

Technique et performance

DES FIBRES AUX CORDAGES

Technique et
performance

Philippe NEIRAS



Résumé

A l'origine sont les fibres. Les fibres synthétiques développées par l'industrie chimique sont classées en 5 grandes catégories : polyester, polyamide, aramides, polypropylène, polyéthylène haut module. Leurs caractéristiques dépendent de leur constitution chimique et permettent la fabrication de cordages spécifiques selon deux modes de fabrication : le câblage et le tressage.

Une bonne connaissance des fibres, de leurs compositions à leurs caractéristiques mécaniques, permet de faciliter le choix des cordages. Une analyse très fine des conditions d'utilisations : en connaissant la charge à laquelle le cordage sera soumis, le parcours du cordage à travers l'accastillage, le type de bloqueur utilisé est nécessaire pour opérer les bons choix. Dans une optique d'optimisation technologique, une organisation rigoureuse des essais est indispensable pour faciliter la relation entre le fabricant et le coureur.

Mots clés : fibres, cordages, résistance, allongement, ténacité, abrasion, fluage, module, polyamide, polyester, aramide, polyéthylène, polypropylène, tresse, câblage, tressage, toron, âme, gaine, duite, fil de caret, fuseau.

La technologie des cordages est certainement plus ancienne que la navigation à voile elle-même. Elle en a précédé puis suivi l'évolution depuis les grands voyages jusqu'à la voile sportive. Au XXI^{ème} siècle nous sommes déjà loin du chanvre et des autres fibres naturelles et l'utilisation des fibres synthétiques va sans doute encore se développer et permettre plus que jamais, de disposer de cordages performants pour régler les voiles et tenir les esparts. Les progrès de la chimie nous permettent de disposer de cordages associant la légèreté à un allongement nul pour permettre la meilleure transmission possible de l'énergie entre le moteur (le gréement) et le châssis (la plate-forme ou la coque).

Le coureur soucieux d'optimiser son matériel ne peut faire l'économie d'une réflexion sur les types de cordages à utiliser. La technologie est l'une des composantes de la performance qui ne doit pas être négligée. La programmation d'objectifs de mise au point du matériel doit passer par une recherche d'informations : Dans cette perspective une meilleure connaissance des caractéristiques des fibres utilisées dans la confection des cordages est nécessaire et indispensable pour pouvoir faire les bons choix de cordages en fonction de l'utilisation faite en navigation. Puis, une méthodologie dans l'évaluation des cordages est également nécessaire pour ne rien oublier : évaluation de la qualité, contrôle du vieillissement, orientations à prendre si le coureur travaille avec un fabricant pour la mise au point.

Ces objectifs de mise au point ou de choix doivent être planifiés : les essais devant se faire suffisamment tôt par rapport aux objectifs de performance et surtout devant être validés sur des régates de moindre importance ou sans objectif de performance : il serait en effet suicidaire d'adopter un nouveau cordage pour un mondial par exemple, sans l'avoir validé au préalable en régate (et pas seulement en entraînement). Le souci permanent du coureur est d'optimiser le rapport efficacité/poids/confort. La spécificité d'un cordage dépend directement des matériaux sélectionnés pour sa fabrication et de la technique d'assemblage. Ces deux éléments sont essentiels pour comprendre un cordage et l'utiliser à bon escient.

Les fibres actuelles ont également remis à l'honneur le matelotage : la préparation des cordages doit être soignée, un suivi doit être réalisé. Le matelotage est devenu ou redevenu, un savoir faire de base du régatier, quelle que soit la série pratiquée. La connaissance des fibres et des bouts doit s'accompagner d'une formation au matelotage. Dans l'équipement du régatier rentre donc la trousse de matelotage (que propose nombre de fabricants de cordages : retenons par exemple, le kit de matelotage "gréateur" proposé par Marlow). Un cordage correctement épissé conserve 90 à 95% de sa résistance

nominale, alors qu'un nœud lui fait perdre 50% de sa résistance...

Les fibres permettent de fabriquer les matières textiles : tissus ou cordages. La fibre est un filament torsadé pour obtenir un fil. Le cordage n'est qu'une combinaison entre un ou plusieurs matériaux et un mode de fabrication, il en résulte un nombre "important de possibilités. Les fibres sont donc à la base, elles se rangent en deux grandes catégories :

1. Les fibres naturelles et les fibres chimiques.

1.1. Parmi les fibres naturelles, on trouve les fibres végétales et les fibres animales.

Dans les fibres végétales, on distingue :

- Les fibres végétales provenant de fruit (noix de coco) ou de graines : (coton, kapok).
- Les fibres provenant de tiges (chanvre, lin, ramie, jute).
- Les fibres provenant de feuilles (sisal).
- Les fibres provenant de graines foliaires (chanvre de Manille, abaca).

Dans les fibres animales, on distingue

- Les fibres animales à base de poils : Les poils de la toison des mammifères tels les ovins (moutons, chèvre commune, chèvre mohair, chèvre cachemire) ; les camélidés (chameau, lama, alpaga, vigogne) ; les rongeurs (lapin angora). On utilise en outre dans l'industrie de la laine cardée, les poils de phoque, d'ours, de renne, de loup, de vison...
- Les fibres animales à base de baves : Les baves sont des produits de sécrétion provenant d'insectes séricigènes, tels les vers à soie du mûrier qui font l'objet d'un élevage et fournissent de la soie naturelle et le vers à soie sauvage produisant la soie tussah.

