LOISIRS NAUTIQUES

HORS SERIE 26

http://www.voiles-alternatives.com/

MATS ET GREEMENTS

LA CONNAISSANCE DES PROBLEMES DE LA MATURE ET DU GREEMENT

M 1949 - 26 H - 169,00 F-RD

CHAPITRE IV

II.IV Mâts en composites : tant qu'il y a de la fibre, il y a de l'espar...

LE terme composite fait partie de ces mots qui cachent une réalité tellement vaste qu'on en vient à ne plus trop savoir ce qu'il recouvre exactement. C'est tellement vrai, que dans les salons, certains vendeurs s'en servent pour éliminer les questions embarrassantes du type : "Qu'est-ce qui entre dans la fabrication du bordé de cette coque ?". Réponse : "Oh, vous savez, il n'y a rien à craindre, c'est une construction en composites...". En fait, un simple contre-plaqué peut aussi être qualifié de composite puisqu'il associe du bois et de la colle, mais soyons sérieux et convenons pour la clarté de ce qui va suivre que ce mot désigne un matériau, la plupart du temps stratifié où une ou plusieurs sortes de fibres sont liées entre elles grâce à une résine ou matrice.
S'il est vrai que dans le domaine de la construction navale, ce type de matériau est très répandu en ce qui concerne les coques et les ponts de nos bateaux (les stratifiés verre-polyester ou verre-kevlar-polyester pour ne citer que les plus courants), l'emploi des composites demeure beaucoup plus rare au niveau de la fabrication des mâts.

Pourtant, cela fait une bonne vingtaine d'années que certaines séries de dériveurs ont essayé des mâts en fibres de verre polyester. Ceux qui ont navigué sur Ponant se souviennent sans doute des discussions pour le moins animées qui opposaient partisans et détracteurs de ce type d'espar, d'autant plus que cette série admettait également les mâts en alliage.

Plus récemment, les exploits ou avatars (on ne sait d'ailleurs plus très bien faire la différence...) des coureurs transocéaniques ont beaucoup fait parler des mâts en composites. Certains skippers lui ont fait gagner ses lettres de noblesse alors que d'autres ont déploré sa fragilité à la suite de démâtages. Ainsi, Yves Parlier, lors de la mini-transat 86, en vrai spécialiste des composites, a su utiliser les possibilités étonnantes des nouvelles fibres pour élaborer un mât très performant qui l'a mené à la victoire. D'autres ont tâtonné un peu plus longtemps avant de trouver la bonne pointure. Olivier de Kersauzon, à la suite d'un démâtage, a changé de mât bien sûr, mais aussi de fournisseur tout en restant fidèle aux qualités du mât composites. Bien lui en a pris, car le mât de son trimaran a tenu tout au long de son tour du monde en solitaire. Certains, enfin, ne veulent plus en entendre parler...
Alors, qu'en est-il à l'heure actuelle ? Est-ce le matériau miracle ? Les amateurs peuvent-ils raisonnablement envisager la construction d'un profil en composites ? Autant de questions auxquelles nous allons répondre en analysant les possibilités mécaniques des matériaux actuellement disponibles sur le marché, ainsi que les différentes techniques employées dans l'industrie mais aussi chez les amateurs à la lumière de quelques expériences vécues.

II.IV.1. : POURQUOI METTRE DES FIBRES DANS SON MAT ?

Quel que soit le matériau choisi, le problème majeur que doit résoudre un concepteur de mât est d'aboutir à un profil aussi raide et résistant que possible, présentant la limite élastique la plus élevée et cela pour la masse la plus faible. Sur ce plan, c'est vrai que les matériaux composites et les techniques actuelles permettent un gain de poids de 30 à 35 pour cent par rapport à un profil compétition en alliage, et cela représente un avantage énorme, surtout sur les voiliers de course.
Pourtant, à mon sens, l'élément déterminant qui joue en faveur du mât composite est la possibilité d'obtenir une adaptation et une spécifité parfaite entre le mât et le type du voilier qu'il va équiper. En effet, le constructeur d'espars ne se trouve plus ici prisonnier du carcan qu'il subissait avec les profils alu qui, malgré le travail de façonnage (rétreint, double peau, etc.) lui imposaient une forme et des moments d'inertie qu'il lui était difficile de changer. Avec les composites, on peut affiner la structure du profil de manière à ce qu'elle réponde exactement aux efforts qu'il aura bien sûr fallu calculer de manière très précise. Pour chaque zone du mât, l'analyse des contraintes et des raideurs dictera exactement les besoins, l'échantillonnage et la disposition des fibres employées.
C'est surtout cette souplesse dans la conception même du profil qui permet de gagner beaucoup de poids d'une part, et d'obtenir un mât qui réponde exactement aux aspirations du skipper ou de l'architecte (cintrage à partir de tel niveau, raideur dans la tête de mât, etc.). On retrouve un peu la même facilité d'adaptation qu'avec le bois mais avec un matériau beaucoup plus performant sur le plan mécanique.
Il est évident que les composites apportent aussi beaucoup de liberté dans le choix des formes et des sections de profils. Cela est surtout vrai dans le domaine des mâts-aile ou demi-aile. Ainsi, par exemple, au chantier ACX, chaque mât de ce type est élaboré dans un moule spécifique, on peut donc choisir la surface, la section et la flèche en faisant varier ces données à différents niveaux du profil. Evidemment, cela ne se fait pas sans de gros investissements qui mettent ces productions hors de portée des plaisanciers moyens, mais nous nous trouvons ici dans le domaine de pointe de la compétition où les impératifs ne sont pas les mêmes que dans la plaisance. Cela n'empêche que les mâts ainsi produits sont parfaitement adaptés aux voiliers pour lesquels ils sont conçus, témoins le mât de "Groupe Pierre Premier" mené par Florence Arthaud qui a parfaitement résisté malgré un choc violent lors de la transat Lorient-St-Barth en 89 *(voir photo II.177)*.
Le cas du Chap's 30 est également très intéressant car il s'agit d'un monotype produit en petite série par Chap's Marine qui a tout mis en

Photo II.177 : *Le design très "in" du mât de "Groupe Pierre Ier" à Florence Arthaud cache une conception elle aussi à la pointe de la technique des mâts composites. ACX a élaboré une structure à base de sandwich mousse/carbone époxy.*

œuvre pour obtenir un pur voilier de course où tout est axé sur la vitesse. La longueur est certes limitée, mais les sensations sont assurées *(voir croquis II.178).* Le mât n'a pas échappé à cette cure de technicité et Jean-Pierre Maréchal fournit un profil fermé en carbone dont le poids linéaire s'établit à 1,2 kg/m, ce qui, associé à un haubanage en kevlar permet de gagner une trentaine de kilos dans les hauts. Bien sûr, je vois déjà quelques croiseurs sourire en haussant les épaules et en soupirant : *"Qu'est-ce que trente kilos de plus ou de moins ?"*. Mais si l'on se place dans l'optique course et que l'on considère que ce voilier ne pèse que 950 kg tout équipé, on comprend dès lors le gain de stabilité que permet cet allègement sans oublier la réduction du tangage et de l'inertie des mouvements, toutes choses primordiales sur un voilier de course.

Comme on le voit, les mâts composites s'adressent essentiellement à la clientèle des coureurs non seulement de par leurs qualités qui sont indéniables, mais surtout à cause de leur prix qui demeure leur handicap majeur. En effet, d'après Jean-Pierre Maréchal Composites un tel mât de section classique coûte environ trois fois plus cher que son homologue en alliage léger. Je vous laisse imaginer ce qu'il en est pour un mât-aile...
Pour les amateurs, il reste la possibilité de confectionner eux-mêmes leur profil et nous verrons que si c'est loin d'être une solution de facilité, cela reste néanmoins réalisable, moyennant quelques précautions, tant au niveau de la construction que de l'équipement et de la maintenance, qui ne sont pas à négliger. Il ne faut pas croire qu'avec un mât en composites, vous serez à l'abri de tout entretien et de tout phénomène électrolytique. Pour peu qu'il soit réalisé en majeure partie en fibres de carbone, votre mât sera sujet à des manifestations d'électrolyse si l'on ne prend pas certaines précautions. En effet, cette fibre conduit très bien l'électricité et se comporte comme un métal noble, on pourrait même dire "royal" puisque son potentiel n'est que légèrement inférieur à celui de l'or et de l'argent ! Evidemment, le fait qu'elle soit obligatoirement associée à une résine isolante (que ce soit polyester, vinylester ou époxy) diminue sensiblement ce potentiel. N'empêche qu'il vous faudra proscrire toutes fixations par rivets aluminium et que les pièces d'équipement en alliage léger seront à éviter dans la mesure du possible, ce qui ne va pas sans poser quelques problèmes, on s'en doute...

II.IV.2. : LES MATÉRIAUX EMPLOYÉS : LA CHIMIE LA PLUS MODERNE AU SERVICE DE L'ALCHIMIE DES CONCEPTEURS

II.IV.2.1. : Les fibres : elles constituent la partie résistante du matériau en lui apportant ses caractéristiques mécaniques principales.

