La CONSTRUCTION NAVALE en COMPOSITES

Actes de Colloques Nº 7 - 1988



ACTES de COLLOQUES N° 7 - 1988



La CONSTRUCTION NAVALE en COMPOSITES

préparé par Lionel LEMOINE et Alain LAGRANGE

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la mer.



Service de la Documentation et des Publications (S D P) IFREMER – Centre de Brest B.P. 70 – 29263 PLOUZANÉ Tél.: 98.22.40.13 – Telex 940 627 F

ISSN 0761.3962

© IFREMER Institut Français de recherche pour l'exploitation de la mer, 1988

le Colloque

"LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITES"

s'est tenu à

NANTES les 16-17-18 mars 1988

avec le parrainage du MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE

Il a été organisé par L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER

en association avec

le BUREAU VERITAS (BV)

le centre technique des industries mecaniques (cetim)

l'ecole nationale superieure de mecanique de nantes (ensm)

la federation des industries nautiques (fin)

le gis ouest materiaux composites (gis omc)

l'institut national d'essais et de recherches nautiques (inern)

l'institut de recherches de la construction navale (ircn)

le service technique des constructions et armes navales (stcan)

l'union de chantiers navals (ucn)

La préparation des actes du colloque a été assurée par Lionel Lemoine et Alain Lagrange IFREMER Direction de l'Ingénierie et de la technologie Département "Essais, Qualification, Matériaux"

TABLE DES MATIÈRES

ALLOCUTION D'OUVERTURE	J-P de LOOF	9
SESSION I - CONSTRUCTION NAUTIQUE		11
La construction nautique française	M. RICHARD	13
Les matériaux composites et la Coupe de l'Ar		25
SESSION II - COMPORTEMENTS		35
Présidence : M. BORD, Chef du service polyme M. ROYER, Docteur ès sciences, r		
Incidences de la réglementation internationa	ale sur l'utilisation des composites	
dans la construction des navires de commerc		37
Contribution à l'étude du comportement de s	tratifiés	
réalisés avec une matrice hybride	C. BALEY, P. BONO, M. CAILLER	55
Etude du comportement au vieillissement de	stratifiés polyester/	
Verre E en milieu marin	R. JACQUEMET, A. LAGRANGE	
A. GROS	SPIERRE, A. LEMASÇON - IFREMER - CETIM	65
Etude des interactions entre des solutions sa	lines et un composite Epoxy-verre,	
à partir des caractéristiques viscoélastiques	du matériau. A. CHATEAUMINOIS,	
	B. CHABERT, J.P. SOULIER	81
Comportement des Gelcoats polyesters en con	ntact avec l'eau, analyse de la phase	
aqueuse après vieillissement P. BELL	LIARD, T. FOUSSARD, D. GAUDIN, J. MOREL	91
Comportement sous choc des composites à fil	ore de verre (E) : influence des paramètres	
λ.	M. DANNAWI, P. TOURNIER , A. EL HABBAK	103
Caractérisation initiale et vieillissement hyd	rolytique en immersion à 100° C	
de cinq résines polyester insaturé	B. MONTAIGNE, V. BELLENGER,	
	P.A. HOARAU, J. VERDU	119
Moyens d'analyse appliqués à l'expertise d'en	dommagement de pièces navales	
en matériaux composites	A. LEMASÇON, A. GROSPIERRE	129

SESSION III - CALCUL		135
Présidence : M. BABINET, Conseiller technique de la direc M. GERALD, Chef de la section structure nava		
Le bureau Véritas et l'expérience de la surveillance des co	nstructions neuves	
et des navires en service	J.N. BABINET, J. BENOIT	137
Calculs d'empilements optimaux pour des structures mult nid d'abeille M. HITTING	cicouches composites/ ER, G. BERTRAND, P. MANIGOT	167
Elément fini coques multicouches	B. PESEUX, S. DUBIGEON	181
Conception et réalisation d'un bras de multicoque	M. CHEVALLEY, M. COQUET	197
Les catamarans de course et les matériaux composites	G. OLLIER, H. OUDIN, B. PESEUX, J.P. QUEVAT	211
Revue de quelques unités en CVR ayant dépassé dix ans o	d'âge M. EBERSOLT	223
SESSION IV - CONSTRUCTION NAVALE MILITAIRE Présidence: M. NIZERY, Directeur technique à l'IRCN. M. BALQUET, Sous-direction Navire - bâtime		231
Structural requirements for small craft	M. RYMILL	233
L'avenir des matériaux composites dans la construction n	avale. R.F.PINZELLI, A. MARCHANT	267
Système expansible Epoxy de stratification	D. SAGLIER	279
Les profilés en matériaux composites et la construction n	avale M. SIDORE	281
Construction navale militaire en composite. Conception d	e bâtiments antimines M. BEAUGRAND	283
Structures et matériaux composites hautes performances sous-marines.	pour applications $\it M.NEDELLEC$	293
Vieillissement hydrolytique des polyesters	B. MONTAIGNE, P.A. HOARAU	305
Structures multicanaux	M. CARBONE	309
Matériaux composites sandwiches pour construction nav. $J.$ (ale militaire GERALD, J.Y. LELAN, V. OLIVIER	321

SESSION V - CONSTRUCTION NAVALE PÊCHE ET	PRODUITS	329
Présidence : M. BONZOM, Directeur général des ACME M. CONAN, Directeur de l'INERN	i.	
Matériaux composites dans la construction navale pêch	e M. BONZOM	331
Utilisation des tuyauteries GRP dans les circuits basse	et moyenne pression	
des plates-formes offshore	M. DUFOUR	343
Les composites obtenus par pultrusion dans la constru	etion	
des plates-formes offshore	J.C. PARDINA, A. BENICHOU	347
Les mousses syntactiques	M. FRIER	357
Critères économiques pour l'emploi des matériaux com	posites en technologie	
navale dans l'activité pêche maritime	M. REYNE	379
SESSION VI - CONTRÔLE ET FABRICATION		395
Présidence : M. de LOOF, Directeur technique à IFREM M. BOURDILLAT, Sous-direction des chant		
Développements de moyens informatiques d'aide à la c	onception de coques	
de bateaux réalisées par ployage de plaques	C. BALEY	397
De l'utilité du contrôle matière pour la construction na	vale en composites	
J.P. CAV	ROT, F. FESQUET, A. JOUANDEAU	409
La construction navale en composite : la microanalyse	appliquée au contrôle	
qualité et aux analyses de défaillances	P. LAMBERT, B. DUBOSCQ,	
	P. FRANGVILLE	423

SYNTHÈSE

- Intervention de Mr BOURDILLAT
- Conclusion de la Table ronde.

ALLOCUTION D'OUVERTURE

Jean-Pierre DE LOOF IFREMER Directeur de l'Ingénierie et de la Technologie

Messieurs les Présidents,

Mesdames,

Messieurs.

C'est avec grand plaisir que nous ouvrons officiellement ce colloque, après l'accueil que Monsieur SAUDRAY, Président de la commission, nous a fait au nom de Monsieur GUICHARD.

Ce colloque est donc le second organisé par l'IFREMER sur le thème de la CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITES, après celui qui s'est tenu, les 2 et 3 octobre 1984, à Brest, au Centre de l'IFREMER.

L'importance de votre participation, la qualité des exposés seront garants, j'en suis sûr, du succès de ce colloque.

Dès à présent, avec 220 participants, nous constatons une forte progression et, surtout, une répartition très homogène des "métiers", à ce colloque.

30% d'entre vous représentent les chantiers navals, les constructeurs et architectes navals, de la pêche, de la plaisance, du transport rapide de passagers et de la marine nationale.

35% représentent les fournisseurs de produits de base, fibre, résine, préimprégné, produits semiouvrés.

35% enfin représentent les sociétés de service et de recherche, les organismes et centres de recherche publique, les ministères et administrations.

Des exposés et débats, nous pouvons donc espérer un éclairage complet sur les problèmes et solutions apportés pour l'utilisation des matériaux composites en construction navale.

Je souhaite vous présenter et préciser les objectifs et les travaux de l'IFREMER dans ce domaine.

Le comportement des matériaux en mer, acier, béton... vis à vis de la corrosion, du fouling, est un des pôles d'excellence, reconnu de l'IFREMER.

La place de plus en plus importante des matériaux composites dans la mer, en construction navale et, pour l'IFREMER, en particulier pour les navires de pêche, mais aussi en instrumentation et engin sous-marin, entraîne forcément notre intérêt et notre engagement sur des études, des recherches, concernant différents objets.

Les matériaux

Etude du vieillissement, phénomène physico-chimique à l'origine de l'osmose et du cloquage.

Caractérisation des propriétés mécaniques sur éprouvettes "vieillies".

Les Calculs de structure

Deux applications des logiciels GIFT, ADINA pour le calcul de structure, et la recherche d'algorithmes spécifiques pour modéliser deux homogénéisations des tissus et des éléments sandwich.

Interprétation de mesures de contrainte sur la liaison bras flotteur du formule 40 de CDK.

Parallèlement, l'IFREMER engage des actions de projet, dont celui de l'étude de substitution possible des matériaux composites sur le futur chalutier de pêche franco-espagnol (projet EUREKA HALIOS).

De même, dans le domaine du transport, l'étude des structures sandwich pourrait amener la filière des vedettes rapides du type NES 24 à des performances ambitieuses.

Pour ces actions, l'IFREMER dispose d'une équipe réduite et fait appel aux centres de recherche et sociétés d'études spécialisées. Citons évidemment les compétences, moyens d'essais et moyens de calculs du CETIM et de l'ENSM, avec lesquels l'IFREMER a constitué un GIS.

Quant aux axes de recherche qui nous intéressent directement, outre la poursuite des travaux en cours, ils concernent :

Pour les matériaux

- la tenue au feu.
- le développement des techniques de réalisation de structures sandwich,
- l'élaboration de cahiers de contrôle et de fabrication, et la méthodologie expérimentale.

Pour les structures

- les études d'assemblage.
- la définition de critère d'endommagement,
- enfin, la validation des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés pour le calcul.

L'objectif principal de la plupart de ces actions était de réduire la dispersion des données sur les matériaux composites de façon à tendre vers l'exploitation de leurs capacités exceptionnelles, alors qu'entre les valeurs théoriques, les valeurs expérimentales obtenues en laboratoire et les valeurs des caractéristiques mécaniques constituées sur les réalisations, il existe encore des écarts importants. Puissent nos efforts contribuer à les réduire valablement.

Voici, Mesdames, Messieurs, les propos que je souhaitais tenir pour l'ouverture de ce colloque, et il reste tant à dire que nous laisserons la parole aux conférenciers qui abordent, pour la plupart, bien des aspects de ces recherches.

