

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

«PSYCHANALYSE  
du mât  
et du surmât»

par Max wolfer.

En 4 volets.  
Revue Loisirs Nautiques.

# PSYCHANALYSE DU «MAT» ET DU «SURMAT»

Les mâts en alu sont maintenant tellement répandus dans la plaisance que pour beaucoup de constructeurs, la seule question qui se pose au moment du choix d'un gréement, c'est de trouver un profil idoine parmi les quelques marques qui extrudent l'alliage d'aluminium. Pour le reste, les amateurs ont conservé le vieil attavisme gaulois qui les fera faire en sorte que leurs voiles ne leur tombent pas sur la tête. Il faut reconnaître que le matériel proposé actuellement sur le marché, aussi bien par les fabricants de ces mâts en alu que pour les gréeurs, présente de bonnes garanties de solidité pour peu qu'on ait respecté les prescriptions de l'architecte. En toute logique donc, et bien que cette série d'articles soit avant tout destinée à vous présenter des réalisations à la portée de l'amateur, nous commencerons par analyser ces fabrications en alliage, ceci uniquement dans un but référentiel. Il faut bien admettre en effet que leur construction reste l'apanage des industriels. Ce premier volet ne saurait être complet sans une étude des principes essentiels qui président à l'élaboration d'un mât. Pour ne pas rebuter les novices dans ce domaine très pointu (plus pointu qu'un mât tu meurs !), ces notions seront abordées dans la douceur et nous réserverons le domaine plus dur des calculs à la dernière partie.

Pourtant, le profil en alliage, qui constitue une solution de facilité, ne satisfait pas certains marginaux pour qui la construction du bateau commence à la quille et se finit à la pomme du mât. Pour ceux-là, passionnés de calculs, de technicité ou simplement économes, que reste-t-il ?

Tout d'abord, le bois qui a longtemps constitué la seule réponse à leur demande. Ce sera donc l'objet du deuxième volet dans lequel nous passerons une revue de détail des différentes techniques employées avec ce matériau.

Enfin, une autre solution qui, sans être nouvelle, est restée longtemps en gestation, semble aujourd'hui attirer la faveur des amateurs : le stratifié à base de tissus de verre ou de fibres plus « exotiques ». C'est cette dernière qui fera l'objet, dans la troisième partie, d'une étude détaillée à partir d'un exemple concret, chiffré et vécu.

## 1 LE MAT : UNE THÉORIE QUI DOIT TENIR DEBOUT !

Le problème mécanique posé par le mât d'un voilier se trouve régi essentiellement par quatre contraintes qui vont tirailler le concepteur de l'espar dans quatre directions différentes, tel un supplicé du Moyen Âge. L'analyse de chacun de ces éléments va nous permettre de mieux comprendre la démarche des constructeurs et surtout de voir quelles vont être leurs répercussions au niveau de la fabrication, selon les matériaux employés.

## A Première contrainte : la résistance aux forces de compression

On l'appelle aussi souvent la résistance aux efforts de flambage et elle constitue en général le souci majeur de l'architecte mais aussi celui du skipper. En effet, bon nombre de ces derniers savent bien que toutes les tensions exercées sur le gréement (haubans, étais, pataras, drisses, poussée vélique, etc.) provoquent toujours une composante s'appliquant verticalement et de haut en bas sur le profil du mât. Cette somme de compres-

sions est répartie sur la section du mât et la résistance de l'espar sera donc proportionnelle à cette section. Tout de suite, une petite mise au point qui évitera bien des confusions. La section dont on vient de parler prend en compte uniquement la surface du matériau (alu, bois, etc.) et non la surface totale de la coupe du profil. Dans le cas d'un mât en alliage par exemple, cela correspond approximativement au périmètre moyen multiplié par l'épaisseur de la paroi de métal profilé.

Intuitivement, on sent bien que la résistance à la compression variera aussi en fonction de la forme selon laquelle sera réparti ce matériau. Pour une même section, si on utilise un profil plein, cette résistance sera nettement moins élevée que si la matière est dispersée sur une grande circonférence ménageant un espace entre les parois. Cette notion est caractérisée par ce qu'on appelle l'inertie du profil, notion qui entrera aussi en jeu dans la deuxième contrainte.

Cela se traduit dans la réalité par des profils d'une masse déjà respectable en-dessous de laquelle il serait dangereux de descendre et présentant des diamètres assez importants de manière à mieux résister aux efforts de compression qui vont tendre à écraser le matériau, diminuer sa longueur et finalement provoquer le flambage (rupture ou simple déformation permanente du profil qui, de toutes façons, sera alors hors d'usage : voir croquis 1). Il est à noter que ces forces seront plus élevées à la base du mât, la tête ne subissant pas la tension des bas-haubans pourra donc être moins échantillonnée que le tronçon inférieur. Cet allègement est d'autant plus utile que la tête de mât représente le point le plus éloigné au-dessus du centre de gravité et par là même, celui qui produit les effets les plus néfastes sur la stabilité.

Il ne faudra pourtant pas se fier aveuglément aux études théoriques qui permettent de penser que l'on va gagner beaucoup de poids dans les hauts. Ces calculs, pour la plupart d'entre eux, se placent dans une optique statique et ne tiennent pas toujours compte des mouvements du bateau. Or, justement,

dans la zone qui nous intéresse, le tangage se trouve très amplifié. Certaines sorties du Solent par vent contre-courant permettent à qui-conque de comprendre ce qu'on appelle un mât qui « fouette dans les hauts » et ce, même par vent de force 5 à 6 ! Ces fouettements intempestifs combinés aux forces de compression peuvent entraîner le flambage et la rupture d'un profil trop faible. En tout état de cause, la réduction du profil dans les derniers mètres sera donc assez limitée.

## B Deuxième contrainte : la rigidité ou la résistance aux forces de flexion

A partir du moment où l'on se place dans le cas le plus général, à savoir celui d'un bateau de croisière gréé en tête, le skipper aura pour souci majeur de régler son mât de telle sorte qu'il reste droit. Plusieurs éléments vont l'aider à atteindre son but : la tension des câbles du gréement, les barres de flèches et aussi la rigidité du profil lui-même, c'est-à-dire la résistance que celui-ci oppose aux forces qui tendent à provoquer sa flexion.

Dans certains cas, comme les gréements fractionnés de beaucoup de voiliers de courses, cette flexion est volontaire et utilisée à bon escient mais il faut alors bien la contrôler. L'exemple le plus significatif dans ce domaine reste sans doute celui de Lion Heart, challenger britannique pour la coupe de l'Amérique. Le profil de sa tête de mât était calculé pour prendre un cintre impressionnant, ce qui lui permettait non seulement d'obtenir un grand-voile d'une forme parfaite mais surtout d'en accroître la surface dans de bonnes proportions (voir croquis 2).

Mais ne nous écartons pas du cas de « monsieur-tout-le-monde », qui préférera s'en tenir à un mât bien droit. Pourtant, les forces latérales qui tendent à provoquer la flexion de l'espar, cause de tous ses soucis ne manquent pas : traction du foc et de l'étau, compression du tangon, de la bôme, etc. Pour lutter contre toutes ces vicissitudes, obtenir la meilleure rigidité et les caractéristiques mécaniques les plus performantes, on sera

amené comme tout à l'heure à augmenter l'inertie du profil, donc son diamètre et par là même son fardage.

Bien sûr, en second lieu, les matériaux employés présenteront des qualités intrinsèques de rigidité. On notera à ce sujet que depuis la généralisation des profils en alliage léger, les mâts ont perdu leur « personnalité ». Non pas qu'un drame freudien les en ait privés, mais les profils en alu d'une même série ont strictement les mêmes réactions et offrent la même souplesse en raison du contrôle très précis des caractéristiques du matériau. Au contraire, les mâts en bois pouvaient, malgré des constructions identiques, présenter des qualités finales différentes selon les arrivages, le séchage et la moindre homogénéité de ce matériau.

On pourra également utiliser un troisième moyen pour optimiser encore la rigidité : celui-ci consiste à rainurer ou nervurer le profil. C'est ainsi que la gorge de ralingue sur la face arrière et le rail de tangon totalement intégré à la face avant d'un profil alu participent activement à l'amélioration de son

Fig. 1 : Efforts de compression et flambage.

Des forces de compression de plus en plus élevées provoquent une diminution de la longueur du profil et aboutissent au flambage.

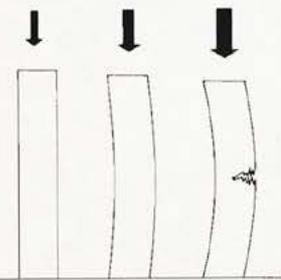
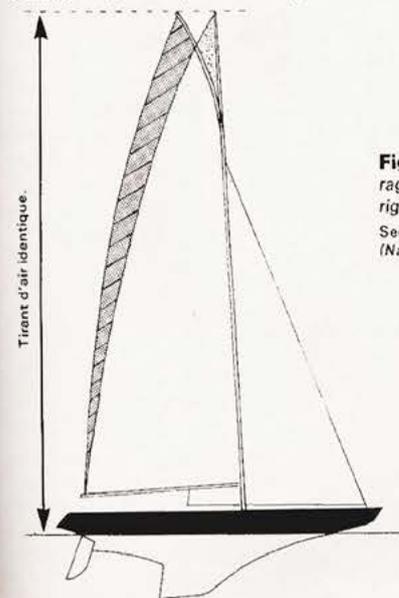


Fig. 2 : Le cintrage poussé à l'extrême.

Lion Heart utilisait un tel gréement lors de la dernière coupe Américaine. On appréciera le gain de surface (hachurée) et la très légère perte (points) par rapport à un gréement classique.



inertie ; ceci pour un diamètre extérieur et un poids linéaire quasiment identiques car ces équipements auraient de toutes façons dû être ajoutés (voir croquis 3). On remarquera que ces forces latérales de flexion provoquent des efforts qui vont venir s'ajouter en partie aux compressions que l'on a déjà évoquées. En effet, sur un profil soumis à un fléchissement, on observe une compression du matériau sur la face concave alors qu'on assiste à un étirement sur la face convexe (voir croquis 4).

D'autre part, le profil est divisé en plusieurs parties séparées par des points fixes ou que l'on peut considérer comme tels : embase de mât, fixation des barres de flèches, tête de mât. On comprend aisément que plus ces tronçons seront longs, plus l'amplitude du fléchissement ou flèche sera importante. Il conviendra donc, comme nous le verrons plus loin, de calculer la longueur maximale de ces différents tronçons en fonction de la charge qu'ils vont subir.

Nous venons de voir que ces deux premières contraintes aboutissaient à peu près au même résultat : à savoir des diamètres de profil importants pour éviter le flambage et des poids linéaires relativement élevés. Les deux derniers paramètres leur sont totalement contradictoires et il faudra donc composer entre toutes ces contingences pour obtenir un compromis cohérent.

**C Troisième contrainte : la finesse aérodynamique**

Le propre du mât, c'est de travailler dans l'air, aussi est-il logique que sa forme, son volume et ses caractéristiques obéissent aux lois de l'aérodynamique et c'est là que le bât blesse ! Nous avons constaté que les contraintes précédentes

nous conduisaient à des volumes importants, or chacun sait qu'un tel espar offrira une résistance à l'air non négligeable. Plus grave encore, il perturbera l'écoulement des filets d'air dans une zone (le tiers avant de la grand-voile) reconnue comme étant très propulsive. Les concepteurs de mâts ont donc cherché les moyens de diminuer le diamètre tout en gardant une bonne résistance à la flexion et à la compression. Parallèlement, on s'efforcera de travailler la « coupe » du mât de manière à améliorer sa pénétration dans l'air. Plusieurs voies se sont dessinées. Ainsi a-t-on vu apparaître les mâts ailes profilés et tournants construits en général en fibres, mais ils semblent pour l'instant réservés aux multicoques transocéaniques. A ma connaissance, aucun croiseur n'est encore gréé de la sorte alors que ces profils sont pourtant employés depuis longtemps sur les chars à voiles ou dans de petites séries de catamarans de sport.

Précédemment s'était développée l'idée qu'il était possible de construire des profils plus fins si on les maintenait mieux. Aussi a-t-on vu bourgeonner des étages de barres de flèches de plus en plus nombreux le long des mâts, de plus en plus grêles des voiliers de course.

Troisième approche : les mâts « fourreaux ». Cette fois, la voile elle-même englobe le profil dans sa forme, améliorant ainsi sensiblement l'aérodynamisme de l'ensemble. Ce système limite bien sûr le haubanage et les diamètres de profil seront plus importants. Dans cette voie encore, les mâts en polyester semblent plus prisés par la très faible proportion de bateaux de croisière équipés de telles voilures disposent le plus souvent d'espars en fibres. Ce fut le cas des « catboats » ou « catketchs » de la série des Freedom ou plus récemment du Stark 100 (mâts en fibre de carbone).