1.2. Parmi les fibres chimiques, on distingue les fibres artificielles et les fibres synthétiques.

- **Les fibres artificielles** résultent de la simple transformation de substances naturelles mises en solution et régénérées sous forme de fibres par passage à travers un trou de filière (soie artificielle à partir de la cellulose).
- **Les fibres synthétiques** (Nylon par exemple) proviennent de polymères qui doivent être fabriqués au préalable.

Il existe en outre les fibres d'origine minérale, groupant des matières élaborées en fibres à partir de métaux ou de matières vitreuses.

La sélection naturelle qui a présidé à l'emploi tex-

tile de diverses fibres utilisées de nos jours résulte essentiellement des propriétés propres à chacune d'elles. Ces propriétés sont la finesse, la longueur, la résistance mécanique longitudinale, la flexibilité transversale qui permet la torsion des fibres dans les fils et le nouage. La réponse de la fibre aux sollicitations mécaniques conditionne les caractéristiques de la fibre et des ensembles de fibres dans un sens spécifique à chacune d'elles, ce qui détermine les différents domaines d'emploi des tissus ou cordages constitués.

Il est fort probable que l'homme a d'abord pensé au tissage des fibres végétales par l'observation de la construction des nids d'oiseau et des toiles d'araignées avant d'apprendre à fabriquer des fils. Le lin, la ramie, le chanvre, la jute ont fourni des tiges flexibles permettant la vannerie et le tissage.

L'invention de la filature qui consiste à paralléliser des fibres ou des filaments et à les retordre pour augmenter la résistance de l'ensemble revêt une importance au moins égale à celle de la roue. Elle a pu être suggérée aux premiers hommes par l'observation des lianes, pour fabriquer d'abord des cordages, des hamacs, des filets de pêche... Cette invention du fil retors a alors rendu possible l'utilisation de matériaux tels la laine et le coton pour la fabrication de tissus et de tricot. Quant aux fibres synthétiques, si on s'accorde à reconnaître en Robert Hooke le précurseur des fibres artificielles à base organiques, il n'en demeure pas moins que les anciens savaient étirer les métaux, or, argent cuivre et même le bronze, en filaments très fins servant à orner les tissus traditionnels. De 1664 avec Hooke à Hilaire de Chardonnet en 1885, les chercheurs se sont efforcés de réaliser une matière analogue à la soie en utilisant des substances naturelles de constitution voisine. Le succès limité de cette entreprise les a conduit à considérer une autre substance naturelle, la cellulose ainsi nommée par Payen en 1842 parce qu'on la trouve dans les parois des cellules végétales. Braconnot prépare le nitrate de cellulose en 1832 ; Audemars dissout ce corps dans un mélange alcool-éther et étire, à l'aide d'une aiguille, une fibre coagulée par évaporation du solvant en 1855. Schwabe invente la filière en 1862. Chardonnet fabrique industriellement la soie au nitrate de 1878 à 1885.

2. Les plastiques.

Il semble que ce soit Léo Hendrik Baekeland qui le premier, en 1909, ait utilisé le terme "plastique" en tant que substantif pour désigner une classe de produit à base de macromolécules. Pour lui les plastiques englobaient aussi bien les résines que les élastomères, voire les fibres artificielles et synthétiques. Actuellement, ce mot est généra-

lement réservé aux substances polymères à l'exclusion des élastomères et des fibres. Encore qu'il devienne de plus en plus difficile de diviser les plastiques en catégories, parce que leur nombre ne cesse de croître en même temps que s'estompent les barrières entre les différentes classes. La plus ancienne des matières plastiques synthétiques est le nitrate de cellulose trouvé par Braconnot en France, et par Schoenbein en Suisse en 1845. Mais ce n'est qu'en 1868 que les frères Hyatt ont mis en œuvre le nitrate de cellulose en tant que plastique, et non plus sous forme de solution. Ils fabriquèrent ainsi des boules de billard. Le nitrate de cellulose est obtenu à partir d'un produit naturel, la cellulose. En revanche, le plus ancien plastique entièrement synthétique est une résine formophénolique découverte par Baekeland en 1907, la **bakélite**.

De nombreuses recherches effectuées sur la constitution chimique des substances naturelles capables de donner des fibres artificielles permirent à Haworth d'établir la formule de la cellulose. Entre 1920 et 1922 l'Allemand H. Staudinger imagine le concept de la macromolécule, il prouva que, à condition que les macromolécules soient linéaires -c'est à dire formées par l'enchaînement, dans une seule direction, de petites molécules identiques (motifs) - la matière ainsi obtenue présentait un état physique spécifique, l'état fibreux, caractérisé par l'existence d'un élément de structure particulier, la fibrille, formée par le groupement en faisceaux parallèles de nombreuses macromolécules. La démonstration fut faite par Staudinger à partir de la polymérisation linéaire du formaldéhyde. Après 1922, on s'orienta surtout vers la synthèse de macromolécules présentant des structures linéaires. Il revient à VV. H. Carothers le mérite de réaliser en laboratoire entre 1928 et 1932, une gamme étendue de telles substances, issues de l'union de molécules bi-fonctionnelles, puis à partir de 1931, d'industrialiser la meilleure d'entre elles, le polyamide 6-6 commercialisé en 1938 par la société Dupont de Nemours sous le nom de nylon.

A partir de 1925, de nouveaux besoins ont surgi que la carbochimie (industrie de la transformation chimique des houilles) n'a pu satisfaire et qui sont à l'origine de la pétrochimie (industrie de la transformation chimique des pétroles ou chimie des dérivés du pétrole). Dès lors que le pétrole tend à devenir la source unique de matière première dans la fabrication des produits chimiques, on peut considérer que la quasi totalité des substances organiques est constituée par des produits pétrochimiques. Et les nouvelles fibres synthétiques prirent un essor prodigieux.