Après avoir eu le privilège d'ouvrir ce colloque au nom de Monsieur SILLARD, j'aurai celui d'essayer d'en tirer les conclusions, aussi serais-je un auditeur attentif.

SESSION I - CONSTRUCTION NAUTIQUE

La construction nautique française Les matériaux composites et la Coupe de l'America M. RICHARD F. de RIVOYRE

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 13 à 24

LA CONSTRUCTION NAUTIQUE FRANCAISE

RICHARD M. (1)

La plaisance en France est un loisir de masse, relativement récent et d'une grande diversité ; c'est aussi une industrie.

Loisir de masse en effet, puisque l'on estime à 2,6 millions le nombre de plaisanciers, auxquels s'ajoutent 3 millions de véliplanchistes.

C'est pourtant un loisir récent, puisqu'il s'est développé après 1950 (20 000 bateaux de plaisance en 1950 ; 690 000 en 1987). Son développement est lié, bien sûr, à la forte croissance des "30 glorieuses", mais aussi à des données spécifiques au monde nautique :

- une efficace action de promotion, grâce, en particulier, à la création en 1962 d'un salon nautique exclusivement réservé à la plaisance et un vigoureux effort de formation, fait en particulier autour d'associations telles que les Glénans ou l'U.C.P.A. qui ont inventé, si l'on peut dire, la voile populaire dans les années 1955-1965;
- la construction de bateaux en série, en utilisant à l'origine le contreplaqué, puis rapidement des matériaux composites (bateaux à moteur Rocca en 1958; 420 Lanaverre en 1960);
- · les premiers succès d'Eric TABARLY, qui ont véritablement participé à la promotion de la plaisance, grâce à l'écho qu'ils ont reçu et parce qu'ils ont été remportés sur les bateaux proches de ceux de série. C'est assez différent aujourd'hui, où la sponsorisation et la médiatisation des courses, faites sur des bateaux "extrêmes" par des coureurs professionnels, avec les risques que cela peut parfois comporter, modifient de façon importante la perception de la navigation de plaisance par le grand public.

La plaisance se caractérise aussi par sa diversité. Le terme désigne des activités s'exerçant sur l'eau, mais c'est sans doute là leur seul point commun tant elles sont variées. Cette diversité se marque dans les embarcations dont chaque type correspond à un programme de navigation particulier (régate ou croisière, pêche-promenade ou de sport, plongée sous-marine, tourisme fluvial, etc...).

La plaisance en France, c'est aussi une industrie :

- 5,2 milliards de chiffre d'affaires en 1986, le deuxième rang mondial après les Etats-Unis ;
- 10 000 emplois directs et 20 000 emplois indirects;
- une forte présence sur les marchés étrangers qui nous assure le rang de premier exportateur du monde, grâce à des géants d'envergure internationale et un tissu de P.M.E. intervenant dans la construction de bateaux, la fabrication d'équipements et les prestations de service diverses.

Nous restreindrons la suite de notre exposé à un aspect particulier de cette industrie: la construction nautique.

Président de la Fédération des Industries Nautiques - Port de La Bourdonnais -75007 PARIS.

I. LE MARCHE FRANCAIS DE LA CONSTRUCTION NAUTIQUE

Il peut être appréhendé à travers l'étude du parc et de son évolution.

A. Le parc des navires de plaisance.

Sa structure (Fig. 1) montre la prédominance des navires à moteurs (68 %), parmi lesquels sont comptés les bateaux pneumatiques. Celle-ci n'est pas particulière à la France puisqu'en Grande-Bretagne les bateaux à moteur représentent 84 % du parc, en Italie 87 %, en Suède 88 %, aux Etats-Unis 90 %. Ces chiffres sont à comparer avec précautions, car leur signification varie d'un pays à l'autre ; mais malgré tout la prédominance du motonautisme est nette ainsi que son moindre développement en France que dans ces pays.

La progression du motonautisme en France est cependant un phénomène ancien, mais lent : les bateaux à moteur représentaient 60 % du parc en 1969, 64 % en 1977 et 68 % en 1987. La France a été pendant longtemps à dominante "voile", et l'on peut presque dire d'elle qu'elle est de "culture voile".

Il faut remarquer sur la figure l que le secteur des voiliers n'a pas la même composition que celui des bateaux à moteur. Les voiliers habitables, c'est-à-dire de plus de 2 tjb (*) représentent 44 % du total des voiliers, soit environ 97 000 unités dont 41 000 de plus de 5 tjb; cette proportion pour les navires à moteur n'est plus que de 18 %, avec environ 86 000 unités dont 18 000 de 5 tonneaux et plus. Cela traduit bien la différence des programmes de navigation pour lesquels sont utilisés les deux types de bateaux; la croisière est beaucoup plus pratiquée à bord de voiliers que de bateaux à moteur, tandis que ces derniers, de taille fréquemment plus petite, sont destinés à de courtes sorties, par exemple pour la pêche, la plongée, le ski nautique, de petites croisières côtières.

B. Evolution du parc.

Elle est retracée par les statistiques d'immatriculation annuelles de navires présentées figures 2 et 3.

- Voiliers: la figure 2 montre que les transactions portant sur les unités habitables (plus de 2 tjb) sont les plus nombreuses. Le marché des voiliers non habitables est en récession depuis plus de 20 ans (11.300 unités neuves immatriculées en 1966 contre 930 en 1987). Pour les unités habitables, l'évolution est plus contrastée: le marché du neuf augmente jusqu'en 1980, puis il diminue; des catégories statistiques plus affinées montreraient que les immatriculations de grands voiliers (plus de 10 tjb) sont en hausse.

Unité de volume, le tonneau vaut 2,83 m³ (soit 100 pieds cubes). La correspondance approximative entre volume et longueur des navires est :

^(*) tjb : tonneau de jauge brute.

² tjb: environ 5 m.

⁵ tjb : environ 8 m.

¹⁰ tjb: environ 10 m.

²⁵ tjb: environ 15 m.

Par contre, le marché de l'occasion est resté en hausse constante et, depuis 1981, les transactions sur les voiliers habitables d'occasion sont supérieures à celles sur les voiliers neufs. Le total des transactions (neuf + occasion) est relativement stable, ce qui montre la persistance de l'intérêt des Français pour la voile.

Navires à moteur : la figure 3 montre, contrairement à la précédente, la prédominance des petites unités, qui comprennent les bateaux pneumatiques. Le marché des navires habitables neufs est en hausse depuis 1984.

L'évolution suivie montre une rupture en 1979 - 1980. Cela s'explique en partie par les difficultés économiques conjoncturelles, mais aussi par les changements dans les modes de loisir des Français : la durée annuelle des congés s'est allongée, mais ils sont maintenant pris de façon fractionnée, en séjours plus nombreux mais plus courts ; cela ne favorise pas l'achat de bateaux par les ménages, mais plutôt la location et explique le développement du marché des grands voiliers. Comme leur valeur unitaire est bien sûr importante, le chiffre d'affaires des entreprises continue à croître alors que le nombre de bateaux produits diminue. Les changements dans les consommations de loisir favorisent aussi le développement du motonautisme: la voile est considérée comme une activité "impliquante", exigeant du temps et des efforts de formation ; au contraire, le motonautisme est considéré, à tort ou à raison, d'accès et de pratique moins contraignants.

Il faut par ailleurs souligner que la taille des séries, c'est-à-dire le nombre de bateaux produits dans une série, diminue : les séries de mille unités et plus, comme l'Arpège et le Sangria il y a une quinzaine d'années, sont plus occasionnelles ; maintenant au contraire, rares sont celles qui durent plus de trois ou quatre ans. Les chantiers sont donc obligés à de lourds investissements pour renouveler leurs gammes.

II. LA CONSTRUCTION NAUTIQUE EN FRANCE

A. Dimension des entreprises

Le nombre d'entreprises de construction nautique est de l'ordre de 150, dont une quinzaine de fabricants de planches à voile et moins d'une demi-douzaine de fabricants de bateaux pneumatiques ; ils ont réalisé en 1986 un chiffre d'affaires de l'ordre de 2 milliards.

Le nombre d'entreprises reste stable, bien qu'en tant qu'industrie de loisirs la construction nautique soit très sensible à la conjoncture économique. La période de restructuration du début des années 1980 est passée et de nouveaux chantiers sont apparus, souvent spécialisés dans un type de produit : multicoques ces dernières années, bateaux à moteur maintenant.

Au-delà du nombre d'entreprises, il faut rappeler que 9 chantiers réalisent 78 % du chiffre d'affaires de la branche qui paraît relativement peu concentrée par rapport à d'autres secteurs; mais il s'agit d'une industrie encore jeune et aux produits très diversifiés, aux séries trop courtes comme nous l'avors déjà vu, qui sont des facteurs peu favorables à une concentration poussée dont l'opportunité dans notre cas, n'est peut-être pas évidente.

B. Structure et évolution du chiffre d'affaires.

La construction nautique française réalise un chiffre d'affaires de l'ordre de 2 milliards, qui en fait la deuxième du monde après les Etats-Unis (tableau I)

Tableau I

EVOLUTION DU CHIFFRE D'AFFAIRES DES CHANTIERS (*) EN FRANCS COURANTS 1976 - 1981

		Chiffres d'affaires (M F)					
	Nombre d'entreprises (1)	0.3 / 1.11 (7.13)		Exportations			
		Total	France	C.E.E.	Pays tiers	Total	% Export
1981	276	1 425,7	954,4	239,8	231,5	471,3	33
1982	227	1 718,7	1 102,8	296,9	319	615,9	35,8
1983	141	1 459	834,8	247,4	376,8	624,2	42,7
1984	143	1 767,5	915,8	300,6	551,1	851,7	48,1
1985	146	1 871,9	867,7	358,3	645,9	1 004,2	53,6
1986	161	2 069,5	1 049,8	387,3	632,4	1 019,7	49,2

Sources : enquête annuelle de branche.

 Jusqu'en 1982, il s'agit du nombre d'entreprises interrogées; à partir de 1983, il s'agit du nombre de réponses à l'enquête.

La figure 4 (chiffre d'affaires en F constants) montre que l'évolution du chiffre d'affaires est très contrastée. Sa croissance globale pendant les dix dernières années s'explique grâce aux exportations, qui font de notre industrie la première exportatrice du monde. Notre balance commerciale est fortement excédentaire (figure 5); toutefois, il convient de noter que, lorsqu'il s'agit de bateaux équipés de moteur, les chiffres d'exportation comprennent alors des moteurs qui sont tous importés, puisqu'il n'existe plus de fabricant français de moteurs pour bateaux de plaisance.