La plus connue des fibres est sans nul doute le verre. Sans entrer dans les détails, le verre filé se présente sous de multiples formes (mat, rowing, tissus, stratifils, filaments, etc.) et toute personne s'intéressant de près à la construction navale de plaisance connaît ces différents produits. Par contre, une information moins répandue dans le public mais tout aussi importante, surtout dans le domaine des mâts, est qu'il existe plusieurs qualités de verre filé. Ainsi, la firme Vétrotex (filiale de St-Gobain) ne diffuse pas moins de cinq types présentant chacun des caractéristiques et des compositions différentes *(voir tableau II.179).* Pour la construction des coques, on utilise toujours le type "E" (le plus économique) dont les caractéristiques sont tout à fait satisfaisantes pour cet usage. Par contre, il serait dommage de se priver du surcroît de qualité offert par le type "R" ou "S" si l'on envisage la réalisation d'un espar. La différence de prix est assez conséquente (le type "R" ou "S" coûte quatre fois plus cher que le "E" selon Vétrotex) mais comme les quantités à utiliser sont assez faibles, le surcoût reste modéré en valeur absolue. Cette fibre peut s'associer à la plupart des résines sans difficulté particulière de manipulation au cours de la stratification.

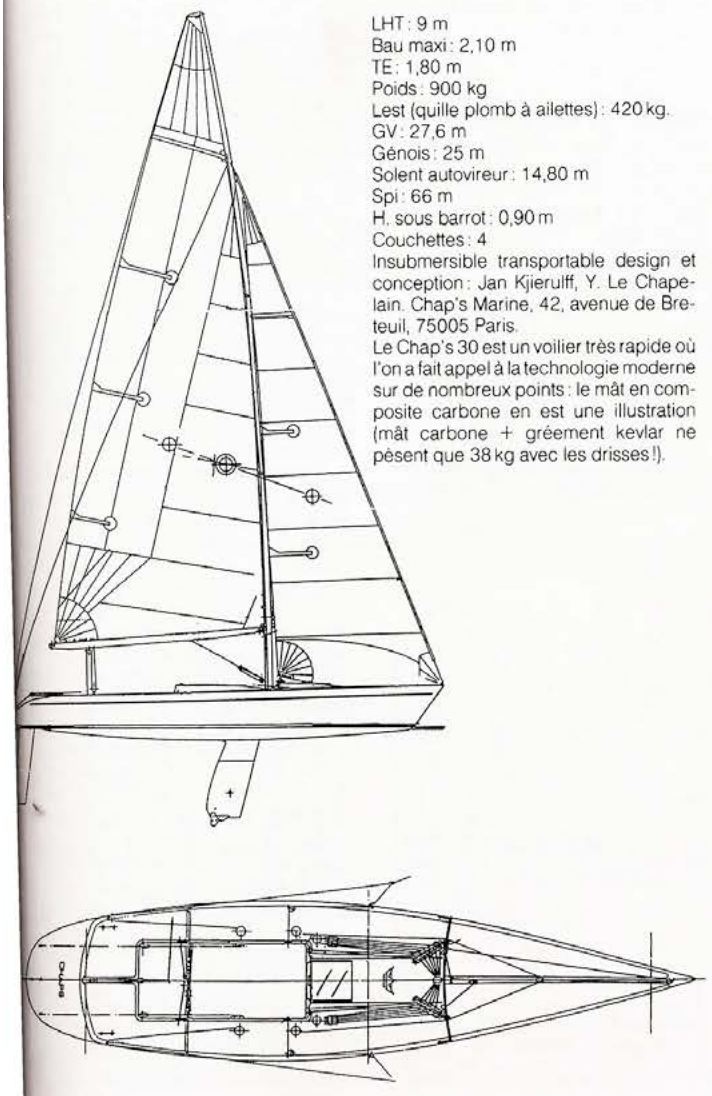
On parle souvent du kevlar en construction navale et l'on peut se demander s'il ne s'est pas créé un certain snobisme autour de cette fibre aux qualités indiscutables certes, mais loin d'être universelles. Certains ont même exploité le phéno-

mène en le transformant en argument de vente et l'on serait étonné de la faible proportion de kevlar entrant réellement dans la composition des stratifiés de certains constructeurs qui ne manquent pourtant jamais une occasion de proclamer qu'ils en emploient... Il faut remettre les choses à leur place et comprendre que s'il est vrai que cette fibre aramide née en 1971 dans les laboratoires de Du Pont de Nemours présente un avantage dans la construction des coques de voiliers et d'embarcations à moteur (gain de poids en particulier), son intérêt n'est qu'assez limité dans la construction des espars.

Ses qualités mécaniques et en particulier son module d'élasticité sont certes supérieures à celles du verre mais elle résiste mal à la compression (environ trois fois moins bien que le verre). Le kevlar 49 n'est donc pratiquement pas employé dans la construction des mâts composites malgré sa faible densité et quand on l'utilise, c'est pour ses qualités de résistance au ragage éventuel des drisses. Ainsi, chez ACX, pose-t-on parfois une couche de kevlar à l'extérieur ou à l'intérieur du profil, de manière à obtenir une pellicule résistante à l'abrasion des câbles ou des cordages de drisses y circulant.

La fibre la mieux adaptée à la fabrication d'espars reste sans conteste le carbone. Cette fibre offre en effet un module d'élasticité presque cinq fois supérieur à celui du verre et ceci pour une densité plus faible. Malheureusement, c'est aussi la plus chère des fibres que nous présentons ici, mais sa résistance à la compression, et surtout sa raideur particulièrement élevée, conjuguée à un allongement très faible, en font un matériau mécaniquement très bien adapté et répondant parfaitement au travail que l'on demande à un mât. Au vu des caractéristiques du *tableau II.180,* on voit tout de suite que c'est le carbone "haut module" ou H M qui devrait être choisi pour cet usage.

Croquis II.178 : *Chap's 30*



LHT : 9 m
Bau maxi : 2,10 m
TE : 1,80 m
Poids : 900 kg
Lest (quille plomb à ailettes) : 420 kg.
GV : 27,6 m
Génois : 25 m
Solent autovireur : 14,80 m
Spi : 66 m
H. sous barrot : 0,90 m
Couchettes : 4
Insubmersible transportable design et conception : Jan Kjierulff, Y. Le Chapelain. Chap's Marine, 42, avenue de Breteuil, 75005 Paris.
Le Chap's 30 est un voilier très rapide où l'on a fait appel à la technologie moderne sur de nombreux points : le mât en composite carbone en est une illustration (mât carbone + gréement kevlar ne pèsent que 38 kg avec les drisses !).

Tableau II.179 : *Différents types de verres produits par Vetrotex et leurs compositions*

Leurs applications sont bien sûr différentes et on remarque que le verre "R" ou "S" présente des caractéristiques mécaniques plus élevées que le type "E".
(Document Vetrotex Saint-Gobain).

Constituants	Composition pondérale (%)				
	Verre type E	Verre D	Verre R ou S	Verre A	Verre C
Silice	53 - 54	73 - 74	60		
Alumine	14 - 15,5		25		
Chaux	20 - 24	0,5 - 0,6	9		
Magnésie	20 - 24	0,5 - 0,6	6		
Oxyde de Bore	6,5 - 9	22 - 23			
Fluor	0 - 0,7				
Oxyde de fer	1	0,1 - 0,2			
Oxyde de Titane	1	0,1 - 0,2			
Oxyde de Sodium	1	1,3			
Oxyde de Potassium	1	1,5			
Indications générales d'emploi	Usage général, bonnes propriétés électriques	Hautes propriétés diélectriques	Haute résistance mécanique	Haute teneur en alcali	Résistance chimique

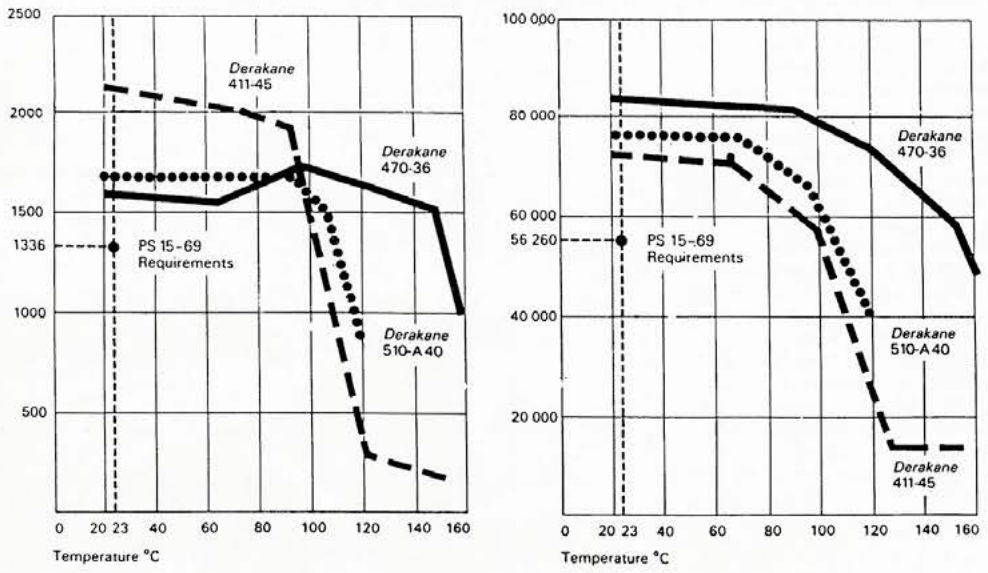
Tableau II.180 :
Comparaisons techniques et économiques des principaux matériaux de renforcement pour composites