2. 1. Les principaux produits chi-

miques issus du pétrole sont : les polymères, les fibres, les plastiques.

Les polymères organiques occupent une place prépondérante dans les produits de la pétrochimie, ils sont de natures très diverses. Polybutadiène, polybutadiène styrène, polyisobutylène sont beaucoup utilisés dans la fabrication des caoutchoucs de synthèse (pneux et chambres à air par exemple). Polyéthylène et polypropylène sont fortement utilisés pour leur grande résistance aux intempéries.

Les fibres synthétiques représentent un deuxième groupe de polymères qui a en partie supplanté les produits naturels (soie laine coton chanvre). La plus connue d'entre eux est le nylon. Il existe également des fibres acryliques ou vinyliques. Le polypropylène peut également être employé sous forme de fibre.

Les matières plastiques sont de très loin le groupe de polymères le plus important avec les polyéthylènes, polypropylènes, polyesters, polyamides, aramides...

Polyamide et polyester sont fabriqués de la même façon : un polymères (groupe de molécules de même matière) est fondu à 290 degrés avant d'être propulsé à 16 mètres/seconde dans une filière d'où il ressort sous forme de filament. Pour obtenir une fibre haute ténacité (très résistante à

l'allongement), on recherche une forte orientation moléculaire par un sur étirage du filament (rapport 4 à 5). Plusieurs dizaines de fibres sont ensuite groupées pour donner un fil. Les fibres appelées fibres exotiques détiennent un haut module d'élasticité, on retrouve sous cette appellation les aramides dont le plus connu est le Kevlar 49, les polyéthylènes comme le spectra et plus récemment les carbonés ou le copolymère de polyester/polyarylate comme le vectran. Dans le monde de la voile, le vectran est apparu en 1992 sur le class america : "América3" d'où l'appellation de "cuban fiber" pour cette fibre.

Ainsi, hormis les fibres naturelles comme le sisal et le chanvre qui ne sont guère plus utilisées que pour les voiliers de tradition, les fibres utilisées pour la confection des cordages sont toutes d'origine synthétiques : polypropylène, polyamide, polyester, aramide, polyéthylène haut module... Les fibres haut module ont désormais le vent en poupe car on sait que 50% seulement des molécules linéaires de transfert des forces sont orientées dans le sens de la traction pour les fibres de type traditionnel, alors qu'on obtient un ratio de 100% pour les fibres à haut module. Ces nouvelles fibres possèdent une ténacité et un comportement à l'allongement équivalents voire supérieur aux câbles métalliques tout en conservant leur propriété textiles (souplesse, légèreté, toucher).

Nom et date de commercialisation de quelques plastiques :

1922	1927	1929	1936	1936	1938	1938
Acétate de cellulose	Polychlorure de vinyle	Urée formaldéhyde	Polyméthacrylate de méthyle	Polyacétate de vinyle	Polystyrène	Polyamide 6.6

1939	1942	1943	1956	1957	1964
Mélamine formaldéhyde	Polyéthylène	Silicone	Polyformaldéhyde	Polypropylène	Polyoxyde de phénylène

1965	1973	1973
Polysulfone	Polytéréphtalate de butylène	Polysulfure de phénylène

Propriétés : Les matières plastiques doivent leur succès à l'extraordinaire variété de leurs propriétés. Elles peuvent être légères comme de la plume, transparentes comme du verre, malléables comme de la cire ou résistantes comme l'acier. Il n'est donc pas surprenant que leurs applications soient innombrables et qu'elles soient utilisées dans les conditions les plus diverses. Les caractéristiques mécaniques des plastiques comptent parmi les plus importantes ~ résistance à l'allongement, résistance à la rupture, limite d'élasticité... Mais cela dépend de la nature des polymères. Bon nombre de polymères cassent avant d'avoir atteint

leur limite d'élasticité apparente, mais la courbe représentative d'un même polymère peut varier de tout au tout en fonction de la vitesse de déformation. Cela est d'une extrême importance du point de vue pratique : ainsi un polymère qui subit sans dommage des déformations importantes sous traction peut casser comme du verre sous l'influence d'une déformation rapide telle un choc. On peut améliorer les caractéristiques mécaniques des polymères en les combinant avec des fibres de verre, de carbone, de bore (sur âme tungstène).

	Allongement à la rupture %	Densité	Fluage	Température de Ramollissement	Température de fusion	Abrasion Ragage	Résistance aux UV	Résistance eau de mer	Résistance résiduelle avec un nœud %	Reprise d'humidité
Polypropylène	12/20	0,91	Fort	120°	160°	Tenue médiocre	Mauvaise sans traitement spécifique	Très bonne	50%	0,05%
Polyamide 6,6 (Nylon)	13,5/20	1,14	Moyen	230°	260°	Bonne tenue	Moyenne	Moyenne	60%	5%
Polyester	11/14	1,38	Faible	220°	260°	Bonne tenue	Bonne	Très bonne	50%	0,4%
Aramide	3,3/4	1,44	Très faible	Dégradation à 500°	Dégradation à 500°	Tenue médiocre	Faible	Moyenne	40%	5%
Polyéthylène haut module	3,5	0,97	Faible	110°	147°	Très bonne tenue	Bonne	Très bonne	55%	0,01%

