

## Chapitre 6b

Le gréement de jonque à panneaux cambrés

### Le mât hybride

Ce chapitre traite d'un type de mât dont la partie basse est un tube d'aluminium et la partie haute est fabriquée en bois. Comme le *Chapitre 6*, qui traite des mâts en bois, ce chapitre est un guide pratique, basé sur mon expérience limitée sur deux bateaux ainsi que l'étude d'un certain nombre de dessins de bateaux. Je ne revendique pas de tout connaître, mais je me permets cependant d'écrire sur le sujet dans la mesure où mes mâts fonctionnent bien sur mes bateaux.

Le défi consiste à arriver à augmenter ou diminuer en taille à partir de bateaux connus et d'essayer de développer des règles utiles et générales pour trouver les efforts subits par le mât. Pour calculer la résistance du mât, soit en bois, soit en aluminium, c'est assez facile, juste des mathématiques classiques. La partie difficile consiste à définir le processus qui permettrait de décider de la résistance que doit avoir un mât pour être adapté à un bateau donné.

**Note : Je me suis principalement focalisé sur les petits voiliers, prévus pour être grésés en sloop. Avec deux mâts ou plus, je pense qu'il faudrait repenser les facteurs d'effort de chacun des mâts. De plus, comme on va le voir, il y a des limites naturelles de dimensions pour les mâts hybrides.**

### Quels sont les avantages et les inconvénients des mâts entièrement en bois ?

J'ai trouvé que les mâts en bois fonctionnent bien mais sont limités :

- Un mât court de 6 à 7 m de haut, avec un diamètre de 100 mm peut être fabriqué facilement et rapidement à partir de planches choisies avec soin, directement à la scierie. Je me suis fait faire ainsi un mât de 5,3 m de long qui est juste protégé avec du vernis polyuréthane à deux composants. Cela marche très bien. Dans cette gamme de taille, un mât tout en spruce aurait ma préférence.
- Cependant si vous voulez faire un mât de plus de 7m de haut, il va vous falloir probablement le construire à partir de lattes, qui devront avoir été scarffées soigneusement pour quelles soient suffisamment longues. Cela a un coût important en terme de travail, de temps, d'outils et de compétences. Vous devrez également disposer d'un atelier pendant un temps assez long. L'alternative, décrite dans le chapitre 6, un mât plein ou creux d'un seul tenant, demande aussi du travail et, si vous partez d'un tronc d'arbre brut, il faut compter six mois de séchage.

### Introduction au mât hybride en aluminium-bois

Après avoir lu l'histoire de la construction d'un mât hybride pour son Raven 26 *Fantail*, par Annie Hill, j'ai adapté sa méthode, avec succès, d'abord sur mon 6.5m *Frøken Sørensen de 6,5m* en 2013, puis ensuite sur mon Marieholm IF, *Ingeborg* de 7,9m en 2016.



Lundsvågen, 20130530. Emboitement à blanc de 0,4m de la section supérieure de 1,6m en bois dans un tube de 6m de long, de 100mm de diamètre ayant une paroi de 4 mm.

### Avantages

Ce type de mât présente les avantages suivants :

- Le tube d'aluminium de la partie basse est disponible, en standard, en 5m ou 6m de long. Ils n'ont pas besoin d'être retravaillés. On peut acheter des tubes avec des alliages trempés, donc plus résistants.  
La poutre de la partie haute se trouve facilement dans les scieries, dans la mesure où sa longueur est généralement inférieure à 6m.
- Un mât hybride est nettement plus léger qu'un mât tout en bois.
- Le diamètre d'un mât hybride est d'environ 70 à 90% de celui d'un mât en bois, ce qui diminue d'autant sa prise au vent.
- Les matériaux, tant pour la partie haute que pour la partie basse peuvent être transportés sur la galerie de la plupart des voitures. C'est un argument intéressant si l'on peut assembler le mât à proximité du bateau. La facilité logistique peut être l'argument décisif pour commencer un projet.

### Inconvénients

Un mât hybride a aussi des limites :

- Les tubes en aluminium de la bonne taille et de bonne qualité ne sont pas disponibles partout. Il peut y avoir un échantillonnage limité chez le fournisseur obligeant à des compromis sur les dimensions.
- Le mât ne peut pas être trop grand sinon la jonction bois-aluminium devient un point faible (voir plus loin).