	Caractéristiques	Unités ou symboles	Verres		Kevlar* 49	Carbone Graphite		Bore sur tungstène
			E	R		Haut module	Haute résist.	
Caractéristiques sur filaments (niveau laboratoire)	Densité		2,60	2,55	1,45	1,95	1,75	2,60
	Contrainte de rupture en traction	M Pa	3.400	4.400	3.500	2.200	2.500	3.200
	Module d'élasticité longitudinal	10^3 M Pa	73	86	135	380	260	400
	Allongement de rupture	%	4,5	5,2	2,5	0,6	1,0	0,8
	Indices de coûts relatifs	Masse	1	4	12	100	65	500
	par unité de :	Volume	1	4	7	75	45	5
Caractéristiques sur composite unidirectionnel Matrice époxy (niveau industriel)	Taux volumique de renfort	%	60	60	60	60	60	50
	Densité (p)		2.04	2.01	1.37	1.65	1.55	1.90
	Module d'élasticité longitudinal (E_l)	10^3 M Pa	46	52	84	230	130	210
	Module d'élasticité transversal	10^3 M Pa	10	13,6	5,6	14,4	14,3	—
	Module de cisaillement	10^3 M Pa	4,6	4,7	2,1	4,9	4,8	—
	Coefficient Poisson		0,31	0,31	0,34	0,32	0,32	0,31
	Contrainte de rupture en traction (R_T)	M Pa	1.400	1.900	1.400	800	1.380	1.700
	Contrainte de rupture en compression	M Pa	910	970	280	900	1.430	3.100
	Contrainte de rupture en cisaillement	M Pa	70	70	70	70	80	100
	Contrainte de rupture en flexion	M Pa	1.500	1.550	—	1.250	1.850	2.100
	Indices relatifs de caractéristiques spécifiques	E_l/P	1	1,2	2,7	6,2	3,7	4,9
		R_T/P	1	1,4	1,5	0,7	1,3	1,3
	Indices relatifs de coût rapporté aux caractéristiques spécifiques (*)	P.M./E_l/P	1	2,65	2,68	10,3	10,7	62,7
		P.M./R_T/P	1	2,20	4,9	90	30,6	234

(*) Prix moyens du marché, en Europe, au 2e semestre 1977, pour des présentations et des quantités équivalentes, rapportés aux caractéristiques spécifiques. (Document Vetrotex Saint-Gobain).

Croquis II.184 : *Caractéristiques comparées de diverses résines vynilester*

Le point PS 1569 correspond au standard agréé par le Bureau National des Normes des USA.

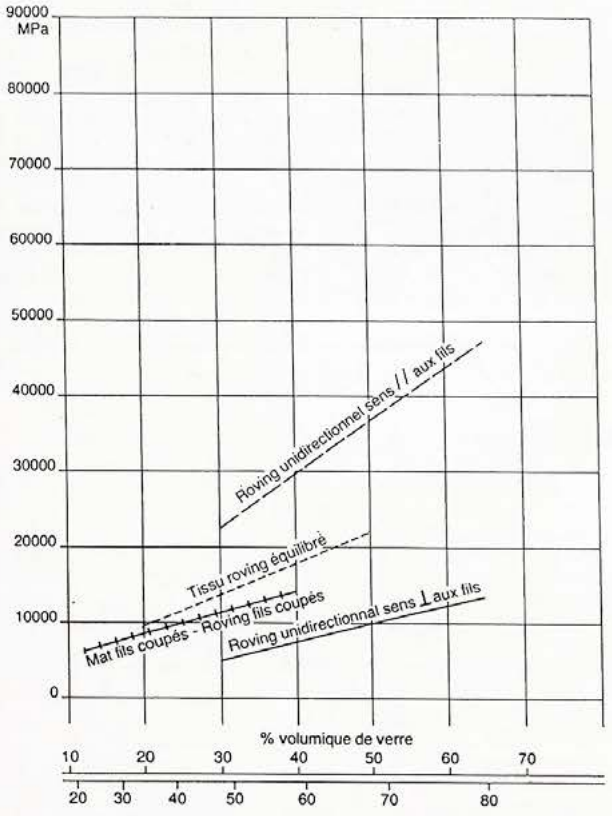


(Documentation Dow Chemical)

Pour des raisons de prix (quatre fois plus cher que le HR), c'est la fibre haute résistance qui est la plus employée même en compétition. ACX construit actuellement un mât-aile en fibres HM pour Florence Arthaud, à ma connaissance, c'est le premier grand mât construit avec cette fibre. Elle est plus fragile que la fibre HR et demande beaucoup de précautions et de délicatesse lors des manipulations.

La résistance à la fatigue est une qualité qui est rarement mise en évidence dans les tableaux de caractéristiques. Pourtant, elle revêt une importance primordiale dans le domaine des mâts où, malgré toute l'attention des architectes et des concepteurs, on est obligé de constater que les phénomènes vibratoires ne sont pas rares sans compter les contraintes répétitives comme cela se produit lorsqu'un voilier progresse contre le vent dans un fort clapot (phénomènes de flexion, d'ondulation et de fouettement). Or, dans ce domaine aussi, la fibre de carbone est particulièrement performante et résistera mieux à la fatigue qu'un alliage d'aluminium par exemple.

Cette fibre est souvent associée à la résine époxy et elle ne présente pas de difficulté particulière dans le travail de stratification mis à part sa couleur noire et brillante qui empêche parfois de bien contrôler l'imprégnation lorsque celle-ci est faite manuellement.

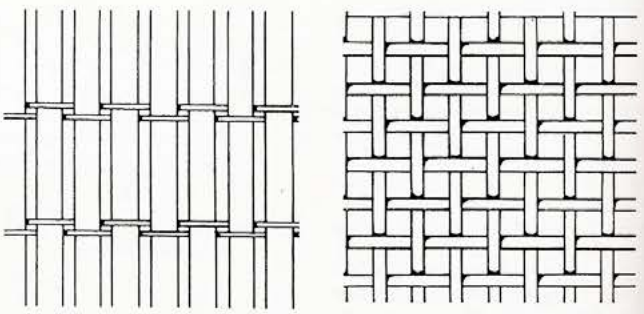


Comme on peut le constater, les meilleures performances sont obtenues lorsque le plus grand nombre de fibres est aligné dans le sens de l'effort. (Document Vetrotex Saint-Gobain)

Croquis II.182 :

Différents types de tissages et dispositions des fibres

(Document Vetrotex Saint-Gobain)



Armature unidirectionnelle :
Des performances très bonnes mais dans un seul sens : celui des fibres.

Armure toile ou taffetas :
Un tissu très équilibré (tout au moins dans deux directions).

II.IV.2.2. : Les différentes présentations

Que ce soit le verre, le kevlar ou le carbone, ces fibres se présentent sous différentes formes à l'utilisateur.
En effet, à partir du fil de base, les industriels ont conçu une foule de produits dont les caractéristiques mécaniques vont dépendre en grande partie de la disposition et de la longueur des fils constituant le produit.
En ce qui concerne la fabrication des mâts, il convient de choisir des structures de renfort dont la résistance soit la mieux orientée possible, c'est-à-dire pour la presque totalité orientée dans l'axe du mât. Il sera donc hors de question d'employer des mats et les tissus conventionnels que l'on dit encore équilibrés (satin, sergés ou taffetas) seront évités au maximum. On leur préfèrera les unidirectionnels dont les caractéristiques sont bien plus performantes à poids de fibres égaux *(voir croquis II.181)*. Il s'agit de tissus dont les fils parallèles constituant soit la chaîne soit la trame, sont réunis par un fil fin respectivement en trame ou en chaîne, ce dernier n'intervenant pratiquement pas dans les performances du tissu proprement dit.
Malheureusement, ces armatures unidirectionnelles manquent généralement de tenue *(voir croquis II.182)* à tel point que les tisseurs les associent parfois à des mats très légers, comme par exemple dans l'Udimat 450/100, complexe de fibres unidirectionnelles (450 grammes/m²) tenues par un mat très léger (100 grammes/m²). Ce tissu se tient ainsi mieux lors de sa mise en place et de sa stratification. On notera que ces tissus unidirectionnels se présentent souvent sous la forme de rubans ou même de "chaussettes" ou tissus tubulaires (produits par exemple par la société Brochier) qui s'enfilent alors directement sur le mandrin. Ces deux présentations sont bien adaptées à la fabrication des mâts.
D'autres tissages aux usages plus spécifiques sont également employés. Ainsi, pour résister à de fortes tensions, emploiera-t-on du "biais" ou "bi-biais" alors que dans les zones soumises à de fortes contraintes (tête de mât, capelage de haubans et barres de flèches, etc.) appliquera-t-on du stratifil normalement prévu pour les enroulements filamentaires. C'est long à mettre en œuvre mais on ne peut pas plus directionnel ! Tous ces produits sont certes un peu particuliers, mais demeurent à la portée de l'amateur. Par contre, les tissus dont nous allons parler maintenant sont plutôt réservés aux industriels car ils nécessitent des infrastructures de mise en œuvre plus spécialisées.
En tout premier lieu, nous évoquerons les tissus préimprégnés. Il s'agit de tissages identiques à ceux que nous venons d'évoquer mais qui ont reçu de façon industrielle et mécanique, donc de manière très précise et constante, une imprégnation de résine. Pour ce qui concerne les mâts, il s'agit la plupart du temps de fibres de carbone imprégnées de résine époxy. Le durcissement de la résine et donc du composite ainsi constitué intervient dans des conditions bien précises de température et de pression qui sont décrites au chapitre relatif aux différentes techniques de construction mais qui, de toutes façons, réclament beaucoup de précision et de rigueur. Cela implique des moyens de mesure et de contrôle très précis comme on pourra s'en apercevoir dans la technologie employée chez ACX et décrite ultérieurement.
L'avantage essentiel des tissus préimprégnés réside dans le gain de poids qu'ils procurent. Par rapport à une stratification opérée manuellement, on enregistre un allègement de l'ordre de 15 à 20 pour cent. Cela vient du fait que les fibres, tout en étant parfaitement imprégnées, n'ont reçu que la dose minimale de résine et qu'il n'y a donc aucun excès comme cela se produit inévitablement lors d'opérations manuelles. De plus, la mise en place des tissus peut s'opérer tranquillement et en totalité avant que le moule ne soit refermé, mis sous pression et à température.
Tous les avis ne concordent pas au sujet de ces tissus préimprégnés. Les uns en sont de farouches partisans et n'emploient que ce type de matériau dans tous leurs moulages alors que d'autres comme Alu Carbon, une firme suisse, demeurent plus réservés quant à leurs qualités. Selon cette société, le fait de porter ces tissus à 80 ou 100 degrés pour que la polymérisation se produise, entraîne une modification dimensionnelle des fibres. Cette variation n'intervient pas tellement dans le sens de la longueur, mais plutôt dans le sens transversal aux fibres. Au refroidissement, cela crée des tensions internes dans le matériau, entraînant une baisse de ses qualités mécaniques.
Par contre, tout le monde est d'accord pour reconnaître que cette technologie fait gagner du poids.
Pour terminer, nous citerons également les tissus chauffants et préimprégnés qui permettent une mise à température simplifiée du stratifié. Il semble qu'actuellement, les industriels aient abandonné ces tissus très spéciaux, tout au moins en ce qui concerne la fabrication des espars.