Caractéristiques des fibres synthétiques

Fibres	Couleur	Famille	Origine	Module initial	Ténacité	Performance module x ténacité	Perte de performance à la flexion	Résistance aux UV	Elongation avant rupture
PBO Zylon	Cuivre Marron clair	aramide	Toyoba Japon	1850	44	80 520	27%	2 à 3 mois	2,50%
Carbone Haute ténacité	Noire	carbone	Mitsubishi et diverse	1350	100	135 000	100%	Non affectée	1,20%
Spectra	Blanche	polyéthylène	Allied Signal et DSM	1250	33,5	41 875	Pas d'effet	6-7 mois	5%
Dyneema	Blanche	polyéthylène		1050	37	38 850	Pas d'effet	6-7 mois	3,5%
Kevlar Edge	Jaune	aramide	Dupont	1100	35	27 260	22%	2-3 mois	3%
Kevlar 49	Jaune	aramide	Dupont	895	24,1	22 207	25%	2-3 mois	1,50%
Twaron	Jaune	aramide	Akzo Nobel	880	24	19 058	25%	2-3 mois	1,50%
Black Technora	Noire	aramide	Teijin Japon	540	28,3	15 282	7%	3-4 mois	4,20%
Pen Pentex	Blanche	polyester	Allied Signal	260	10,2	2550	Pas d'effet	6 mois	6%
Polyester HT	Blanche	polyester	Dupont	100	7,9	1242	Pas d'effet	6 mois	8%
Nylon	Blanche	polypropylène	Dupont	45	9,5	428	Pas d'effet	3-4 mois	12 à 13%

Module : chiffre indiquant la capacité d'une fibre à résister à l'élongation. Plus les chiffres sont hauts, moins la fibre s'allonge.

Ténacité : Résistance à la rupture d'un cordage, exprimée en grammes/denier. Chiffre indiquant l'effort requis avant la rupture de la fibre. Plus le chiffre est élevé, meilleure est la ténacité.

Flexion : Exprimée en pourcentage. Pourcentage de résistance perdue après 60 flex : c'est la perte de la capacité de la fibre à résister dans toutes les directions à soixante allers et retours sur deux petits rouleaux superposés et où la fibre s'angle à 90°.

Ultraviolets : Ils attaquent jour et nuit la fibre qui, sans protection, voit sa ténacité chuter. C'est le nombre de mois que met la fibre à perdre 50% de sa résistance initiale.

Fluage : Allongement au-delà de l'élasticité sous forte charge constante : c'est une déformation irréversible de la matière sous l'action d'une charge constante.

Densité : Rapport de la masse volumique de la matière par rapport à la masse volumique de l'eau. La densité de l'eau étant de 1,00 si la densité de la matière est inférieure à 1,00 ça flotte. Sinon, ça coule (sic). Rappel de la masse volumique : masse/volume

Température : Pour les aramides, il s'agit de la température de dégradation, pour les autres fibres, il s'agit de la température de ramollissement et de fusion.

Abrasion/ragage : Différence de résistance d'une matière après trempage dans l'eau de mer.

Résistance à l'eau de mer : Résistance de la matière après trempage dans l'eau de mer.

Reprise d'humidité : Quantité d'eau que retient la fibre après immersion.

Résistance résiduelle avec un nœud : Toutes les matières perdent une partie de leur résistance mécanique dès qu'on leur impose une courbure élevée. Le nœud est le cas extrême. Exprimée en pourcentage, c'est la résistance finale de la fibre, une fois le nœud effectué.

Fibre	Portrait	Avantages	Inconvénients
<p>PBO (Polybenzoxal)</p> <p>marque : Zylon</p> <p>Famille des Aramides</p>	<p>Dernière née des fibres haute performance, mise au point par Dow Chemical et produite par le japonais Toyoba. Elle surpasse tout ce qui existe, rare et cher. Aspect cuivré ou marron clair. Elle ne fond pas à la flamme. Elle n'est pas orange (les voiles en PBO orange étaient en fait fabriquées avec du PBO dimension-polyant, protégé par un film orangé Magna Shield qui absorbe jusqu'à 70% des UV. Son module initial très élevé permet de l'utiliser pour des complexes très sophistiqués. FSE commercialise le Futura PBO en diamètre 4 à 14mm avec une gaine polyester 32 fuseaux. Marlow commercialise le PBO Racing en diamètre 6 à 12mm. Cousin commercialise le King Rope en diamètre 3,9 à 16mm.</p>	<p>La fibre la plus résistante à ce jour. Pour la fabrication de voiles : -Déformation pratiquement inexistante. -Légèreté de la voile finie : elle divise par trois la masse du tissu nécessaire pour faire une voile. -Rapport poids /élongation presque idéal. Pour les cordages : Allongement et fluage quasi nul Utilisée en tresse cette fibre remplace avantageusement le câble d'acier ou inox. On l'emploie sur des gréements dormants (haubannage), mais aussi pour des applications à forte charge : drisse, bastaques, étais ou bras de spi, là où chaque millimètre compte. Les trimarans 60' l'utilisent beaucoup, notamment pour les galhaubans. L'équipe France Tornado l'avait adopté pour les trapèzes et le câble traversier de foc.</p>	<p>Diffusion confidentielle. Prix exorbitant. Très sensible aux UV, voir à la seule lumière du jour. Sensible à la flexion.</p>
<p>Spectra Dyneema</p> <p>Famille des Polyéthylènes haut module</p>	<p>La fibre spectra a été commercialisée en 1983 par l'américain Allied Signal. On la retrouve sous le nom de Dyneema en Europe commercialisée par le Hollandais DSM. C'est une fibre polyéthylène à très haut module. Densité : 0,97, inférieure à 1 : elle flotte. Point de fusion = 165°C. La fibre brûle en dégageant une odeur de cire. Combine haute performance et durabilité. C'est une fibre idéale pour les usages au long cours, car elle est peu sensible aux UV et se plie plutôt bien. C'est le cordage à tout faire actuel. Couleur blanche aspect soyeux. Cousin utilise le Dyneema SK 75 de DSM dans sa gamme : Top Star (écoutes) : diamètre 8 à 10 dégainable Dyneestar (drisses et écoutes) en âme tressée en 16 fuseaux pour les diamètres 3 à 10mm et 12 fuseaux pour les diamètres 12 à 18mm. Pour les diamètres 3 à 18mm : gaine extérieure polyester 24 fuseaux et gaine intérieure de compactage pour les diamètres de 6 à 18mm. La Tresse Dynalight cousin avec enduction polyuréthane est un produit facilement épissurable, très bonne tenue au ragage il existe en différent coloris. FSE utilise du Dyneema/spectra en âme : Ocean color, Ocean 300, Admiral racing,, cup line, wega, radial, admiral volcano, Extreme, Tonga. L'admiral racing est constitué d'une gaine intermédiaire en polyester filé qui empêche le glissement de l'âme dans la gaine. Cette gaine facilite l'épissage car on peut la retirer lors de la fabrication de l'épissure. Le radial dyneema est beaucoup utilisé par les catamarans de sport.</p>	<p>Fibre très légère. Elle est Hydrophobe : Stable par rapport à l'humidité. Elle ne perd aucune qualité à la flexion. Très haute résistance, faible élongation. Une des fibres exotiques parmi les moins sensibles aux UV. On peut donc l'utiliser en simple tresse : (15 grammes au mètre pour un diamètre 4 mm). Bonne résistance à la rupture. Excellente résistance à l'abrasion et aux intempéries. Résistance aux nœuds et aux faibles rayons de courbure. Meilleur module et plus haute ténacité que le Kevlar. Spectra et dyneema supplantent le Kevlar (fibre aramide à haut module très résistante à l'allongement mais sensible aux UV et n'aimant pas les flexions répétées.)</p>	<p>Présente un certain Allongement avant la rupture : fluage. Peut glisser lors de charge longue.</p>