C. Localisation des entreprises.

Elles sont localisées pour plus de la moitié d'entre elles dans une région de la façade Atlantique, d'où se détache la région Poitou-Charentes grâce à la présence de nombreux chantiers en Charente-Maritime. Mais on observe malgré tout une certaine dispersion géographique, puisque seules quatre régions n'ont aucune entreprise de construction navale.

^{*} y compris pneumatiques et planches à voile.

La répartition géographique des entreprises par chiffre d'affaires (fig. 7) est différente.

La concentration est beaucoup plus grande, et la prépondérance de la région des Pays de la Loire est très nette : elle assure, à elle seule, 50 % du chiffre d'affaires de la construction nautique française. Cela s'explique évidemment par le "poids" des chantiers vendéens.

D. Production

Nous l'étudierons sous l'angle des matériaux de construction.

Les chantiers nautiques construisent essentiellement des bateaux en polyester renforcé : ce matériaux représente 98 % des coques rigides produites en 1986.

La prédominance du polyester est déjà ancienne, comme le montrent les statistiques d'immatriculation :

%	Plastique	Bois	Métal	
1987 90		8	2	
1977	89 9		2	
1969	76	22	2	

Source : Secrétariat d'Etat à la Mer.

Les matériaux composites sont utilisés dans la construction nautique depuis la fin des années cinquante. Ils se sont rapidement généralisés entre 1960 et 1965, alors que la démocratisation de la plaisance permettait d'envisager des productions en série ; grâce à leurs avantages, ils ont rapidement supplanté le contreplaqué.

En effet, ils permettent de construire des coques d'une seule pièce, donc sans problèmes d'étanchéité ; ils permettent de renforcer facilement les zones les plus sollicitées, en y ajoutant des couches de tissus supplémentaires, ou des rubans ou des raidisseurs orientés selon les efforts. Les matériaux composites et de nouvelles conceptions de carènes ont finalement mené à un bouleversement complet dans l'architecture nautique à la fin des années 1960, avec la création du SYLPHE puis de l'ARPEGE par Michel DUFOUR. Les coques des navires, jusqu'alors étroites, se sont considérablement élargies au maître bau pour proposer, à longueur et déplacement constants, un plus grand espace ; le contremoulage de la coque et du pont a permis d'éliminer les éléments de renfort de structure apparents et de préfabriquer des éléments complets d'emménagement, soit en bois (cloisons traversales, façades de couchettes et d'équipets), soit en stratifié (cuisine, lavabos, ...).

L'industrialisation de la production et la productivité des chantiers n'ont cessé de s'accroître : en 1977, un voilier de 9,20 m - 9,30 m valait environ 150.000 F.; dix ans plus tard, un voilier de même taille valait environ 270.000 F., soit un coefficient multiplicateur de 1,80. Pendant ce temps,

l'indice du coût de la vie augmentait de 2,22 ; le bateau de 270 000 F. aurait dû valoir 333 000 F., soit 23 % de baisse par rapport au coût de la vie.

L'utilisation des matériaux composites a aussi permis d'améliorer considérablement la finition des bateaux ; le niveau de qualité atteint par les chantiers français dès les années 70 leur a permis de s'imposer sur le marché international.

Le succès des matériaux composites s'explique aussi par les avantages qu'ils procurent aux plaisanciers pour l'entretien de leurs bateaux : celuici n'est, bien sûr, pas supprimé, mais il est beaucoup plus facile grâce à un matériau imputrescible, résistant très bien à la corrosion, et limitant les problèmes d'étanchéité.

Les matériaux composites sont idéals pour la construction nautique : ils ont permis de construire des bateaux sûrs, performants et d'une finition inconnue auparavant.

Les perspectives d'évolution actuelles ne montrent pas que la suprématie des matériaux composites comme matériau de construction des coques et des ponts, puisse être remise en cause. Les fibres exotiques ont fait une apparition encore relativement modeste et le polyester renforcé à la fibre de verre reste largement dominant. L'évolution viendra plutôt par l'automatisation de la production et par l'optimisation de l'utilisation des matériaux.

III. L'ENVIRONNEMENT REGLEMENTAIRE

A. SITUATION ACTUELLE

La construction des bateaux de plaisance est régie par les textes sur la sauvegarde de la vie humaine en mer, dont les principes spécifiques à la plaisance ont été posés en 1962 et 1969.

Ces textes ne comportent pas de règles pour les procédés de fabrication; ils disposent simplement que :

"Les matériaux sont utilisés suivant des techniques de mise en oeuvre " et d'assemblage propres à assurer à l'ensemble de la construction une " solidité suffisante ".

Ils laissent donc une grande liberté de choix des matériaux et des techniques de mise en oeuvre ; il y a obligation de résultat mais pas de moyens. Les modalités de contrôle des prescriptions techniques varient selon la taille des navires :

pour ceux de 5 à 25 m. de long, un contrôle a priori est effectué par la Commission Nationale de Sécurité de la Navigation de Plaisance,

qui est chargée de l'approbation des plans de ces navires ; puis un contrôle du navire tête de série, complété ensuite par des sondages dans la série, est effectué par les services des Affaires Maritimes;

pour les navires de moins de 5 m., il n'y a pas de contrôle a priori;
 l'approbation est faite après contrôle du navire tête de série.

Les sociétés de classification sont intervenues diversement selon les pays dans la construction nautique ; citons le Norske Veritas qui a publié un règlement spécifique aux bateaux de plaisance, l'A.B.S. (American Bureau of Shipping) qui exerce ces dernières années une forte poussée dans le monde des courses, le R I N A qui a reçu délégation de contrôle du Gouvernement italien.

Au plan international, l' I S O n'a pas de normes relatives aux échantillonnages, son domaine d'intervention étant plutôt axé sur les équipements et les grands ensembles ainsi que sur les matériaux de base.

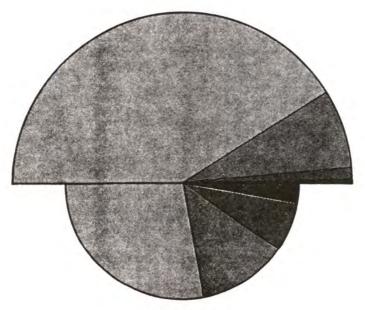
B. Evolution à venir

Il est encore trop tôt pour déterminer le sens de l'évolution règlementaire qu'introduira le marché unique européen. Il semble que les normes y joueront un grand rôle, et d'ici 1992 un gros travail d'élaboration de normes devra être fait. Cela suppose également un important effort de recherche, en particulier sur les matériaux composites. Nous l'avons amorcé en compagnie de nouveaux partenaires, parmi lesquels le Bureau Veritas et l'IFREMER.

Ce colloque sera une contribution appréciable à une meilleure connaissance des matériaux composites par leurs utilisateurs ; nous en remercions l'IFREMER.

- Figure 1 STRUCTURE DE LA FLOTTE DE PLAISANCE (1987)

Navires à moteur (467586 unités)

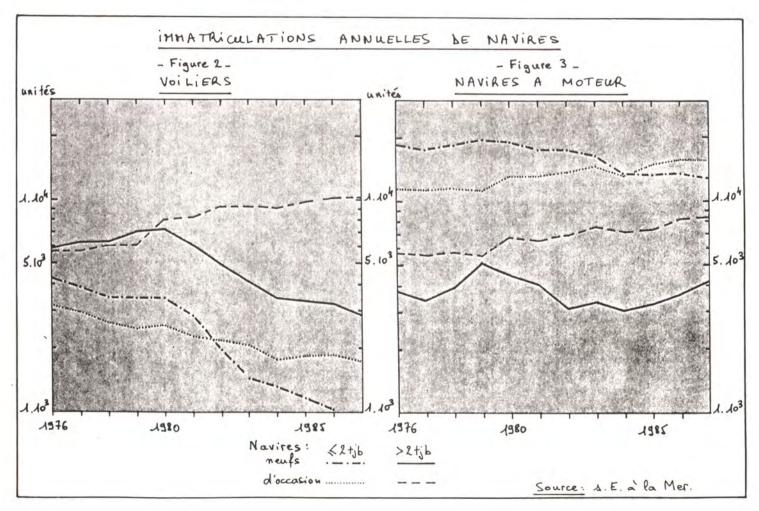


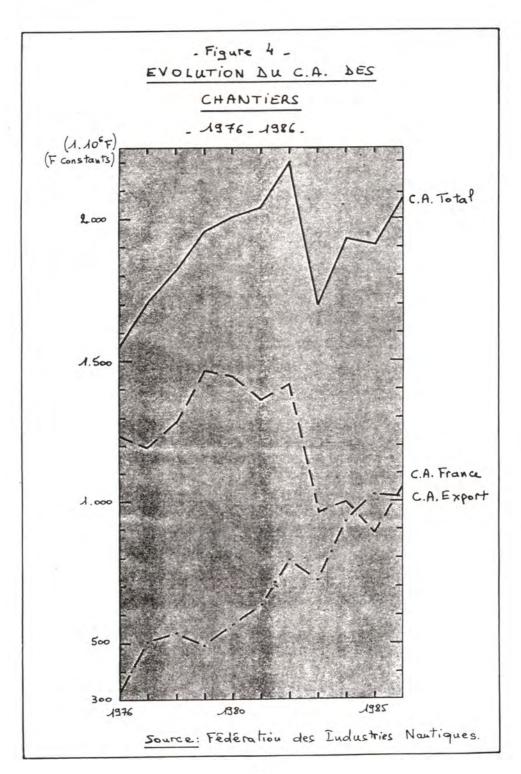
Voiliers (222 453 unités)

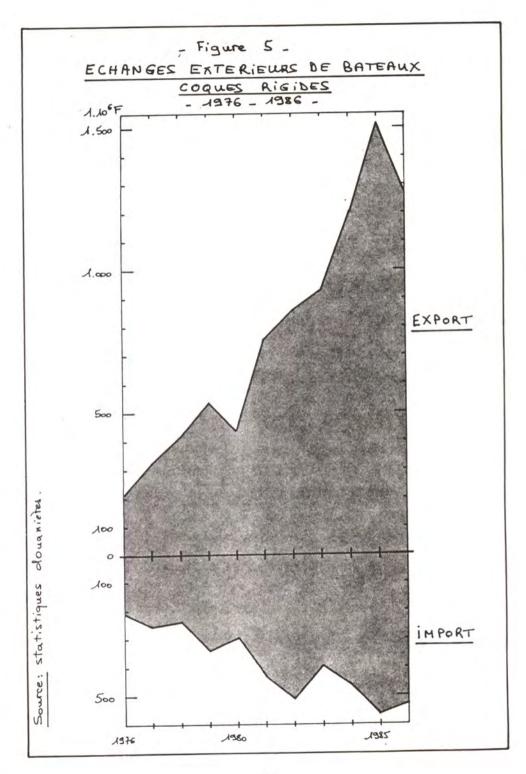


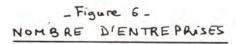
Source: secrétariat d'Etat à la Mez.



