

1

LA CONCEPTION ET L'ARCHITECTURE NAVALE EN COMPOSITE DANS L'INDUSTRIE DE LA PLAISANCE

G. DOLTO¹

Résumé - Cette communication donne un bref portrait de la conception à l'aide de matériaux composites dans l'industrie du bateau de plaisance. Le dimensionnement des voiliers et des bateaux à moteur est décrit et les propriétés des matériaux sont discutées du point de vue de l'architecte naval.

Mots clés : conception, dimensionnement, échantillonnage, bateau de plaisance, propriétés mécaniques.

BREF PORTRAIT DE L'INDUSTRIE DE LA PLAISANCE

L'industrie de la plaisance est une activité qui évolue d'une forme artisanale, issue de la construction traditionnelle en bois, à une production industrielle ; cette évolution n'a pas été nécessairement de pair avec un développement des bureaux d'étude ou des méthodes de calcul.

Elle possède de nombreuses originalités dont l'une des principales est qu'un bateau de plaisance peut être construit sans plan ni bureau d'études, alors que cela est quasiment impensable dans la plupart des autres industries. Il est en effet courant de construire un bateau avec un moule, quelques schémas d'implantation, de la résine, de la fibre, de l'huile de coude et du savoir-faire.

Cette assertion est volontairement un peu caricaturale, mais proche de la vérité pour nombre de petits chantiers. Il est un fait que la moindre PME de fabrication mécanique possède un bureau d'études de plusieurs personnes, tandis que, dans la plupart des chantiers de plaisance, ce bureau ne comprend que 0 à 5 personnes, rarement plus, et ces personnes s'occupent plus du dessin des balcons ou de problèmes d'approvisionnement que du calcul de l'échantillonnage.

¹ Ingénieur et Architecte Naval (Groupe GRAAL) ; Consultant Technique pour la Fédération des Industries Nautiques (FIN).

On comprend que les méthodes de détermination de l'échantillonnage aient longtemps suivi une évolution plus empirique qu'issue de méthodes d'ingénierie, et que c'est autant la poussée de la législation (normes, règlements nationaux ou internationaux, etc) qu'un désir de rationalisation, d'économie ou d'efficacité qui ont poussé la profession à faire l'effort vers une plus grande rigueur scientifique qui est actuellement en cours.

A la décharge des chantiers, il faut dire que ce travail plus théorique était souvent fait par l'architecte naval et, surtout, que la nécessité d'études longues et compliquées ne se faisait pas sentir. Un chantier, qui avait construit plusieurs dizaines de bateaux de 8 m sans problème structurel notable, extrapolait cet échantillonnage pour faire un bateau de 9 m, **et cette méthode fonctionne !!** Alors, pourquoi payer très cher des études qui diront que l'on peut rajouter un tissu de 235 g, alors que de toute façon on rajoutera un tissu de 500 g car c'est le seul que l'on a en stock.

Ce point met en évidence une vérité que tout concepteur ou législateur devrait écrire en gros caractères au-dessus de son lit et bien graver dans sa tête : **"La meilleure preuve qu'un échantillonnage est satisfaisant est que le bateau remplisse sans problème les tâches que l'on lui demande, et tant pis si c'est inexplicable ou si, d'après les calculs, le bateau aurait dû casser ou couler : la preuve du résultat est là et il n'y a qu'à revoir sa copie pour que les règles "expliquent" la pratique"**.

Il y a, bien entendu, de nombreux bémols à apporter à cette manière de voir, car il faut définir le cahier des charges du bateau et s'assurer ensuite que le bateau a bien rempli sa mission sur toute sa durée de vie prévue, et ceci avec une bonne proportion de calme et de gros temps. Il faut d'ailleurs noter que des bateaux de série modernes, globalement satisfaisants pour une utilisation "normale" de 1000 à 1500 milles par an sur 4 ans, montrent parfois leurs limites quand ils sont utilisés par des clubs comme le Centre Nautique des Glénans où la moyenne d'utilisation annuelle est d'au moins 4000 milles, aux mains de stagiaires maladroits.

LES MOTEURS DU PROGRES

De ce progrès, les moteurs sont les suivants :

- La construction des bateaux de course océanique, monocoques ou multicoques, qui demandent un allègement maximal de la structure, tout en conservant la solidité nécessaire.
- Le boom de la location, aidé par les aspects fiscaux de la loi Pons qui demande des bateaux fiables et faciles à entretenir, confiés à des

locataires dont le niveau technique baisse en raison de l'élargissement de la clientèle.

