les artères des méninges. Le sumatriptan est le chef de file de la famille des «triptans» (zolmitriptan, naratriptan, rizatriptan, etc) qui seront prochainement commercialisés en France.

Les divers médicaments ne doivent pas être mélangés, et ils doivent être pris le plus tôt possible, dès que le migraineux sait qu'une crise commence. Un traitement de crise ne doit jamais être prolongé, au risque de devenir dangereux : certains médicaments vasoconstricteurs entraînent des complications vasculaires, l'Aspirine et les anti-inflammatoires des troubles gastriques, etc. De surcroît, le risque de survenue d'une accoutumance existe, et un mal de tête de sevrage se déclenche entre les prises médicamenteuses : la céphalée chronique quotidienne avec abus médicamenteux est une toxicomanie.

La quête d'un traitement efficace

La majorité des migraineux gèrent la maladie avec les moyens simples évoqués et l'utilisation judicieuse des divers traitements de crise. Quand les crises sont de plus en plus fréquentes au fil des semaines et des mois, un traitement de fond tente d'empêcher leur survenue. Divers traitements de fond non médicamenteux sont proposés aux migraineux. Leur évaluation scientifique est difficile, en raison de la variabilité de la migraine et de l'importance de l'effet placebo. L'acupuncture et la relaxation ont été étudiées avec quelque rigueur, et méritent d'être essayées en cas d'échec des médicaments ou si les patients migraineux préfèrent ce type de traitement.

Plusieurs médicaments sont aussi disponibles, les uns spécifiques de la migraine tels que le Sanmigran®, le Nocertone®, le Désernil®, le Vidora® ; les autres, utilisés aussi pour le traitement d'autres maladies : l'Avlocardyl et d'autres bêta-bloquants, habituellement utilisés pour lutter contre certaines maladies cardiaques et contre l'hypertension, le Sibelium® contre les vertiges, le Laroxyl® contre les dépressions, la Dépakine® contre l'épilepsie et l'Aspirine (notamment dans les migraines avec aura).

Quel que soit le médicament retenu, le patient doit éviter d'en associer plusieurs, noter la survenue des crises,



6. L'ERGOT DE SEIGLE, (l'excroissance noirâtre sur les épis) est un champignon qui fut responsable, au Moyen Âge, de nombreuses intoxications. Depuis, on en a extrait l'ergotamine, une substance qui soulage les migraines.

augmenter très progressivement la dose de médicament pour éviter les intolérances, prolonger le traitement pendant trois mois avant de juger de son efficacité et, s'il est efficace, le maintenir pendant six mois à un an, puis essayer de l'arrêter. Ce programme de traitement doit être précisé avant la mise en route de la thérapie, sinon le patient risque de l'arrêter dès la première crise, déçu que ses crises ne disparaissent pas.

Le recours aux manipulations cervicales est fréquemment proposé aux migraineux, mais généralement sans succès. De surcroît, ces manipulations ne sont pas dénuées de risque et peuvent, exceptionnellement, provoquer un infarctus cérébral par lésion des artères vertébrales qui irriguent la partie postérieure du cerveau.

Seuls 0,5 pour cent des migraineux sont soulagés par ce type de manipulations, ceux dont la migraine est d'origine cervicale : ils souffrent de crises de migraine sans aura neurologique, déclenchées par certains mouvements du cou. Ce sont des personnes qui ont eu, antérieurement, un accident d'automobile et qui ont subi le «coup du lapin». La douleur commence invariablement en un point précis, en haut du cou, et elle remonte ensuite vers l'œil ; elle se limite toujours au même côté de la tête et s'accompagne alors des autres symptômes

de la migraine, tels que nausées et vomissements.

Certaines femmes souffrent de crises de migraine uniquement au moment des règles, le plus souvent dans les deux jours qui les précèdent. Les estrogènes percutanés soulagent ce type de migraine : on applique sur la peau un gel hormonal, Cestroge1®, que l'on fait pénétrer par massage ; on commence les applications 48 heures avant le début présumé de la crise et on continue pendant une semaine. Ce procédé évite souvent la survenue des crises liées aux règles.

Enfin, chez l'enfant, le médecin prescrit généralement des antalgiques et des anti-inflammatoires pour soulager les crises, mais pas, habituellement, de traitement médicamenteux de fond.