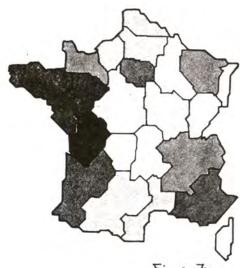








PAR REGION



Nombre d'entreprises (1386)

plus de 25

de 16 à 25

de 11 à 15

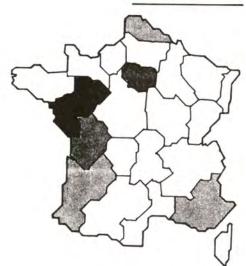
de 6 à 10

de la 5

aucune

_Figure 7 _ CHIFFRE D'AFFAIRES

PAR REGION



Chiffre d'affaires (1986)

plus de 500 MF

de 250 à 500 MF

de 100 à 250 MF

de 50 à 100 MF

de 50 MF et moius

Source: Fédération des Industries Nautiques.

LES MATERIAUX COMPOSITES ET LA COUPE DE L'AMERICA

Franck de RIVOYRE (1)

RESUME - Depuis 1987, les matériaux composites sont apparus dans le monde des 12 mJI, habituellement fabriqués en aluminium. Après un bref rappel sur les 12 mJI et la Coupe de l'América, nous regarderons, pour les problèmes de construction et de matériau, ce qui est autorisé par le réglement actuel de la Course. A partir d'un calcul très simple nous comparerons le comportement en flexion d'un panneau en composite et en aluminium, ainsi que l'influence du matériau sur la rigidité globale du bateau. Une analyse plus sophistiquée de type "éléments finis", faite pour le compte du Challenge Français pour l'América's Cup, permettra de définir plus précisément le comportement mécanique de la structure. Nous étudierons, pour finir, les avantages et les inconvénients des matériaux composites employés pour les 12 mJI en nous appuyant sur l'exemple Néo-Zélandais.

mots clés : 12 mJI, composite, résistance des matériaux, éléments finis

ABSTRACT: Since 1987, composite materials appeared in the world of the 12 metres, usually built in aluminium. After a quick glance around twelve metres and the America's Cup, we will have study the construction and materials which are authorized by the present rules. From a very simple calculation, we will compare the bending comportment for a composite and aluminium pannel, as well as the influence of the material on the stiffness of the whole boat. A more sophisticated analysis ordered by the "Challenge Français pour l'América's Cup" will allow a more precise mechanical comportment of the structure. Finally we will compare advantages and disavantages of composite materials in the construction of 12 mJ1 by studying New-Zeland's concept.

key-words: 12 mJI, composite, strenght of materials, finite elements

(1) ATELIER D'ARCHITECTURE NAVALE Fondation Sophia Antipolis Place Sophie Laffitte 06560 VALBONNE Tél: 93-65-35-65

LES MATERIAUX COMPOSITES ET LA COUPE DE L'AMERICA

Depuis la dernière édition courue à Fremantle, en Australie Occidentale, les matériaux composites ont fait leur entrée dans le monde de la Coupe de l'América et des 12 mJI.. L'équipe de Nouvelle-Zélande devait être la première à construire 3 bateaux en fibres dont deux strictement identiques, KZ 3 et KZ 5. C'est à la barre du troisième bateau, KZ 7 alias Kiwi Magic, que Chris Dickson allait être éliminé en finale de la coupe Louis Vuitton Cup par Dennis Conner. Les excellentes performances de KZ 7 provoqueront une remise en question des bateaux en composites, suivie d'une demande d'interdiction. Néanmoins l'International Twelve Meter Association (I.T.M.A), au cours de sa dernière assemblée générale, devait voter le maintien des coques en matériaux composites et assurer leur avenir et leur utilisation par la majorité des futurs challengers.

Ces nouveaux matériaux expliquent-ils à eux seuls les bonnes performances des Néo-Zélandais ? Quels sont les possibilités offertes par le règlement pour construire un 12 mJI en fibre ? Quels sont les critères retenus par le Lloyds Register of Shipping pour les structures ? Quels sont

les aspects de la conception et de la construction de tels bateaux ?

Autant de questions auxquelles nous tenterons de répondre, compte tenu de notre expérience acquise au Challenge Français pour la Coupe de l'América.

1- LA COUPE DE L'AMERICA

A- Les bateaux

L'America's Cup est une course pour le moins particulière. Un règlement trés strict, la Jauge Internationale, impose à l'architecte un certain type de forme à son dessin qui doit vérifier la formule:

$$(L + 2d - F + \sqrt{S}) / 2.37 = 12$$

L: longueur de jauge

d: mesure de chaîne

F: franc-bord moyen S: surface de voilure

Le résultat de cette formule s'exprime en "mètre"; les voiliers qui en découlent sont les "12m II". Ils mesurent 20 m, pèsent 25 tonnes et portent plus de 200 m2 de voilure. Ce sont des bateaux extrêmes : le rapport de lest atteint 80% du poids total, caractéristique lui donnant une énorme raideur à la toile. Par 25 à 30 noeuds de vent, sous génois et grand-voile haute, par 30 degrés de gite, la compression du mât conjugué aux efforts des haubans et au couple de redressement du lest sont suceptibles de provoquer d'importantes déformations à la structure, néfastes à la bonne marche du navire. Celle-ci se juge à sa vitesse et à son cap. Ces facteurs dépendent du bon contrôle de la voilure et notamment pour les allures de près (allure essentielle pour les 12 mJI), de la raideur du bord d'attaque du génois. Or, l'une des causes de la flèche de l'étai est la flexion longitudinale de la coque. A titre indicatif, en condition de navigation normale, la compression dans le mât avoisine les 30 tonnes, la tension d'etai : 4 tonnes, de bastaque: 3 tonnes et 16 tonnes pour le haubanage latéral au niveau du pont.

B. Constructions et matériaux

Entre 1951 et 1958, la Coupe de l'América s'est déroulée sur des bateaux en bois ou en acier, de 140 pieds de longueur hors tout (43 m). En 1958, le réglement international des 12m JI a été adopté. Le règlement prévoyait uniquement l'utilisation de bois comme matériau de construction, probablement parce qu'à l'époque la construction en métal était plus onéreuse et plus compliquée. Les échantillonages devaient être approuvés par le Lloyds Register of Shipping. A partir de 1970, l'aluminium a fait son entrée dans la Coupe de l'América et les gains de poids obtenus sur les coques en firent très vite le matériau roi, si bien qu'en 1974 "challengers" et "defenders" étaient tous en aluminium. A l'époque le règlement favorisait énormement l'utilisation de nouveaux matériaux, et les bateaux en bois se sont trouvés très vite dépassés. Par opposition aujourd'hui, 15 ans plus tard l'introduction des matériaux composites dans la course s'est accompagnée d'une énorme quantité de spécifications destinées à ne pas trop avantager leur utilisation et à maintenir la compétitivité de la flotte existante. L'application du réglement, très fourni au niveau de la partie "construction et structure", est controlée par le Lloyds. Tous les échantillonages sont calculés et vérifiés par lui, de telle manière qu'aucun matériau ou choix de structure ne soit rendu a priori avantageux. La coupe de L'América semble être devenue plus que jamais une bataille de "forme", ou les concepteurs de la structure sont là pour vérifier le simple respect du règlement. Telle est la règle du jeu.

Dans ce contexte, la question que nous nous sommes posée au Challenge Français pour l'América's Cup, était de savoir sur quels critères on pouvait tirer avantage d'une construction en composite.

2- REGLEMENTS ET SPECIFICATIONS

A- Principes de base

Les règlements pour la Coupe de l'América ont été développés sous l'autorité de l'I.Y.R.U (International Yacht Racing Union) et ont été sujet à de nombreuses rectifications et mises à jour. La règle 26 stipule que "coque et pont" doivent être conformes aux normes de construction définis par le Lloyds. La construction en composite est autorisée depuis 1980. Les principes de base sont les suivants:

- a- Un bateau en fibres ne doit être, ni plus léger (aa), ni avoir un centre de gravité plus bas (ab), ni une répartition des poids longitudinale plus avantageuse (ac) que la même coque construite en aluminium. Ce sont donc, d'abord, des critères de poids, facteurs déterminants pour la marche du payire.
- aa- Pour un déplacement donné, le gain de poids obtenu sur la coque sera transféré dans le lest et améliorera le couple de redressement du bateau c'est à dire la raideur à la toile et la marche au près ; d'où l'avantage d'une construction légère.

ab- De la position en hauteur du centre de gravité de la coque dépends directement le couple de redressement. Un centre de gravité bas va de pair avec un bon couple de redressement.

ac- La répartition longitudinale du poids influe directement sur le tanguage néfaste à la marche au près. C'est pourquoi les architectes cherchent à centrer les poids au maximum.

b- D'autre part, l'I.Y.R.U exige, suivant ses propres termes, "qu'un 12 mJI en fibres ne doit pas être "moins solide" qu'en aluminium". Ce principe assez flou fait réference à un critère de résistance. Pour le Lloyds "solidité" signifie à la fois "resistance" et "rigidité", mais qu'en est-il réellement ? Nous avons vu que la raideur de la coque est un élément qui contribue aux bonnes performances du bateau. Peut-on attendre, à poids égal, une meilleure rigidité avec du composite, sur un 12 mJI ?

B- Les matériaux autorisés

De ce point de vue là, non plus, aucune liberté n'est accordée aux concepteurs puisque seule la fibre de verre est autorisée. Kevlar et carbone sont interdits sous prétexte que leur utilisation est encore très confidentielle et que seuls certains syndicats pourraient en bénéficier. Les résines de polyester, vinyl-ester et époxy sont autorisées ainsi que tous types de matériaux d'âme.