En ce qui concerne un gréement classique et pour respecter ce souci

d'aérodynamisme, on se bornera à ne pas exagérer le diamètre du profil et à exploiter les possibilités offertes par les matériaux modernes (alu et fibres) qui permettent la réalisation d'espars creux acceptant le passage des drisses à l'intérieur. Ce dernier point est essentiel sur le plan de la finesse aérodynamique.

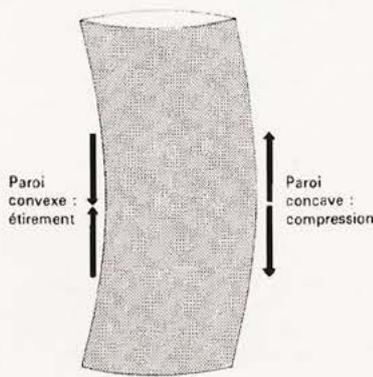
**D Quatrième contrainte : la légèreté**

On ne peut pas dire que le poids du mât participe à la stabilité du voilier. Bien au contraire, il n'y a pas de charge plus mal placée et quelques kilos gagnés sur le profil seront très appréciables. Pour une même inertie, on aura donc tout intérêt à adopter un profil de diamètre plus important mais à parois minces plutôt qu'un tube de faible diamètre mais d'échantillonnage plus épais et qui, en définitive, sera plus lourd. Mais me direz-vous, et l'aérodynamisme dans tout ça ? Eh bien oui, nous avons fait le tour du problème et comme dans toutes les bonnes tragédies antiques, nous voilà revenus au point de départ avec toujours autant d'énigmes dans notre sac.

**E En conclusion :**

Le profil d'un mât représente toujours un compromis, un de plus sur un bateau qui en définitive n'en est qu'une suite ininterrompue. Cependant, le souci qu'il faudra garder à l'esprit lors de la conception et de la fabrication d'un mât de croiseur sera celui de la sécurité. Même si l'on mise sur un solide haubanage, le profil devra lui aussi apporter sa contribution à la solidité du gréement. Il suffit, pour comprendre la résistance que doit avoir un tel espar, de rappeler l'opinion que s'en fait Eric Tabarly : un mât digne de ce nom doit pouvoir coucher le bateau sans subir aucun dommage. On retrouvera ce souci de sécurité au niveau des calculs (troisième volet) où, chose courante en matière de conception de voiliers, les résultats obtenus par des formules mathématiques élaborées sont pondérés de manière très empirique par des coefficients dictés par l'expérience acquise au fil du temps. Aussi est-il bon d'établir une comparaison des matériaux que peut utiliser un amateur dans ses réalisations avec ceux plus conventionnels qui ont fait leurs preuves dans ce domaine et qui constituent de sérieuses références.

Fig. 4 : Les effets d'une flexion sur un tube.



Max WOLFER

A suivre  
Article  
en 3 volets



# PSYCHANALYSE DU «MAT» ET DU «SURMAT»

## II SELON LE MATERIAU, CHOISISSEZ VOTRE MEILLEUR PROFIL

Il est curieux de constater qu'en partant des quatre principes que nous venons d'analyser, les résultats et les fabrications que l'on obtiendra ne seront pas forcément les mêmes selon que l'on emploiera tel ou tel matériau. Comme dans beaucoup de situations de la vie courante, ces homo-sapiens que sont les constructeurs s'efforcent d'utiliser au mieux les qualités spécifiques du produit qu'ils emploient et s'accrochent tant bien que mal de ses défauts... Un petit tableau récapitulatif des caractéristiques essentielles des principaux matériaux employés ne sera pas

inutile pour donner un ordre d'idée de ce qu'un amateur pourra obtenir :

Au premier abord, l'examen de ce tableau révèle des différences assez importantes dans les caractéristiques mécaniques des matériaux analysés. Cependant, plutôt que de considérer leur valeur absolue, il est plus logique d'effectuer le rapport avec leur densité. La valeur ainsi obtenue est beaucoup plus significative et les différences enregistrées sont beaucoup plus faibles que tout à l'heure.

(1) On remarque tout de suite qu'il sera intéressant d'associer ces deux fibres.

Il ne s'agit pas ici d'établir le « Hit Parade » du meilleur tube (de mât s'entend...) mais simplement de fixer des ordres de grandeur dans les comparaisons entre les matériaux. A ce sujet, il faut admettre un état de fait, c'est que le mât en alu sera souvent comparé aux autres parce que c'est celui que tout le monde connaît et que l'expérience acquise tant dans sa fabrication que dans son utilisation

Exemple :	E =	module d'élasticité	=	2444 pour le bois
				2592 pour l'alliage
	D	densité		857 à 1133 pour le verre (1)
				9285 pour le carbone

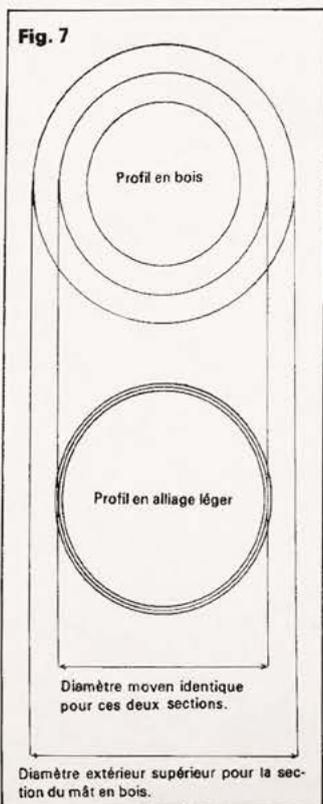
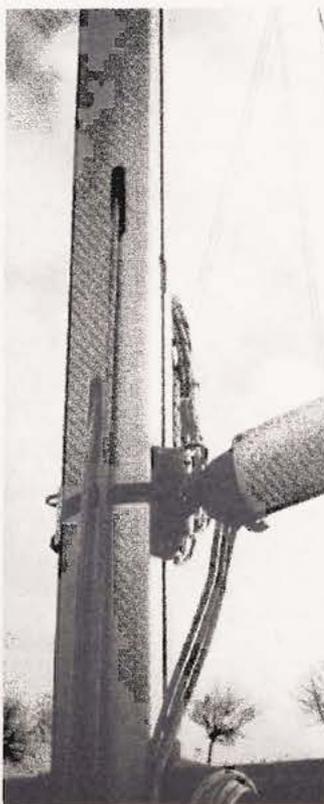
## III MAT EN ALU : UN TUBE TRES EN VOGUE !

Quand je dis « alu », je devrais préciser « alliage » pour les puristes. Il en existe plusieurs nuances mais la plupart du temps, il s'agit de tubes extrudés à partir de l'alliage 6005 A. Sans entrer dans les problèmes de fabrication qui de toutes façons restent du domaine industriel, disons que le produit obtenu est parfaitement au point et présente pas mal d'avantages. Les quelques ennuis rencontrés par les plaisanciers sont très souvent provoqués par les accessoires du profil (ferrures diverses, ancrages, etc.) mais exceptionnellement par le profil lui-même. Au niveau des avantages, celui qui est essentiel paraît le plus évident, à savoir qu'on a affaire à un tube et comme chacun sait, le propre d'un tube c'est d'être « creux à l'intérieur ! ». De cette Lapalissade découlent deux qualités prépondérantes : une légèreté assez satisfaisante et un fardage limité grâce au passage des drisses, câbles électriques et électroniques de tous poids à l'intérieur (voir photo 5).

Ces profils sont tellement diffusés que leur prix est devenu relativement abordable malgré l'outillage

est énorme. Aussi, même si le travail de l'alliage n'est pas à la portée de l'amateur, l'analyse de ses possibilités nous sera d'un grand enseignement.

Photo 7 : Ferrure de vit de mulet simplement rivetée (elle travaille essentiellement à la compression).



Matériau	Résistance à la rupture R	Charge de travail C	Module d'élasticité E	Densité D	Homogénéité du matériau
Hémic Droit fil, humidité ramenée à 12 %	5,5 kg/mm <sup>2</sup>	1 kg/mm <sup>2</sup>	1.100 kg/mm <sup>2</sup>	0,45	Difficulté d'obtenir de grandes longueurs parfaitement homogènes : nœuds, orientation des fibres, séchage sont autant de facteurs influents.
Alliage d'aluminium nuance : 6005 A de chez Isomat	26 kg/mm <sup>2</sup>	25 à 50 % de R selon le type d'utilisation des mâts	7.000 kg/mm <sup>2</sup>	2,7	Très bonne homogénéité. Remarque : en cas de soudures, la résistance diminue si celles-ci ne sont pas traitées.
Stratifié fibre de verre + résine vinylester (40 % de fibre)	13 à 16 kg/mm <sup>2</sup>	à l'appréciation de celui qui met en œuvre (voir 3° volet)	1.200 à 1.700 kg/mm <sup>2</sup>	1,4 à 1,5	Dépend essentiellement de la mise en œuvre et des conditions ambiantes. Toutes les caractéristiques ici énoncées en sont tributaires.
Stratifié carbone + résine époxy (40 % de fibre)	300 kg/mm <sup>2</sup>	à l'appréciation de celui qui met en œuvre (voir 3° volet)	13.000 kg/mm <sup>2</sup>	1,4 environ	Dépend essentiellement de la mise en œuvre et des conditions ambiantes. Toutes les caractéristiques ici énoncées en sont tributaires.

important que nécessite leur fabrication (voir photo 6). L'homogénéité du métal est très bonne mais attention aux soudures qui provoquent un affaiblissement des qualités mécaniques de l'ordre de 10 % à moins que celles-ci ne soient traitées thermiquement. Cela explique que toutes les pièces qui travaillent en compression comme les ferrures de barres de flèches ou de vit-mulet soient souvent simplement rivetées ou que les ancrages des câbles se fassent par des coquilles inox dans lesquelles s'engagent les embouts à boule des haubans (voir photos 7 et 8). Ces systèmes ne nécessitant pas de

soudure, n'affaiblissent que très peu la résistance du profil. Le tableau précédent nous a montré les bonnes qualités de ce métal et la section nécessaire pour supporter la charge d'une voileure restera raisonnable. Ainsi, 2.000 m<sup>2</sup> suffiront pour un mât de 11 m convenant à un voilier de 9,50 m pour 4 t de déplacement. Heureusement, car il faut quand même admettre que c'est le matériau le plus dense du tableau. Cette section modérée, répartie sur un périmètre important, donnera donc des épaisseurs plus faibles qu'avec d'autres matériaux, en particulier le bois. En fin de compte, on obtiendra un far-

dage plus limité. Un exemple concret illustrera mieux cette caractéristique : prenons un profil en alliage et un autre en bois qui présentent tous deux la même résistance et le même diamètre moyen. Pour le premier, l'épaisseur des parois étant faible, le diamètre extérieur sera nettement inférieur à celui du second qui nécessairement aura des parois six ou sept fois plus épaisses (voir croquis 9).

Récemment, on pouvait encore reprocher à l'alliage de n'offrir que des profils linéairement invariables, c'est-à-dire sans possibilité de modifier le diamètre en tête de mât. Cela n'est plus tout à fait vrai depuis que les industriels se sont équipés de machines à restreindre qui, pour les mieux outillées, effectuent la découpe et la soudure entièrement automatiquement grâce au pilotage par ordinateur.

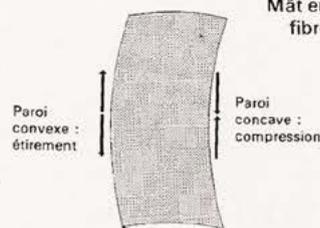
Malgré l'anodisation, les problèmes de corrosion ne doivent pas être négligés car ce traitement électrolytique censé protéger l'alliage par

une couche d'oxyde ne résiste pas longtemps à une drisse qui claque ou simplement au frottement d'une goupille, celle qui retient les cabillots de grand-voile par exemple. Isomat a remédié à cet inconvénient en adoptant une petite plaque sur ses récentes productions. Ce détail montre à quel degré de finition en sont arrivés les industriels du mât. Le mois prochain, nous nous placerons à un niveau plus modeste mais plus intéressant pour l'amateur car avec l'étude des différents procédés de construction d'espars en bois, c'est sa fibre naturelle qui vibrera...

#### Max WOLFER

A suivre  
3<sup>e</sup> Volet  
Mât en bois  
4<sup>e</sup> Volet  
Mât en fibre

Fig. 4 : Les effets d'une flexion sur un tube.



Dans le n° 181 page 49, la présentation du dessin 4 a été inversé. Ci-contre rectificatif.

