

## 41

### ELEMENTS SUR LE COMPORTEMENT EXPERIMENTAL ET NUMERIQUE DE LA STRUCTURE D'UN VOILIER DE 7,70m EN COURS DE NAVIGATION

C. BALEY\*, M. CAILLER\*\*

Résumé - Le voilier expérimental "Mesure Z" a été conçu et réalisé pour le compte de la fédération des Industries Nautiques. L'étude a été conduite en collaboration avec le Bureau Veritas, IFREMER et le CEA. Réalisée en matériaux composites, la coque du voilier proche de celle d'un voilier de série a été conçue comme une coque-capteur c'est-à-dire une coque dont la structure et l'échantillonnage permettent d'effectuer des mesures (déformation de coque, accélération, efforts sur le gréement, etc...). L'article présente des éléments sur le voilier de mesure, les matériaux de la coque-capteur et leur échantillonnage, et le comportement de la zone centrale et de la partie avant de la coque en cours de navigation.

mots clés : Voilier, matériau composite, mesure, éléments finis, comportement mécanique, navigation.

### INTRODUCTION

Le voilier expérimental "Mezure Z" a été conçu et réalisé pour le compte de la Fédération des Industries Nautiques. L'étude a été conduite en collaboration avec le Bureau Veritas, le CEA-CESTA et le service des Phares et Balises. Le programme d'étude auquel il était destiné avait pour but d'augmenter le niveau de connaissances sur le comportement des coques de voiliers en cours de navigation.

Ce projet a été suivi et orienté par la Cellule Technique du Syndicat des Constructeurs de Navires dont les membres de cette cellule appartiennent aux différents chantiers de plaisance français.

La première étape a été de choisir un modèle voilier permettant de réaliser une "coque capteur". Pour des raisons de coût et de disponibilité d'outillage, on a retenu une coque de 7,66 m, conçue par les architectes J. Finot, J. Berret et J.Fauroux et non produite en série. La structure de cette coque a été simplifiée par rapport à celles des voiliers de série pour faciliter les mesures.

---

\* INERN - rue Didier Bestin - 56100 Lorient, France

\* ISITEM - Université de Nantes - 44087 Nantes, France

Les principales caractéristiques du voilier sont :

- longueur hors tout : 7,66 m
- longueur à la flottaison : 7 m
- largeur hors tout : 2,85 m
- déplacement : 2,2 tonnes
- tirant d'eau : 1,40 m
- hauteur franc bord : 0,90 m.

La figure 1 présente une coupe longitudinale et une vue de dessus de la coque et de sa structure. La figure 2 présente le plan de voilure. La figure 3 présente une vue en perspective d'une demi-coque permettant ainsi de visualiser la structure. Elles montrent que le bordé est renforcé longitudinalement par deux lisses et transversalement par deux cloisons. Le mât repose sur une épontille (fig 1), la cloison avant étant située devant le mât.

La deuxième étape a consisté à équiper le voilier de nombreux capteurs tels que :

- des jauges de déformation certaines orientées perpendiculairement à l'axe du navire et disposées au centre de chaque panneau de bordé, d'autres orientées suivant l'axe des lisses sur la semelle des lisses à mi-distance entre cloisons.
- des accéléromètres placés à l'étrave et en fond de coque au dessus du lest et orientés dans les trois directions principales du flotteur,
- des capteurs d'efforts placés sur l'étai, le pataras et les haubans.

La connaissance de l'environnement étant indispensable pour l'interprétation des données, d'autres mesures ont été réalisées :

- paramètres de navigation (vitesses du vent et de la coque, orientation du vent par rapport à l'axe du navire, angle de gîte,
- caractéristiques de la houle mesurées à l'aide d'une bouée Datawell installée dans la zone de navigation.

L'étude elle même s'est déroulée en plusieurs phases :

- choix des jauges de déformation après essais sur éprouvettes en stratifié,
- équipement de la coque,
- essais statique pour vérification du fonctionnement du capteur-coque,
- essais en cours de navigation.

Il n'est pas possible de présenter ici l'ensemble des résultats ; nous nous intéressons donc à quelques points remarquables.

## MATERIAUX

La coque est en matériaux composites, résine polyester renforcée par des fibres de verre E. Elle a été réalisée au contact, dans un moule femelle, technique de fabrication la plus utilisée pour les bateaux de plaisance.

La coque comporte trois zones d'échantillonnages différentes entre le livet de pont et la ligne de quille.