- La construction en série des multicoques de croisière, qui a été le moteur d'une utilisation massive de structures sandwich autrefois aux superstructures dans la construction des monocoques.

- Les enjeux économiques mondiaux et, surtout, l'avènement du marché commun unique et de sa législation sont un puissant moteur pour une action et une recherche technique commune avec l'aide de la Fédération des Industries Nautiques et souvent l'appui des instances gouvernementales :

* les recherches au sein de la cellule technique du Syndicat des constructeurs de navires ;

* l'élaboration de normes nationales et participation à l'élaboration de normes techniques internationales (ISO ou CEN) ou de décisions techniques qui ont des incidences économiques évidentes ;

* les recherches techniques au sein du "Groupement National Composite" ;

* les décisions techniques aidant à une transition sans heurt de législations nationales à des règles communautaires.

LES METHODES DE MISE EN OEUVRE VUES PAR UN ARCHITECTE

Pendant l'exposé, développement des avantages et inconvénients des diverses méthodes possibles de construction (monolithique, sandwich), des modes de mise en oeuvre et du choix des matériaux (fibres et matrices), selon les critères prix/facilité de mise en oeuvre/poids/performances.

Ces critères varient suivant le type du bateau, son programme et d'autres facteurs qui font que le choix est relativement ouvert et laisse de nombreuses possibilités.

LES METHODES ET REGLES D'ECHANTILLONNAGE

A part celles, empiriques, citées plus haut, on peut recenser diverses méthodes ou règles d'échantillonnage :

LES APPROCHES DU CHARGEMENT : GLOBALES/LOCALES

Il y a actuellement plusieurs approches de l'échantillonnage. Toutes passent, bien entendu par des hypothèses sur le chargement subi par la structure.

Les effets globaux résultant soit du fonctionnement normal du bateau (poussée d'Archimède ou pression dynamique, efforts globaux aérodynamiques et hydrodynamiques et résultantes de ces efforts sur le gréement ou les appendices, efforts dus aux forces gravitationnelles ou inertielles, etc), soit d'autres types d'effort (frottement le long d'un quai ou échouement involontaire, chocs latéraux dans les ports, etc) peuvent être estimés avec une plus ou moins grande précision et cependant de nombreuses incertitudes, dont les principales sont liées à l'état de la mer et aux effets dynamiques qui en découlent.

Une méthode véritablement scientifique consisterait alors à appliquer séparément ou simultanément ces cas de chargement à la structure en utilisant la méthode des éléments finis. A part quelques études ponctuelles, cette approche a surtout mis en évidence que l'échantillonnage résultait de l'enveloppe de tous les cas de chargement et que les incertitudes résultant des suppositions de chargement cités plus se cumulaient et aboutissaient à des échantillonnages qui avaient du mal à se marier à la pratique courante.

C'est, à ma connaissance, principalement sur certains bateaux de course (multicoques surtout) que des approches globales de l'ensemble de la structure ont été faites avec succès. Je pense ici au travail intéressant de M. Souquet (Société Bertin) sur les multicoques dessinés par mes confrères Van Petergher - Lauriot Prevot.

Pour les vedettes un certain nombre de campagnes d'essais ont eu lieu, dont les principales ont été celles de Heller -Jasper pendant la seconde guerre mondiale qui ont bien mis en évidence la répartition de pression dans les fonds des vedettes planantes. On constate des pics de pression très importants sur des petites surfaces, alors que sur des surfaces plus grandes la pression moyenne est écrêtée. Dans un bateau monolithique, les lisses peuvent être échantillonnées pour une pression plus faible que celle du bordé, les membrures et varangues ayant à supporter une pression encore plus faible.

Pour les efforts locaux l'approche consiste à demander que le bordé et ses raidisseurs résistent à une certaine pression théorique avec le facteur de sécurité approprié et une déformation raisonnable. Une épaisseur minimum est souvent demandée pour tenir compte des efforts (ragages, poçonnement, etc) non modélisables par le calcul.