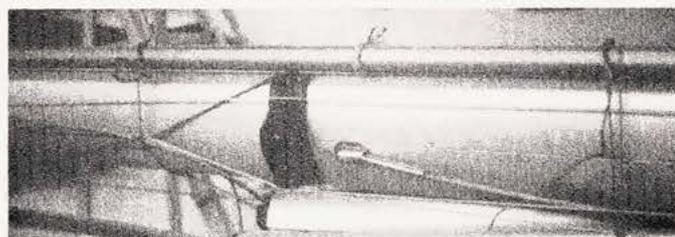


Photo 8 : Ancre de bas-hauban par coquille et embout à boule. Ferrure de barre de flèche rivetée (profil National Mast).

Photo 5 : Coupe d'un profil en alliage. Le grément courant passe à l'intérieur du mât. Les câbles électriques sont protégés par des gaines en plastiques fixées sur la paroi intérieure du mât (documentation Isomat).

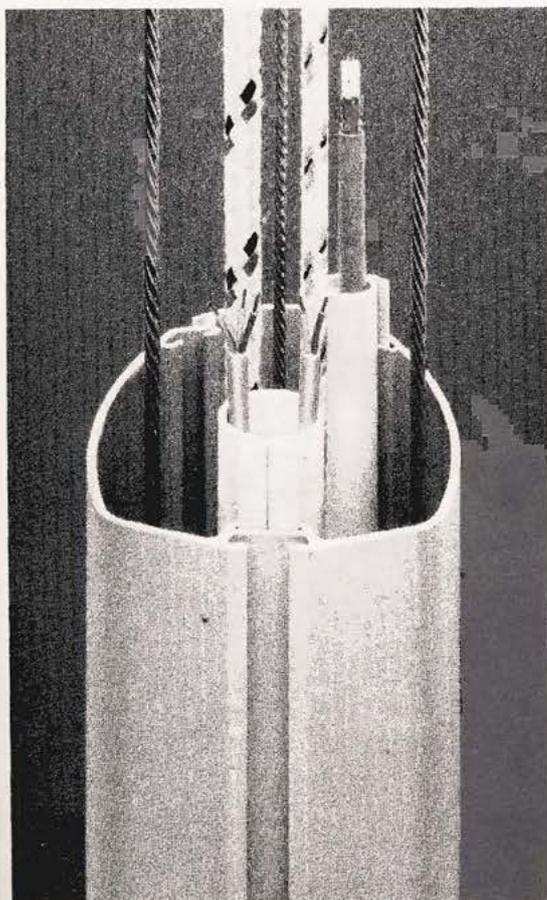
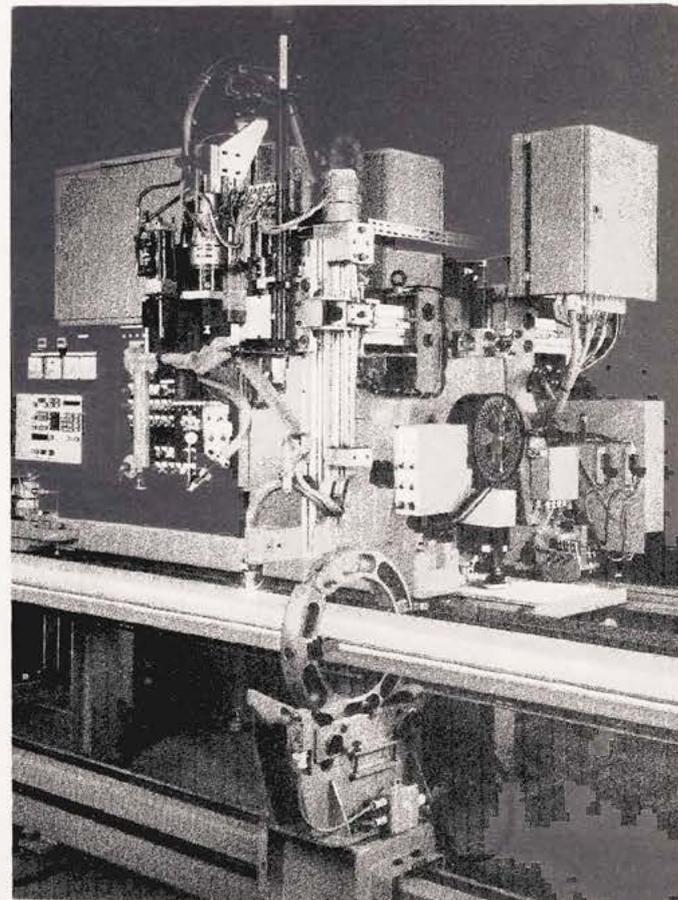


Photo 6 : Un outillage sophistiqué pour la fabrication des profils en alliage : machines assistées par ordinateur ou asservies à un lecteur optique de plans (documentation Isomat).





# PSYCHANALYSE DU «MAT» ET DU «SURMAT»

2<sup>e</sup> Volet (suite des n<sup>o</sup> 181 et 182)

## POUR SON MAT, L'AMATEUR FAIT FEU DE TOUT BOIS !

Le premier volet du n<sup>o</sup> 181 vous a rappelé les différentes lois auxquelles un mât doit obéir pour tenir debout. Ces lois n'ont pas encore été chiffrées et le domaine du calcul ne sera abordé que dans le troisième volet de manière que ces notions aient bien eu le temps de vous imprégner. Ce mois-ci, ce sont les fabrications des mâts en bois qui seront passées en revue. Beaucoup d'entre elles sont à la portée des amateurs et bon nombre de voiliers utilisent de tels profils avec bonheur. D'autres restent plutôt du domaine des chantiers spécialisés dans le collage et le travail du bois et qui ont bien voulu nous apporter leur concours. Ces réalisations sont cependant très intéressantes car elles apportent des idées neuves sur ce matériau très ancien.

### **I** MAT EN BOIS MASSIF : L'ANCETRE

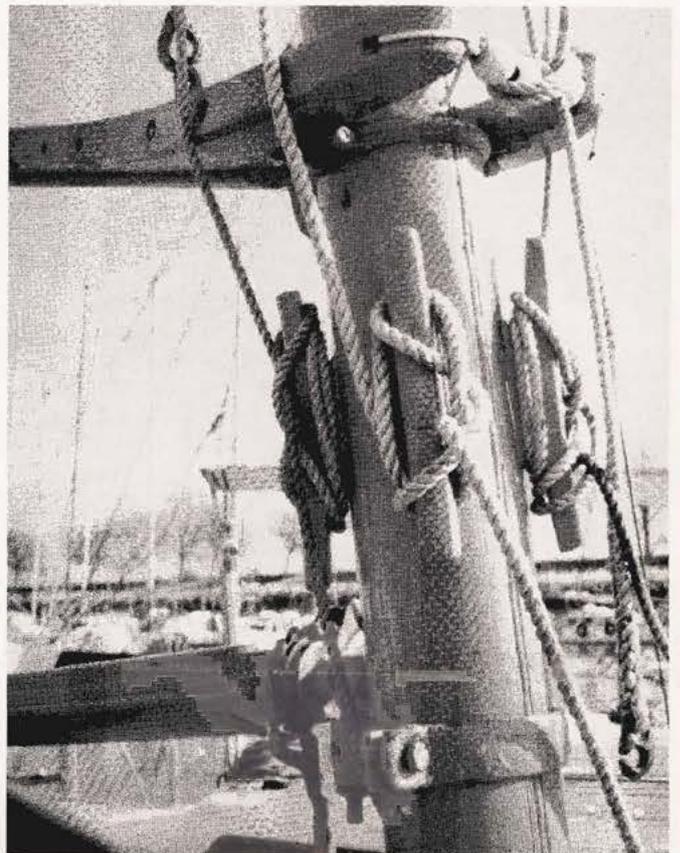
Ancêtre, oui, mais n'allez pas croire pour autant que ses caractéristiques soient dépassées. Le tableau du volet précédent vous a montré au contraire que ces qualités étaient tout à fait compétitives si l'on tient compte de sa faible densité. Ancêtre néanmoins car c'est tout de même la méthode la plus ancienne que l'on emploie pour réaliser des mâts. Il faut dire que leur fabrication est assez simple, surtout si l'on se contente du style « poteau télégraphique » ! Cette comparaison, certes ironique, vous remet en mémoire le nom d'un navigateur des plus sérieux : Bernard Moitessier. C'est en effet la solution qu'il choisit lorsqu'il gréa son Joshua. Selon ses dires, le poteau E.D.F. représentait le moyen le plus simple et le plus sûr pour un amateur de construire son mât. Le traitement d'imprégnation que l'on fait subir à ces bois les rendant même particulièrement résistants au milieu marin. Pour parfaire cette protection, il prenait cepen-

dant la peine d'injecter à la seringue un mélange à base d'huile de lin dans les fissures. Le même bonhomme avait réussi à tailler sa bôme d'artimon dans une simple branche et cette solution lui donnait entière satisfaction. Malheureusement, tout le monde n'a pas comme ce grand navigateur l'instinct de la mer, ni la sensibilité innée des choses et de leur résistance. Il faut avoir accumulé une expérience énorme pour pouvoir juger simplement à l'œil de la charge de rupture d'un profil « arborescent ». Aussi, gardons-nous bien, plaisanciers moyens que nous sommes, de faire fi de tous les calculs et lois de la physique que l'on ne doit pas négliger dans ce domaine. Ce type de mâts très bon marché offre aussi l'avantage de ne pas poser de problème pour la fixation de l'accastillage (par vis ou boulonnage) ou même du gréement (par colliers ou capelages). Leur principal inconvénient reste leur poids relativement élevé. Même si l'on emploie des essences de résineux peu denses qui sont les plus adaptées grâce à leurs qualités mécaniques, à la disposition et à la longueur de leurs fibres, on obtient

en fin de compte une inertie peu favorable en regard du poids de matériau utilisé. Sur les bateaux anciens comme les langoustiers de Bretagne par exemple, la plupart du temps, on utilisait le pitchpin en prenant la précaution de renforcer l'esper à l'aide de lattes de chêne au niveau des points d'appui du pic et du gui. En plus de caractéristiques mécaniques acceptables, ce

bois présente l'avantage d'offrir une bonne résistance au vieillissement. Autre inconvénient, il est à l'heure actuelle difficile de trouver une pièce de bois suffisamment longue, offrant une parfaite homogénéité, c'est-à-dire sans nœud ou presque, avec des fibres rectilignes et bien sèches de surcroît (moins de 20 % d'humidité). On notera à ce sujet que l'achat du bois néces-

Photo 1 : Détails d'une mâture en bois massif. Encornat de pic dont les deux cornes, réalisées en bois, sont reliées par un collier de boules.



saire à la confection du mât devra se faire si possible au début de la construction de manière à parfaire le séchage. Lors du choix, on pourra cependant tolérer quelques nœuds s'ils sont petits et relativement espacés. On sera alors amené à appliquer des coefficients de sécurité lors des calculs de résistance qui aboutiront à un échantillonnage encore plus généreux, donc à un profil encore plus lourd et au fardage plus important. Les drisses qui seront obligatoirement extérieures n'arrangeront rien sur ce dernier point. Malgré ces quelques faiblesses, ce type de profil est bien adapté à certains voiliers de déplacement lourd (moindre importance relative de la masse de l'espar) et surtout aux gréements auriques car ceux-ci utilisent des mâts courts. Pourtant, le pic qui les prolonge est lui aussi en bois massif, donc dense, mais on a quand même l'avantage en cas de gros temps, de « faire descendre le bois

en même temps que la toile ». Ce type de grément offre en outre des facilités pour être entièrement réalisé par l'amateur. Les ferrures de bôme (alias gui) et de pic sont ici remplacées par des encornats de bois dont les deux cornes sont reliées sur l'avant par des colliers de boules (voir photo 1). La mâture en bois massif plaira aux tourdumondistes qui lui trouveront une facilité de réparation ou même de remplacement peu commune, ceci ajouté à l'attrait de sa simplicité de construction et à son côté économique.