Fibre	Portrait	Avantages	Inconvénients
Vectran Polymère de cristaux liquides	Très utilisée dans les cordages le vectran est aussi utilisé pour la fabrication des voiles de grande dimension. Arrivé en 1992 avec america3 développé par Hoechst Celanese. Généralement utilisé mixé avec d'autres matériaux Densité = 1,41 Se décompose à 500° C On trouve chez Marlow : le vecstran racing ou le excel vectran Cousin propose le vecstar FSE propose un mixage dyneema/ vectran dans sa gamme cupline à 70% dyneema et 30% vectran sous une gaine polyester 32 fuseaux. Le vectran stoppe le fluage du dyneema Liros propose le vecstran olympique : âme vectran et gaine polyester 32 fuseaux à haute ténacité	Très haute résistance, faible élongation Assez bonne caractéristiques de résistance à la flexion, ténacité très bonne. Bonne résistance au fluage Allongement avant rupture excellent Excellente résistance aux charges répétées. L'équipe de France tornado l'a adopté pour réaliser les latéraux de bout dehors.	Très sensible aux UV, résiste peu aux UV et à l'abrasion. Casse sans prévenir à cause de son module quelconque. Il faut le remplacer souvent. Supporte mal les nœuds. Prix élevé au regard des performances.
Carbone Haute ténacité	Depuis la sortie du PBO, en perte de vitesse en utilisation voilerie. Très difficile à mettre en œuvre.		
Kevlar Twaron Famille des aramides	L'apparition du dyneema ou spectra et du vectran ont rendu obsolète l'utilisation de cette fibre performante mais coûteuse. Liros propose le liros aramide : âme aramid kevlar twaron et gaine polyester diolen tressé 1 :1		
Polyester HT	Fibre la plus courante dans la confection des cordages, vulgarisée sous l'appellation de tergal ou térylène. Densité = 1,38 Point de fusion = 260°C Lorsqu'elle brûle, elle dégage une fumée noire. Matériau à tout faire par excellence (fil à coudre, fil à surlier) Il est universellement utilisé pour la gaine. Beaucoup utilisé pour les amarrages et mouillages. Cousin propose le Squareline ou le flat line idéal pour un encombrement limité Marlow a développé le marlowbraid qui est donné pour une résistance de 40% supérieure aux polyesters traditionnels à double tresse. C'est la technique de fabrication avec une âme à 3 torons qui permet ces performances : utilisable pour drisses écoutes bras de spi pour des navigations « loisir sportif » Marlow développe également le 16 tresses matt et le double tresse idéals pour les écoutes de GV.	Fibre très bon marché, bonne ténacité, bonne tenue à l'eau de mer et aux UV : résiste aux UV. Bonne résistance à la flexion. Excellente résistance à l'abrasion reste souple en toutes conditions climatiques : ne se contracte pas avec l'humidité. Supporte très bien les intempéries. Très bonne absorption des chocs. Bonne tenue des couleurs, idéale pour les gaines.	Allongement beaucoup plus important que n'importe quelle autre fibre. Caractéristiques un peu juste pour la compétition. Excellent rapport qualité prix
Polypropylène	Fibre résistante mais souple. Densité = 0,91 inférieure à 1, elle flotte. Point de fusion = 210°C Utilisé pour réaliser des remorques ou des lignes flottantes. Des filins de secours pour lancement de bouée couronne. Quand elle brûle, elle dégage une odeur de cire.	Hydrophobe, léger peu couteux, assez élastique. Flottabilité, légèreté, pratiquement imperméable. Bonne résistance à la flexion et à l'usure. Excellente résistance à l'abrasion et aux intempéries. Absorbe les charges brutales	Très peu résistant : caractéristique mécanique médiocre, point de ramolissement bas, inutilisable sur un winch. Toronné ou tressé il est vite désagréable, voire agressif au toucher dès les premiers symptômes d'usure. Peut perdre jusqu'à 15% de sa résistance avec l'humidité : Se contracte avec l'humidité.
Nylon Perlon ankalon Polyamides	Densité = 1,14, il ne flotte pas. Point de fusion = 215° à 255° Ils brûlent un peu moins facilement que les polypropylènes et s'ils fondent, ils gouttent moins que les polypropylènes. Quand il brûle la flamme dégage une fumée blanche à odeur de céleri. Cordage tout usage pour amarres de quai, ligne de mouillage, ligne de corps mort. donc tout cordage nécessitant une bonne élasticité et pour les gercettes rabans et sangles. Les productions réalisées à partir de cette fibre sont câblées en 3,4 ou 8 torons. Avec 3, 4 torons, les épissures sont aisées ; avec 8 torons, le cordage a une surface plus douce : toucher plus agréable et moins de formation de coques. Cousin propose le cordage polyamide référence TN en 3 torons	Souple et élastique, il absorbe les charges brutales. Il est en fait idéal pour les amarres. Bonne ténacité et élasticité. Meilleure résistance aux UV que les polypropylènes bien que la fibre jaunisse vite mais ceci affecte peu la résistance du cordage.	Tendance à mal vieillir : devient raide ; faible résistance, rétraction et perte de résistance dans l'eau. Grand allongement Assez souple mais se durcissant à l'eau (taux d'absorption assez élevé)