LE PASSAGE DU CHARGEMENT A L'ECHANTILLONNAGE

Là aussi la porte est ouverte à de nombreuses discussions. Il faut d'abord bien comprendre que l'échantillonnage ne dépend pas uniquement du chargement, mais aussi de la manière dont travaille le

matériau - et surtout de la manière dont on suppose qu'il travaille - du facteur de sécurité admissible selon le nombre de cycles de chargement, etc. Comme on supposait traditionnellement que la pression ne varait pas rapidement d'un raidisseur à l'autre, on pouvait penser le bordé encasté entre deux raidisseurs ou encasté sur le raidisseur et appuyé sur le bouchain pour les panneaux proches d'un bouchain vif. Certaines sociétés de classification comme le Lloyd's préfèrent supposer que les encastremets ne sont pas parfaits et que le bordé comme les raidisseurs doivent être considérés comme semi-encastés.

Enfin, maintenant que les ordinateurs nous offrent des moyens de calcul puissants, on en vient à considérer que les panneaux travaillent à la fois en membrane et en flexion, cela était connu de tous temps, mais la complication des calculs correspondants avait contribué à éluder le problème.

On voit donc que l'on est encore loin de l'unanimité sur les modes de calcul.

LES REGLEMENTS DES SOCIETES DE CLASSIFICATION

Diverses sociétés de classification ont émis des règlements, parmi lesquels on peut citer :

- le Bureau Véritas ;
- le Lloyd's Register of Shipping ;
- Det Norske Veritas qui est la seule société faisant intervenir dans son règlement le travail en membrane (pour les bateaux "rapides et légers") ;
- l'ABS (American Bureau of Shipping) ;
- le RINA (Registro Italiano Navale) dont le règlement a force de loi en Italie ;
- le Germanischer Lloyd's.

LE GUIDE IOR/ABS

A la suite des accidents survenus lors de la tempête du Fastnet en 1979 dont certains - très peu - étaient dus à des défaillances de structure, l'IOR a décidé d'édicter des règles d'échantillonnage minimum. Pour ce faire, elle a consulté l'ensemble des architectes navals (parmi lesquels les Américains Sparkman & Stephens et Gary Mull ont été les plus actifs, mais les Français ont apporté une importante contribution) pour connaître leurs méthodes d'échantillonnage. Le canevas finalement adopté a été mis en forme par l'ABS.

Dans ce guide, les panneaux sont considérés comme des plaques encastées et les critères d'échantillonnage sont à la fois un

critère de résistance et un critère de déformation maximale. De mon point de vue, ce guide possède de nombreux avantages par rapport aux autres règlements.

- Les règles sont "transparentes" et le passage des pressions de chargement à l'échantillonnage se comprend facilement et correspond aux formules habituelles de la résistance des matériaux. Nous sommes loin de certains règlements de sociétés de classification qui ressemblent plus à des recettes données sans aucune explication. La culture du secret est une des spécialités des sociétés de classification.

- La pression "vue" par les divers éléments de structure dépend de la dimension du panneau considéré. Une petite surface devra être capable de supporter une pression assez majorée des pics locaux dus au "slamming", tandis qu'un plus grand panneau n'aura à supporter qu'une pression plus faible et débarrassée des surpressions locales.

Cette approche, bien dans l'esprit des constatations faites par Heller-Jasper pour les vedettes, me paraît tout à fait pertinente, elle est un des seuls moyens permettant d'étudier les structures sandwich avec les mêmes outils que pour l'étude des structures en monolithique.

Il ne s'agit cependant que d'un guide à l'usage d'ingénieurs ou de techniciens qui ne rentre pas nécessairement dans tous les détails de la structure mais en donne simplement les grandes lignes. On peut aussi regretter que les autres règles ABS notamment pour les vedettes ne soient pas conçues dans le même esprit : pas de diminution de pression avec la taille du panneau sauf dans les fonds, et surtout pas les mêmes facteurs de sécurité, ce qui rend difficile la comparaison avec les autres règlements ABS.

LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

Cette méthode est certainement prometteuse mais elle présente à priori deux défauts :

- Elle analyse le véritable comportement du matériau (travail flexion + membrane), et elle a donc besoin que le cas de chargement introduit soit bien le cas de chargement réel. Ce cas de chargement réel ne correspond absolument pas aux hypothèses de calcul le plus couramment utilisé (Sociétés de classification ou autres méthodes) qui considèrent que le bordé travaille en plaque. Si l'on applique ces cas de chargement à une structure modélisée, on trouve souvent des épaisseurs requises ridiculement faibles par rapport à la pratique ou au bon sens. Cela veut dire qu'il faut revoir entièrement à la hausse les hypothèses de chargement de départ et jongler avec les divers facteurs intervenants (facteurs de sécurité, flèches admissibles, etc) ; un lourd travail en perspective !