II.IV.2.3. : Les résines : des caractéristiques mécaniques différentes, mais aussi un problème de retrait

La résine polyester est la plus connue et la plus employée dans la construction navale de plaisance, pourtant, elle n'entre que très rarement dans la fabrication des mâts. A cela, deux raisons principales : ses caractéristiques mécaniques moindres, et surtout un retrait important lors de son durcissement final. Le *tableau II.183* permet de constater ces deux différences et montre que le retrait du polyester est sept fois plus important que celui de l'époxy. On notera qu'un retrait important a aussi comme conséquence d'établir une moins bonne liaison entre la fibre et la matrice. En réalité, il convient de tempérer ces valeurs en prenant en compte la stabilité dimensionnelle des fibres qui sont incluses dans la résine ou matrice. Il est évident, et la pratique le confirme, qu'un stratifié polyester a un retrait inférieur à sept pour cent, et cela n'est d'ailleurs pas gênant lorsqu'on travaille sur moule femelle, comme c'est le cas pour la construction des coques, au contraire, cela faciliterait plutôt le démoulage. Par contre, comme nous allons le voir ultérieurement, beaucoup de techniques de fabrication d'espars en composite font appel à un moule mâle ou mandrin et là, le retrait du stratifié lors de son durcissement va sérieusement compromettre la facilité du démoulage.
La résine époxy constitue la matrice la plus résistante mécaniquement. Son faible retrait et sa bonne résistance aux températures élevées en font le complément idéal de la fibre de carbone car les composites ainsi obtenus demandent souvent un étuvage à environ 120 degrés. Comme par un fait exprès, les meilleurs produits sont souvent les plus chers, et l'époxy ne déroge pas à la règle puisque son prix la situe cinq ou six fois plus chère qu'une résine polyester classique quand ce n'est pas plus !

Au chapitre des inconvénients, outre son prix, on peut citer une plus grande viscosité que le polyester ce qui la rend plus difficile à travailler. Evidemment, on supprime cet inconvénient en employant des préimprégnés. Pour terminer, il est à remarquer qu'un pourcentage non négligeable de personnes présente des signes d'allergie à l'époxy, en particulier au niveau de la peau, et avant de l'employer, il n'est pas saugrenu de faire un essai qui testera votre résistance face à cette résine.
Lorsqu'on quitte le domaine des technologies sophistiquées propres à la compétition où l'époxy règne en maître, on s'aperçoit que la matrice la plus employée pour la fabrication des mâts en composites est la résine vinylester. Beaucoup plus économique que l'époxy, elle se travaille aussi facilement que le polyester, mais son grand avantage par rapport à cette dernière est de ne présenter pratiquement aucun retrait en polymérisant. Quant à ses caractéristiques mécaniques, on peut dire qu'elles sont intermédiaires entre le polyester et l'époxy *(voir croquis II.184)*.

Tableau II.183 : *Caractéristiques mécaniques des résines époxy et polyester*

	Masse spécifique	Module d'élasticité E (en MPa)	Résistance à la traction (en MPa)	Allongement à la rupture (en %)	Résistance à la flexion (en MPa)	Température maxi d'utilisation (en °C)	Retrait volumique (en %)
Polyester	1,1 à 1,3	3 000	50 à 80	2,5	100	70 à 80	7
Epoxy	1,2	5 000	90	1,3	120	100 à 200	1

1 MPa ≈ 10 kgf/cm² ou 0,1 kgf/mm²

II.IV.3. : LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION : DES ÉQUIPEMENTS TRÈS SOPHISTIQUÉS DES INDUSTRIELS, AUX MOYENS TRÈS RUDIMENTAIRES DES AMATEURS

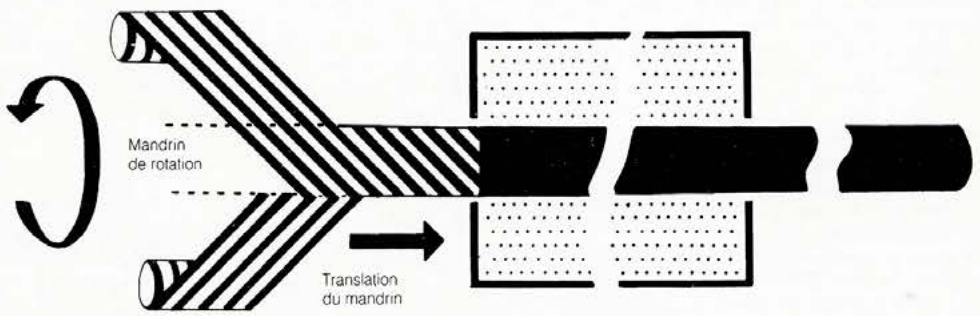
II.IV.3.1. : Par enroulement filamentaire

Il y a fort à parier que les premiers mâts industriels en composites aient été fabriqués selon la même technique d'enroulement que celle qu'on utilise pour confectionner ou enrober les tuyaux de pipe-line ou les tubes de forage. Sur un mandrin en rotation, la machine distribue une série de stratifils préalablement passés dans un bain de résine *(voir croquis II.185)*. L'avancement et le recul relatif du mandrin par rapport à ce que nous appellerons l'enrouleur, permet de répartir la fibre tout le long du profil selon l'échantillonnage que l'on a prévu et qui peut varier selon les zones.

Comme on s'en doute, cette technologie suppose de gros investissements en machines-outils, ainsi qu'un réglage très précis de la rotation et des déplacements linéaires du mandrin. Tout cela pour arriver à un résultat qui à mon avis reste plus proche des qualités d'un tube que de celles d'un mât. En effet, un très gros pourcentage de fibres ne sont pas orientées correctement pour subir les contraintes de compression et de flexion propres à un mât, et si quelques-unes de ces productions ont pu servir en tant que mât libre (non haubané), beaucoup ont rendu l'âme dès qu'elles ont eu à subir la compression d'un haubanage, aussi réduit soit-il.

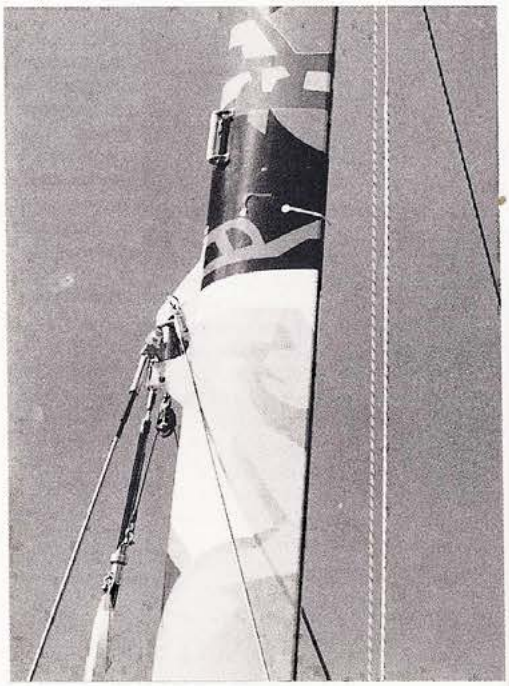
A ma connaissance, il n'y a plus, à l'heure actuelle, de mâts de voilier produits selon cette technique en France. Elle reste pourtant utilisée pour la production de mâts de planche à voile où les phénomènes de torsion sont bien supportés par les fibres croisées et enroulées en spirale. De plus, ces mâts présentent une conicité qui facilite leur démoulage.