La fabrication des cordages : La base est donc la fibre : polyamide, polyester, aramide ou polyéthylène. Ces fibres peuvent être continues ou discontinues. Elles sont livrées aux fabricants de cordage sous forme de bobines par les grands groupes de l'industrie chimique. La fibre continue est la matière première constituée de fibres de très grande longueur (de la longueur de cordage) appelées filaments, ils offrent un fini lisse plus résistant à l'abrasion et plus solide que le discontinu. La fibre discontinue est la matière première constituée de fibres courtes (15 centimètres) qui procure le touché coton et permet d'obtenir un fini mat.

Deux méthodes sont utilisées pour la fabrication des cordages : le tressage et le câblage. Et c'est là qu'intervient le savoir du fabricant, certaines techniques sont jalousement gardées par les cordiers. Les machines tournent en permanence dans un bruit assourdissant : la fabrication se passe dans l'automatisme le plus complet. La visite d'une usine de fabrication telle celle de Cousin près de Lille, est très impressionnante.

Le câblage : Il donne un cordage toronné. Il consiste à assembler plusieurs groupes de fibres entre elles, ces fibres sont légèrement tordues (duites) pour obtenir par torsion inversée un taron (fil de cadet). Il faut au moins trois torons pour réaliser un cordage. Chaque opération est réalisée avec des torsions inverses pour éviter le décoffrage.

Le tressage : Il consiste à entrelacer deux groupes égaux de duites provenant des fuseaux d'un métier à tresser. La moitié des fuseaux tournent dans le sens des aiguilles d'une montre, l'autre dans le sens inverse. Un cordage

tressé peut avoir plusieurs formes : simple tresse, tresse plate ou creuse, une ou deux tresses sur âme constituée d'un faisceau de fils parallèles. L'âme est la partie qui subit la quasi totalité des efforts, la gaine assure elle un rôle de protection. Réalisée en fibres discontinues, la gaine apporte un confort exceptionnel de préhension.

La machine à tresser est constituée d'un plateau rotatif chargé de 8 à 16 fuseaux et la qualité du cordage dépend de la tension du fil et de la vitesse d'enroulement. En effet un fil mal équilibré réduit la durée de vie d'un cordage et diminue sa charge de rupture : la charge n'étant pas répartie équitablement. Par exemple, pour une tresse 8 fuseaux, si 3 fuseaux sont plus tendus que les autres, ils encaisseront les efforts de façon disproportionnée lorsque le cordage sera sous tension. Ces 3 fuseaux se casseront avant les 5 autres. Pour une finition en double tresse, deux passages sont à effectuer sur la machine. Dans les cordages l'âme peut donc être constituée de 3 torons, de fils parallèles ou tressée. La tresse extérieure est constituée de 8, 16 ou 32 fuseaux. Le tressage 32 fuseaux confère une excellente tenue à l'abrasion sur bloqueurs, self tailing et winchs, de plus, il ne coque jamais.

Il y a donc 4 étapes dans le processus de fabrication :

- 1 : Des filaments parallèles sont torsadés pour obtenir les fils initiaux,
- 2 : Ces fils sont à leur tour torsadés,
- 3 : Les fils obtenus sont torsadés pour obtenir des torons ou fuseaux.
- 4 : Les torons ou fuseaux sont travaillés pour former le cordage.

2.2. Le coureur face au choix d'un cordage

L'évolution des techniques de tressage associée aux caractéristiques exceptionnelles des fibres synthétiques a permis de diminuer fortement le diamètre des cordages : donc de gagner en légèreté et souplesse. Le premier élément dans le choix d'un cordage est de connaître **la charge** qui lui sera imposée. Une campagne de mesures réalisées sur les Tornados a permis de connaître la charge sur les différents bouts utilisés : on a relevé par exemple, jusqu'à 240 kilos sur les latéraux de tangon. De là, on peut en déduire la résistance demandée au cordage et choisir le cordage adapté. Bien entendu on prend une marge de sécurité : le bon choix peut être de sélectionner le diamètre du cordage qui rentre à 30% de la charge de rupture. **La charge de rupture** est la valeur exprimée en déca-newton à laquelle le cordage casse un déca-newton est égal à 1,02 kilogramme cette donnée apparaît dans tous les catalogues constructeur. On parle aussi de ténacité pour les fibres et fils. Elle se calcule par le rapport de la force de rupture du cordage au poids au mètre d'un même cordage : pour deux cordages d'un poids au mètre identique (et pas forcément de même diamètre), celui qui a la ténacité la plus grande a une résistance à la rupture supérieure. Si on considère qu'en régate on utilise les cordages à 35% de leur charge de rupture, on utilise la formule suivante charge de rupture = surface de voile en m² x vitesse du vent en nœuds x 0,0021 x 5. On peut considérer que les tensions exercées sur les cordages augmentent linéairement en