- La modélisation est longue et coûteuse.

Je crois cependant beaucoup à l'utilisation des programmes de calcul, mais je pense qu'ils sont surtout utiles pour modéliser au moins une fois les efforts globaux sur un type de bateau pour pouvoir en extrapoler ensuite les résultats à d'autres bateaux semblables. Pour les efforts locaux, un long travail d'analyse des bateaux existants doit être fait pour bien cerner les pressions et chargements réels, avant de pouvoir utiliser pleinement cette méthode pour les cas courants.

LA FUTURE NORME ISO ET LA POSITION ACTUELLE DE LA FRANCE

Une norme ISO est actuellement à l'étude, le rapporteur en étant Fritz Hertz, le consultant de l'ICOMIA (Fédération internationale des industries nautiques). Cette norme est actuellement très peu avancée pour les vedettes et quasiment pas pour les voiliers.

La tendance actuelle est de tenter de suivre l'esprit du guide IOR/ABS en y apportant les modifications nécessaires. Parmi ces modifications, il y a un certain nombre de détails concernant les sandwichs et il y aura probablement une plus grande variation du champ de pression selon la position sur le bateau. En effet, j'avais effectué pour la FIN une enquête, en 1980, comparant l'échantillonnage proposé par le Lloyd's (il était à l'époque question que le règlement Lloyd's devienne obligatoire dans la CEE), le projet IOR/ABS et les échantillonnages couramment pratiqués par les chantiers français. Il ressortit de cette étude que l'IOR/ABS correspondait assez bien à la pratique française, sauf dans les zones arrières où la pression de calcul devait être sérieusement abaissée. Nous venons avec la FIN de lancer une nouvelle enquête auprès des chantiers afin de confirmer nos impressions et présenter des propositions de modification.

Une autre tendance (c'est la position des Finlandais qui ont fait notamment une campagne de mesure sur un Swan participant à la Whitbread) est de considérer que le bordé ne travaille pas réellement en plaque mais en plaque + membrane ; il conviendrait alors de tenir compte de cet aspect, ce qui compliquerait les calculs car les épaisseurs ne peuvent se déduire qu'après des calculs itératifs.

De toute manière, nous nous efforcerons à ce que la future norme, quelle qu'elle soit, accepte les échantillonnages couramment appliqués par l'industrie française.

LES PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX

A la différence des métaux, les propriétés mécaniques des stratifiés et composites sont très dispersées et dépendent évidemment

de la mise en oeuvre, mais aussi de nombreux autres facteurs : température, hygrométrie, absorption d'eau, etc, sans parler des méthodes d'essai qui font l'objet de discussions serrées !

Les chantiers testent assez rarement les propriétés mécaniques de leurs stratifiés et les architectes en sont souvent réduits à supposer les valeurs des propriétés mécaniques à partir de formules théoriques.

MODELES THEORIQUES

Un certain nombre d'auteurs donnent des moyens de calculer de manière théorique les valeurs du module d'élasticité en traction des composites en fonction de l'empilement des plis et des taux de fibre et de vide dans le stratifié. Les diverses méthodes proposées se recoupent assez bien (voir l'ouvrage de Tsai, le "Pape" de la théorie des composites). Il en va autrement lorsqu'il s'agit de prédire les résistances mécaniques : traction, flexion, cisaillement. Tsai propose les critères de Tsai-Hill ou de Tsai-Wu, sur lesquels d'autres spécialistes semblent émettre des réserves, avec la discussion supplémentaire de savoir si l'on peut dépasser ou non le premier endommagement (la toute première rupture d'un pli) en fonctionnement normal, sans parler des effets de bord et autres joyeusetés !

CAMPAGNES DE TEST ET EVALUATION DE LA VALIDITE DES MODELES THEORIQUES

Les doutes cités ci-dessus doivent être levés par l'acquisition de valeurs fiables de caractéristiques mécaniques des matériaux, faite à partir de tests sur des échantillons - réalisés dans des conditions de chantier et pas en laboratoire - puis la vérification de la validité des modèles théoriques et leur éventuelle adaptation.