- La zone 1 est comprise entre le livet de pont et la lisse supérieure,
- La zone 2 entre la lisse supérieure et la lisse inférieure,
- La zone 3 entre la lisse inférieure et la ligne de quille.

Pour une zone donnée, les empilements de plis stratifiés sont identiques, de l'avant à l'arrière. Le tableau 1 présente les échantillonnages des trois zones. Les épaisseurs théoriques des plis ont été calculées pour des taux volumiques de fibres de 25% pour les mats et de 32% pour les taffetas. Le gel-coat à l'extérieur de la coque est composé d'une résine polyester de type neopentyl glycol transparent. Compte tenu des épaisseurs de stratifié, la coque est translucide, ce qui facilite le positionnement des jauges de déformation placée en un même point (face externe et face interne) de la coque.

Lors de la stratification, les tissus de la coque ont été disposés dans la coque de telle façon que la chaîne soit perpendiculaire à l'axe du navire.

Le pont est à structure sandwich avec pour empilement : 2 mats 300 gr/m<sup>2</sup> - âme en balsa 9,5 mm - 1 mat 300 gr/m<sup>2</sup> - 1 taffetas de 500 gr/m<sup>2</sup>.

Les caractéristiques mécaniques ont été mesurées sur des éléments de stratifié prélevés sur la coque (Ifremer). Parmi ces résultats, on note que des éprouvettes découpées en zone 1 avaient un taux volumique de fibres de 19,7% et une épaisseur moyenne de 4,75 mm, (épaisseur légèrement supérieure à notre valeur théorique).

Le module d'Young moyen en flexion des éprouvettes est 9200 MPa, les éprouvettes étant découpées parallèlement à la trame des taffetas en traction. Le module d'Young moyen de l'empilement est de 10900 MPa et la contrainte de rupture en traction de 148 MPa. Les valeurs du module d'Young théorique ont été déterminées à l'aide des équations proposées par Puck (Manera, 1988). Le module micromécanique théorique d'Young est de 9760 MPa en flexion et de 10500 MPa en traction.

Nous considérons que les différences entre les modules d'Young théoriques et expérimentaux ne sont pas significatives compte tenu des remarques suivantes :

- il y a méconnaissance du taux de fibres précis dans chaque pli composant l'empilement (seul le taux volumique moyen est connu),
- les équations micromécaniques ne donnent que des valeurs approchées,

- nous ne connaissons qu'imparfaitement les caractéristiques mécaniques des fibres et de la matrice.

Les propriétés mécaniques de la "coque-capteur" correspondent à ce qu'il est possible d'attendre d'un tel matériau. (Pour plus d'informations sur les caractéristiques obtenues et leur calcul théorique, (Baley, 1991)).

A titre de comparaison, nous avons calculé les épaisseurs théoriques demandées par l'A.B.S (A.B.S, 1981), en utilisant la valeur expérimentale du module d'Young. Le tableau 2 présente les épaisseurs théoriques calculées en fonction d'un critère de flèche. Dans les équations utilisées, nous tenons compte du coefficient faisant intervenir la courbure de chaque panneau. L'examen du tableau montre que, dans tous les cas, les épaisseurs des panneaux de bordé de la coque-capteur sont inférieures à celles demandées par l'A.B.S

La lisse inférieure de profil "omega" a une hauteur 120 mm et une largeur de semelle de 50 mm, et la lisse supérieure une hauteur de 90 mm et une largeur de 50 mm.

## **VERIFICATION DE LA SENSIBILITE DU CAPTEUR COQUE**

Celle-ci a été réalisée en soumettant la coque à différents chargements statiques, le voilier étant à l'eau. Cela consistait par exemple à mettre le gréement sous tension (Baley, 1991), les efforts et déformations étant enregistrés lors de la mise en charge (mise en charge par paliers avec des variations de chargement très lentes). Une comparaison entre déformations théoriques calculées par une méthode des éléments finis et déformations expérimentales a permis de vérifier que la coque peut remplir son rôle de "mesure" du capteur des sollicitations et des déformations.

## **ELEMENTS SUR LE COMPORTEMENT DE ZONE AVANT DE LA COQUE EN COURS DE NAVIGATION**

Le maillage de la partie avant de la coque est présenté à la figure 4 et la position des jauges de déformation à la figure 5. Le tableau 3 présente :

- les valeurs des déformations subies dans le bordé sous le vent, le voilier navigant par 32 noeuds de vent apparent. Il s'agit de valeurs maximales enregistrées ou d'un choc brutal de la coque heurtant violemment une vague.