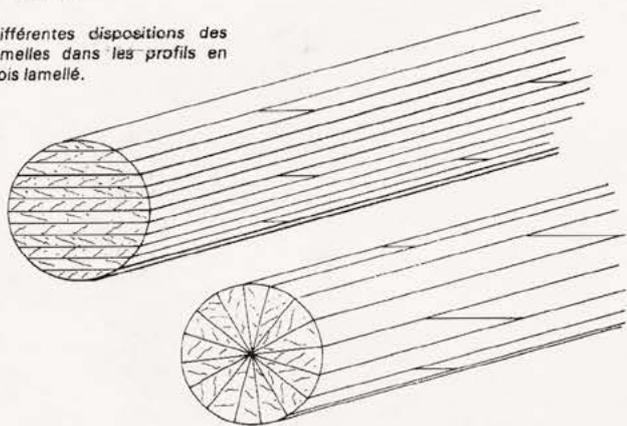
## 2 PROFILS EN BOIS LAMELLE PLEIN : PAS DE NOËUD POUR LES MARINS

On retrouve ici à peu près les mêmes caractéristiques que dans le cas précédent. Pourtant ceux-ci font actuellement plus d'adeptes que le bois massif. A cela plusieurs raisons, bien sûr, l'aspect final sans nœud ni fissure correspond mieux au design des bateaux de plaisance modernes mais surtout, ils sont plus adaptés aux possibilités du marché actuel du bois. L'amateur pourra en effet contourner la difficulté de trouver une belle pièce de bois d'un seul tenant en collant plusieurs petites longueurs de bonne qualité plus faciles à dénicher. Ce collage présentera aussi l'avantage de supprimer une grande partie des tensions internes du bois qui parviennent parfois à voiler le profil.

Bien que d'une densité voisine de celle du bois massif, le profil ainsi obtenu sera en général plus léger car les coefficients de sécurité appliqués lors des calculs de résistance pourront être légèrement minorés puisque les imperfections (nœuds, fissures, mauvaise orientation des fibres...) sont ici quasiment éliminées. Des voiliers récents ont utilisé ce type d'espar (plein ou creux) comme le Sinagot de J.-J. Herbulot gréé en cat-boat. Plusieurs dispositions dans les plis du bois peuvent être employées, certaines privilégient une direction où la résistance en flexion du profil sera plus grande (lamelles disposées parallèlement), d'autres au contraire présentent les mêmes caractéristiques dans toutes les directions si on a opté pour des lamelles radiales taillées en forme de coins et serrées par des colliers (voir croquis 2). Pour ceux que cette dernière méthode intéresse, ils se reporteront au n° 174 de Loi-

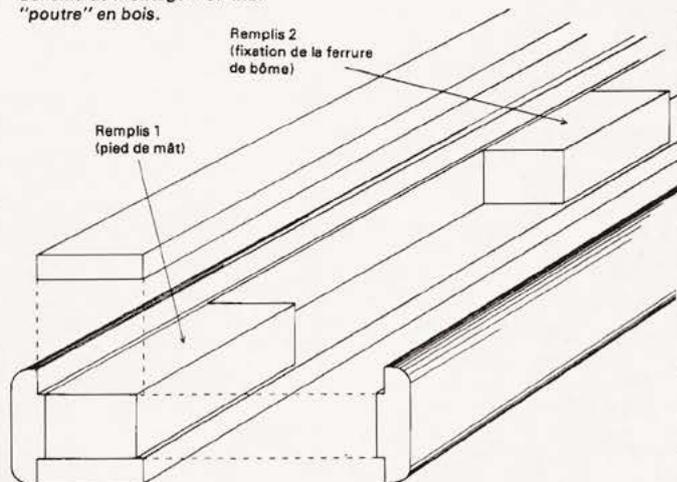
### Croquis 2

Différentes dispositions des lamelles dans les profils en bois lamellé.



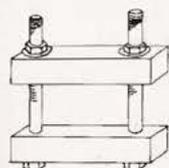
### Croquis 5

Schéma de montage d'un mât "poutre" en bois.

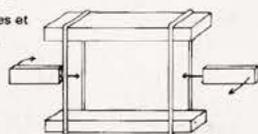


### Croquis 3

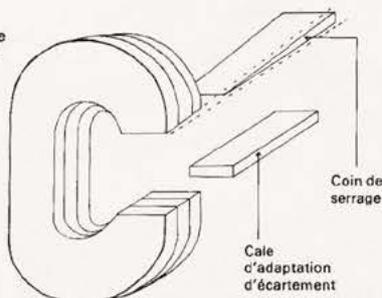
Rappel de quelques moyens de serrage économiques à la portée de l'amateur.



A) Par tiges filetées et écrous-rondelles.



B) Par torsion des cordes.



C) 2 ou 3 grands "C" découpés dans des chutes de C.-P. et collés. Le coin de serrage, enfoncé en force, doit s'adapter au biseau de la branche supérieure.

### Croquis 4

Profil en bois évidé

Ce type de mât procure un gain de poids linéaire mais la fixation de l'accastillage doit être prévue dès le départ pour bien positionner les remplis.

sirs Nautiques où Jean-Louis Couderc vous raconte la construction d'un mât de jonque selon cette méthode.

Quelle que soit la disposition des lamelles employée, la difficulté pour l'amateur sera d'obtenir un bon collage sur de telles longueurs. Sachant qu'il convient d'utiliser trois ou quatre serre-joints par mètre de collage, un rapide calcul montre tout de suite la disproportion de leur nombre avec l'outillage courant d'un amateur. Des moyens de serrages simples et efficaces sont cependant assez faciles à réaliser de façon économique, surtout quand on connaît les facultés d'adaptation de notre « homo-amateurus-constructus ».

Le croquis 3 vous en montre quelques-uns dont les schémas sont déjà passés dans les colonnes de votre revue favorite.

Les lamelles, rabotées et préparées, sont donc encollées, soigneusement placées et légèrement clouées (pointes inox) pour éviter le glissement lors de la mise sous presse. Toutes ces opérations demanderont un certain temps, surtout si l'on opère seul, aussi le choix de la colle aura son importance puisqu'il conditionnera le temps de prise. Les colles les plus employées sont la résorcine et la P.P.U. Cette dernière offre l'avantage d'une polymérisation lente, ce qui laisse le temps de souffler ou de boire une bière.

### 3 PROFILS CREUX : LES PLUS REPANDUS

Ce sont les mâts en bois que l'on rencontre le plus souvent. Schématiquement, il s'agit de deux demi-cylindres évidés et collés. Malgré le gain de poids que cela procure, l'épaisseur des parois ne peut être diminuée inconsidérément vu la cohésion des fibres du bois. Il semble que les meilleurs chantiers n'aient pu descendre en-dessous de 20 mm et la plupart des réalisations présentent des parois de 25 mm au minimum.

Comme dans le cas du bois massif, le problème sera de trouver un madrier qui fasse la longueur du mât d'un seul tenant. L'idéal étant de travailler le bois à moins de 15 % d'humidité, ce ne sera pas chose facile à se procurer (ni à transporter !). Le mieux est ensuite de faire scier ce madrier en deux sur toute sa longueur par un menuisier disposant d'une scie à ruban précise. Par la même occasion, on lui fera dégaucher et raboter les deux pièces de bois ainsi obtenues. Attention toutefois, avant de pratiquer ces opérations, repérez bien (par marquage) les deux faces de sciage de manière à pouvoir par la suite les retourner tête-bêche, ce qui annulera en grande partie les tensions internes du bois.

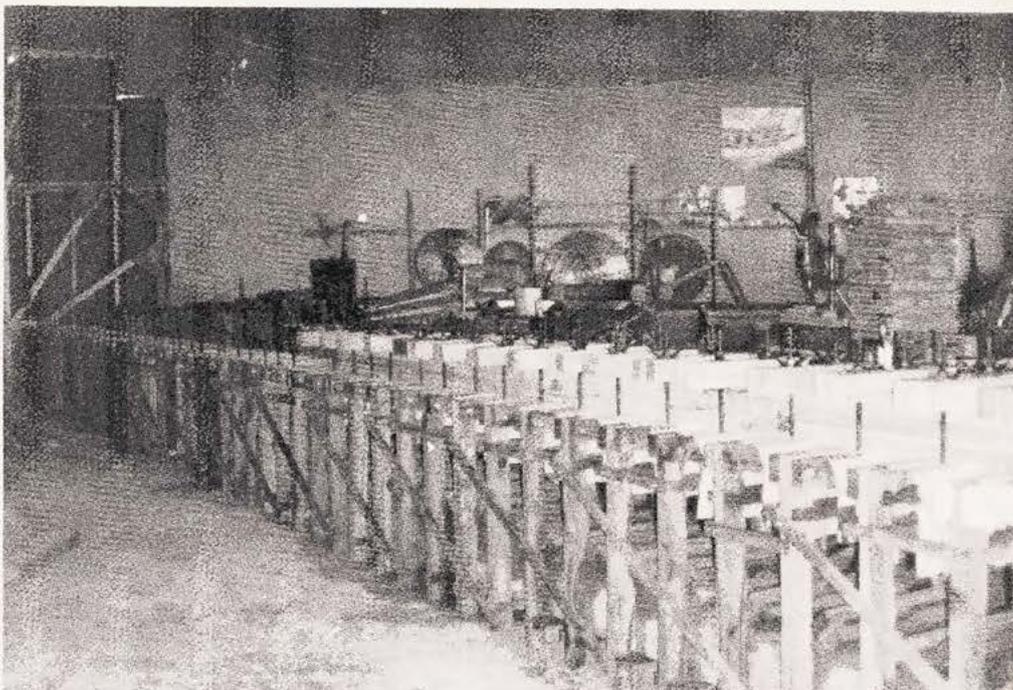


Photo 6 : Marbre utilisé par l'Atelier du Bois Collé pour la fabrication de mât en lamellé jusqu'à 18 m (ici collage d'une bôme).

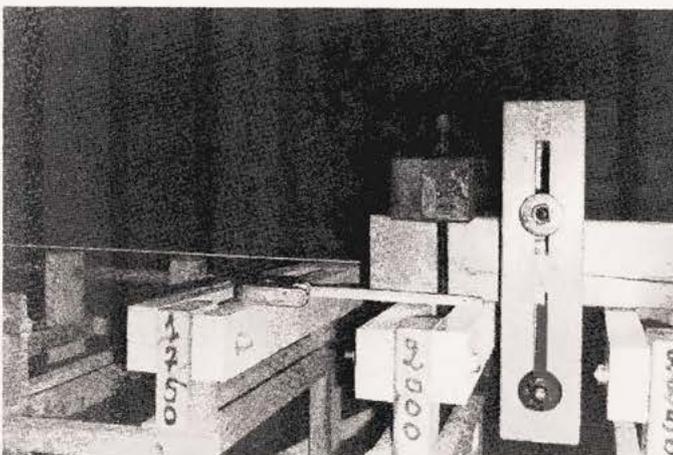


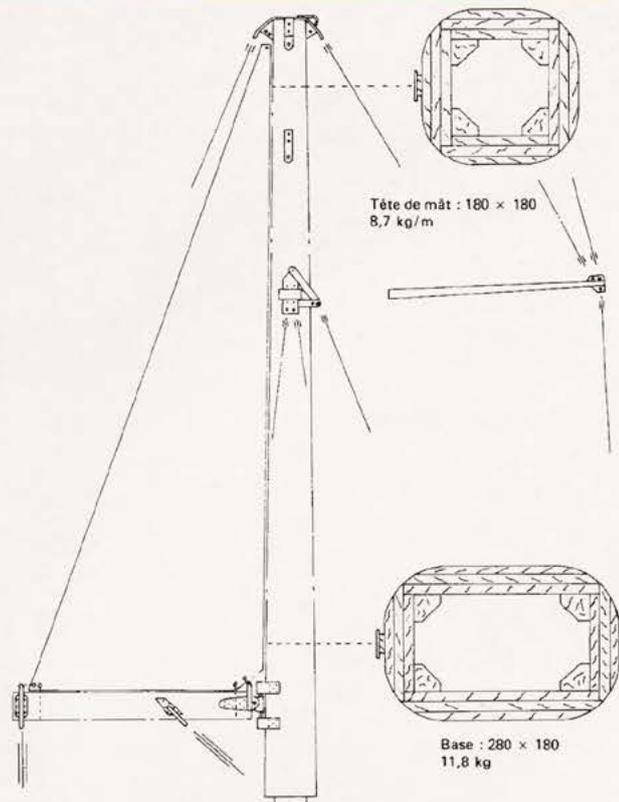
Photo 8 : La sangle à poncer : un outil bien pratique pour la finition des profils en bois.  
(Photo "Atelier du Bois Collé").



Photo 7 : Moyens de serrage simples mais puissants. Disposés tous les 25 cm, ils prennent appui sur les bâts du marbre (en ce qui concerne le serrage vertical).  
Photos "Atelier du Bois Collé".