La migraine est une maladie fréquente et invalidante. Le diagnostic clinique est suffisamment rigoureux pour que le recours à des examens complémentaires soit presque toujours inutile. Ses mécanismes se précisent à mesure que l'on découvre des médicaments spécifiques et que l'on identifie des gènes impliqués dans la maladie. Contrairement à une opinion répandue, on peut soigner la migraine, en essayant de façon raisonnée, progressive et tenace les médicaments qui écourtent les crises et en instaurant, si nécessaire, un traitement de fond. Le pessimisme et le nihilisme thérapeutique ne devraient plus avoir cours aujourd'hui.

Marie-Germaine BOUSSER dirige le service de neurologie de l'Hôpital Lariboisière, à Paris. Hélène MASSIOU est médecin dans ce service. Après avoir fait une thèse dans l'équipe de M.-G. Bousser, Anne DUCROS poursuit ses recherches dans l'équipe d'Élisabeth Tournier-Lasserre, Unité INSERM U25, Hôpital Necker-Enfants malades, à Paris.

M.-G. BOUSSER et H. MASSIOU, *La migraine*, éditions Hermann, collection Ouverture médicale, 1992.

M. LAURITZEN et al, *Pathophysiology of the Migraine Aura*, in *Brain*, vol. 117, pp. 199-210, 1994.

C. WEILLER et al, *Brain Stem Activation in Spontaneous Human Migraine Attacks*, in *Nature Medicine*, vol. 7, pp. 658-660, 1995.

R. OPHOFF et al, *Familial Hemiplegic Migraine mutations in the Ca⁺⁺ channel gene*, in *Cell*, vol. 87, pp.543-552, 1996.

Les voiles de course

BRIAN DOYLE

Les tissus en matériaux composites mis au point pour les voiles des bateaux de course pourraient être utilisés pour les parachutes et les ballons stratosphériques.

Le 22 août 1851, le voilier *America* participe à une régate autour de l'île de Wight et l'emporte haut la main : il coupe la ligne d'arrivée quelques minutes avant un yacht plus petit, l'*Aurora*. Aujourd'hui, ce dernier serait déclaré vainqueur, car les règles incluent un handicap de manière que les petits voiliers, plus lents, ne soient pas pénalisés. Toutefois la vitesse de l'*America* était si impressionnante pour l'époque, que le trophée, la Coupe des Cent Guinées, devint la Coupe de l'*America* en son honneur.

L'*America* dut sa victoire à sa conception novatrice. Avec sa proue étroite et sa coque élancée, il fendait mieux les vagues que les bateaux britanniques plus arrondis, caractéristiques de cette époque. En outre, l'*America* arborait des voiles inhabituelles, en coton, alors que la plupart des bateaux britanniques utilisaient des voiles de lin. Bien que moins résistantes que les voiles de lin, les voiles de coton conservaient mieux leur forme sous la pression du vent. Ainsi, selon le récit de la régate publié par le *Times*, les voiles de l'*America* restèrent remarquablement tendues et plates.

Aujourd'hui, les concurrents de la Coupe de l'*America* recherchent encore les avantages apportés par les innovations techniques. D'une part, les concepteurs mettent au point des coques plus rapides, dont les plans sont jalousement gardés secrets. D'autre part, les ingénieurs trouvent sans cesse de nouveaux moyens de renforcer et d'alléger les voiles. Ils ont ainsi perfectionné leurs formes et mis au point des textiles peu extensibles. Les toiles les plus récentes sont constituées de couches de fibres résistantes et de minces films en plastique. Ces voiles en matériaux laminés ont changé les courses

Sharon Green

1. LES VOILES EN MATÉRIAU LAMINÉ, constituées de minces films plastiques et de couches de fibres résistantes comme le Kevlar, sont plus légères et se détendent moins que les voiles en tissus classiques. Ces deux propriétés augmentent la vitesse des bateaux : le poids total du bateau est réduit, et la voile conserve mieux sa forme aérodynamique. La voile tridimensionnelle en laminé (3DL) présentée ici est constituée de fibres résistant à la traction placés dans la direction des contraintes qui s'exercent sur la voile lors de son utilisation. On minimise ainsi le poids de la voile tout en lui conférant une solidité optimale en chaque point.