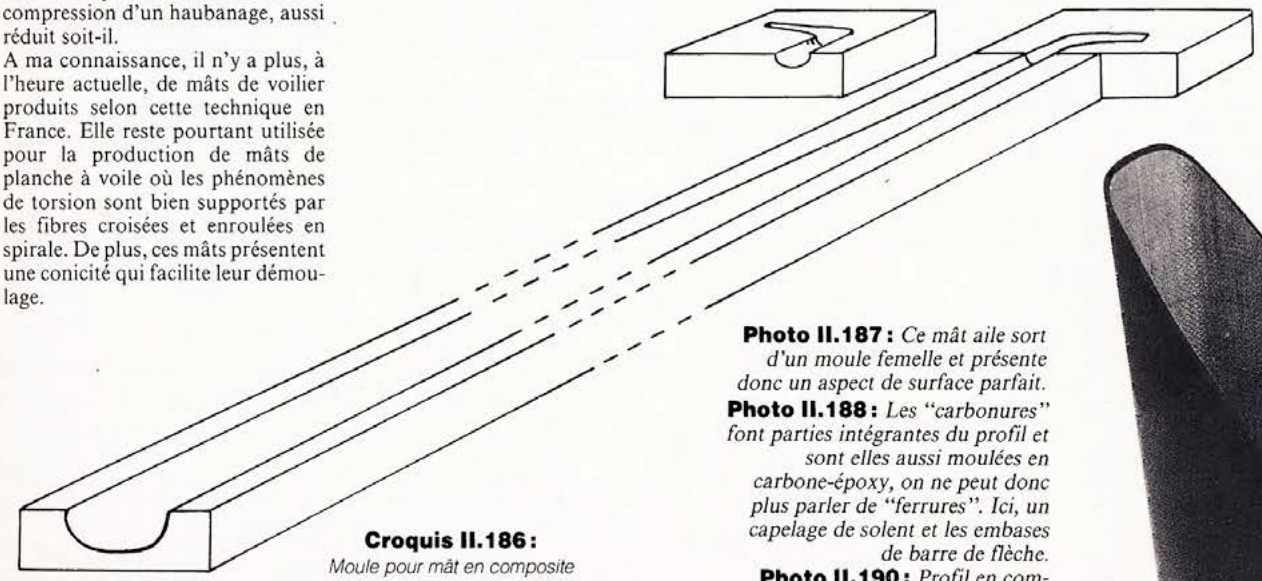
Croquis II.185 : *Technique d'enroulement filamentaire sur un mandrin en rotation*
(Documentation Vetrotex St-Gobain)



II.IV.3.2. : Techniques utilisant un moule femelle :

Dans la plus simple de ces techniques, on emploie un moule "coquille" représentant une moitié du profil et l'on va stratifier un demi-profil à la fois. Les capelages de barres de flèche et le pied de mât ne posent pas de problème puisqu'ils peuvent sortir du même moule, qu'ils soient situés sur la partie droite ou gauche du profil. Par contre, la tête de mât qui est souvent intégrée à la structure de l'ensemble implique un moule démontable à ce niveau *(voir croquis II.186)*. Chaque moitié du profil est donc stratifiée de manière indépendante jusqu'à obtenir une épaisseur suffisante pour permettre son démoulage et sa manipulation. En général, l'épaisseur de stratification est alors encore inférieure à la moitié de l'épaisseur prévue.





Croquis II.186 :
Moule pour mât en composite
Même si l'on adopte un profil de section symétrique, certaines parties comme une tête de mât intégrée ne sont pas réversibles et nécessitent un moule démontable.

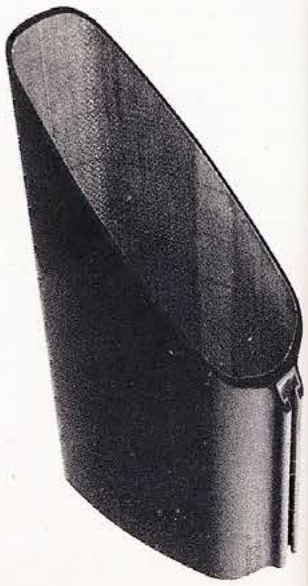
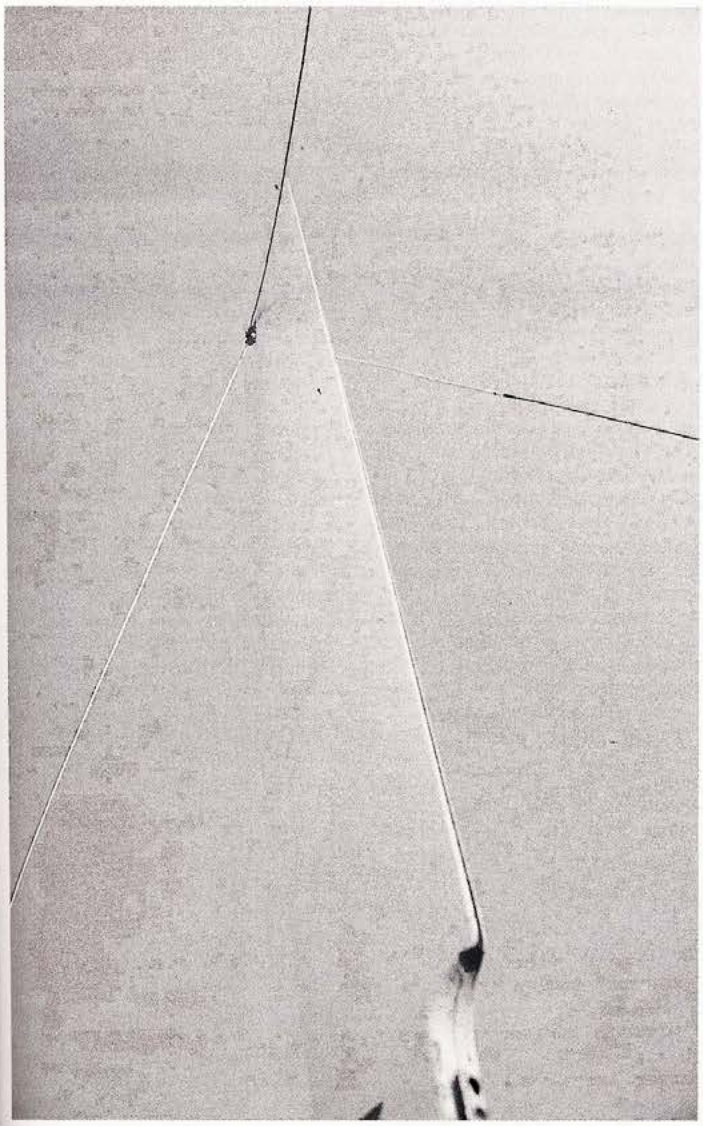


Photo II.187 : *Ce mât aile sort d'un moule femelle et présente donc un aspect de surface parfait.*
Photo II.188 : *Les "carbonures" font parties intégrantes du profil et sont elles aussi moulées en carbone-époxy, on ne peut donc plus parler de "ferrures". Ici, un capelage de solent et les embases de barre de flèche.*
Photo II.190 : *Profil en composite intégrant le rail de ralingue dans sa structure (doc. ACX).*



Certains renforts sont déjà intégrés à ce stade (capelages de bas-haubans, de barres de flèche, etc.). Les deux moitiés ainsi obtenues sont ensuite assemblées et stratifiées ensemble. On notera que cette stratification d'assemblage se fait presqu'obligatoirement avec des tissus équilibrés (par exemple satin), alors que toute la première partie avait pu se faire en unidirectionnel. Le reste de la stratification se fait à l'extérieur du profil jusqu'à obtenir l'échantillonnage calculé au départ.

Cette technique permet des renforcements locaux dans les zones les plus sollicitées comme le passage de pont (cas d'un mât emplanté) ou aux endroits de fixation des équipements. Elle permet aussi le moulage de pièces compliquées (tête de mât avec longue crosse, etc.), ainsi que des profils particuliers comme les mâts ailes *(voir photo II.187).* Par contre, on aura remarqué que certaines couches de tissu n'auront pas leurs fibres bien orientées, elles sont peu nombreuses, c'est vrai, (couche d'assemblage et extérieure), mais elles constituent néanmoins un léger excédent de poids que les régatiers ne manqueront pas de prendre en considération. Sur un plan plus pratique, avec le même moule, on pourra obtenir différentes longueurs de mâts tout en conservant bien sûr la même section, ce qui limite quand même les possibilités.

Certains chantiers ont perfectionné cette technique et emploient maintenant des moules ouvrant où l'on pose tous les tissus (en général, il s'agit de préimprégnés). On place ensuite une âme gonflable et on referme le moule. L'âme gonflable est alors mise en pression et plaque le stratifié sur les parois du moule durant toute la durée du durcissement de la résine qui s'opère à une température comprise entre 80 et 120 degrés.

Quand la polymérisation est totale, il suffit de dégonfler l'âme et d'ouvrir le moule pour démouler le mât. La formule est intéressante car on obtient une finition impeccable, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur du mât, ce qui évite l'usure des drisses internes et donne une esthétique comparable à celle des profils en alliage. De plus, l'orientation des fibres est particulièrement performante puisqu'on emploie presqu'exclusivement des unidirectionnels, et les mâts ainsi obtenus présentent un rapport inertie/poids linéaire extrêmement intéressant. Pourtant, leur coût est élevé. Cela se comprend car un tel moule et son système gonflable coûte cher et ne peut produire qu'un seul type de mât.

II.IV.3.3. : Les techniques qui utilisent un moule ou mandrin :

Les lois mathématiques régissant les calculs des moments d'inertie des mâts étant les mêmes quel que soit le matériau employé (rappelons en effet que ces données sont uniquement liées à la géométrie de la section du profil), les fabricants emploient des profils d'alliage léger en guise de mandrin. C'est le cas d'ACX qui utilise les profils Sparcraft qui vont donc générer la forme des mâts en composites qui vont être stratifiés par dessus et dont nous allons observer les principes de fabrication.

Cet Atelier des Composites créé il y a quelques années par Xavier Joubert est installé à Brest et fabrique des mâts, mais aussi toutes sortes de produits faisant appel à la technologie très pointue des composites. Cela va du offshore civil ou militaire à l'œuvre d'art de caractère futuriste ! Mais si l'on en revient aux mâts, seuls des profils à l'unité sont produits par ACX et chaque projet fait l'objet d'une étude. Bien souvent, cela entraîne la confection d'un moule et une fabrication spécifique. Logiquement, ces productions sont exclusivement tournées vers la compétition.