### Conclusion préliminaire

Les mâts hybrides aluminium-bois sont bien adaptés à des mâts entre 7m et 11m. Dans ces dimensions, c'est la méthode la plus rapide et la plus facile de construire un mât léger et fiable.

### Décider de la résistance de la partie basse d'un mât hybride

Vous allez rapidement vous rendre compte que la partie facile de la construction d'un mât hybride est la fabrication elle-même, alors que la partie difficile consiste à décider de sa résistance puis, ensuite, jusqu'à un certain point, de calculer les résistances des tubes disponibles.

### La première étape : trouver ou estimer le moment de redressement du bateau

C'est l'élément de base pour trouver la résistance requise du mât.

La formule du moment de redressement  $M_r$ , pour n'importe quel bateau est :

$$M_r = \text{Displacement} \times L_r$$

où  $L_r$  est la longueur du bras de redressement du bateau gité.

Souvent, le chantier publie une courbe de redressement du bateau et, dans ce cas, il est facile de trouver la valeur maximale de  $M_r$ . Cependant, si le  $L_r$  n'est pas disponible, il faut en trouver une valeur approchée. Ayant vérifié de nombreuses données disponibles sur les bateaux, il semble que le  $L_r$  varie entre 1/4 et 1/6 du maître bau du bateau (B).

Un bateau étroit avec un rapport de lest élevé, un « couloir lesté », à un bras de levier de presque 1/4 du maître bau soit :

$$\text{Righting arm} = L_r = \text{entre } 0.22B \text{ et } 0.25$$

A l'autre bout du spectre, si le bateau est large avec un rapport de lest faible, un peu comme un dériveur, un « plat à barbe », le bras de levier peut se trouver entre 1/5,5 et 1/6 du maître bau, soit :

$$\text{Righting arm} = L_r = \text{entre } 0.18B \text{ et } 0.167B$$

Pour simplifier, voici, en résumé la méthode pour estimer le bras de levier d'une coque :

1. Les bateaux faiblement ou non lestés : prendre  $L_r$  quelque part entre 17 et 19% du maître bau.
2. Les bateaux « normalement » lestés de 30% à 40% du déplacement : prendre  $L_r$  quelque part entre 19 et 21% du maître bau.
3. Les bateaux qui ont un rapport de lest supérieur à 45% : prendre  $L_r$  quelque part entre 21 et 24% du maître bau (les bateaux extrêmes peuvent être atteindre 25%)

En suivant ces règles grossières, les marges d'erreurs de vos estimations du bras de levier,  $L_r$ , et donc du moment de redressement,  $M_r$ , ne devraient pas excéder +/- 20%.

Exemple :

Si je prends *Ingeborg* comme exemple. voici comment j'ai calculé puis construit le mât hybride.

Données de base :

LOA= 7.9m,

Maître bau= 2.2m,

Déplacement = 2150kg,

Ballast= 1250kg (58%).

En suivant mes recommandations, j'ai placé *Ingeborg* en catégorie 3 et donc estimé le bras de levier maximum à 22% du maître bau de 2.2m, soit :

$$L_r \text{ max} = 2.2m \times 0.22 = \mathbf{0.48m}$$

Le moment de redressement maximum est donc :

$$M_r \text{ max} = \text{Disp} \times L_r = 2150\text{kg} \times 0.48m = \mathbf{1032kpm}$$

La seconde étape : décider du facteur de sécurité de la résistance du mât

De toute évidence, on ne peut pas laisser la résistance du mât à la rupture être égale au  $M_{r \text{ max}}$ , moment maximal de redressement du bateau. Je suis arrivé, en m'appuyant encore sur l'expérience des mâts en bois précédents, à un ensemble de règles grossières :

- Pour de la croisière côtière, sans faire de la régate de malade, je vise une résistance de rupture :

$$M_b \geq 2.0 \times M_r \text{ max}$$

- Pour de la croisière au grand large, ou pour la régate, je recommande de prendre une résistance plus forte :

$$M_b \geq 2.5 \text{ ou même jusque'à de } 3.0 \times M_r \text{ max}$$

En gardant en mémoire le moment de redressement de l'Indebord de  $M_{r \max} = 1032 \text{kpm}$ , la résistance du mât à l'étambrai devrait être entre ( $M_{b \text{ safe}} =$ ) 2064kpm (côtier) et 2580-3096kpm (hauturier ou régates).