Commence ensuite l'opération délicate de l'évidement. Si l'on ne peut disposer d'une toupie équipée d'un fer demi-rond, on utilisera un rabot à fer et semelle arrondis (on est souvent oblique de le fabriquer soi-même). Les extrémités de l'évidement devront être façonnées à la gouge. Bien sûr, on aura pris soin de déterminer et de marquer les différents remplis à laisser pour la fixation de l'accastillage (pied et tête de mât, ferrure de bôme, ancrage des haubans, etc.). Ce travail délicat réclame une certaine habileté et un tour de main que tout le monde n'a pas. Comme dans beaucoup de tâches qu'il entreprend, l'amateur disposera des qualités requises lorsqu'il aura terminé son travail... L'évidement de la demi-gorge de ralingue de grand-voile demandera la même attention avec, en prime, une méticulosité encore plus grande. Aussi, le remplacera-t-on souvent par la pose d'un rail pour coulisseaux une fois le mât terminé, malgré le poids supplémentaire que cela engendre.

Les deux demi-profilés étant achetés intérieurement, on les assemblera par vis (au niveau des remplis) pour un dernier contrôle. Après collage et assemblage, ces vis seront remises en place avant de procéder au serrage, ceci pour éviter les glissements. Ce n'est pas



**Croquis 9** : Mât réalisé en lamellé creux (15 m).

On notera le renforcement des angles et la variation de la section et des cotes qui privilégie l'inertie « antéro-postérieure » dans le bas du mât. (Plan "Atelier du Bois Collé").

pour autant qu'il faudra négliger de surveiller la rectitude de l'ensemble lors de la « montée en pression » du serrage. En effet, celui-ci peut provoquer des déformations qu'il faut à tout prix éviter car elles risqueraient d'être définitives.

Le plus dur est fait et la finition extérieure présente beaucoup moins de difficultés. Le rabotage sera bien simplifié par l'utilisation de gabarits de contrôle et par le traçage des chanfreins au trusquin (voir croquis 4). J.-J. Herbulot consacre un chapitre de son livre « Des bateaux pour tous » à la réalisation de tels mâts mais il faut bien reconnaître que cette construction, sans être inabordable, n'est pas à la portée du premier amateur venu. Celui-ci ne dispose pas toujours de l'outillage nécessaire pour éviter une gorge régulièrement sur une aussi grande longueur. Il lui sera également difficile d'obtenir un ajustage parfait des deux demi-profilés. Il convient pourtant de soigner ce dernier point car les surfaces de collage sont assez restreintes.

En général, les amateurs qui succombent au charme de cette construction sont ceux qui ont choisi le bois comme matériau de construction de leur bateau et celui-ci n'a donc plus beaucoup de secrets pour eux. Les constructeurs moins

avertis qui demeurent cependant partisans du profil en bois se rabattent souvent sur une variante de ce système que l'on pourrait appeler le mât poutre en planches collées (voir croquis 5). Ici, les cales des remplis, en plus du rôle qu'elles vont jouer au moment de la fixation de l'accastillage, facilitent le montage des différentes faces.

Avec ces deux méthodes, on obtient des profils beaucoup plus légers et donc plus performants qu'avec le bois massif. Malgré cela, force est de constater que l'avantage reste au mât en alliage moins lourd d'environ 20 %. Des comparaisons ont pu être effectuées sur des séries comme le Muscadet qui fut successivement équipé de mâts en bois puis en alliage.

Les essences les plus adaptées à ces espars sont les Spruces Sitka ou Silver originaires du Canada, ce sont aussi malheureusement les plus rares et on les remplacera souvent par le hemloc, plus facile à trouver. On voit aussi quelques réalisations en pin d'Orégon. Il n'est pas rare de rencontrer ces espars sur des voiliers d'une trentaine d'années qui en sont toujours à leur mât d'origine, preuve de la longévité de ce matériau à la condition qu'il soit bien entretenu et bien stocké. Mais comme le dit un quatrièmement célèbre :

« Le temps aux plus belles choses  
Se plaît à faire un affront... ».

Il conviendra donc de prendre certaines précautions pour éviter le noircissement puis le pourrissement du bois. Le vernissage régulier sera donc de rigueur. De même, posé en porte à faux sur des supports trop peu nombreux ou mal alignés, ce type de profil pourra subir une déformation qui risque d'être permanente.

Les drisses qui sont là encore extérieures, provoquent un fardage non négligeable et on aura tout intérêt à instaurer la mixité textile-câble d'acier. Ce dernier qui, en navigation, reste seul le long du mât est en effet d'un diamètre inférieur au polyester pré-étiré ou au kevlar de plus en plus à la mode.

#### 4 LE BOIS LAMELLE CREUX

C'est la dernière génération des mâts en bois, sans doute leur forme la plus élaborée et en tout cas celle qui tire le meilleur parti des qualités de bois actuellement disponibles sur le marché. Dans le domaine de la lamellé, les recherches ont été menées dans plusieurs directions. Un chantier écossais, Mac Gruer and C. de Clynder, avait même mis au point une méthode de fabrication par enroulement en spirale et collage d'une feuille de spruce. Ce système n'a pas eu le succès escompté et a été abandonné à cause de la complexité de l'opération, de la longueur et de la fragilité de la feuille de bois et finalement du coût assez élevé de ces productions, ce dernier point ne pardonnant pas dans cette contrée du Royaume-Uni ! Une méthode plus carthésienne, plus « carrée » aussi, a vu le jour récemment en France et semble plus à même d'intéresser les amateurs de par son prix de revient relativement économique (même en passant par un chantier) et par sa technologie. L'Atelier du Bois Collé (47310 Sérignac) est l'un des rares fabricants à utiliser cette technique et a bien voulu apporter son concours à cette étude.

La méthode reprend le principe du mât poutre mais en améliorant nettement l'homogénéité de l'ensemble et plus particulièrement des planches composant les quatre faces. En effet, à part dans les petites dimensions, il est pratiquement impossible de les réaliser d'un seul tenant, compte tenu des longueurs de bois disponibles dans le commerce. Le constructeur devra donc trouver une solution pour raccorder les différents tronçons. Le scarf (assemblage en biais) est sans doute la plus valable mais il n'est pas facile à réaliser par l'amateur. Dans la méthode développée par ce chantier, l'assemblage est réalisé

en collant et compressant les extrémités des lattes relativement fines (environ 7 mm). Chaque face étant constituée d'un « emplage » de trois lattes, on s'arrange bien sûr pour décaler les raccords, ce qui évite les points faibles.

Les lamelles sont ensuite assemblées sur un marbre (voir photo 6) qui permet de réaliser des mâts de 18 mètres en associant une parfaite planéité à des moyens de serrage puissants (voir photo 7). Les angles internes du profil sont renforcés par des « lattes-cornières », ce qui permet d'affiner les côtes extérieures du profil, une fois celui-ci entièrement assemblé, sans diminuer outrageusement les épaisseurs dans les angles rabotés. Comme dans le cas des profils creux en bois massif, la finition extérieure consiste à raboter les quatre arêtes et à poncer l'ensemble en vue de le rendre plus aérodynamique. L'Atelier du Bois Collé utilise un rabot électrique portatif muni d'un guide d'angle pour la première opération. L'amateur devra quand même avoir une certaine habitude de cet outil pour l'utiliser surtout lorsqu'on arrive aux cotes minimales car on a vite « mangé » 1 ou 2 mm en trop ! Pour le ponçage, opération longue et fastidieuse s'il en est, il sera bien facilité par l'emploi d'une longue sangle à poncer (voir photo 8).

Le bois utilisé ici est un résineux rouge de Finlande connu sous la dénomination L.R.G. chez les importateurs de bois. Il offre des qualités intéressantes : pratiquement pas de nœuds, ou alors assez petits, faible densité : 0,49 à 10 % d'humidité, longues fibres et peu de résine, ce qui permet un collage à la résorcine sans préparation. Le croquis 9 vous montre deux coupes d'un mât de 15 mètres de long prévu pour un voilier acier de 12 mètres. Le poids linéaire ainsi obtenu est de 11,8 kg à la base mais de seulement 8,7 kg en tête, ce qui semble tout à fait honorable pour un mât de croiseur. En effet, bien qu'un peu plus lourd qu'un profil alu, son centre de gravité sera situé plus bas grâce à la diminution progressive des cotes en tête de mât. Ce qui en définitive donnera à peu près le même résultat sur la stabilité.

Nous voici parvenus au terme de notre promenade dans la forêt des profils en bois. Le prochain volet abordera un matériau plus récent puisqu'il s'agira des fibres stratifiées. Nous passerons également à un domaine plus technique puisque nous entrerons dans le monde des calculs, mais que les poètes et les littéraires se rassurent, le schéma directeur adopté pour calculer un profil restera simple (sans pour autant être simpliste).

**Max WOLFER**

A suivre

# PSYCHANALYSE DU «MAT» ET DU «SURMAT»

3<sup>e</sup> Volet - Suite des n° 181 à 183

## Mât en fibre Le nouvel espar

Après avoir étudié dans les n° 181-182-183 les fabrications de profils plutôt conventionnels en alliage puis en bois, nous allons cette fois aborder un matériau encore inhabituel pour cette utilisation : la fibre stratifiée. Depuis une bonne décennie, ce type d'espar a fait une apparition d'abord timide dans certaines séries de dériveurs et plus récemment quelques grands « multipattes » de courses transocéaniques se sont équipés de ces profils dont au départ, on ne savait ce qu'il fallait redouter le plus : la trop grande souplesse ou simplement le manque de références.

Dernièrement pourtant, le mât en fibre a commencé de gagner ses galons dans quelques grandes courses. Ainsi, Yves Parlier, dans la dernière mini-transat, 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. Est-ce le matériau miracle ? Les amateurs peuvent-ils raisonnablement l'employer dans la construction d'un profil ? Nous répondrons à ces questions au travers de l'expérience que l'un d'eux nous a très aimablement communiquée. Nous profiterons de l'occasion pour essayer de débroussailler la « jungle » de calculs devant laquelle se trouve l'amateur qui envisage la construction de son mât.

### I LE PROJET : ECONOMIE OU EXERCICE DE STYLE ?

Lors d'une visite au chantier Brussels Yachts, j'avais été intrigué par cette longue perche couchée le long d'une coque de Samba 36 en cours de finition. Ça avait la forme de l'alu, la dureté de l'alu, mais ce n'était pas de l'alu...

« C'est de la fibre stratifiée ! » me dit une voix en bleu de travail. Je venais de pénétrer dans le jardin secret de M. Beeckman, le concepteur-calculateur-construc-teur de ce mât inédit. Certes, l'absence d'entretien et les arguments d'économie qu'il m'exposait avaient dû être pour quelque chose dans la germination du projet, mais au fil de l'entretien, on sentait bien que la passion de concevoir entièrement son bateau avait entraîné cet amateur dans une recherche qui s'était vite transformée en exercice de style pour compositeur en « résine et fibre majeur ». La passion entraînant la raison, l'étude avait été menée dans le but « de développer une méthode de fabrication accessible à peu de frais et permettant de construire un mât ne nécessitant aucun entretien ».

### II LES CALCULS : COMMENT CHIFFRER UNE THEORIE ?

Les calculs représentent la première phase de la démarche du constructeur d'un mât. Il lui faut connaître exactement les limites qu'il ne devra pas franchir, les normes qu'il devra observer pour obte-

nir un profil répondant à ses besoins et surtout à ceux de sa coque car c'est en grande partie « elle » qui commande. En partie seulement car le concepteur a quand même son mot à dire et l'organisation du calcul va s'établir selon deux directions initiales qui vont se rejoindre pour aboutir à la conception finale. Des caractéristiques du bateau découlera le moment de redressement, point de départ des données numériques ; après sa « transformation » en traction sur les cadènes et l'affectation de coefficients de sécurité, nous obtiendrons la charge supportée par le mât. Connaissant les caractéristiques du matériau employé (nous verrons tout à l'heure le problème que posent les fibres stratifiées à ce niveau), on déterminera la section et l'inertie. Nous rejoignons ici la deuxième branche du calcul qui, elle, prend racine dans le choix du type de gréement. Celui-ci entraînera la division du profil en un nombre de tronçons donnés de dimensions déterminées.