La fabrication d'un espar en composite débute donc par le choix d'un profil, choix qui bien sûr ne doit rien au hasard, mais correspond à la géométrie et aux cotes que l'on souhaite obtenir en fin de compte. Intervient alors une phase de calculs à grands renforts d'ordinateurs savamment "logiciellés" qui vont déterminer les échantillonnages à tous les niveaux, les grammages et caractéristiques des tissus à employer et qui va aussi fournir l'orientation des fibres et même le plan de nappage des tissus dans le moule ! Ceux-ci, uniquement des carbones préimprégnés (unidirectionnels et biais) sont alors disposés selon ces instructions autour du mandrin dont la surface a préalablement été traitée pour faciliter le démoulage ultérieur.

La totalité des tissus étant en place, ils sont mis en pression grâce à des poches à vide et portés à la température de 120 degrés pendant 6 à 8 heures selon les cas. Le système de génération de la chaleur est très original et surtout comporte de nombreux capteurs qui vont permettre un contrôle précis et rigoureux tout au long du durcissement. Ce système ne nécessite pas de four ce qui offre une grande liberté dans les formes et la longueur des pièces. C'est ainsi que des mâts de trente-cinq mètres ont pu être élaborés selon ce procédé sans que cela ne pose de problème particulier.

Il est bon de noter un autre point important, c'est que tout au long de cette polymérisation, les informations fournies par les différents capteurs sont enregistrées par écrit, ce qui constitue non seulement une garantie et un contrôle pour le constructeur comme pour le client, mais aussi la base d'une connaissance expérimentale rigoureuse.

Autre détail montrant le degré de technicité d'ACX, la plupart des équipements de mât sont réalisés en carbone et on pourrait les appeler des "carbures" et non plus des ferrures ! C'est ainsi que sont moulés les différents capelages du gréement, les embouts de bôme, les têtes de mâts, etc. *(voir photo II.188).* Dans le même ordre d'idée, la ralingue plastique est intégrée sur la face arrière du mât et usinée après démoulage *(voir photo II.190).* On supprime ainsi tout problème d'électrolyse et de fixation que nous avions évoqué au début de ce chapitre. Grâce à cette technologie, on ne règle pas seulement cette question d'électrolyse, mais on gagne aussi du poids tout en renforçant l'homogénéité et la solidité de l'ensemble augmentant en fin de compte la sécurité du voilier.

Dans certains cas, une couche de kevlar vient tapisser l'intérieur du profil pour offrir une résistance supérieure à l'usure provoquée par le ragage des drisses.

Il ne serait pas exact de dire que le mât composite ne se prête pas à la production en série. Bien sûr, vus les procédés de fabrication, les cadences ne rivaliseront sans doute jamais avec les productions en alliage, mais la prochaine coupe de l'America nouvelle formule devrait permettre à ACX de sortir une série de 20 à 30 mâts en collaboration avec Sparlight pour équiper les futurs challengers.

II.IV.4. : DES MATS COMPOSITES RÉALISÉS PAR DES AMATEURS, C'EST POSSIBLE ?

Oui, c'est possible et nous allons observer au cours des deux expériences qui vont suivre, que si les moyens mis en œuvre n'ont rien de comparables avec ceux des industriels, les résultats sont tout à fait séduisants si l'on se place dans une optique croisière.

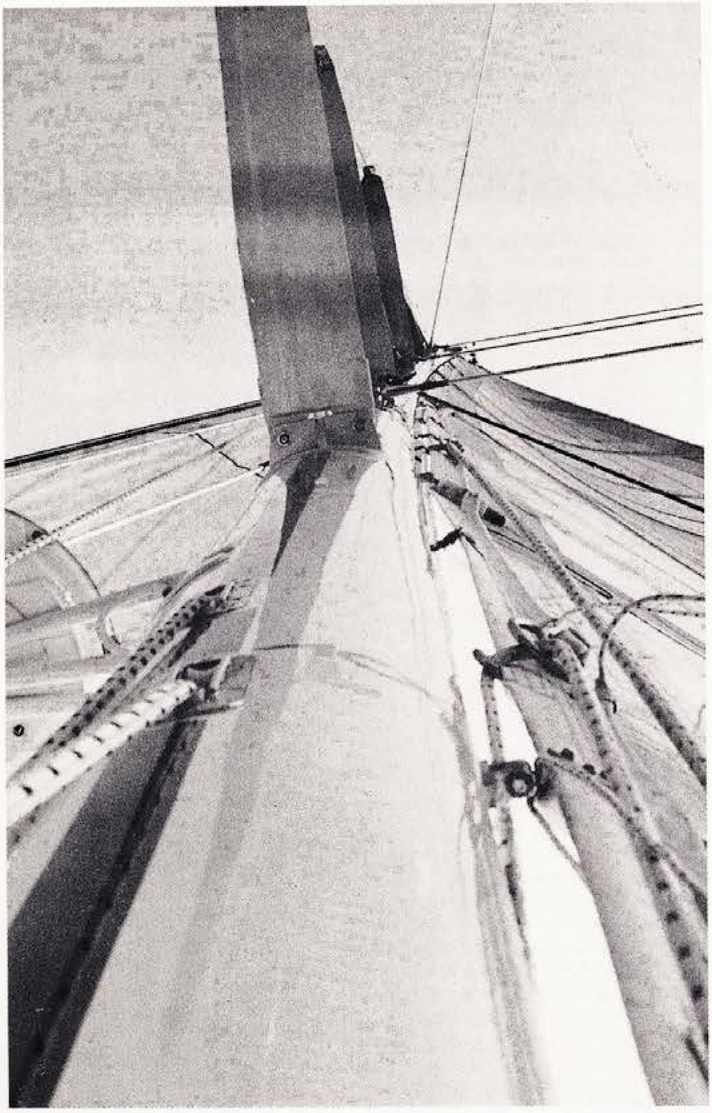


Photo II.191 : *Les mâts en composite sont surtout destinés aux voiliers de course. Ici, un mât ACX pour Olivier Moussy.*

II.IV.4.1. : Fabrication d'un mât de quatorze mètres pour équiper un Samba 36 : quand l'âme engendre le corps...

Comme de nombreuses fabrications en stratifié, l'odyssée commence par la confection d'un moule. De manière à obtenir un intérieur lisse pour que les drisses ne raguent pas sur des surfaces abrasives, c'est la méthode du moule intérieur ou moule mâle qui a été retenue. Cela obligera bien sûr en fin de construction à poncer l'extérieur, mais sans pour autant nécessiter une finition comparable à celle d'une coque. Ce moule est réalisé en bois aggloméré habillant une structure de nervures fixée sur un plan. La mise en forme définitive s'achève par un rabotage, une enduction à la résine polyester et au mastic et enfin un ponçage. En fait, ce moule ne représente qu'un demi-profil, mais grâce à une astuce de construction, on pourra l'utiliser pour les parties droite et gauche. Il est en effet réalisé en trois tronçons qui, mis bout à bout dans l'ordre A B C, vont donner le demi-profil droit, et dans l'ordre C B A, le gauche *(voir croquis II.193).*

□ **La partie supérieure du mât** est une pièce d'environ 4 mètres de long dont la coupe présente un profil symétrique, étant entendu que la boîte à réas est rapportée.

□ **La partie centrale,** quant à elle, mesure 7,50 mètres. Elle est profilée (bord d'attaque, bord de fuite), mais s'affine pour retrouver une section symétrique à chaque extrémité *(voir croquis II.193).*

□ **Le pied de mât,** long de 2,50 mètres présente un léger rétreint dans le bas et se termine en sifflet à 40 centimètres du pont. C'est dans cette partie que seront rapportés ultérieurement les réas de sorties de drisses.

Pour permettre le montage du moule dans un sens puis dans l'autre, on trouve quatre extrémités de section identique et symétrique : deux sur la partie centrale et une des extrémités de la tête ou du pied de mât. Le montage étant effectué et les raccords traités, la stratification peut commencer.

En fait, il s'agit du moulage d'une peau aussi légère et fine que possible, dont l'épaisseur est juste suffisante pour être auto-porteuse. Elle comporte une lèvre d'assemblage sur le pourtour *(voir croquis II.194).* Cette première moitié démoulée, on inverse les extrémités sans toucher à la partie centrale et on recommence. Après le deuxième démoulage, les deux demi-coquilles ainsi obtenues sont assemblées provisoirement à l'aide de rivets à travers les lèvres prévues à cet effet (tous les 20 ou 30 centimètres). Ces lèvres sont ensuite coupées entre les rivets et arrasées, permettant ainsi une stratification légère. Après polymérisation, on coupe les parties rivetées pour terminer la stratification d'assemblage.