même temps que le déplacement du bateau : les constructeurs de cordages donnent dans leur catalogue l'évolution des tensions en fonction du déplacement du bateau. Mais bien sûr, rien ne remplace des mesures sur l'eau à l'aide de capteurs adaptés. Ces mesures permettent de connaître précisément les charges sur tous les cordages utilisés. Pour les Tornados par exemple, une nouvelle campagne de mesure s'impose après la modification du gréement (double trapèze, adoption d'un spi et augmentation de la surface de GV et de foc. L'allongement des cordages doit être pris en considération, on distingue trois formes d'allongement :

- L'allongement élastique : dans ce cas le retour à la taille initiale est total et immédiat.
- L'allongement temporaire : très difficile à évaluer et à prendre en compte car le retour à la taille initiale après allongement est progressif.
- L'allongement définitif : dans ce cas le cordage ne retrouve jamais totalement sa longueur initiale en raison des modifications de sa géométrie propre.

Les cordages sont testés par les constructeurs, en général après une série de six charges à 50% de la charge de rupture (Marlow). La difficulté pour pouvoir comparer les produits d'un constructeur à un autre vient du fait que les tests réalisés ne sont pas tous sur le même protocole : il convient donc lorsqu'on lit les données constructeurs de bien vérifier si les tests pratiqués sont identiques, malheureusement, c'est rarement le cas.

L'accastillage est également déterminant : il faut

savoir si l'accastillage utilisé correspond avec les caractéristiques du cordage choisi, car la performance du cordage en dépend.

Diamètre des réas : le diamètre intérieur doit être égal à 5 fois, au moins, le diamètre du cordage prévu. Le cordage s'adapte plus ou moins aux réas selon qu'ils sont montés sur roulement à aiguille ou à billes.

Le parcours du cordage est déterminant : frottements et courbures importantes sont à prendre en compte dans le choix. L'arrêt du cordage sous tension est également à prendre en considération : **angulation et nature des taquets**.

Les nœuds amoindrissent la résistance du cordage, les épissures sont deux fois plus efficaces: la possibilité ou non de réaliser des épissures est donc capitale dans le choix. Les catalogues indiquent cette donnée appelée résistance aux nœuds : la charge de rupture étant fortement réduite, la résistance aux nœuds est donnée en pourcentage de la charge de rupture usuelle du cordage sans

nœud. La possibilité d'installer des **protections par surgainage** ou de protéger des zones de ragage (cuir, adhésif...) est également à prendre en considération.

Le Souci permanent du coureur est d'optimiser le rapport efficacité/poids : Les fibres haut module grâce à leur grande résistance permettent de diminuer le diamètre du cordage pour une résistance équivalente à une fibre bas de gamme d'un diamètre supérieur - le gain de poids est donc important. Entre des fibres haut module, il peut y avoir aussi recherche d'un gain de poids, par exemple: le dyneema racing de Marlow est la plus légère des fibres dyneema. De plus, un cordage de ce type peut encore être allégé en le dégainant: on va l'alléger de 65%

de son poids. Cette diminution du poids se fait sans altérer la force ni la résistance à l'allongement du cordage : le dyneema étant très résistant aux UV et à l'abrasion, il faut, autant que possible, l'utiliser dégainé.

Le choix de la gaine est important: une gaine plus lisse permet une diminution de la friction et une augmentation de la vitesse des passages aux différents points de contact avec l'accastillage : on empanne par exemple plus vite et mieux grâce à un choix judicieux de gaine sur une écoute de spi de catamaran de sport.

Les qualités de préhension et de confort dans la main sont capitales pour des actions efficaces sur les réglages : le diamètre est certes un critère, mais la qualité de la gaine en est un autre. Autrement dit c'est la gaine qui fait la raideur ou la souplesse d'un cordage : le pas utilisé pour son tressage est déterminant ou plus exactement l'espacement des points. Plus le pas est serré, plus la gaine est raide. Plus la gaine est souple ou lâche plus elle est sensible à l'abrasion. Un autre élément intervient : le point de fusion. La température monte vite sur un cordage qui frotte en aller et retour sur un réa (cas de la drisse de spi en Tornado par exemple), l'élévation de température fragilise donc le cordage et si le polyester est souvent préféré pour réaliser les gaines c'est que son point de fusion est de 260 degrés contre 130 pour le dyneema.

Le coureur qui veut se lancer dans une démarche d'optimisation des cordages doit d'abord établir la nomenclature des bouts utilisés, le tableau suivant était utilisé par l'équipe de France Tornado qui travaillait avec la société COUSIN.