Ces deux axes doivent donc concorder et se rejoindre lors de la vérification de la résistance au flambage. Un schéma directeur permettra d'y voir plus clair :

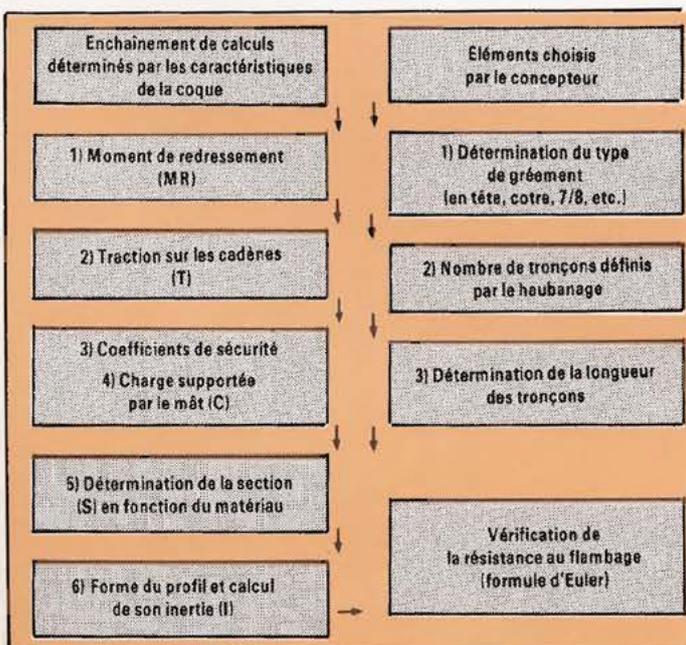
Ce n'est certes pas la seule démarche possible. Dans le cas présent par exemple, le constructeur était parti d'une autre notion : le module de flexion (rapport de l'inertie par la distance de la fibre la plus éloignée au centre de gravité du profil). Cette donnée lui a servi de base de départ mais finalement pour arriver aux mêmes conclusions. On peut aussi décider de déterminer les longueurs libres des différents tronçons en fonction de la résistance au flambage ; le concepteur sera alors moins libre dans le choix de son gréement. On peut encore donner la priorité à l'inertie dans le cas où l'on veut absolument un profil très léger. En fait, ce qui est important, c'est que toutes ces données doivent concorder dans un ensemble cohérent car ne l'oublions pas, un mât forme un tout qui doit s'intégrer harmonieusement avec le voilier. L'enchaînement de calculs que j'ai retenu répond à plusieurs exigences :

- les données de base sont disponibles à partir du plan ou facilement calculables,

- les notions entrant en jeu présentent un caractère concret (traction, section, inertie...),

- la simplicité des formules doit également être la plus grande possible (tous les candidats concepteurs n'ont pas forcément une formation scientifique).

Nous nous en tiendrons donc à cette méthode simple et nous allons reprendre maintenant chaque étape une par une et définir ses différents niveaux.



## 1<sup>o</sup> Le moment de redressement de la coque :

On peut se demander ce que viennent faire les caractéristiques de la coque dans le calcul du mât. Et bien lorsqu'un bateau gîte sous l'action du vent dans la voilure, il atteint une position d'équilibre lorsque la force qui le fait gîter transmise par le mât et les câbles du gréement devient égale au couple de redressement. Nous allons donc prendre ce dernier, plus facile à évaluer, comme donnée de base.

En ce qui concerne la conception d'un profil, on retient généralement deux angles de gîte : 15° et 30° pour le calcul du moment de redressement. On comprend bien que la valeur du moment va augmenter avec cet angle, ceci dans le cas d'un monocoque et si l'on ne dépasse pas l'angle de stabilité maximale qui se situe généralement autour de 60°. Il est de loin préférable d'effectuer les calculs d'espars à partir de l'angle de 30°. Les architectes donnent les deux valeurs de ce moment de redressement (pour 15 et 30°) ou mieux vous communiquent la courbe de stabilité de la coque sur laquelle il est facile de les lire. Dans le cas de plans personnels ou de transformation d'un bateau dont on ne dispose pas du dossier technique, sachez qu'on obtient cette donnée en multipliant le déplacement appliqué au centre de carène, par la distance du centre de carène au centre de gravité du voilier. Nous nous engageons là dans le domaine des calculs de carènes qui nous éloignent singulièrement de notre sujet, aussi, pour ceux qui désirent approfondir leurs connaissances en la matière, on ne saurait trop recommander la lecture des Hors Série Loisirs Nautiques « *Connaissance de l'architecture et de la construction navale n°1* » et « *Connaissance du tracé des carènes n°8* ». Ils en donnent une méthode de calcul à la portée de tout un chacun et constituent la Bible ou même le Coran pour tout ce qui concerne l'accouchement sans douleur de ces « êtres » mathématiques que sont les métacentres, centres de poussée, poussée d'Archimède... Mais on s'égare, quittons la carène et refaisons surface pour retrouver notre mât. Pour le Samba 36 de notre constructeur, la valeur du moment de redressement à 30° de gîte est de  $50.10^3$  Nm (Newton mètre) = MR.

## 2<sup>o</sup> Traction sur les cadènes et charge supportée par le mât :

Ici, l'expérience reprend ses droits et nous voyons apparaître des coefficients tout à fait empiriques mais qui ont au moins l'avantage de simplifier la vie des concepteurs et d'avoir été vérifiés. La traction (T)

sur les cadènes s'obtient avec la formule :

$$T = \frac{MR \times 1,5}{\text{distance cadène - pied de mât}}$$

Dans le cas présent, on obtient :

$$\frac{50.10^3 \times 1,5}{1,4 \times 1,8} = 41,6 \text{ à } 53,5.10^3 \text{ N}$$

(une cadène à l'intérieur des passavants, l'autre à l'extérieur).

La charge (C) supportée par le mât s'obtient en multipliant cette valeur par 1,85 = C = T x 1,85 ici C = 77 à 99.10<sup>3</sup> N

On pourra remarquer que dans le cas du Samba 36 de cet amateur, la valeur du coefficient 1,85 pourrait être diminuée. En effet, celui-ci tient compte d'une traction standard de l'étai et du pataras, or ici, les étais sont conçus par le propriétaire de la manière suivante : ils sont creux, tournants, d'un seul tenant et possèdent donc une inertie ou une rigidité propre, ils demanderont donc une traction moindre pour raidir le bord d'attaque. Toutefois, le coefficient sera conservé « pour la paix de l'esprit ».

## 3<sup>o</sup> Détermination de la section :

La charge que devra supporter le profil a été déterminée à une valeur de 99.10<sup>3</sup> N. Si on laisse tomber Newton et sa pomme, cela correspond à une charge de 10 tonnes (en arrondissant). En se référant au tableau paru dans le premier volet et qui nous indiquait les charges de rupture spécifiques des matériaux principaux, on constate que le stratifié verre offre une résistance de 13 kg par mm<sup>2</sup>. Cette charge de rupture est la valeur maximale de la résistance du composite, ce n'est pas celle qui sera retenue pour les calculs car cela supposerait qu'on utilise ce matériau jusqu'à sa dernière limite (la rupture). Aussi ferons-nous appel à la notion de charge de travail mais avant de la déterminer, il convient de se souvenir du matériau employé : le stratifié, et d'en faire la critique.

Ses qualités mécaniques sont intéressantes mais elles dépendent de plusieurs facteurs éminemment importants :

### a) les produits employés :

Les fibres tout d'abord, puisque ce sont elles qui vont définir près de 90 % des qualités mécaniques qui nous préoccupent. Les principales fibres utilisées dans ce domaine sont le verre et le carbone qui, vu son module d'élasticité exceptionnel (13.000 kg/mm<sup>2</sup>), apportera une raideur d'autant plus importante qu'on l'utilisera en fibres unidirectionnelles. Au passage, rappelons aussi qu'il possède une résis-

tance à la fatigue elle aussi exceptionnelle, ce qui garantira les qualités mécaniques du mât à long terme. Le procédé de tissage des fibres est lui aussi déterminant pour le résultat final. Intuitivement, on comprend bien que seules les fibres longitudinales qui courent d'un bout à l'autre du mât vont être véritablement efficaces. Les fibres transversales ne sont là que pour une commodité de mise en œuvre mais n'apportent aucune résistance supplémentaire.

Le choix des résines quant à lui se fera en fonction des fibres utilisées. La chimie moderne nous offre une quantité considérable de ces produits et si l'on ne retient que celles qui ont trouvé une application courante dans le domaine de la plaine, nous citerons les résines époxy, vinylester et époxy. Chacune de ces trois familles recouvre de nombreux sujets souvent identifiés par des matricules et présentant des qualités différentes. On comprend le trouble de l'amateur hésitant entre toutes ces possibilités. Dans le cas présent, c'est la résine vinylester Déralane 470-36 (distribuée par Dow Chemical Europe) qui a été associée à la fibre de verre et une résine époxy pour le carbone (SP system).

### b) les conditions de mise en œuvre :

Pour les deux premiers éléments que nous venons d'examiner (fibre et résine), les fournisseurs vous communiquent des valeurs précises qui sont celles du tableau ; mais ces données sont le plus souvent établies à partir d'éprouvettes de laboratoires qui représentent des échantillons « haute performance » qui seront peut être assez éloignés du produit que vous, vous serez capable d'élaborer. C'est un peu la même chose en sport : ce n'est pas parce que Thierry Vigneron saute 6 m avec sa perche que tous les Français vont en faire autant, même s'ils disposent du même matériel ! Voyons donc cela de plus près. Les conditions de mise en œuvre dépendent de l'habileté du constructeur et de ses conditions de travail. Première qualité demandée donc, savoir stratifier en utilisant une quantité de résine minimum pour imprégner soigneusement le maximum de fibre. En effet, pour obtenir un composite performant, on doit arriver à des pourcentages de verre de l'ordre de 50 %. Même si l'on utilise exclusivement des rowings plutôt que des mâts plus « gourmands », il faut avoir une certaine habitude de l'ébullage manuel pour y parvenir. Encore faut-il, pour profiter pleinement des qualités des différents constituants (fibres + résine) que la stratification s'opère dans les conditions adéquates de température et

d'humidité préconisées par le fabricant.

Tout cela fait que chacun devra décider en toute objectivité de son coefficient de sécurité, coefficient qui appliqué à la charge de rupture, lui donnera la charge de travail de son stratifié. Ici, le constructeur a choisi le rapport 1/5,5, c'est-à-dire qu'au lieu de 13 kg/mm<sup>2</sup> prévu initialement on tablera seulement sur 2,3 kg/mm<sup>2</sup> soit 230 kg/cm<sup>2</sup>. Cela peut paraître une marge de sécurité un peu trop prudente mais il faut savoir qu'elle est couramment admise et même inférieure à celle qui est réclamée en matière de travaux publics par exemple (pont, grue, etc.).

Pour conclure cette longue parenthèse, je reprendrai les propres termes de notre collaborateur : « La tension admissible est laissée au libre arbitre du concepteur en fonction du risque (il est moins dangereux de fabriquer une bibliothèque design qu'une pale d'hélicoptère ou un câble d'ascenseur !). J'ai donc choisi une marge de sécurité importante, préférant viser un poids égal (à un profil alu) et de meilleures caractéristiques plutôt qu'un poids inférieur à caractéristiques égales, ces dernières étant sujettes à un grand nombre d'aléas ».

On peut donc maintenant calculer la section S du profil :

$$S = \frac{C}{\text{charge de travail ou tension admissible}}$$
$$S = \frac{10.000}{230} = 44 \text{ cm}^2$$

## 4<sup>o</sup> L'inertie du profil :

Ces 44 cm<sup>2</sup>, le constructeur va tout mettre en œuvre pour les utiliser le plus efficacement possible. Dans le premier volet, nous avions défini cette notion d'inertie, aussi, passons directement à son calcul : on obtient le moment d'inertie d'une section par rapport à un axe en multipliant la surface de cette section par le carré de sa distance à l'axe. Dans le cas de notre mât profilé, cette distance varie pour pratiquement tous les points de cette surface courbe (voir croquis 1). Aussi en est-on réduit à la découper en petites surfaces élémentaires de 1 cm<sup>2</sup> et à calculer pour chacune d'elles son moment d'inertie. La somme de tous ces petits moments vous donnera le moment d'inertie de la section. Sans jeu de mots, un bon « moment » vous sera nécessaire pour effectuer ce calcul mais pour peu qu'on ait pris la peine de dessiner la section sur papier millimétré (mesure des surfaces et des distances plus faciles), on obtiendra un résultat plus précis qu'avec les formules d'approximation spécifiques à chaque figure géométrique simple comme le rectangle, le cercle ou l'ellipse (voir croquis 2). Dans le cas présent, le

constructeur a choisi une épaisseur de paroi d'environ 8 mm, ce qui lui donne un moment d'inertie par rapport à l'axe du bateau de 1.406 cm<sup>4</sup>. L'inertie de cette même section, calculée par rapport à l'axe bâbord-tribord, est encore plus élevée (distance à l'axe plus grande), mais pour les calculs, on retiendra la première par mesure de sécurité. La première « branche » de calculs se termine là et nous allons maintenant reprendre les étapes de la seconde, qui, il faut bien le reconnaître, est moins rébarbative puisque les mathématiques cèdent le pas aux intentions du navigateur.