Le fonctionnement d'une voile

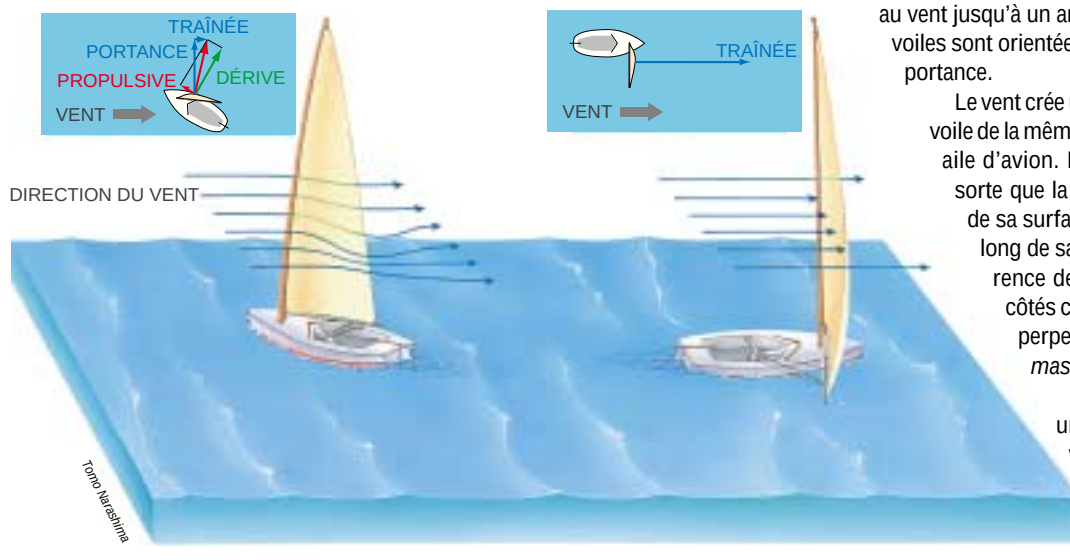
Chaque comprend le déplacement d'un voilier par vent arrière. La brise soufflant sur la voile exerce une force qui pousse le voilier. Pour produire une puissance maximale dans ce sens, les marins orientent les voiles perpendiculairement au vent et ajustent leur forme (schémas de droite).

Avancer contre le vent est un peu plus compliqué. Livrés à eux-

mêmes, de nombreux bateaux s'orientent face au vent et restent sur place. En cas de vents forts, ils peuvent même se bloquer et être «bout au vent». Un voilier ne peut progresser dans la direction du vent, car les voiles ne se gonflent pas (les sortir d'un côté ou de l'autre ne sert qu'à faire reculer le voilier, ce qui n'est d'aucune utilité, sauf si vous êtes bout au vent et que vous n'avez pas d'autres solutions). Un voilier peut cependant remonter au vent jusqu'à un angle de 35° environ, si les voiles sont orientées de façon à produire une portance.

Le vent crée une portance autour d'une voile de la même manière qu'autour d'une aile d'avion. La voile dévie le vent, de sorte que la pression diminue le long de sa surface externe et augmente le long de sa surface interne. La différence de pression entre les deux côtés crée une force de portance, perpendiculaire à la voile (schémas de gauche).

Le vent crée également une force de traînée sur la voile. La force aérodynamique totale s'exerçant sur la voile résulte de la combinaison de la



nautiques et sont utilisées dans d'autres domaines. De ce point de vue, l'invention de deux entrepreneurs suisses mérite une attention particulière.

Il y a sept ans, Luc DuBois, géologue, et Jean-Pierre Baudet, fabricant de voiles, inventèrent un ingénieux système de moulage des voiles laminées en une seule pièce. La suppression de l'opération de coupe permet d'obtenir des voiles sans coutures, moins sujettes à l'étirement. Les couches extérieures en plastique sont collées (le matériau est fourni en rouleau de un mètre et demi de largeur) pour former une membrane couvrant toute la surface du moule. Entre ces films plastiques, les fibres du tissu courent d'un angle à l'autre pour former l'armature de la voile. Leur disposition prend en compte les forces dues au vent : l'étirement est minimisé parce que les fibres solides sont orientées dans la direction des contraintes. La voile conserve ainsi, à l'emploi, une forme optimale. Dès leur apparition, ces voiles tridimensionnelles laminées (3DL) ont surpassé toutes les autres. Aujourd'hui, des ingénieurs de l'aéronautique envisagent d'utiliser ces membranes composites souples pour les parachutes et pour les enveloppes de ballons stratosphériques.