3- CALCULS MANUELS

Dans le but de confronter une coque en aluminium à une coque en composite, nous avons comparé deux échantillonages de bordé de 12 mJI, conformes au Lloyds. Le bordé en aluminium est constitué d'une tole de 6.5 mm d'épaisseur. Celui en composite est un sandwich dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Peau exterieure: 10 couches de tissus unidirectionels de verre R

- Peau exterieure: 10 couches de tissus unidirectionels de verre R placées alternativement à + ou - 45 deg. Taux de fibres en volume :

53%

- Ame en balsa

- Peau interieure: Idem que la peau extérieure mais avec deux couches de moins

Ceci donne au sandwich les propriétés suivantes:

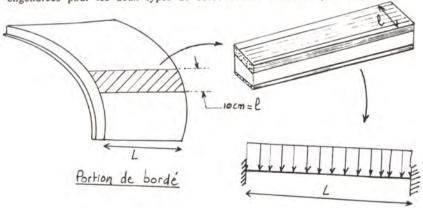
- Epaisseur peau exterieure: 4.38 mm

- Epaisseur âme: 25 mm

- Epaisseur peau interieure: 3.5 mm

A- Raideur au niveau des panneaux

Les panneaux de bordé sont dimensionnés en premier lieu pour résister à la pression de l'eau. Pour un calcul simplifié, mais largement suffisant pour une première approche, nous modéliserons le panneau par une tranche de 10 cm de large dont la longueur est la distance entre deux raidisseurs (ici deux membrures). Le modèle "poutre" est considéré comme encastré à ses deux extrémités et soumis à une charge uniformément répartie due à la pression dynamique de l'eau. On compare les déflexions engendrées pour les deux types de bordé définis ci-dessus (CF Vue 1).



- VUE 1 - Modélisation grossière d'un panneau de bordé

Tous les calculs sont faits à partir de la théorie des poutres composites. Les résultats donnent, à 3% près, la même raideur de flexion pour les panneaux en aluminium et en sandwich pour un poids de bordé identique (moins de 1% d'éccart).

B- Raideur au niveau de la flexion générale de la coque

Une représentation assez proche de la réalité consiste à considérer un 12 mJI comme une poutre de 20 m de long soumise à deux forces vers le haut à chaque extrémité et supportant en son centre une torpille de 20 tonnes. Dans une première approche la raideur en flexion longitudinale dépend de l'inertie de la poutre navire, ou plus exactement du produit "EI" (ou "E"est le module d'Young du matériau employé et "I" l'inertie). On peut considérer en première approximation que "I" est une fonction linéaire de l'épaisseur, et que c'est en fait le produit "Ee" qui caractérise la raideur en flexion du bateau (où "e" est l'épaisseur équivalente du bordé). Suivant ce critère, les calculs donnent un net avantage à l'aluminium puisque le gain en raideur est pratiquement de "2" par rapport à la fibre de verre. L'emploi de fibres plus performantes telles que le Kevlar ou le Carbone modifieraient bien-sûr ce résultat.

4-CALCULS SUR ORDINATEURS

Nous avons été amenés, pour la Coupe de l'América 87 et toujours dans le cadre du Challenge Français pour l'America's Cup, à faire une étude plus sophistiquée destinée à vérifier ces calculs approchés et à définir la structure de "Challenge France". Les calculs ont nécessité la création d'un modèle éléments finis. Ils ont été fait chez MATRA au centre de calcul du Chesnay, avec le programme d'éléments finis Nastran. Toutes les étapes et résultats de calcul ne seront pas exposés ici. Les conclusions nous intéréssant dans le cadre de cette communication sont les suivantes:

- Compte tenu des conditions de navigation rencontrées, les coques sont sur-échantillonnées en résistance : pour une coque en aluminium, les contraintes moyennes sur le bordé sont de l'ordre de 1 à 2 Hbars (DaN/mm2), ce qui nous place très loin de la limite élastique (CF Vue 2).

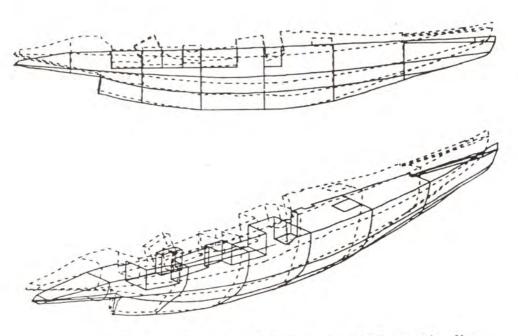




- VUE 2 - Isocontraintes Von Mises - Coque au vent-

- Pour les déformations, on constate deux phénomènes:

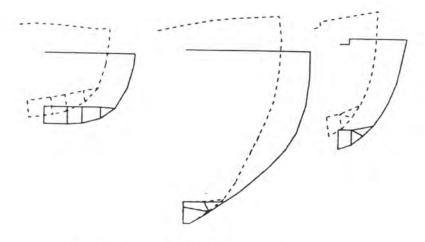
a- Une flexion longitudinale de la coque, dûe aux efforts du gréement. Mais cette déformation est très faible: de l'ordre du "cm", par exemple, pour la déflexion vers le haut de l'étrave (CF Vue 3).



- <u>VUE 3</u> - Déformations d'une coque de 12mJI au près. Vue longitudinale

b- Une rotation de la coque autour du plat de la quille, conséquence du couple provoqué par le lest au niveau des varangues. Cette rotation se retrouve intégralement sur tous les couples. Elle est tout à fait négligeable: de l'ordre de 0.2 deg (CF Vue 4).

Il ressort de ces résultats qu'un 12 mJI est très raide. Ceci provient du fait même de ses formes très profondes, qui donnent à la poutre navire une grande rigidité. En fin de compte les déplacements dûs aux déformations sont tellement faibles que les gains en raideur en choisissant tel ou tel matériau sont à relativiser.



- VUE 4 - Déformation - vue transversale.

5 - COMPARAISON ALUMINIUM- FIBRE DE VERRE

Nous venons de voir qu'il n'y avait rien à attendre d'une construction en sandwich de verre, par rapport à l'aluminium. D'autre part, un bateau en aluminium est facile est rapide à construire, facile à réparer, et ses points d'ancrage sont aisés à concevoir. L'inconvénient majeur de l'aluminium réside dans la difficulté de fabriquer une forme absolument conforme aux plans, à cause des retraits de soudure, ce qui nécéssite le passage de kilos d'enduits et alourdi inutilement la structure. Par opposition

les bateaux en fibre ont une forme parfaite dès la sortie du moule. Pour une fabrication à l'unité, la construction en composite est apparemment plus onéreuse, mais le moule peut être rentabilisé par la fabrication d'autres coques identiques. Cet avantage des matériaux composites sur l'aluminium a été largement exploité par les Néo-Zélandais qui ont sorti trois 12 mJI du même moule.

En ce qui nous concerne, nous n'avions, au "Challenge Français pour l'America's Cup", ni les moyens ni le temps de faire plusieurs bateaux. D'autre part, compte tenu que "Challenge France", pour le choix de l'aluminium, devait être fabriqué par l'Aérospatiale, nous étions assurés d'un travail très propre. C'est pourquoi nous avons écarté la possibilité d'une coque en fibre de verre.

6- LE DEFI NEO-ZELANDAIS

Dans l'édition 87 de la Coupe, seuls les Néo-Zélandais on opté pour une construction en fibres. Sur les pontons de Fremantle, toutes sortes de bruits circulaient à propos du bateau "Kiwi". La plupart faisaient référence au matériau et expliquaient les bonnes performances de KZ 7 par l'utilisation du "plastique magique". Nous venons de voir qu'il n'en était rien. De la bouche même de Bruce FARR, l'architecte, la Nouvelle Zélande ne possédait pas à l'époque de chantiers "alu" disponibles et c'est la raison principale du choix Néo-Zélandais. Néanmoins, le fait de pouvoir construire deux coques test identiques (KZ 3 et KZ 5) à partir du même moule, ont permis aux Néo-Zélandais d'"optimiser" les paramètres un par un par comparaison, sur le terrain et en temps réel, des performances des deux bateaux. Cette démarche tout à fait innovante explique pour beaucoup leurs performances et sera peut-être un des éléments du succés dans les futures Coupes de l'América.

KZ 7, le troisième 12 mJI Néo-Zélandais, est une version plus raffinée des deux autres. Il est en sandwich de fibre de verre et résine époxy avec des matériau d'âme de types et de densités variés. Sur KZ 3 et KZ 5, les points d'ancrage ont été conçus en faisant largement appel à des sous-structures en aluminium. Cependant, celles-ci ont été abandonnées sur KZ 7. Au total, plus de 250 éprouvettes provenant de la coque et des raidisseurs, ont été

testées pour permettre l'homologation des bateaux par le Lloyds.

CONCLUSION

Naval Architects, 100 p.

En ce moment même, la Coupe de l'América connaît quelques rebondissements et se court entre Américains et Néo-Zélandais sur des voiliers qui n'ont rien à voir avec des 12 mJI, mais il est probable qu'il y ait un retour à la Jauge Internationale pour les prochaines éditions. L'I.T.M.A a fait récemment un certain nombre de propositions pour la réglementation et le contrôle de la construction des futurs 12 mJI, mais aucune libéralisation, ni dans le choix des matériaux ni dans les échantillonages n'est à attendre pour le moment. Dans ces conditions, dans le milieu des 12 mJI, il n'y a pas de raisons pour que les matériaux composites supplantent l'aluminium, comme c'est le cas pour les principaux autres type de voiliers, maxi-yacht compris.

INTERNATIONAL TWELVE METRE ASSOCIATION, 1987. Proposed Weigt Distribution and Construction Requirements, 5 p.

LAROZE S., BARREAU J.J., 1987, Mécanique des Structures - Tome 4 - Calcul des Structures en Matériaux Composites, EYROLLES MASSON, 276 p.

LLOYDS REGISTER OF SHIPPING, 1984. Requirements For 12 Metre International Rating Class Yachts Constructed of Aluminium Alloy, 30 p.

LLOYDS REGISTER OF SHIPPING, 1984. Draft end Test Requirements For Certification of G.R.P 12 Metre Racing Yacht, 4 p.

de RIVOYRE F., 1986, Etude de structure d'un 12 mJI, Institut Superieur des Matériaux et de la Construction Mécanique - MATRA Espace, 130 p.

UNIVERSITY OF WESTERN AUSTRALIA, 1987, Conference on Yachting Technology 1987, The Institution of Engineers, The Royal Institution of

SESSION II - COMPORTEMENTS

Présidence: M. BORD, Chef du service polymères et matériaux composites, CETIM.

M. ROYER, Docteur ès sciences, maître de conférences à l'ENSM.

Incidences de la réglementation internationale sur l'utilisation des composites dans la construction des navires de commerce.