**5° Détermination du type de gréement, du nombre de tronçons, du profil et de leur longueur.**

Sur le premier point, les avis ne manquent pas et les défenseurs de tel type de gréement (en tête, 7/8, 9/10, etc.) ne sont jamais à court d'argument pour défendre leur création. Là n'est pas notre sujet et nous nous contenterons de suivre notre guide-constructeur dans sa démarche :

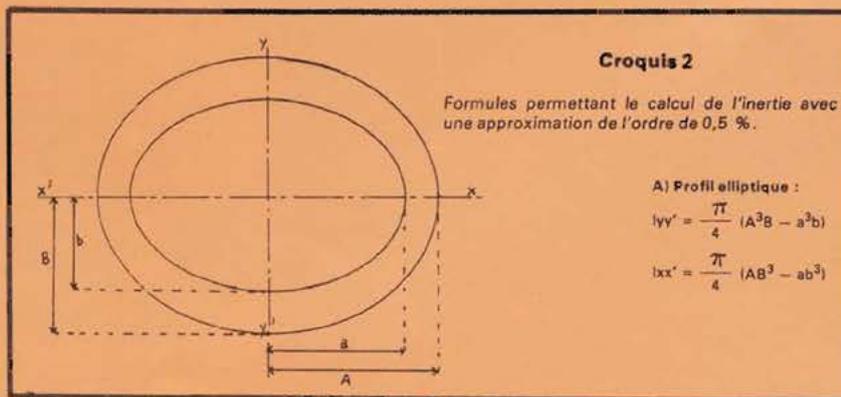
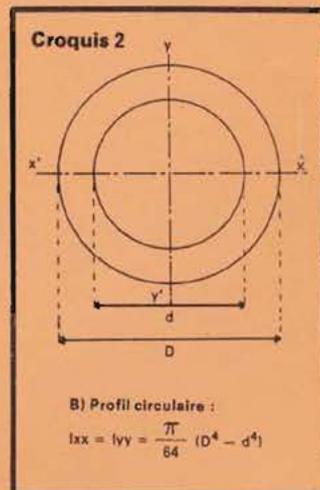
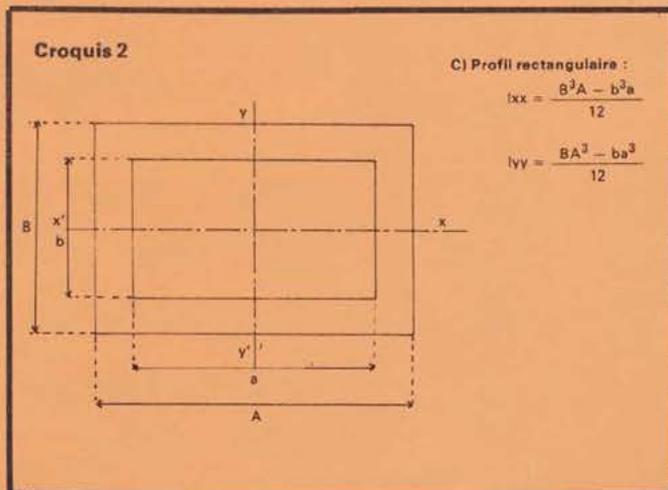
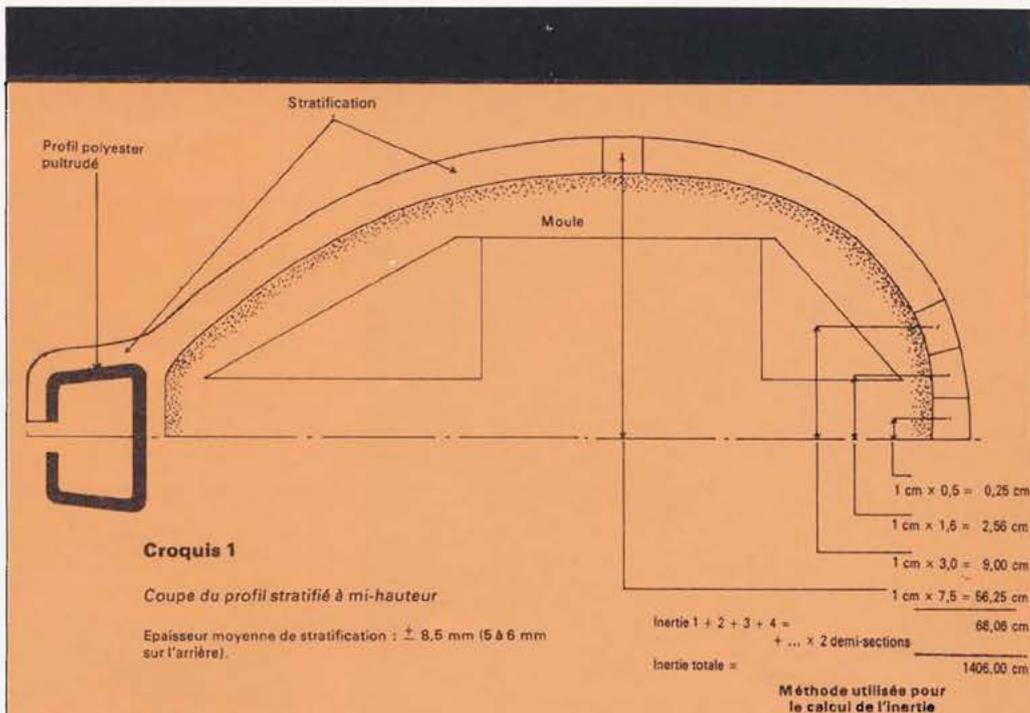
« Pour ma part, j'ai opté pour une voilure de cotre 7/8 ou plutôt 8/9 avec trinquette à grand allongement. Les points de drisse sont ainsi plus proches les uns des autres et dégagent la tête de mât sur environ 1,50 m. Dès la première prise de ris, les bastaques relativement hautes peuvent rester fixes. De toutes manières, la tête de mât est renforcée par des fibres unidirectionnelles qui constituent la potence de pataras. Le gréement latéral peut donc être surbaissé et avec lui le centre de gravité. L'efficacité de ce haubanage est ainsi accrue sur la partie travaillante du mât lorsque le vent forcé. Les cotes sont les suivantes :

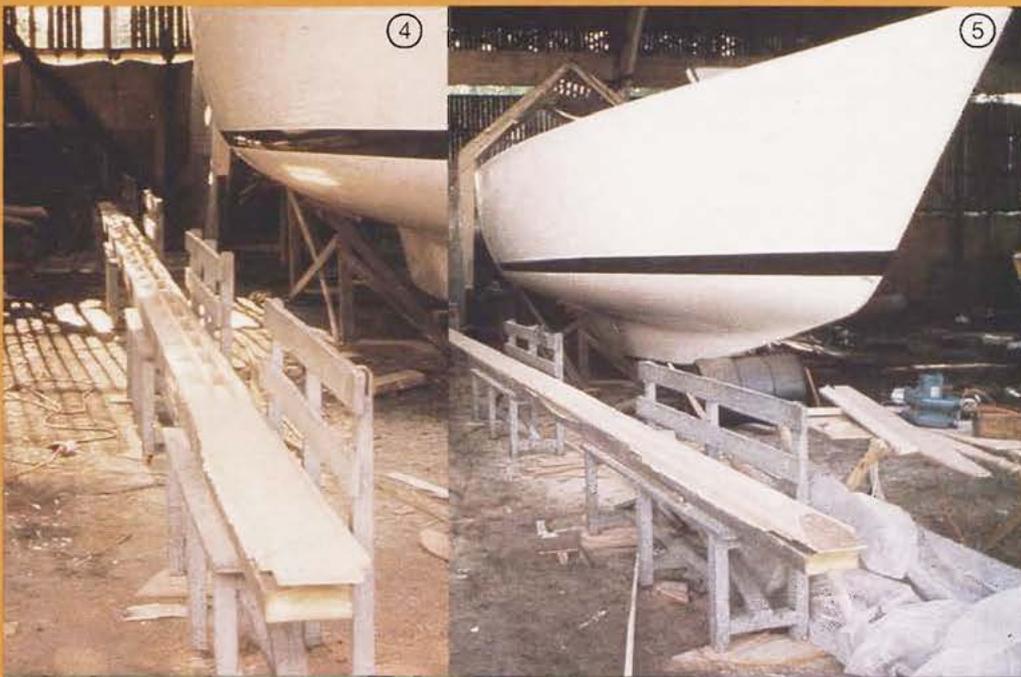
- hauteur du mât : 14,20 m ;
- hauteur de l'ancrage des galhaubans : 12,60 m ;
- hauteur des barres de flèches supérieures : 8,20 m ;
- hauteur des barres de flèches inférieures : 4,10 m (ces dernières sont aussi proches que possible du centre de poussée vélique) ».

La longueur libre (L) des différents tronçons est donc de 4,10 m. Il nous reste donc à vérifier que cette longueur est compatible avec la charge supportée par le profil. On remarquera que dans le cas plus général où l'on n'a pas d'exigences particulières concernant le type de gréement, la démarche sera plutôt inverse de celle-ci, les longueurs libres seront déterminées à partir de la charge. Il suffit pour cela d'inverser la formule qui va suivre.

Suite et fin au prochain numéro.

**Max WOLFER**





## PSYCHANALYSE DU «MAT» ET DU «SURMAT»

# Mât en fibre

## Le nouvel espar

4<sup>e</sup> Volet  
Suite des numéros  
181 à 184

### 6<sup>o</sup> Résistance au flambage : donnez-nous d'Euler !

Pour vérifier cette qualité ô combien importante pour un mât, on utilise la formule de ce mathématicien :

$$C = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

C : charge supportée par le mât (en N)

E : module d'élasticité du matériau, voir tableau volet 1 (en N/cm<sup>2</sup>)

Photos du haut, de gauche à droite :

4 Construction du moule : montage des nervures.

5 Habillage de la structure du moule.

13 Collage du profil en polyester pultrudé servant de gorge de ralingue.

Les 2 photos du centre :

14 Un four de 14 m, c'est ça la grande cuisine.

9 Ces deux demi-profilés sont assemblés et forment l'âme du mât. Les lèvres d'assemblage ont été coupées entre les rivets pour permettre une première stratification. Après polymérisation, les rivets seront à leur tour supprimés pour compléter cette liaison.

La photo du bas :

15 De l'adresse et aussi de la technique, c'est le "Brussel Yacht Circus" qui vous présente ses funambules.

10 Ci-contre, renfort de barre de flèche avant la pose des fibres unidirectionnelles (Photos Beeckman).

I : inertie du profil (en cm<sup>4</sup>)

L : longueur libre (en cm)

Ici, on obtient donc :

$$\frac{3,1416^2 \times 12.10^5 \text{ N/cm}^2 \times 1406 \text{ cm}^4}{(410 \text{ cm})^2} = 99060 \text{ N}$$

soit 10.097 kg, ce qui correspond à la charge que nous avons définie au 2<sup>o</sup>. Il convient aussi de rappeler qu'à chaque fois que le choix se présentait, c'est la valeur minimale des caractéristiques qui a été choisie. Ce mât qui, pour l'instant est stratifié uniquement en belles équations, va entrer dans sa phase de fabrication et il y a fort à parier qu'à l'issue de celle-ci, les tests de vérification lui trouveront des qualités supérieures mais ne vendons pas la mèche (ou plutôt la fibre) tout de suite !