Des performances accrues

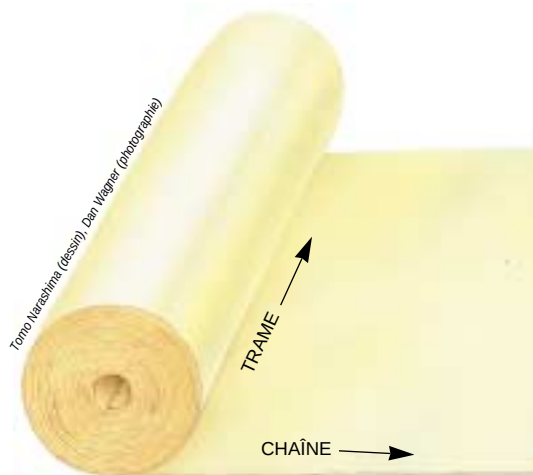
On pense souvent, à tort, que les voiles se distendent pour prendre leur forme optimale. En fait, les fabricants de voile rêvent d'une extensibilité minimale des tissus. Ce n'est qu'en considérant les voiles comme inextensibles qu'ils peuvent concevoir des voiles aux formes précises une fois gonflées par le vent : une voile doit se courber et se vriller de manière que l'air qui passe crée une portance, comme sur une aile d'avion.

L'efficacité d'une forme de voile dépend des conditions d'utilisation. Pour remonter au vent, il faut des voiles plates ; pour naviguer par vent arrière, une voile plus creuse donnera plus de puissance. Les voiles plates sont plus rapides par vent fort, tandis que les performances des voiles plus grandes et plus creuses sont meilleures par vent faible. Pour répondre à ces différents besoins, les fabricants créent des voiles spécifiques, adaptées aux diverses conditions de vent.

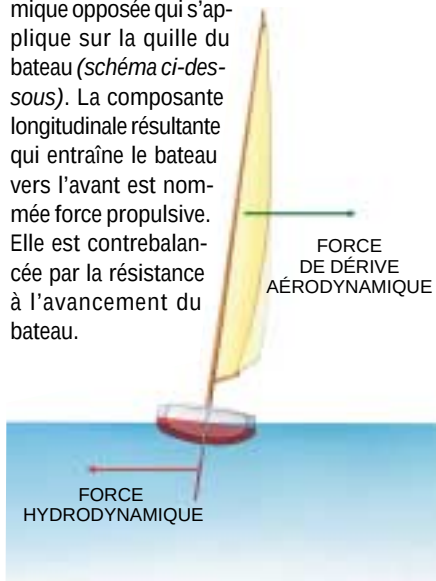
Pendant des siècles, dans les voileries, les artisans ont cousu des pièces de tissus coupées en bandes nommées laizes pour produire des voiles de formes et de tailles variées. Les laizes ont des bords légèrement incurvés,

de sorte qu'une fois assemblées et fixées au gréement, les voiles aient un léger creux.

L'une des caractéristiques principales d'une voile est sa courbure globale, ou cambrure (voir l'encadré de la page 45). De plus, les ingénieurs choisissent en quel point de la voile il faut placer le creux maximal, ou point vélique. En principe, le vent augmente et change de direction à mesure que l'on s'élève au-dessus de l'eau. Aussi, pour s'assurer que l'angle entre la direction du vent et la voile reste constant



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.

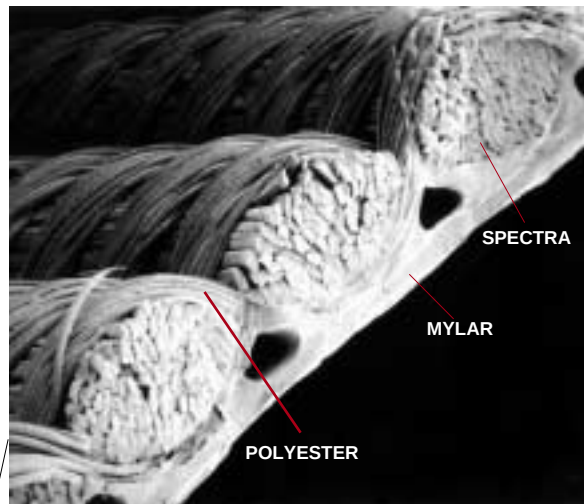
Grâce aux ordinateurs, les concepteurs prévoient également la construction d'une voile de la dimension voulue en utilisant un moule virtuel. Cet outil informatique aide à la détermination de la forme et de la configuration des différentes laizes de la voile. Un programme spécialisé permet également de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