On obtient ainsi une "âme" de mât sur laquelle va se construire le corps du profil et de ses accessoires. Cette première stratification légère est constituée de l'intérieur vers l'extérieur, d'un gel-coat, d'une couche de rowing unidirectionnel (Rowing "S" unidirectionnel syncotape TU 270, en bande de 10 centimètres de large et contenant 80 % de fibres longitudinales) et de trois couches d'Udimat 450/100 (voir précédemment). Ces tissus sont stratifiés à la résine vinylester Derakane 470-36. On notera que l'Udimat est assez difficile à mettre en œuvre, car il demande une imprégnation et un ébullage laborieux *(voir croquis II.195).*

II.IV.4.2. : Renforts, ancrages et fixation des équipements :

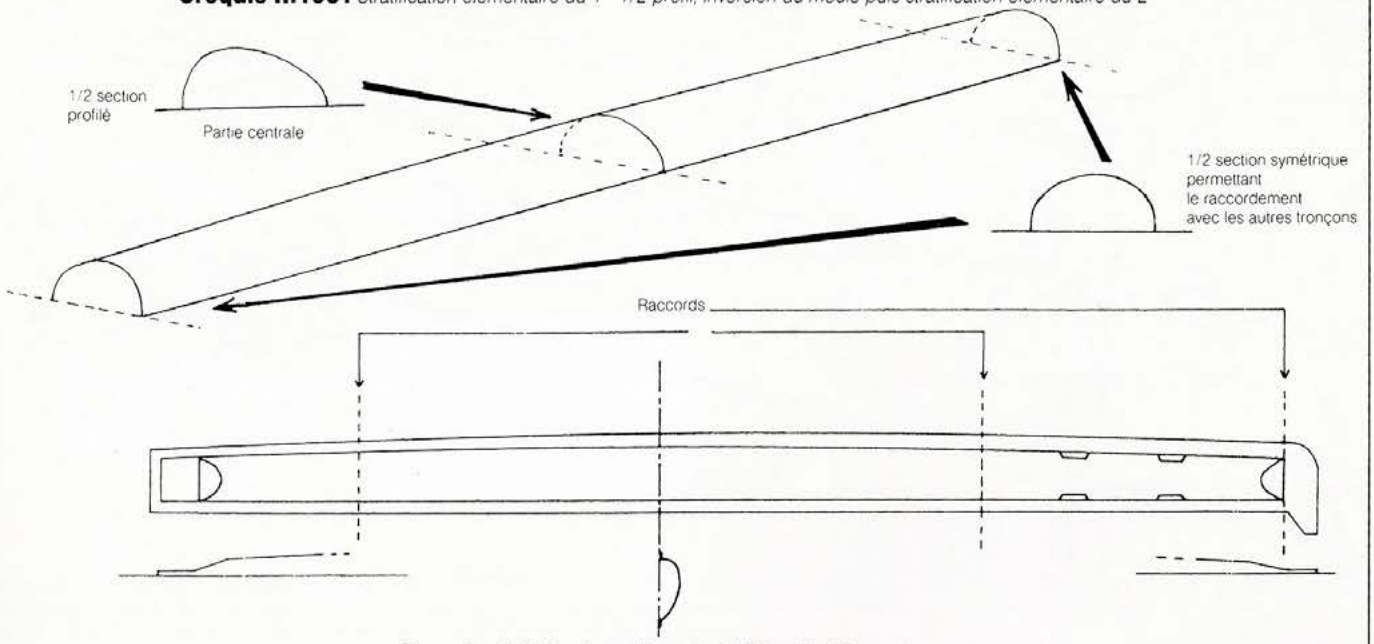
L'étape suivante consiste à aménager des logements pour les renforts de barres de flèche. On découpe des fenêtres de chaque côté du profil et on stratifie de part et d'autre des tissus qui vont se rejoindre et se souder sur le plan de symétrie du mât *(voir croquis II.197 bis).* Les cavités sont ensuite remplies de fibres unidirectionnelles qui entourent un tube. Celui-ci va recevoir un goujon de fort diamètre en inox sur lequel vont se fixer à la fois barres de flèche et haubans. Ce type de renfort, mécaniquement très solide, ménage cependant un espace suffisant pour permettre le passage des drisses qui vont circuler librement à l'avant ou à l'arrière du profil et ressortir en pied de mât *(voir croquis II.198).* Les câbles électriques, quant à eux, sont logés dans des gaines stratifiées en renfort du rail de ralingue.

Les ancrages de galhaubans et d'étais sont eux aussi renforcés de fibres unidirectionnelles qui sont toujours disposées dans le sens de l'effort. La stratification d'ensemble comprend trois couches d'Udimat, dix à onze couches de Rowing "S" se recouvrant à 30 %. Le pied de mât fait l'objet d'un traitement de faveur, puisqu'il reçoit des surépaisseurs progressives sur environ trois mètres, de manière à encaisser le surcroît de compression régnant dans cette zone. Le tout est alors enrobé de trois ou quatre couches de fibres de carbone stratifiées à la résine époxy (carbone EX 320/100 + résine époxy SP 110). Les épaisseurs de cette fibre, dont la couleur et le prix s'apparentent à ceux de la truffe du Périgord, vont décroissantes vers la tête du mât, moins sollicitée avec le type de gréement choisi. Le rail de ralingue constitué d'un profil trapézoïdal en polyester pultrudé (produit par Fiberline au Danemark) est collé puis recouvert de six couches de Rowing "S" plus époxy. On termine par la stratification d'une dernière couche de Rowing "S" à l'époxy, de manière qu'au ponçage de finition le carbone soit protégé.

II.IV.4.3. : Etuvage et mise au four : de la grande cuisine !

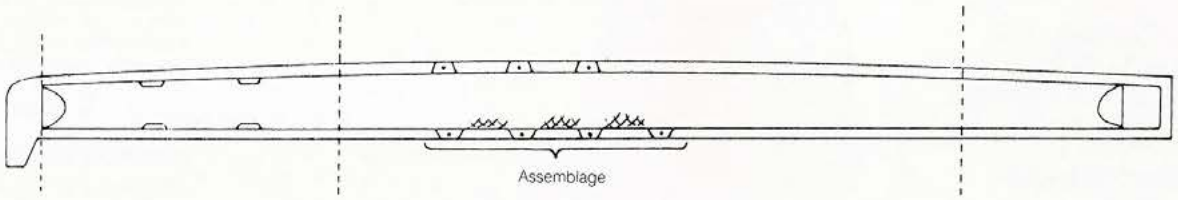
Qui a dit qu'il n'y avait qu'en France que l'on pratiquait la grande cuisine ? Ce mât a été construit en Belgique, et cet amateur a lui aussi des dons dans ce domaine, jugez plutôt. **Il s'est confectionné un gigantesque four de quatorze mètres de long à l'aide de cartons d'emballage enrobés de vieux tapis et couvertures en tout genre et chauffé (à feux doux !) par des résistances de fours usagés. Inutile de conseiller d'être quand même très vigilant durant le fonctionnement de ce tunnel chauffant !** Enfournez alors votre plat ou plutôt votre mât pendant 72 heures, thermostat 48 degrés, et vous obtiendrez un délicieux composite polymérisé jusqu'à la moelle ! *(voir photo II.199).* Trêve de plaisanterie, bien qu'il ne s'agisse pas ici de préimprégnés, l'étuvage permet de garantir une polymérisation à cent pour cent de toute la résine mise en œuvre et donc de s'approcher des qualités mécaniques des éprouvettes de laboratoires. A l'issue de cette expérience originale, il est intéressant de dresser le bilan et de profiter de l'expérience ainsi acquise. Les principales difficultés rencontrées ont été d'ordre commercial et surtout d'approvisionnement. Certains composants comme le Rowing "S" ou les résines sont difficiles à trouver, surtout au

Croquis II.193 : *Stratification élémentaire du 1er 1/2 profil, inversion du moule puis stratification élémentaire du 2e*



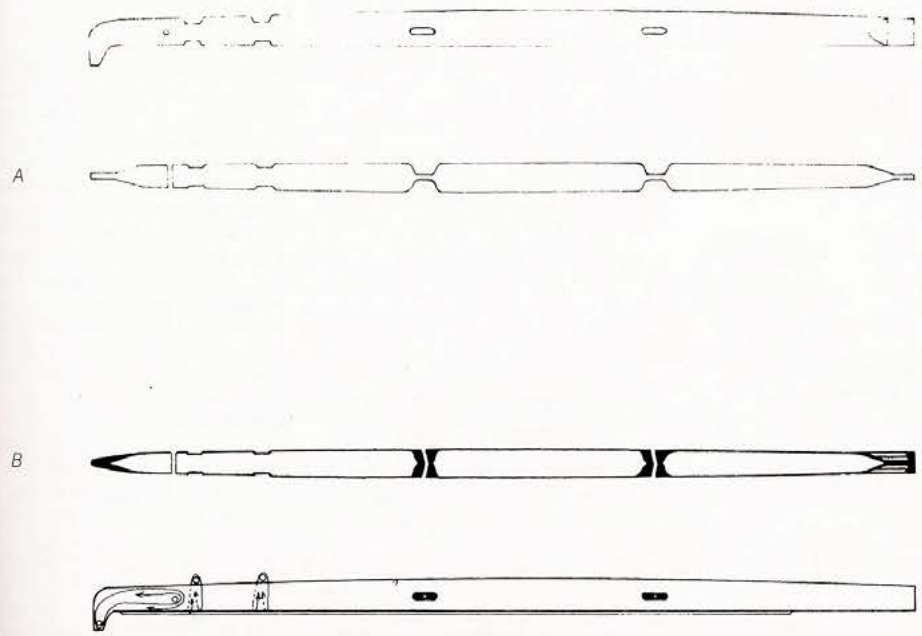
Croquis II.194 : *Assemblage des 2 1/2 profils élémentaires*

Les lèvres sont rivetées, puis découpées entre les rivets. On procède à une 1re stratification sur les zones découpées, puis à l'assemblage définitif après avoir éliminé les lèvres rivetées.



Croquis II.195 :

A. Les 2 1/2 profils sont assemblés et stratifiés, les évidements sont effectués aux endroits à renforcer.
B. Les évidements sont remplis de fibres UD selon le sens de l'effort.



détail. D'autres présentent une mise en œuvre délicate alors qu'on ne s'y attendait pas : l'Udimat par exemple. Par contre, des produits qu'on imaginait complexes d'emploi, se stratifient facilement, c'est le cas de la fibre de carbone avec la résine époxy.