Utilisation	Diamètre	Poids Grammes/mètre	Couleur	Ame	Gaine	Métrage	Echantillon référence
Ecoute gv	Dégressif 10 à 5		Rose	Dyneema	Polypropylène	10	
Ecoute foc	Dégressif 8 à 5		Gris	Dyneema	Polypropylène	12,50	
Rotation de mât	6		Noir fil rouge	Dyneestar : âme à pas long tressée en polyéthylène aromatique	Polyester		
Cunningham gv	6	Dégainé	Rouge	Topstar		5,30	
Cunningham foc	4		Blanc fil noir	Dyneestar	Chappe polyester	4,20	
Chariot gv	6		Noir fil vert	Dyneestar	Polyester	3,10	
Barber foc	5		Noir fil jaune	Dyneestar	Polyester	5	
Point tire foc	5		Noir fil rouge	Dyneestar	Polyester	1,70	
Trapèze et estrope foc	5		Noir fil bleu	Dyneestar	Polyester	0,80	
Remontée dérive	5		Noir fil jaune	Dyneestar	Polyester	3,1	
Drisse gv	4		Blanc fil bleu	Dyneestar	Polyester	19	
Drisse foc	1,3		Jaune fil rouge	Super aram	Polyester	12	
Transfilage latéral trampoline	3		Rose fil jaune	Super aram	Polyester	2,30	
Transfilage arrière trampoline	3		Rose fil jaune	Super aram	Polyester	1,90	
Règlage bôme	5 5 5		Noir fil jaune Noir fil rouge Noir fil bleu	Dyneestar Dyneestar Dyneestar	Polyester Polyester Polyester	1,10 0,90 1,50	

Ce tableau du Tornado standard a été réactualisé pour le Tornado sport, il permet donc aux coureurs de définir chaque utilisation des bouts, de connaître le poids de ses bouts, la qualité, le métrage précis. Dans la colonne échantillon, le coureur peut couper un morceau de chaque bout et le coller dans l'espace réservé. Lors d'une discussion avec le fournisseur, ce tableau permet une vue complète de l'équipement du bateau en cordage et permet une discussion très précise. Une fois l'inventaire de ce qui est utilisé fait grâce au tableau, le coureur doit se fixer des objectifs. Par exemple, lors de la collaboration entre l'équipe de France Tornado et la société Cousin pendant les Préparations Olympiques de 1996 et 2000, Les objectifs étaient de tester des tressages différents dans la gamme des âmes dyneema de façon à choisir entre 3 tressages possibles : Le tressage

cousin standard ; Le tressage serré ; Le tressage intermédiaire. En ce qui concerne les gaines, l'objectif était de tester les gaines polypropylène pour les écoutes de foc. De tester les gaines polyester continu serré (PCS), les gaines polyester discontinu (PD) et les gaines polyéthylène. Différents prototypes ont été réalisés :

- Proto 1 : âme diamètre 3 dyneema, gaine tresse polyester continu serré.
- Proto 2 : âme diamètre 3 dyneema, gaine polyester discontinu.
- Proto 3 : âme diamètre 4 dyneema, gaine polyester discontinu.

Le but étant de gagner du poids sur les écoutes en diminuant le poids sec et humide et en adoptant des cordages dégressifs.

Une fiche d'identification a alors été réalisée :

Une fois le cordage sélectionné, les rapports d'essai effectués par les coureurs étaient alors consignés sur une fiche, qui permettait un aller et retour entre le fabricant et les coureurs :

FICHE D'IDENTIFICATION

REFERENCE :
DÉSIGNATION :

ECHANTILLON

O :mm Longueur :m Poids gr/m sec :

moillé :

Résistance à la rupture :daN
 Allongement à 25% RR :%
 Allongement à 50% RR :%
 Allongement à 75% RR :%

Composition : Ame :
 Couverture :
 Couleur :
 Traitement :

CRITÈRES :	PEU IMPORTANT	=	IMPORTANT
Souplesse			
Compacité			
Abrasion			
Confort			

Remarques :

N° de fiche :
Date d'émission :

Rapport d'essai
Série tornado

Observations

Nbre d'heures d'utilisation			
Conditions vent	1 à 3	4 à 5	6 à 7

Critères	Tres bien adapté	Bien adapté	Mal adapté	Inutilisable
Souplesse				
Tenue aux taquets				
Toronnage				
Glissement gaine/âme				
Abrasion				
Usure au ragage				
Résistance à la rupture				
Elasticité				
Poids				
Etanchéité				
Identification couleurs				
Epissurage				

Remarques :

Schéma d'utilisation :

De cette façon, il est possible de réaliser un excellent travail de coopération entre un fournisseur et les coureurs. Dans la définition d'une stratégie de préparation olympique, toutes les composantes de la performance sont prises en compte et les coureurs sont en perpétuelle recherche de leur optimisation. Dans le cadre d'un travail d'équipe, la composante technologique permet de définir des objectifs communs qui lient et qui cimentent le groupe. En effet, la voile est un sport individuel et particulièrement la voile olympique où un seul bateau par série et par nation participe aux Jeux Olympiques : les Coureurs sont donc adversaires puisqu'il faudra sélectionner un équipage et un seul. Pourtant, les équipages coopèrent entre eux dans les phases de préparation, car le groupe permet de traiter plus d'objectifs en réalisant plus

d'essais, en répartissant les tâches. Le rôle de l'entraîneur est alors primordial car il se situe à l'interface : c'est lui qui garantit la répartition équitable des tâches lorsque l'objectif est fixé, c'est lui qui peut être à l'origine d'un plan de développement ou tout au moins lui qui peut organiser le travail du collectif. Il peut être à nouveau à l'interface entre le fournisseur et les coureurs : il peut faire la synthèse des essais en collectant les fiches d'essai, organiser les rencontres avec les fournisseurs, assurer le suivi des commandes, contrôler la réception des commandes etc. Les coureurs gagnent ainsi un temps précieux qu'ils peuvent investir dans d'autres composantes. Tout est question de confiance et d'organisation entre le coach et les coureurs.