- les déformations théoriques obtenues par la méthode des éléments finis. Le chargement étant l'effort de traction dans l'étau, et la pression hydrostatique, en considérant la coque immergée jusqu'au livet de pont (chargement statique). L'examen du tableau montre que les niveaux de déformation restent très faibles et négligeables. L'estimation de la

rupture du matériau correspond à une déformation de 0,0125 (Manera, 1988). Ces déformations ont été mesurées au centre des panneaux et lisses, emplacements qui ne correspondent pas obligatoirement aux emplacements des concentrations de contraintes. Les calculs théoriques ont pour but d'aider à la compréhension des résultats.

Un capteur de pression a été placé sur le bordé à l'avant de la coque (au niveau de la flottaison) par le Bureau Véritas. Cet équipement n'a donné aucun résultat exploitable (Bureau Véritas, 1990).

## **ELEMENTS SUR LE COMPORTEMENT DE LA ZONE CENTRALE DE COQUE EN COURS DE NAVIGATION**

La figure 6 présente les déformations subies par le bordé sous le vent en zone 2 dans la partie centrale de la coque, le bateau navigant au près. Ces résultats ont été obtenus par la méthode des éléments finis. Les déplacements sont amplifiés pour la clarté de la figure. On observe que les panneaux de bordé travaillent en flexion, les déformations provenant du moment de redressement imposé par le lest à la coque. Il est important de noter que, pour cette zone de coque (les panneaux de bordé), c'est le chargement dû au lest qui est dimensionnant alors que les règlements de classification ne tiennent pas compte des pressions d'eau.

## **CONCLUSION**

Le but de cette étude était de disposer d'informations sur le comportement de voiliers en cours de navigation.

"Mesure Z" dont les échantillonnages sont "sous-dimensionnés" par rapport aux données de l'A.B.S (Baley, 1991) navigue sans endommagement depuis quatre ans. Ceci ne signifie pas que de tels règlements de classification conduisent obligatoirement à un "sur-échantillonnage". C'est lorsque le voilier navigue au près que l'on enregistre les sollicitations maximales.

Dans la définition de la structure d'une coque, il est nécessaire de tenir compte de l'ensemble des efforts auxquels elle est soumise au cours de sa vie. Dans le cas de "Mesure Z", ce n'est pas la pression d'eau qui est dimensionnante dans la partie centrale. Les valeurs des déformations maximales enregistrées restent très faibles par rapport au seuil d'endommagement du matériau. Les calculs par éléments finis constituent une aide pour la compréhension du comportement de la coque et nous ont permis de situer les zones de concentration de contraintes et d'évaluer les valeurs des contraintes maximales.

Pour le dimensionnement d'une coque de voilier, il est nécessaire de tenir compte :

- du moment de redressement imposé par le vent,

- des pressions d'impact d'eau possibles pour la coque et le pont,
- des efforts imposé par le gréement,
- des chocs imprévus que peuvent recevoir pont et étrave,
- des efforts d'inertie liés aux mouvements du voilier (tangage, roulis, lacet),
- de la poussée hydrodynamique sur le lest et sur le safran.

- 
- \* (BALEY 1990) C. BALEY . C. CONNAN . M. CAILLER  
Etude du comportement de la coque du voilier expérimental "Mesure Z"  
en navigation - Méthodologie . ATMA 1990
  - \* (BALEY 1991) Thèse de doctorat. Contribution à l'étude du  
comportement mécanique de matériaux composites comportant des  
renforts bidimensionnels et conception d'une structure de voilier en vue  
de mesurer les sollicitations mécaniques en cours de navigation - Ecole  
centrale de Nantes . Octobre 1991
  - \* (BUREAU VERITAS 1990) "Mesure Z" campagne de mesures  
expérimentales.- Dossier RDM 188 039 1990
  - \* (IFREMER 1989) Campagne d'essai sur le bateau Mesure Z  
Rapport N° 89/DIT/EQE.M/R06
  - \* (A.B.S. 1981) American Bureau of Shipping  
Guide for building and classing off shore racing yachts - 1981 New York
  - \* (MANERA 1988) Manera, Massot, Morel, Verchery, Manuel de calcul  
des composites verre - résine-Edition pluralis, Paris 1988