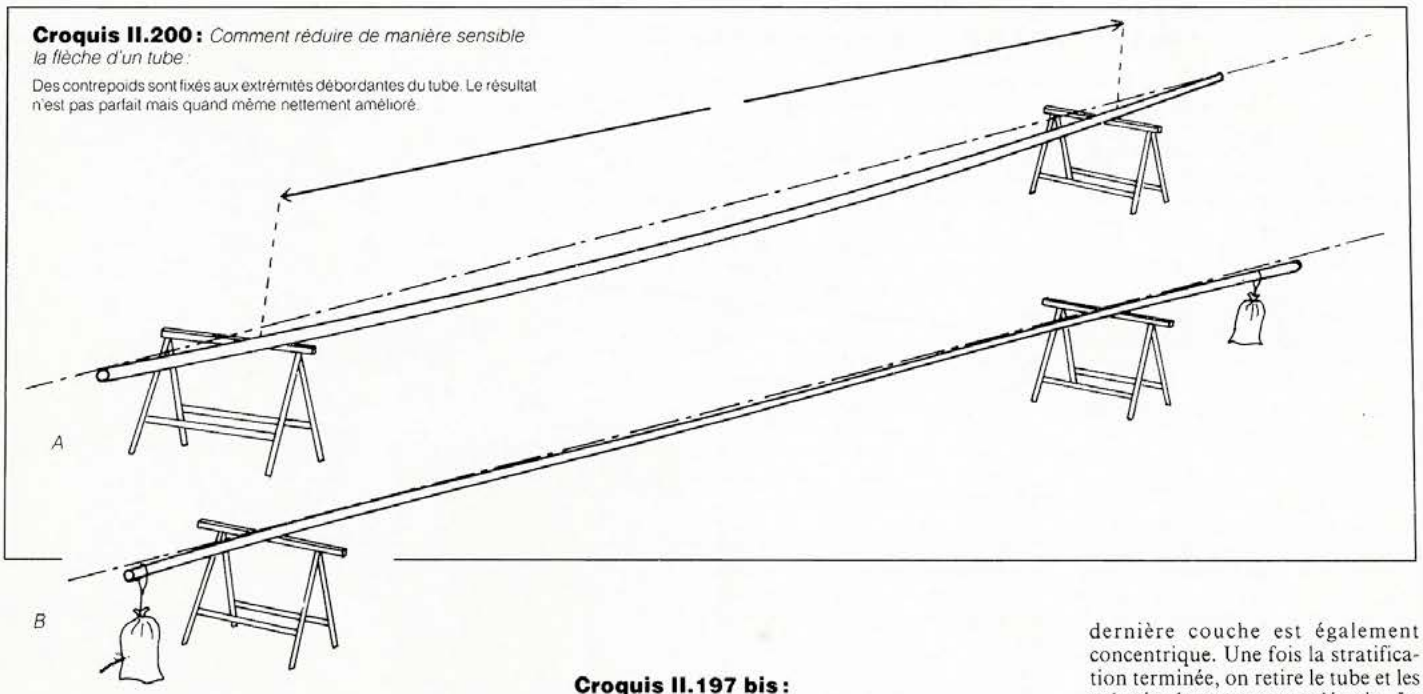
Sur le plan financier, le prix de revient s'établit à 7.500 F (en 1987) ce qui peut paraître élevé, mais il faut savoir qu'il s'agissait là d'un prototype et à la lumière des résultats obtenus, certains produits onéreux pourraient être remplacés, surtout si l'on se place dans l'optique croisière. Je vous livre le point de vue du constructeur qui confirme d'ailleurs cette opinion :

"Si c'était à refaire, je n'utiliserais ni époxy, ni carbone. Le comportement du mât aux stades intermédiaires de la construction laisse entrevoir des performances largements suffisantes pour la croisière si l'on se contente d'une masse de verre + vinylester équivalente à celle d'un profil alu. Par ailleurs, le profil pultrudé (utilisé comme rail de ralingue) n'est pas vraiment souhaitable, car il n'est pas prévu pour des coulisseaux".

Le budget ne serait plus alors que de 4.000 F, ce qui représente une sérieuse économie.

Croquis II.200 : *Comment réduire de manière sensible la flèche d'un tube :*

Des contrepoids sont fixés aux extrémités débordantes du tube. Le résultat n'est pas parfait mais quand même nettement amélioré.



II.IV.4.4. : Construction de mâts cylindriques ou coniques par les amateurs ou comment fabriquer un mandrin de façon économique :

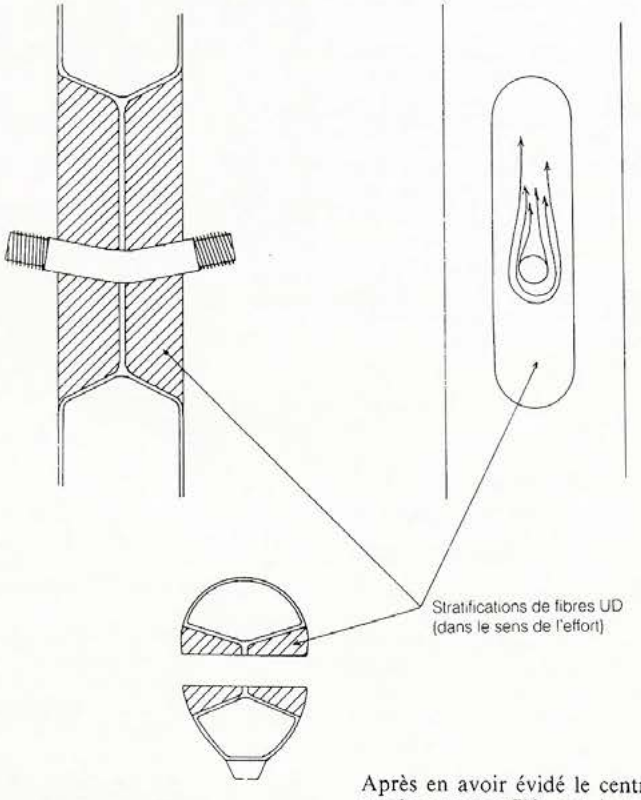
Cette technique est couramment utilisée par les amateurs britanniques et elle a été décrite par Jack Manners Specer qui l'a employée pour réaliser les mâts de son bateau équipé d'un gréement type "Gallant" (voiles semi-rigides en forme d'aile d'avion et enfilées chacune sur un mât cylindrique). En premier lieu, il s'agit de se procurer un tube rigide, généralement en alliage, d'environ 10 à 12 centimètres de diamètre, légèrement plus long que le mât à construire. Ce tube prend appui aux endroits correspondant aux extrémités de ce que sera le futur mât.

C'est alors qu'avec horreur, on prend conscience de la flèche que peut prendre un tube par le seul fait de son propre poids ! Nos amis anglais ont trouvé un moyen de contrecarrer cet effet désastreux : ils accrochent des contrepoids aux extrémités du tube qui dépassent des appuis *(voir croquis II.200).* Evidemment, ce n'est pas parfait, mais cela devient acceptable. On découpe ensuite dans de la mousse PVC (Klégécell ou autre) une série de cercles correspondant au diamètre intérieur du profil. Si celui-ci est conique, le diamètre des cercles sera bien sûr variable, alors que dans le cas d'un mât cylindrique, il sera constant.

Croquis II.197 bis :

Structure des renforts au niveau des barres de flèche

Les cavités évidées (voir croquis II.195 A) sont remplies de fibres UD qui entourent un tube inox.



Après en avoir évidé le centre, les cercles sont enfilés sur le tube et espacés d'environ 40 à 50 centimètres *(voir croquis II.201).*

On recouvre ensuite l'ossature ainsi obtenue avec du carton rigide de manière à obtenir un cône ou un cylindre de surface bien lisse, sur lequel on va stratifier d'abord de manière concentrique, de façon à obtenir un support rigide, puis dans le sens de la longueur pour que les fibres travaillent correctement. La dernière couche est également concentrique. Une fois la stratification terminée, on retire le tube et les gabarits de mousse sont détruits. Le tube est encore une fois bien utile pour cette opération.

L'épaisseur de stratification peut bien sûr varier selon les zones et les équipements à fixer, et cette technique offre beaucoup de souplesse en cela. Néanmoins, si elle ne nécessite que peu de matériel, elle réclame beaucoup de main-d'œuvre, mais c'est bien la seule chose dont l'amateur dispose presqu'à volonté...

II.IV.5. : CONCLUSION : UN MAT COMPOSITE DOIT ÊTRE TRÈS BIEN ADAPTÉ AU VOILIER QU'IL VA ÉQUIPER :

Quelle que soit la technique choisie, le résultat dépendra en grande partie de la mise en œuvre des matériaux, ce qui fatalement fait intervenir le savoir-faire de l'opérateur, même quand celui-ci se manifeste au travers du réglage d'une machine. Il sera donc très difficile d'avoir deux mâts composites exactement identiques et, contrairement à ce qui se passe dans le domaine de l'alliage léger, le savoir et l'expérience seront ici beaucoup plus difficiles à acquérir. Il est pourtant absolument nécessaire de bien calculer et de bien adapter le mât composites à l'usage qu'on pense en faire. Un exemple illustre parfaitement cette nécessité, c'est celui de Garry Hoyt, concepteur de la série des Freedom, les célèbres cat-boats de croisière, qui cassa sept mâts en composites avant de trouver la section correcte convenant à son Freedom 25 *(voir croquis II.202).* Il est vrai qu'il s'agit d'un gréement de cat-boat un peu spécial pour lequel il ne disposait que de peu d'informations au départ.