### III FABRICATION : QUAND L'ÂME ENGENDRE LE CORPS !

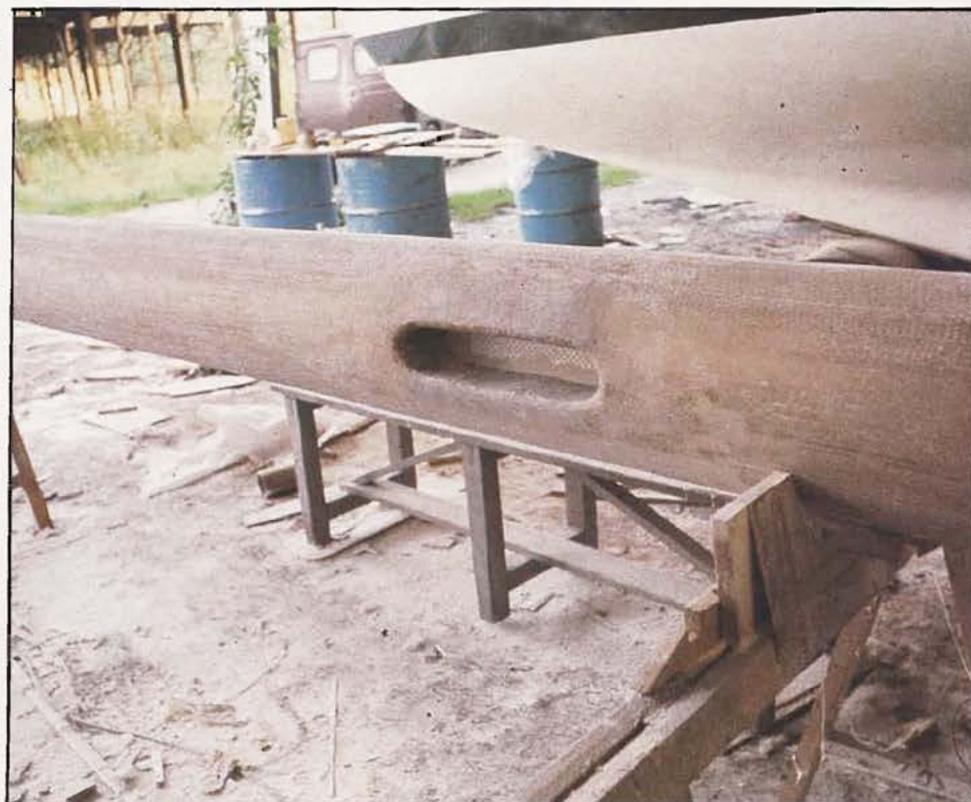
Comme de nombreuses fabrications en stratifié, l'odyssée commence par la confection d'un moule. De manière à obtenir un intérieur de mât lisse et afin que les drisses ne raguent pas sur des surfaces abrasives, c'est la méthode du moule intérieur qui a été retenue. Cela obligera bien sûr en fin de construction 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 fixées sur un plan (voir photos 4 et 5). La mise en forme définitive s'achève par un

rabotage, une enduction à la résine polyester et un ponçage. Ce moule ne représente en fait 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 ABC, vont donner le demi-profil droit et dans l'ordre CBA, le gauche (voir croquis 6).

— La tête de mât est une pièce d'environ 4 m 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 m. Elle est profilée (bord d'attaque, bord de fuite) mais s'affine pour retrouver une section symétrique à chaque extrémité (voir croquis 7).

10



**moteurs**

**équipements moteurs**

**équipements électriques**



équipements  
électriques

**Perkins**  
moteurs pièces

PRESTOLITE équipements électriques, moteurs de relevage pour hors-bords - STANDARD MOTOR PRODUCTS pièces pour allumeurs, démarreurs et alternateurs US-FACET pompes électriques à essence et gazole MC CORD pochette de joints moteurs US-SEALED POWER jeux de segments, pistons, chemises, soupapes etc...

**la fiabilité des pièces d'origine  
stock complet permanent-livrai-  
son immédiate**

**SEA**

Importateur, distributeur,  
concessionnaire  
15, rue de Dautzig 75015 Paris  
Tél.: (1) 45.31.14.98 +  
Télex 200 923 PARTAUK

**SP Systems**™

**Systèmes epoxy pour  
contruction navale**

**Systèmes de stratification,  
collage et revêtement**

Distribué en France par:

**Ets CHARLES**

111, Rue de Stalingrad, 93100 MONTREUIL  
Tel: (1) 48.57.35.92 & (1) 42.87.52.12  
Telex: UPIEX 220429 F

Contreplaqués Marine

Poyomer

Poyotis

— Le pied de mât, long de 2,50 m, présente un léger rétreint dans le bas et se termine en sifflet à 40 cm 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 ou 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 autoporteuse, elle comporte une lèvre d'assemblage sur le pourtour (voir croquis 8).

Cette première moitié démolée, 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 à 30 cm). Ces lèvres sont coupées entre les rivets permettant ainsi une stratification légère (voir photo 9). 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 roving unidirectionnel (Roving « S » unidirectionnel Syncotape TU 270, en bande de 10 cm de large : 80 % de fibres longitudinales), et de trois couches d'Odimat 450/100 (complexe de fibres unidirectionnelles : 450 g/m<sup>2</sup> sur un mât très léger : 100 g/m<sup>2</sup>). Ces tissus sont stratifiés à la résine Vinylester Derakane 470-36. On notera que l'Odimat est assez difficile à mettre en œuvre car il demande une imprégnation et un ébullage laborieux.

L'étape suivante consiste à ménager les logements pour les renforts de barres de flèches. 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 photo 10 et croquis 10 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 flèches 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'arrière du profil et ressortir en pied de mât (voir croquis 11). 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 seront toujours disposées dans le sens de l'effort. Il s'agit de fibres de verre en bobines normalement destinées aux enroulements filamenteux.

La stratification d'ensemble comprend trois couches d'Odimat, dix à onze couches de roving « 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 à quatre couches de fibre de carbone qui se stratifie sans problème 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. Le rail de ralingue constitué d'un profil trapézoïdal en polyester pultrudé (Fiberline Danemark) est collé puis recouvert de six couches de roving « S » plus époxy (voir photo 13). On terminera par la stratification d'une dernière couche de roving « S » à l'époxy de manière qu'au ponçage de finition, le carbone soit protégé.

#### **IV ETUVAGE ET VERIFICATION : DE LA « GRANDE » CUISINE !**

Qui a dit qu'il n'y avait qu'en France que l'on pratiquait la « grande cuisine » ? Notre ami belge a lui aussi des dons dans ce domaine, jugez-en plutôt. Il s'est confectionné un gigantesque four de 14 m de long à l'aide de cartons d'emballage enrobés de vieux tapis et couvertures en tous genres et chauffé (à feu doux !) par des résistances de fours usagers. Inutile de conseiller d'être quand même très vigilant durant le fonctionnement de ce tunnel chauffant ! Enfouissez alors votre plat ou plutôt votre mât pendant 72 heures, thermostat 48° et vous obtiendrez un délicieux composite polymérisé jusqu'à la moëlle ! (voir photo 14). Trêve de plaisanterie, l'étuvage permet de garantir une polymérisation à

**Economisez 25 % sur  
l'achat de vos Hors  
Série et vos dossiers  
+ 30 % sur vos petites  
annonces en vous  
abonnant à Loisirs  
Nautiques.**

100 % de toute la résine mise en œuvre et donc de s'approcher des qualités mécaniques des éprouvettes de laboratoires.

Pour la vérification, vous devrez faire appel à vos dons de funambule comme en témoigne la photo 15. Une fois le profil terminé, l'appuyer à chaque extrémité sur des supports (improvisés de préférence !) et trouver un volontaire pour le tester. Il faut croire que M. Ruitz, le responsable du chantier « Brussels Yachts » ne doutait pas un instant des qualités du profil, puisque ce sont ses 83 kg personnels qu'il avait engagés dans cette expérience qui, malgré les apparences, est cependant des plus sérieuses. En effet, elle nous permet de mesurer la flèche sous une charge donnée et de vérifier la valeur du module d'élasticité (ou module de Young) en employant la formule suivante :

$$F = \frac{P L^3}{48 E I}$$

P : charge appliquée : ici 83 kg  
 F : la flèche provoquée par cette charge : ici 10,5 cm  
 L : représente ici la longueur entre les deux points d'appui, ici L = 1,350 cm  
 I : inertie du profil : 1.406 cm<sup>4</sup>  
 E : module d'élasticité à vérifier

$$E = \frac{P L^3}{48 F I}$$

$$E = \frac{83 \times 1350^3}{48 \times 10,5 \times 1406} = 288.179 \text{ kg/cm}^2$$

soit 2.881 kg/mm<sup>2</sup> au lieu des 1.200 kg/mm<sup>2</sup>, valeur minimale du tableau du volet 1. Cela s'explique en grande partie par la présence des fibres de carbone dans le composite. A partir de là, on peut reconsidérer la résistance au flambage par la formule d'Euler :

$$C = \frac{3,1416^2 \times 288.179 \times 1406}{410^2} = 23.789 \text{ kg}$$

En comparaison des 10 tonnes calculées tout à l'heure, on constate que la marge de sécurité ainsi obtenue est plus que confortable.

## V ET SI C'ETAIT A REFAIRE ?

L'expérience n'est pas encore totalement terminée puisqu'on ne pourra en tirer les conclusions définitives que lorsque ce mât aura navigué mais dès à présent, on peut penser que les qualités intéressantes que nous avons constatées donneront toute satisfaction. Cependant, il y a de fortes chances pour que certains détails demandent à être mis au point, mais ces quelques petits changements ne sont-ils pas le charme de toute construction amateur qui, pour son propriétaire, n'est jamais totalement terminée ! Malgré cela, il est

intéressant de dresser le bilan de cette réalisation et de profiter de l'expérience ainsi acquise.

Les principales difficultés rencontrées ont été d'ordre commercial. Certains composants comme le Roving « S » ou la résine sont difficiles à trouver surtout au détail. D'autres présentent une mise en œuvre délicate alors qu'on ne s'y attendait pas : l'Odimat 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 8.500 F, 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 :

« 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 largement suffisantes pour la croisière, si on se contente d'une masse de verre + vinylester équivalente à celle de l'alu. Par ailleurs, le profil pultrudé (utilisé comme rail de ralingue) n'est pas vraiment souhaitable car il n'est pas prévu pour les coulisseaux ».

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

## VI EN CONCLUSION :

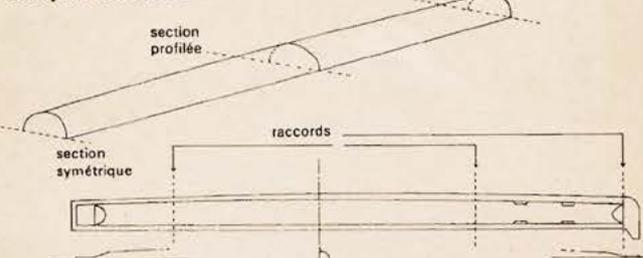
Cette série d'articles vous a montré que la conception d'un mât ne peut être confiée au hasard, qu'elle nécessite certaines précautions et une bonne connaissance tant théorique que pratique du matériau sur lequel on va travailler. Vous avez pu vous apercevoir aussi qu'avec un peu de méthode et d'ingéniosité, il était tout à fait possible à un amateur de produire un profil aux caractéristiques mécaniques tout à fait comparables à celles des productions industrielles. Celles-ci sont choisies massivement car il faut bien reconnaître que le problème du mât se pose surtout en fin de construction et qu'à ce moment, l'énergie fait souvent défaut ! Cependant, rien n'empêche d'y penser avant et d'élaborer le profil pendant un moment creux car en s'y prenant bien, cela demande du temps mais finalement peu d'argent.

Alors à vos rabots, pinceaux et autres rouleaux à ébuller et faites-vous part de vos expériences !

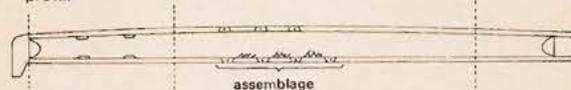
Max WOLFER

Photos et dessins de l'auteur

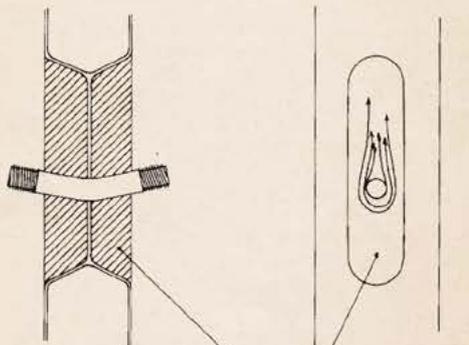
Croquis 7 : Partie centrale



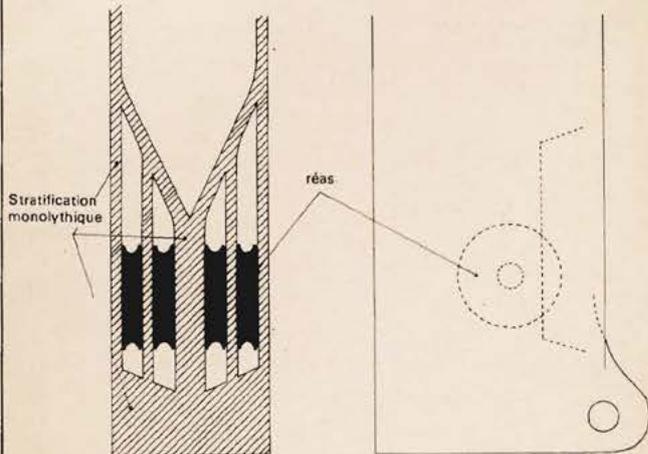
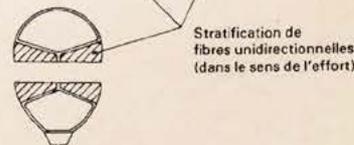
Croquis 6 : Stratification élémentaire du premier demi-profil.



Croquis 8 : Moulage du deuxième demi-profil après inversion des extrémités du moule.



Croquis 10 bis : Structure des renforts de barre de flèche.



Croquis 11 : Pied de mât