M. NIZERY

Contribution à l'étude du comportement de stratifiés réalisés avec une matrice hybride C. BALEY, P. BONO, M. CAILLER

Etude du comportement au vieillissement de stratifiés polyester/
Verre E en milieu marin R. JACQUEMET, A. LAGRANGE
A. GROSPIERRE, A. LEMASÇON - IFREMER - CETIM

Etude des interactions entre des solutions salines et un composite Epoxy-verre, à partir des caractéristiques viscoélastiques du matériau. A. CHATEAUMINOIS, B. CHABERT, J.P. SOULIER

Comportement des Gelcoats polyesters en contact avec l'eau, analyse de la phase aqueuse après vieillissement P. BELLIARD, T. FOUSSARD, D. GAUDIN, J. MOREL

Comportement sous choc des composites à fibre de verre (E) : influence des paramètres M. DANNAWI, P. TOURNIER , A. EL HABBAK

Caractérisation initiale et vieillissement hydrolytique en immersion à 100° C de cinq résines polyester insaturé

B. MONTAIGNE, V. BELLENGER, P.A. HOARAU, J. VERDU

Moyens d'analyse appliqués à l'expertise d'endommagement de pièces navales en matériaux composites A. LEMASÇON, A. GROSPIERRE

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - nº 7 - 1988 - IFREMER, pages 37 à 54

INCIDENCES DE LA RÉGLEMENTATION INTERNATIONALE SUR L'UTILISATION DES COMPOSITES DANS LA CONSTRUCTION DES NAVIRES DE COMMERCE

Bernard NIZERY (1)

RESUME - La construction des navires de commerce fait l'objet d'une réglementation internationale destinée à assurer la sauvegarde de la vie humaine en mer. L'incendie est un danger redoutable sur un navire. Aussi la réglementation maritime internationale définit-elle de façon détaillée les prescriptions auxquelles doivent satisfaire du point de vue de la protection contre l'incendie la construction des navires et les matériaux utilisés. Les principales règles s'appliquant aux différents types de navires sont rappelées. La substitution de composites aux matériaux traditionnels suppose que l'on se soit au préalable assuré que les matériaux composites dont l'utilisation est envisagée répondent aux prescriptions de la réglementation. Un certain nombre d'essais en laboratoire seraíent donc à faire pour qualifier des composites et les éléments de construction tels que ponts et cloisons réalisés avec ceux-ci.

mots-clés : réglementation, navire de commerce, incendie, composites

ABSTRACT - The building of merchant ships deals with an international regulation in order to ensure the safety of life at sea. Fire is a dreadful danger on board a ship. So international marine regulation gives detailed provisions which have to be fulfilled by the building of ships and the used materials about fire protection. The main regulations applied to the different ships are reminded. Before using composite materials in the place of classical materials, it is necessary to be sure that the foreseen composite materials are in agreement with the provisions of the regulation. Some laboratory tests are to be performed to qualify composite materials and building elements such as decks and bulkheads built with those.

key-words : regulation, marchant ship, fire, composite materials

⁽¹⁾ Institut de Recherches de la Construction Navale (I.R.C.N.), 47 rue de Monceau, 75008 PARIS, France.

1 - GENERALITES

1.1 Introduction

Les matériaux composites sont largement utilisés dans la construction de certains navires civils tels que yachts de plaisance, chalutiers, vedettes diverses, et dans celle de navires militaires particuliers tels que chasseurs de mines.

Les avantages bien connus de ces matériaux, gain de poids par rapport au métal, facilité d'adaptation aux problèmes de mise en forme et de mise en place, résistance élevée à la corrosion marine, amagnétisme ... sont à l'origine de ces développements.

Quel que soit le navire ou le bâtiment concerné le concepteur et le constructeur se trouvent confrontés à diverses questions relatives aux composites :

- propriétés et caractéristiques des matériaux
- comportement en service dans un environnement marin
- évolution des caractéristiques dans le temps et vieillissement
- mise en oeuvre
- méthodes de calcul permettant un échantillonnage rationnel
- moyens et procédés de contrôle permettant de vérifier la qualité de la construction.

Ces différents points ont déjà fait l'objet de nombreuses communications ; ils seront largement débattus au cours de ce colloque ; il n'y a pas lieu d'y revenir ici.

La construction des navires de commerce doit répondre aux prescriptions d'une réglementation internationale. La présente communication a pour objet d'étudier les conséquences de cette dernière sur l'utilisation des matériaux composites.

1.2 La réglementation

Le texte de référence est la Convention internationale de 1974 pour la sauvegarde de la vie humaine en mer ; il est le fruit des travaux d'une conférence internationale à laquelle participaient environ 70 pays.

Les textes mis au point par cette conférence, ont fait l'objet d'amendements importants adoptés par le Comité de la Sécurité Maritime de l'OMI (Organisation Maritime Internationale) le 20 novembre 1981. D'autres amendements, beaucoup plus limités, ont été adoptés par ce même comité le 17 juin 1983, et sont entrés en vigueur le 1er juillet 1986.

Ces documents fondamentaux définissent les règles auxquelles doivent satisfaire les navires, leurs installations et leurs équipements. Ces règles visent à réduire les risques d'accident, limiter la gravité de ceux qui se produisent, et assurer des moyens de sauvetage aux passagers et à l'équipage lorsqu'une catastrophe rend nécessaire l'évacuation du navire.

La convention internationale et ses amendements renvoient parfois à des documents complémentaires dits "résolutions" définissant ou précisant certains points spécifiques de la réglementation, par exemple une méthode d'essai.

La conformité du navire à la réglementation est reconnue et sanctionnée par la délivrance de certificats par l'Administration, le terme Administration désignant le gouvernement de l'Etat dont le navire est autorisé à battre le pavillon.

La réglementation internationale ne s'applique pas aux navires de guerre, ni aux transports de troupes ; elle ne s'applique pas non plus aux navires de charge d'une jauge brute inférieure à 500, ni aux navires de pèche, ni aux navires de plaisance ne se livrant à aucun trafic commercial. Elle s'applique aux navires effectuant des voyages internationaux.

Les règlements nationaux sont établis en conformité avec les stipulations de la réglementations internationales ; ils apportent parfois certains compléments ou certaines précisions.

Les sociétés de classification reprennent généralement dans leurs réglements respectifs les dispositions essentielles de la réglementation internationale.

Les matériaux composites sont essentiellement concernés par les dispositions réglementaires relatives à la protection contre l'incendie, et plus particulièrement par celles intéressant la prévention de l'incendie. C'est cet aspect des choses qui est examiné dans la présente communication.

1.3 Dangers des incendies à bord

Le feu à bord d'un navire en mer est un danger redoutable. La vie des passagers et de l'équipage est menacée soit directement par l'incendie lui-même, soit indirectement parce que des installations nécessaires à la sécurité du navire se trouvent détériorées voire détruites.

La situation peut également être très grave si le navire est au port ; cependant l'évacuation des passagers devrait être facilitée pourvu que l'ordre en soit donné assez tôt.

Le feu peut être attisé et sa propagation accélérée par le vent naturel qui la plupart du temps règne en mer.

Un autre danger très grave guette également le navire lorsque l'on cherche à maîtriser le feu en arrosant, avec de grandes quantités d'eau, le foyer d'incendie ; des carènes liquides se forment ; elles sont d'autant plus dangereuses qu'elles sont situées plus haut. La stabilité transversale diminue puis s'annule ; le navire prend de la gite puis chavire. L'exemple le plus spectaculaire est celui du paquebot "Normandie" qui a chaviré de cette façon dans le port de New York pendant la seconde guerre mondiale. Quelques

années plutôt le paquebot "Paris" avait péri de la même façon dans le port du Havre.

1.4 Minimisation des conséquences d'un incendie

Malgré les précautions prises pour éviter les imprudences, malgré les consignes de sécurité, malgré la qualité et la fiabilité des divers installations et équipements du navire, il peut arriver qu'un incendie vienne à se déclarer à la suite d'une défaillance matérielle ou humaine.

En pareil cas il faut que les conséquences de l'incendie restent aussi limitées que possible, et que celui-ci puisse être maîtrisé et éteint rapidement.

Les dispositions envisageables peuvent avoir pour but :

- d'éviter l'extension et la propagation de l'incendie
- de circonscrire l'incendie dans une zone du navire aussi limitée que possible, si on n'est pas parvenu à le maîtriser
- d'utiliser des moyens efficaces pour
 - refroidir les matériaux par l'action de l'eau afin d'éloigner ceux-ci des conditions d'inflammation et de combustion
 - . étouffer l'incendie en empêchant l'air nécessaire à la combustion de parvenir jusqu'au foyer : utilisation de mousse physique ou chimique, ou d'un gaz inerte (gaz carbonique).
- de disposer de moyens de détection fiables et rapides pour pouvoir intervenir très rapidement si un incendie se déclare.

La réglementation édictée par l'OMI propose plusieurs méthodes de protection contre l'incendie; celles-ci peuvent combiner des mesures de plusieurs types, agissant par prévention, par extinction, ou par détection de l'incendie.

1.5 Rappel de quelques notions fondamentales

Matériau combustible et matériau incombustible

La réglementation française considère comme combustible un matériau qui se décompose et brûle au contact d'une flamme, et qui a un pouvoir calorifique supérieur à 600 Kcal/Kg. La décomposition se traduit en outre par des émissions de fumées, suies, gaz, la production éventuelle de gouttes (fusion) ou de débris, parfois enflammés.

La pré-inflammation peut donner lieu à des émissions de gaz dont le seuil de toxicité peut être atteint avant même le début de l'incendie.

On verra plus loin que, pour définir ce qu'est un matériau incombustible, la réglementation maritime internationale dispose de critères

et de méthodes d'essais qui lui sont propres.

Classement des matériaux

Au terme de la législation et d'après les essais de comportement au feu prescrits (arrêté du 4 juin 1973) les matériaux sont classés comme suit :

matériaux incombustibles	indice	MO
matériaux combustibles non inflammables		M1
difficilement inflammables		M2
moyennement inflammables		M3
facilement inflammables		M4
très facilement inflammables		M5

Les matières non inflammables sont celles dont la décomposition s'effectue sans production de flamme ou de gaz inflammable et cesse dès la suppression de la source d'inflammation ou de chaleur.

La valeur de l'indice peut être modifié par un traitement chimique des matériaux, notamment par une ignifugation dans la masse, et par incorporation de charges minéraless ou d'armatures incombustibles (verre textile par exemple).

Réaction au feu

La réaction au feu caractérise l'aliment qui peut être apporté au feu et au développement de l'incendie; elle se traduit par un dégagement calorifique, l'émission de fumées et de gaz, la formation de zones carbonisées et de suies, la production de débris ou gouttes enflammés ou non.

Les essais de réaction au feu s'appliquent en particulier aux semi-produits (plaques, feuilles, films, etc ...) destinés à une mise en oeuvre ultérieure, et aux produits finis (revêtement, par exemple), ainsi qu'aux matériaux composites constitués soit de plaques différentes, soit de plastiques et de matériaux non plastiques.