Chaque chantier, architecte ou fournisseur de matière première a ses valeurs, mais dans lesquelles les arguments commerciaux l'emportent parfois sur la réalité.

Il est donc éminemment souhaitable d'effectuer - de manière neutre - une campagne de tests de matériaux associant le plus grand nombre possible de partenaires.

C'est ce qui est entrepris en France, et je m'en réjouis, dans le "Projet national Composite Naval" dont Madame Baudin vous parlera plus tard.

REGLES PRATIQUES SIMPLES

En attendant les résultats de cette campagne, j'utilise personnellement pour les cas courants la méthode simple suivante :

- Je calcule les modules E et G par une loi de mélanges, en donnant le taux de fibres en masse ou en volume, le % de mat, de fibres à 0/90 et +/-45°.

- Pour les stratifiés de verre je multiplie le E ainsi obtenu par un "allongement fictif à la rupture" de 1,67% avec du polyester et d'environ 1,7 à 1,8% avec de l'époxy pour obtenir une valeur de la résistance traction/flexion.

C'est une méthode certainement simpliste, mais dont les résultats ne devraient pas s'écarter de la vérité de plus de 10 à 20 %, cet écart peut paraître énorme, mais il suffit de voir la dispersion des valeurs avec la température, le taux de vide, l'humidité, le vieillissement,... ou l'âge du capitaine ! pour s'en contenter, c'est d'ailleurs ce type de méthode qu'utilise le Bureau Veritas.

Pour la fibre de verre un allongement de 1,67 % est bien en deçà des valeurs théoriques, mais il s'agit d'une moyenne entre l'allongement à la rupture de la résine et de celle de la fibre tissée et manipulée.

Pour la fibre de carbone, l'allongement à la rupture de la résine étant beaucoup plus grand que celui de la fibre, c'est cette dernière valeur qui est "dimensionnante", et j'utilise un "allongement fictif à la rupture" de 1,1%.

Pour les valeurs de la résistance au cisaillement je pense que l'on puisse utiliser la même approche en multipliant le module de cisaillement G par un "angle de déformation équivalent" de 2,5%.

L'ECHANTILLONNAGE DANS LA PRATIQUE

En pratique le concepteur de l'échantillonnage ne part pas directement du champ de pression mais procède de manière beaucoup plus empirique. Un prédimensionnement initial est d'abord fait, surtout destiné à voir si les dimensions générales des diverses poutres sont cohérentes avec les efforts globaux (surtout pour les multicoques), et si la philosophie de la structure est saine.

Le concepteur choisit d'abord un bordé qui lui paraît cohérent avec les caractéristiques du bateau (dimensions, déplacement, programme, mise en oeuvre), il détermine ainsi l'épaisseur du bordé pour une construction en monolithique ou les épaisseurs minimum de peau et une estimation de l'épaisseur de l'âme pour un sandwich. C'est seulement après qu'il ajuste la taille et l'écartement des raidisseurs (qui sont très souvent étroitement liés à la disposition des aménagements). Et c'est souvent après ce dimensionnement du bordé raidi que l'on se plonge dans l'analyse de la globalité de la structure : poutres, introduction des efforts dus au gréement, au lest et appendices, aux moteurs, etc.

En guise de conclusion, présentation de quelques exemples concrets d'échantillonnage pour un monocoque ou un multicoque.

GIBBS & COX 1960 : MARINE DESIGN MANUAL for Fibreglas Reinforced Plastics Mc Graw Hill USA.

GIBBS & COX 1960 Design Properties of Marine Grade Fiberglass Laminates.

ABS 1986 Guide for building and classing Offshore Racing Yachts.

ABS 1990 Guide for building and classing Motor pleasure Yachts.

ABS 1986 Guide for building and classing High Speed Craft.

BUREAU VERITAS 1990 Règlement pour la Classification-Certifications des Navires de Plaisance.

DNV (Det Norske Veritas) 1983 Rules for construction and certification of vessels less than 15 metres.

DNV 1991 Rules for construction and certification of High Speed and Light Craft.

LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING Rules and Regulation for the classification of Yachts and Small Craft.

HELLER and JASPER 1960 On the structural design of planing craft RINA Transactions GB.

TSAI and HAHN 1980 Introduction to composite materials Technomic USA.