La troisième étape : trouver le tube d'aluminium ayant une résistance adaptée

Dans de nombreux cas les fournisseurs peuvent vous fournir le moment de rupture ou plutôt le moment de flexion (yield moment),  $M_b$ , du tube d'aluminium. Si ce n'est pas le cas, on doit au moins vous donner les dimensions exactes ainsi que les caractéristiques de l'alliage utilisé. Je m'excuse de devoir faire un peu de mathématiques, mais avant cela, il y a une autre question à poser : *gros diamètre et parois fines ou petit diamètre et parois épaisses ?*

Les deux peuvent produire des mâts suffisamment solides, mais, à un moment, si l'on continue à réduire le diamètre, le mât va devenir trop flexible et trop lourd pour être utilisable. Le gréement de jonque semble assez tolérant à la flexibilité du mât, mais je suis devenu moins tolérant, après avoir beaucoup navigué avec des mâts en spruce bien raides.

En fait, de s'attaquer à cette question de déflexion de la tête de mât scientifiquement demande un tas de mesures et de calculs. C'est au dessus de mes capacités et de mes besoins. A la place, j'ai étudié ce qui était utilisé et je l'ai comparé aux mâts en spruce auxquels je suis habitué. J'en ai là encore déduit une règle empirique :

*l'épaisseur de la paroi du tube d'alliage d'aluminium de la partie basse devrait être quelque part entre 2,5% et 5% du diamètre extérieur. Par ailleurs, une épaisseur minimale de 2,5mm doit être respectée pour éviter les enfoncements et les bosses.*

Cette règle semble produire des d'échantillonnages raisonnables avec des parois qui ne sont ni trop épaisses et lourdes, ni trop fines.

Voici la formule du moment maximum de flexion d'un tube cylindrique :

$$M_b = \delta * \pi / 32 * (D^4 - d^4) / D$$

Où :

- $\delta [N/mm^2]$  est la force de rupture du matériau.
- $D [mm]$  est le diamètre extérieur du tube.
- $d [mm]$  est le diamètre intérieur du tube, i.e. D moins deux fois l'épaisseurs de parois.
- $1N = 1 \text{ Newton} = 1/9.807 \text{kp}$  (kilopond)

Exemple du tube de la partie basse du mât de mon IF, *Ingeborg*.

Après avoir vérifié 2 ou 3 tubes disponibles sur le catalogue du fournisseur, j'ai trouvé celui-ci et j'en ai calculé sa résistance.

Dimensions, 6m x 150mm x 5mm, 6082-T6 alloy (avec Sigma,  $(\delta) = 250 \text{N/mm}^2$ ).

A partir de la formule ci-dessus (et en faisant attention à la cohérence des unités) la force de rupture trouvé est :

$$M_{b \text{ yield}} = 250 \text{ N/mm}^2 * [ \pi / 32 * ( 150 [mm]^4 - 140 [mm]^4 ) / 150 (mm) ] = 19976929 \text{ Nmm} = \mathbf{19977 \text{ Nm}}$$

En divisant par 9.807(g) pour obtenir le résultat en t kilopond-meter, *kpm*, le moment maximum sera de :

$$M_{b \text{ yield}} = 2037 \text{ kpm}$$

Ceci est légèrement inférieur au  $2 \times M_{r \text{ max}}$ , que j'avais trouvé pour *Ingeborg* (2064kpm). J'ai décidé de l'utiliser dans la mesure où le tube disponible au dessus était trop costaud.

Note : le mât de 100 x 4mm sur le *Frøken Sørensen* de 740kg, et celui de 150 x 5mm sur le *Ingeborg* de 2150kg, s'avèrent efficaces. Ils ne sont ni trop flexibles ni trop raides et lourds. Le mât de *Ingeborg*, qui fait environ 53kg, ne représente que 2.5% du déplacement, ce qui, je pense, est très bien. Une valeur en dessous de 3% est considérée comme bonne.)