Résistance au feu

La résistance au feu caractérise le temps pendant lequel les éléments de construction peuvent jouer le rôle qui leur est dévolu malgré l'action de l'incendie. Elle concerne la stabilité et la résistance mécanique, l'étanchéité aux flammes et aux gaz, l'isolation thermique, l'absence d'émission de gaz inflammables sur la face de l'élément non exposé à l'incendie.

2 - LA PROTECTION CONTRE L'INCENDIE DANS LA REGLEMENTATION INTERNATIONALE

2.1 Trois définitions essentielles

Trois expressions relatives aux matériaux de construction reviennent fréquemment dans la réglementation internationale ; il convient d'en rappeler les définitions :

2.11 Matériau incombustible :

Au regard de la réglementation maritime un matériau incombustible est un matériau qui ne brûle ni n'émet de vapeurs inflammables en quantité suffisante pour s'enflammer spontanément quand il est porté à une température d'environ 750°C, cette propriété étant déterminée à la satisfaction de l'Administration au moyen d'une méthode d'essai agrée.

La méthode d'essai permettant de classer comme incombustibles les matériaux de construction navale fait l'objet de la résolution A472(XII) de l'OMI (19 novembre 1981). Les principales dispositions de cette méthode sont rappelées dans l'annexe 1.

Tout autre matériau est considéré comme matériau combustible.

2.12 Acier ou matériau équivalent :

Dans l'expression "acier ou autre matériau équivalent", par les mots "matériau équivalent" il faut entendre tout matériau incombustible qui, de lui-même ou après isolation, possède des propriétés équivalentes à celles de l'acier du point de vue de la résistance mécanique et de l'intégrité, à l'issue de l'essai au feu standard approprié (par exemple, un alliage d'aluminium convenablement isolé).

2.13 Essai au feu standard :

Pour tester la résistance au feu des cloisonnements incendie ceux-ci subissent un essai dit "essai au feu standard", au cours duquel des échantillons de cloisons ou de ponts sont soumis, dans le four d'essai, à des températures correspondant approximativement à la courbe standard température-temps. Celle-ci est une courbe régulière qui passe par les points suivants, ces points représentant les élévations de température par rapport à la température initiale du four :

_	au	bout	des	5	premières	minutes	:	556°C
		11		10	"		:	659°C
		**		15	**		:	718°C
		11		30	"		:	821°C
		**		60			:	925°C

2.2 Principes généraux de la protection

2.21 Principes de base

Les prescriptions relatives à la prévention des incendies à bord s'inspirent des principes suivants :

- 1 division du nvire en tranches verticales par des cloisonnements ayant une résistance mécanique et thermique
- 2 séparation des locaux d'habitation du reste du navire par des cloisons ayant une résistance mécanique et thermique
- 3 utilisation restreinte de matériaux combustibles.

2.22 Différents types de cloisonnement

La réglementation distingue trois types de cloisonnements, les types "A". "B" et "C".

Ceux-ci se distinguent d'après :

- la nature et les caractéristiques des matériaux rentrant dans la construction des cloisonnements
- l'intégrité des cloisonnements vis à vis de leur résistance mécanique et vis à vis de leur étanchéité aux flammes et aux fumées
- les propriétés isolantes des cloisonnements quand ils sont exposés au feu standard pendant une durée déterminée.

Les cloisonnements type "A" doivent être en acier ou autre matériau équivalent; ils doivent en outre être convenablement raidies. Les matériaux utilisés pour leur isolation doivent être incombustibles et approuvés.

Les cloisonnements des types "B" et "C" doivent être construits en matériaux incombustibles approuvés.

Soumis au feu standard les cloisonnements du type "A" doivent empêcher le passage de la fumée et des flammes pendant une heure, tandis que les cloisonnements du type "B" doivent empêcher le passage des flammes pendant une demi-heure.

Le degré d'isolation des cloisonnements tye "A" doit être tel que, lors de l'essai au feu standard, la température moyenne de la surface non exposé ne s'élève pas de plus de 139°C par rapport à la température initiale, et que la température en un point quelconque de cette surface ne s'élève pas de plus de 180°C, à l'issue d'un délai fixé. Suivant que ce délai est de 60, 30, 15 ou 0 minutes, la cloison est dite de classe A 60, A 30, A 15 ou A 0.

Pour un cloisonnement du type "B" l'élévation maximale de température, autorisée, est de 139°C pour la température moyenne et 225°C pour la température maximale, à l'issue d'un délai de 15 minutes ou 0 minute pour un cloisonnement de classe B 15, ou B 0.

Les cloisonnements du type "C" ne font l'objet d'aucune prescription concernant le passage de la fumée et des flammes, ni les élévations de température sur la face non exposée.

Les revêtements combustibles sur les cloisonnements des types "B" et "C" peuvent être autorisés s'ils satisfont aux prescriptions de la réglementation.

Une récapitulation des prescriptions essentielles concernant les différents types de cloisonnement et leur essai au feu standard est fournie par l'annexe 2.

Les modalités d'exécution de l'essais au feu standard font l'objet de la résolution A517(13) de l'OMI ; les éléments essentiels en sont rappelés dans l'annexe 3.

2.3 Catégories de navires

Du point de vue protection contre l'incendie, la réglementation internationale distingue trois catégories de navires :

- les navires à passagers
- les navires de charge
- les navires citernes

Ces derniers font l'objet d'une catégorie à part en raison des risques particuliers dus aux cargaisons de produits pétroliers.

Ces trois catégories vont être successivement examinées.

2.31 Les navires à passagers

- structure

La coque, les superstructures, les cloisons de structure, les ponts et les roufs doivent être en acier ou autre matériau équivalent.

Des dispositions spéciales sont à prendre en cas d'utilisation d'alliage d'aluminium pour la construction de la superstructure.

- Tranches verticales principales

A bord des navires à passagers, la coque, les superstructures et les roufs doivent être divisés en tranches verticales principales par des cloisonnements du type "A". Le degré d'isolation de ceux-ci, fixé par la réglementation, dépend de la nature des locaux situés de part et d'autre.

A l'intérieur des tranches verticales principales, toutes les cloisons qui ne sont pas du type "A" doivent être au moins du type "B" ou "C". Leur degré d'isolation est fixé par la réglementation. Pour les navires ne transportant pas plus de 36 passagers, cette obligation concerne seulement les cloisons situées dans les locaux d'habitation et de service.

Lorsque des cloisonnements du type "A" sont percés pour le passage de câbles électriques, tuyaux, puits, conduits, etc ... ou d'hiloires, barrots ou autres éléments de structure, des dispositions doivent être prises pour que leur résistance au feu ne soit pas compromise. Des mesures doivent être prises également pour maintenir l'intégrité des cloisonnements du type "B" traversés par des tuyaux, des câbles électriques, etc ...

- Ouvertures pratiquées dans les cloisonnements du type "A"

Les portes et leurs encadrements ménagés dans les cloisons de type "A" doivent être en acier ou autre matériau équivalent, et offrir une résistance au feu et au passage de la fumée et des flammes équivalente autant que possible à celle des cloisons.

- Ouvertures pratiquées dans les cloisonnements du type "B"

Les portes et leurs encadrements ménagés dans les cloisons du type "B" doivent être en matériau incombustible et offrir une résistance au feu équivalente autant que possible à celle des cloisons.

2.32 Les navires de charge

- Structure

La coque, les superstructures, les cloisons de structure, les ponts et les roufs doivent être en acier ou autre matériau équivalent.

- <u>Cloisons situées à l'intérieur des locaux d'habitation et des locaux</u> de service

Dans les zones d'habitation et de service la protection contre l'incendie doit être assurée par l'une des trois méthodes suivantes respectivement repérées IC, IIC et IIIC.

- . Méthode IC : Tous les cloisonnements intérieurs sont des cloisons du type B ou du type C en matériaux incombustibles. Il n'est pas exigé de dispositif automatique d'extinction par eau diffusée, ni de système de détection, ni de système avertisseur d'incendie dans les locaux d'habitation et de service.
- . <u>Méthode IIC</u>: La protection est assurée par un dispositif automatique d'extinction par eau diffusée, un système de détection et un système avertisseur d'incendie. Dans de cas, en règle générale, il n'existe aucune restriction en ce qui concerne le type de cloisonnement intérieur.

. Méthode IIIC: Un dispositif fixe de détection et d'alarme d'incendie est installé. En règle général il n'existe aucune restriction en ce qui concerne le type de cloisonnement intérieur. Cependant, on doit prévoir des cloisons du type "B" ayant une intégrité au feu du type "BO" entre les locaux ou groupes de locaux dont la surface est égale ou supérieure à 50 mètres carrés.

L'intégrité minimale au feu des cloisons et des ponts qui séparent des locaux adjacents est précisée par la réglementation; ce point concerne essentiellement l'application de la méthode IC.

- Protection des escaliers et des cages d'ascenseurs

Des règles spéciales s'appliquent à la protection des escaliers et des ascenseurs dans les locaux d'habitation, les locaux de service et les postes de sécurité ; elles imposent suivant les cas l'utilisation de cloisonnements du type "BO" ou du type "AO" au minimum. En outre tous les escaliers doivent avoir une charpente en acier, sauf lorsque l'Administration, approuve l'utilisation d'autres matériaux équivalents.

- Portes dans les cloisons d'incendie

La résistance au feu des portes doit, dans la mesure du possible, être équivalente à celle de la cloison.

2.33 Les navires citernes

- Parois extérieures des superstructures et des roufs

On doit prévoir une isolation du type A60 pour les parois extérieures des superstructures et des roufs délimitant les locaux d'habitation et de service sur l'ensemble des surfaces côté citernes à cargaison et sur 3 mètres à partir de la façade avant pour les parois latérales. Dans le cas des parois latérales des superstructures et des roufs, l'isolation doit être prévue sur une hauteur donnant satisfaction à l'Administration.

- <u>Structure, cloisons situées à l'intérieur des locaux d'habitation et des locaux de service</u>

Les prescriptions relatives à la structure et aux cloisons situées à l'intérieur des locaux d'habitation et des locaux de service sont celles applicables aux navires de charge pour la méthode IC.

- Intégrité au feu des cloisons et des ponts

Les règles relatives à l'intégrité au feu des cloisons et des ponts qui séparent des locaux adjacents sont propres aux navires citernes ; elles figurent dans le document de l'OMI.

3 - POSSIBILITES D'UTILISATION DES COMPOSITES

3.1 Situation actuelle

Dans le cas particulier d'un navire de charge pour lequel la méthode protection contre l'incendie IIC ou la méthode IIIC aurait été retenue, rien ne s'opposerait, du point de vue de la réglementation internationale, à la réalisation de cloisons en composites.