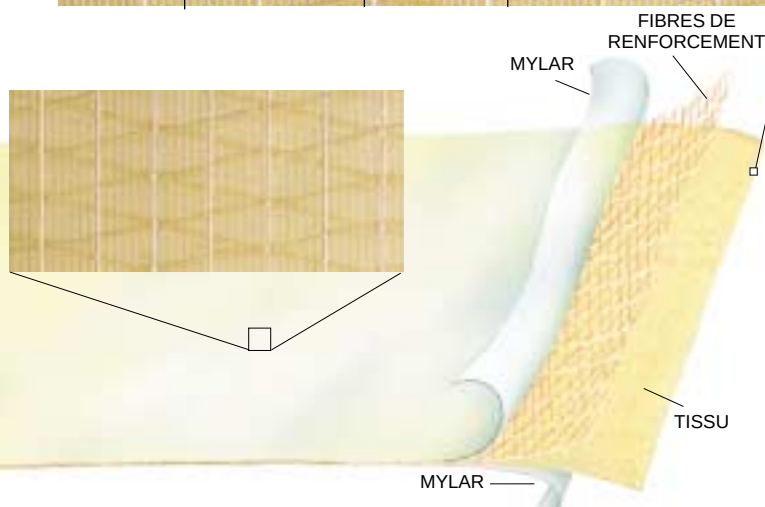
Un poids réduit

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 serré. 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.

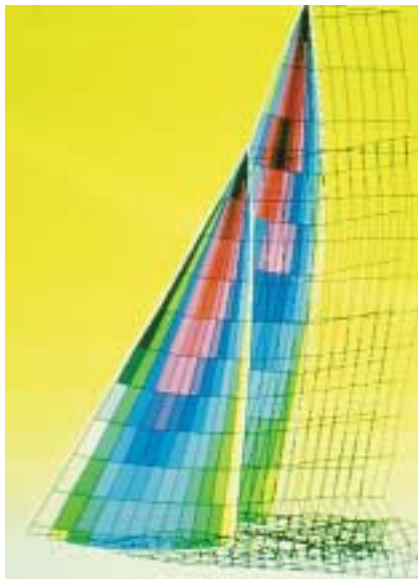
Du Kevlar au carbone

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

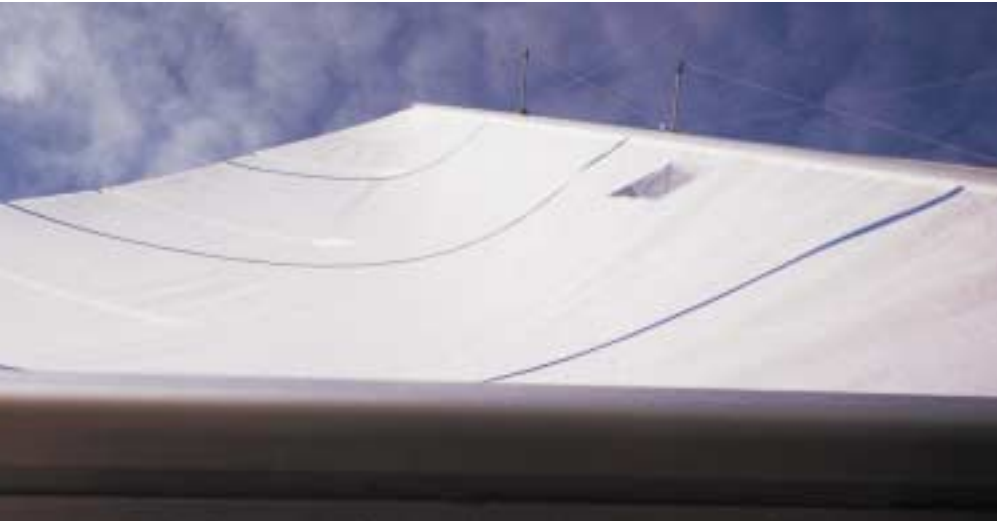
des premières voiles renforcées au *Kevlar* étaient si solides qu'elles pouvaient arracher le gréement.