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Nombre de plis	7	8	9
Ordre d'empilement	Gel coat Mat 300 * Taffetas * Mat 300 Taffetas 500 Mat 300 Taffetas 500 Mat 300	Gel coat Mat 300 Taffetas 500 Mat 300 Taffetas 500 Mat 300 Taffetas 500 Mat 300 Mat 300	Gel coat Mat 300 Taffetas 500 Mat 300 Taffetas 500 Mat 300 Taffetas 500 Mat 300 Taffetas 500 Mat 300
Epaisseur théorique de stratifié (mm)	4,35	4,95	5,6

\* les valeurs sont indiquées en  $gr/m^2$

Tableau 1 : Echantillonnage de la coque

	Désignation des panneaux	ABS		Coque capteur
		Epaisseur en fonction des contraintes admissibles	Epaisseur définie par la flèche admissible	Epaisseur théorique
Avant	Zone 1	4,95	5,97	4,35
	Zone 2	5,73	6,80	4,95
	Zone 3	5,22	5,84	5,60
Milieu	Zone 1	5,52	6,81	4,35
	Zone 2	7,14	8,51	4,95
	Zone 3	7,79	9,67	5,60
Arrière	Zone 1	5,70	6,92	4,35
	Zone 2	7,32	8,78	4,95
	Zone 3	7,18	8,50	5,60

Tableau 2 : Epaisseurs théoriques calculées en fonction d'un critère de flèche

		Déformation mesurée $\cdot 10^{-6}$	Déformation théorique $\cdot 10^{-6}$
Zone 1	Jauge externe	- 314	- 394
	Jauge interne	+ 295	+ 369
Zone 2	Jauge externe	- 557	- 1115
	Jauge interne	+ 690	+ 292

Tableau 3 : Comparaison entre déformation expérimentale et théorique.