Comme je l'ai dit précédemment, on n'a pas besoin ni de souder ni d'usiner ces tubes de partie basse des mâts. Cela permet d'économiser des coûts d'usinage et d'éviter d'affaiblir les alliages trempés.

### La partie supérieure en bois

La résistance utile du bois est bien moindre que celle de l'aluminium. On doit donc vérifier que la liaison entre les deux parties ne sera pas un point faible.

J'ai recherché et trouvé que la résistance du spruce était :

$$\sigma_{\text{spruce}} (\delta) = 44.8 \text{ N/mm}^2.$$

En utilisant cette valeur dans la même formule que celle que nous avons utilisée pour le tube d'aluminium, la résistance d'une section de 200mm de spruce creux avec une épaisseur de parois de 1/5 du diamètre serait de :

$$M_{b \text{ 20cm}} = 3122 \text{ kpm}$$

Voici une formule générique qui permet de trouver simplement la résistance de mâts en spruce à condition de respecter une épaisseur de parois 1/5 du diamètre D :

$$M_b = 3122 \text{ kpm} \times (D \div 200 \text{ mm})^3$$

La résistance de la partie haute du mât de *Ingeborg* de 140mm de diamètre à la jonction sera donc, si creux et un peu plus si plein, de :

$$M_{b(140\text{mm})} = 3122 \text{ kpm} * (140\text{mm}/200\text{mm})^3 = 1071 \text{ kpm}$$

La question devient : quel est le moment de flexion au niveau de la jonction ?

J'ai choisi d'utiliser le scénario du pire avec toute la force de la voile sur le mât concentrée en tête de mât. Dans ce cas, le moment de flexion sera nul en tête de mât et va augmenter linéairement en descendant le long du mât jusqu'à ce que l'on trouve la valeur maximale calculée de 2037kpm à l'étambrai. Comme la section du haut fait 3,7m, la hauteur de mât au dessus du pont LAP 8,7m (longueur totale du mât 9,7m), le moment de flexion au niveau de la jonction entre les sections est de :

$$\begin{aligned} M_{b(\text{jonction})} &= M_b (\text{à l'étambrai}) * \text{longueur partie haute} / \text{longueur du mât au dessus de l'étambrai} \\ &= 2037 \text{ kpm} * 3,7\text{m} / 8,7\text{m} = 877 \text{ kpm} \end{aligned}$$

En d'autres termes, la charge maximale 877kpm est inférieure à la résistance calculée (1071kpm) de la section du haut en bois de 14cm de diamètre. C'est bon !

Emboitement : quelle doit être la longueur de la section en bois du haut qui est insérée dans la section du bas ?

Je traite la section du haut comme si elle était un mât indépendant. Donc l'emboitement doit, pour cette raison, être au moins de 10% de la hauteur de la section haute au dessus de la jonction. En plus, pour limiter les efforts à la jonction, je souhaite également que l'emboitement fasse au moins 4 à 5 fois le diamètre intérieur de la section du bas. *L'emboitement de la section du haut dans la section du bas devrait faire au moins 4 (mieux 5) fois le diamètre intérieur de la section du bas ET au moins 10% de la hauteur de la section du haut au dessus de la jonction.*

Lorsque le mât est agrandi

Ce que l'on peut déduire, ou pas, des calculs ci-dessus, c'est que si l'on veut faire des mâts hybrides de plus en plus haut, alors que la partie basse du mât n'est pas disponible en longueur supérieure à 6m, la partie haute va devenir une partie de plus en plus longue de l'ensemble. Selon la formule ci-dessus, les efforts à la jonction vont augmenter. Les efforts à la jonction ne doivent pas excéder la résistance du bois. De plus, en allongeant trop le mât, il devient difficile de trouver des planches de bois suffisamment longues pour fabriquer la partie haute sans avoir besoin de faire des scarfs. Simplement dit, ces mâts hybrides sont limités à une longueur d'environ 11m.

Note : Maintenant, j'ai trouvé que le LAP maximum est de 10,54m quand le Mb à la jonction dépasse 1071kpm. La partie haute est de 5.54m ; vérifiez vous même en utilisant la formule ci-dessus. Ne pas oublier qu'un mètre de la partie basse du mât de Ingeborg se trouve sous l'étambrai.