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

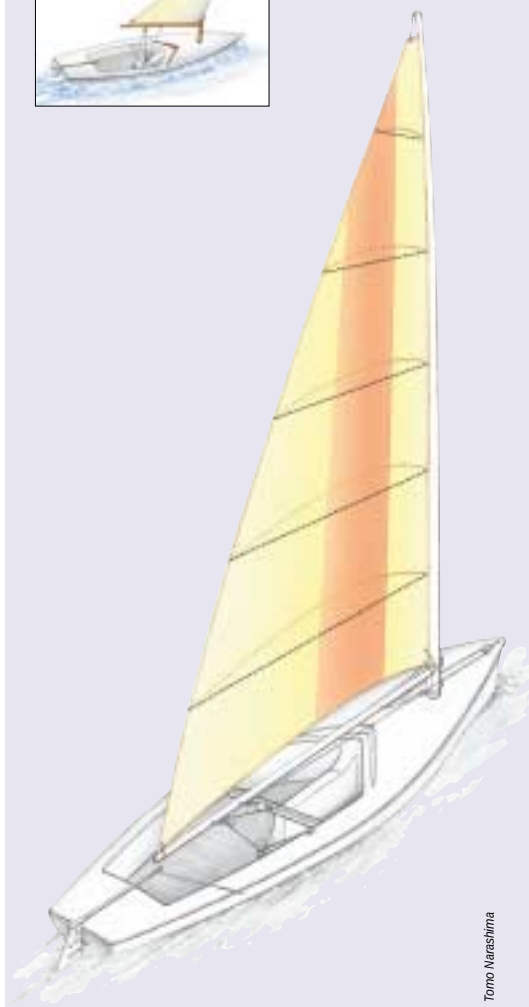
ou à coller les nouveaux composites laminés renforcés par des fibres, compromettant ainsi leur résistance exceptionnelle par l'introduction de raccords fragiles. Alors que les performances mécaniques des tissus augmentaient, il devenait de plus en plus difficile de réaliser des coutures suffisamment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

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.

Grandeur et décadence de l'amiante

JAMES ALLEMAN • BROOKE MOSSMAN

Minéral aux applications universelles, des mouchoirs à la pâte dentifrice en passant par les matériaux de construction, l'amiante est aujourd'hui proscrit. On ne lui connaît toutefois pas de remplaçant.

L'avenir industriel de l'amiante est compromis. Cette étrange fibre, qui fait régulièrement la une des journaux depuis une vingtaine d'années, est l'un des polluants les plus redoutés de la planète. C'est aussi celui dont la suppression et le remplacement sont le plus coûteux : en 1997, plusieurs dizaines de milliards de francs seront dépensés aux États-Unis pour l'élimination de l'amiante dans les bâtiments et dans les produits d'utilisation courante (le seul déflo-cage du campus universitaire de Jus-sieu, à Paris, a été évalué à un milliard de francs ; les industries qui utilisent l'amiante disparaissent ou se recon-vertissent. L'ampleur de cette crise est à la mesure de l'enthousiasme suscité par l'amiante au cours des siècles passés : on ne connaissait pas

de produit garantissant une meilleure sécurité.

Le nom d'amiante désigne une famille de silicates, minéraux contenant du silicium et de l'oxygène, de structure fibreuse (voir l'encadré de la page 51). Malléable, flexible et résistant au feu, l'amiante fut d'abord tissé pour la fabrication de capes, de nappes, de rideaux de théâtre et de combinaisons ignifugées. Les produits d'isolation en amiante ont permis d'économiser l'énergie et ont protégé contre les risques d'incendie. Les plaquettes de frein et les garnitures d'em-brayage en amiante ont amélioré la sécurité à bord des voitures d e

course et de tourisme ; des filtres à air en amiante étaient utilisés avec succès dans les ventilateurs d'hôpitaux, dans les cigarettes et dans les masques à gaz militaires.

Malheureusement, les mêmes propriétés de résistance et de flexibilité des fibres en font des ennemis redoutables de la santé humaine. L'inhalation d'amiante, à des concentrations même faibles, mais de façon prolongée, déclenche divers types de cancers. Dans de nombreux pays, l'utilisation de l'amiante est donc aujourd'hui interdite, sauf pour quelques applications où aucun matériau de substitution n'a été trouvé.

Des fibres minérales ignifuges

Vers 300 avant notre ère, Théophraste, disciple et successeur d'Aristote à la tête des péripatéticiens, mentionne, le premier, l'amiante dans son traité *De lapidibus* (Sur les pierres) : une substance semblable à de la laine pourrie, et qui brûle sans se consumer lorsqu'on l'imbibe d'huile. Au cours

Au 1^{er} siècle, Dioscoride décrit des mouchoirs en amiante réutilisables, nettoyés et blanchis au feu.

Plinie l'Ancien le nomme *asbestinon* dans l'*Histoire naturelle*.

Les hauts et les bas de l'histoire de l'amiante

En 300 avant notre ère, Théophraste, disciple d'Aristote, mentionne l'amiante : une substance qui ressemble à du bois pourri. On l'imprègne d'huile qui y brûle sans dégrader le support.

300 AVANT J.-C.

50 APRÈS J.-C.

Dessin du tuyau par Brian Christie ; Malcolm Ross ; Jason Goltz (photographie)