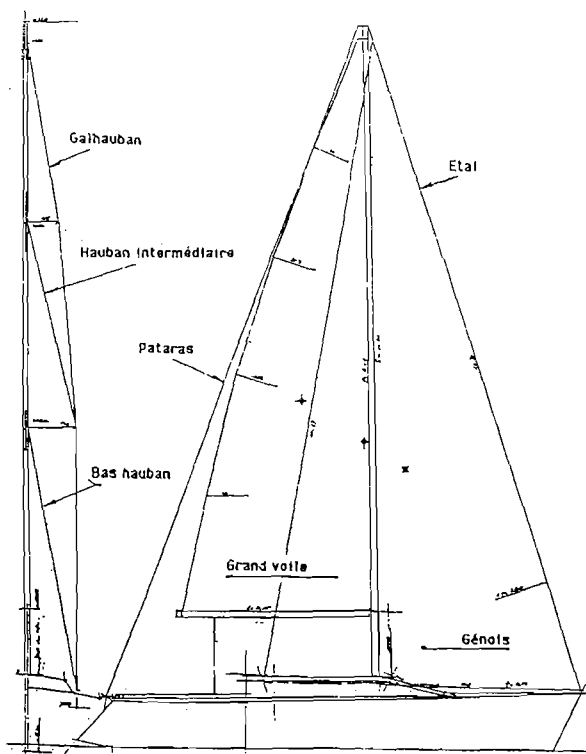


Fig. 2

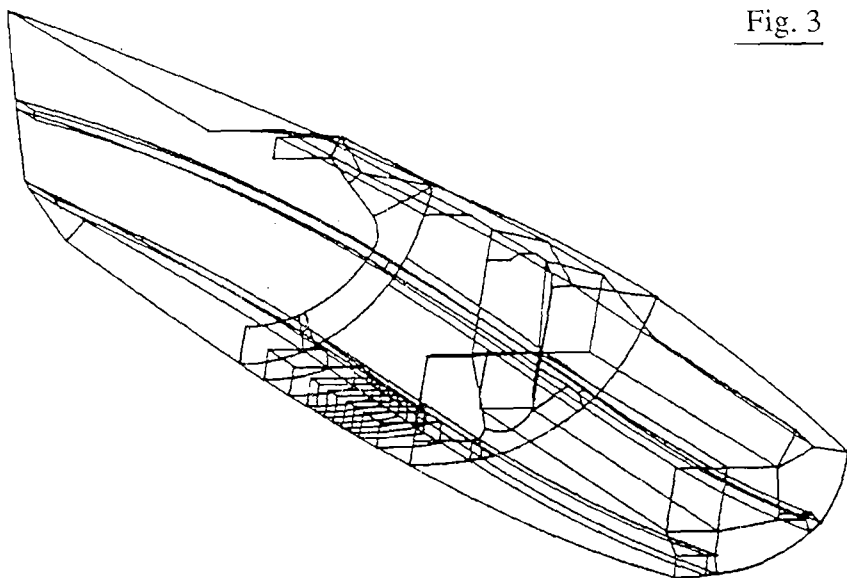


Fig. 3

Fig. 4

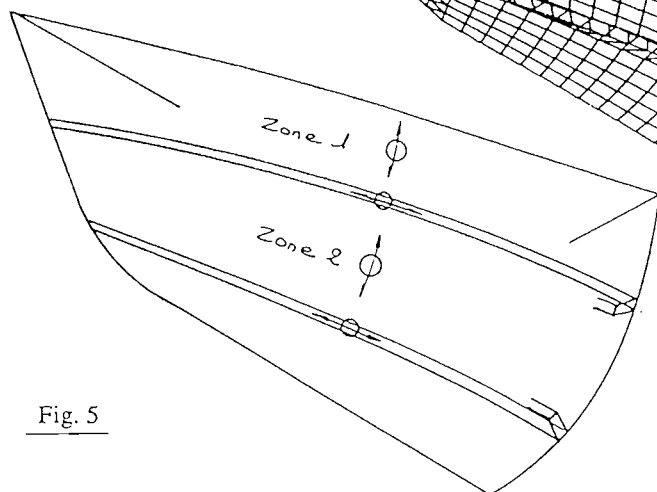
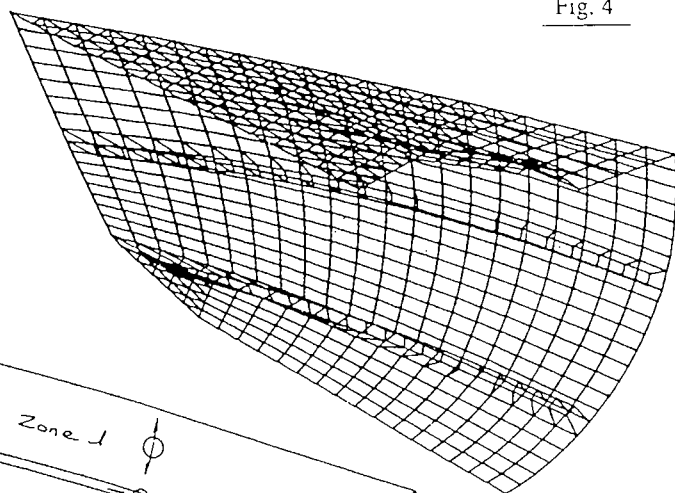


Fig. 5

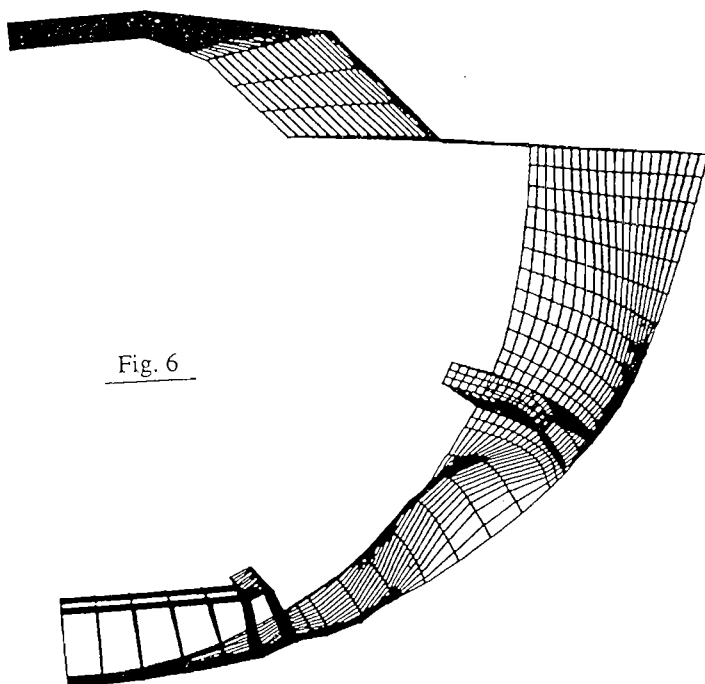


Fig. 6