Dans tous les autres cas et quel que soit le type du navire l'approbation préalable de l'Administration pour les matériaux et les éléments de la construction (cloisons, ponts, portes, etc ...) serait indispensable. L'agrément de la société de classification et l'accord de l'armateur seraient également nécessaires.

Actuellement il ne semble pas que les connaissances et les informations disponibles soient suffisantes pour permettre d'entreprendre la construction d'un navire de commerce dans lequel il serait fait un large emploi de matériaux composites pour réaliser la coque et les superstructures. Des investigations complémentaires seraient à mener sur la réaction au feu et sur la résistance au feu des matériaux susceptibles de répondre aux exigences de la réglementation internationale.

3.2 Investigations proposées

Les investigations à entreprendre concerneraient essentiellement l'incombustibilité des matériaux, les possiblités de substitution à l'acier de matériaux composites considérés comme équivalents, le compartiment à l'essai au feu standard de cloisonnements réalisés en matériaux composites convenablement isolés.

Une première sélection s'impose parmi la multiplicité des matériaux composites qui existent sur le marché, afin de ne retenir que ceux à priori susceptibles de répondre aux critères de la réglementation maritime. Le choix serait fait à partir de la documentation existante, en particulier les fiches techniques des fabricants, les procès verbaux d'essais en laboratoire et la réglementation applicable à la construction immobilière. Des critères complémentaires de sélection pourraient également être considérés : conditions de mise en oeuvre, vieillissement, tenue en service, coût ...

Les composites sélectionnés seraient soumis aux essais conditionnant leur classement comme matériau incombustible au titre de la réglementation maritime internationale, et ceux qui seraient reconnus satisfaisants feraient l'objet d'une procédure d'approbation auprès de l'Administration.

L'étape suivante consisterait à étudier les possibilités de réalisation de cloisonnements de type "B" en composites en faisant subir à ceux-ci des essais au feu standard. Les dispositions répondant aux critères d'acceptation seraient présentées à l'approbation de l'Administration.

Il faudrait ensuite rechercher quelles seraient les dispositions à adopter pour qu'un composite puisse être considéré comme un matériau équivalent à l'acier. Ces dispositions ne seraient acceptables qu'à la condition de rester d'un coût raisonnable et de ne pas imposer de sujetions d'emploi excessives.

Si l'on peut apporter une réponse positive à la question de l'équivalence entre un composite donné et l'acier, on pourra alors envisager la conception de cloisons et de ponts du type "A" réalisés avec ce composite.

Les différents essais nécessaires devraient être exécutés par un laboratoire agréé.

CONCLUSION

L'analyse faite conduit aux conclusions suivantes :

- 1 Actuellement l'emploi de matériaux composites dans la construction des navires de commerce peut être envisagé pour la cloisons situées à l'intérieur des locaux d'habitation et des locaux de service des navires de charge pourvu que la protection de ces locaux contre l'incendie soit assurée essentiellement soit par un dispositif automatique d'extinction par eau diffusée (méthode IIC) soit par une installation fixe de détection et d'alarme d'incendie (méthode IIIC).
- 2 Hormis ces deux cas le développement de l'emploi des composites pour des applications plus étendues implique en premier lieu d'apporter, par des essais au laboratoire, la preuve que les matériaux utilisés satisfont aux critères d'incombustibilité imposés par la réglementation maritime internationale.
- 3 La substitution d'un matériau composite à l'acier pour la construction d'éléments pour lesquels la réglementation prescrit l'utilisation d'acier ou d'un matériau équivalent nécessiterait d'apporter au préalable la preuve par des essais appropriés que le matériau composite, si besoin convenablement isolé, peut être considéré comme équivalent à l'acier tant du point de vue résistance mécanique que résistance au feu.
- 4 Les cloisons et ponts des types A et B, pour la réalisation desquels on envisagerait l'utilisation d'un matériau composite devraient être soumis à l'essai au feu standard approprié de façon à vérifier qu'ils répondent aux prescriptions de la réglementation internationale.
- 5 En résumé les possibilités d'utilisation des composites sont liées à l'acquisition d'une meilleure connaissance du comportement au feu de ces matériaux tant vis à vis de la résistance mécanique que de

- l'intégrité et des émissions de gaz toxiques. Le développement ultérieur des applications dépendra des résultats des essais qui seront exécutés.
- 6 Il va sans dire que outre les aspects techniques, l'aspect économique conditionnera largement l'évolution de l'emploi des composites pour la construction des navires de commerce.

ANNEXE 1

ESSAI D'INCOMBUSTIBILITE POUR LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION NAVALE

Appareillage

Four :

- . tube en aluminium réfractaire hauteur 150 mm diamètre intérieur 75 mm
- . chauffage par enroulement électrique
- . diffuseur tronconique vertical de 500 mm de longueur à la partie inférieure du four.

Etalonnage et régulation du four :

- . réglage de la température du four à 750° ± 10°C
- . température de la parois : elle ne doit pas varier de plus de 50°C sur une longueur de 100 mm mesurée à mi-hauteur, la température moyenne étant de 850°C environ.

Mesure des températures :

- . au moyen de trois thermocouples mesurant respectivement
 - la température du four
 - la température de la surface de l'éprouvette
 - la température au centre de l'éprouvette
- . l'intervalle entre les mesures ne doit pas dépasser 10 secondes.

Eprouvettes

Nombre et dimensions :

. 5 éprouvettes cylindriques diamètre 45 mm, hauteur 50 mm

Préparation :

Dans le cas des matériaux composites, si nécessaire l'épaisseur de l'éprouvette doit être préparée en vue d'obtenir l'épaisseur exigée en ajustant proportionnellement l'épaisseur de chaque composant. Les faces supérieures et inférieures de l'éprouvette doivent être munies du revêtement définitif du matériau.

Conditionnement:

Les éprouvettes doivent être conditionnées dans une étuve ventilée maintenue à la température de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ pendant 20 heures au moins et

refroidies ensuite jusqu'à la température ambiante dans un dessicateur où elles doivent être conservées jusqu'au moment de l'essai.

Chaque éprouvette doit être pesée avant l'essai.

Mode opératoire

Observations à effectuer :

- . enregistrement des températures indiquées par les trois thermocouples
- . relevé de l'apparition éventuelle ainsi que la durée des flammes existantes
- . pesée de chaque éprouvette après l'essai.

Classification des matériaux

Incombustibilité:

Un matériau est réputé incombustible si :

- 1 la moyenne des cinq températures maximales indiquées par les thermocouples du four ne dépasse pas de plus de 50°C la température initiale du four
- 2 la moyenne des cinq températures maximales indiquées par les thermocouples de surface ne dépasse pas de plus de 50°C la température initiale du four
- 3 la moyenne de toutes les durées maximales des flammes persistantes enregistrées ne dépasse pas 10 secondes ; et
- 4 la perte de poids moyenne des éprouvettes pendant l'essai ne dépasse pas 50 p.100 du poids initial mesuré après le conditionnement.

Combustibilité

Si l'un des quatre critères n'est pas satisfait, le matériau est réputé combustible.

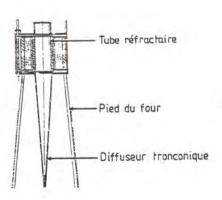


Fig. 1 Appareillage

ANNEXE 2

ESSAI AU FEU STANDARD

Les différents types de cloisonnement

	Matériau des flamm		Isolation				
Type de cloisonnement		Passage des flammes	Elév de temp	Au bout			
		et des fumées	Moyenne	Maximale	de		
A 60	Acier	Empêcher le	139*	180*	60 min		
A 30	ou autre	passage des fumées et des	139*	180*	30 min		
A 15	matériau	flammes pendant une heure (2)	139*	180°	15 min		
A O	équivalent	une neure (2)	139°	180*	0 min		
B 15	Matériaux	Empêcher le	139*	225*	15 min		
ВО	incombustibles approuvés (1)	passage des flammes pendant une demi-heure	139*	225*	0 min		
C	Matériaux incombustibles approuvés (1)						

- (1) Revêtements combustibles autorisés s'ils satisfont aux prescriptions de la réglementation
- (2) Toutefois pour une cloison de type A 15 ou A 30 l'essai peut être limité à 15 ou 30 minutes si l'âme est en acier

On doit mesurer la déformation maximale de l'échantillon, et, pour une porte, le déplacement maximal de chaque point de la porte par rapport au dormant.

Doivent en outre faire l'objet d'essai d'incombustibilité :

- les matériaux isolants utilisés pour les cloisons et ponts type "A" et les ponts type "B"
- les matériaux utilisés pour la construction des cloisons et plafonds du type "B" (incombustibles)
- les matériaux utilisés pour la construction des portes destinées aux ouvertures pratiquées dans les cloisons du type "A" ou du type "B"

ANNEXE 3

ESSAIS AU FEU STANDARD DES CLOISONNEMENTS TYPES "A" ET "B"

Dimensions et constructions des échantillons

. dimensions minimales 1910 mm x 2440 mm soit 4,66 m²

- . pour les cloisons et ponts du type "A" isolés l'épaisseur des tôles, l'échantillonnage et l'écartement des raidisseurs et barrots sont fixés par la règlementation
- . des précisions sont données concernant l'installation des portes

Méthodes d'essais

Conditionnement de l'échantillon

- . Stabilisation approximative du poids de l'échantillon dans une atmosphère ayant une humidité relative de 55 \pm 15 p.100 et une température de 20° \pm 5°C.
- . Après avoir été conditionné et avant d'être soumis à l'essai, l'échantillon ne doit pas être à une température de plus de 40°C.

Mode de fixation des échantillons dans le four

- . Essai des cloisons et portes en position verticale
- . Essai des ponts et plafonds en position horizontale
- . Pour un échantillon de pont ou de plafond seule est exposée au four la face inférieure
- . Mode de fixation réalisée de façon à rendre impossible une mauvaise interprétation des résultats de l'essai de passage des flammes et des fumées.

Contrôle du four

Par 4 thermocouples.

Essai de résistance à la pénétration de la fumée et des gaz chauds

Les fentes et autres crevasses qui se forment au cours de l'essai ne doivent pas permettre l'inflammation d'un tampon de coton que l'on place pendant 30 secondes à une distance de 25 mm environ de la fente. Si aucune inflammation ne se produit, on doit enlever le tampon et recommencer l'opération à des intervalles ne dépassant pas 5 minutes. Les tampons ne doivent servir qu'une seule fois.

Observation de la température de la face non exposée

Les observations sont à faire à intervalle de 5 minutes au plus.

Les positions des thermocouples sont les suivantes :

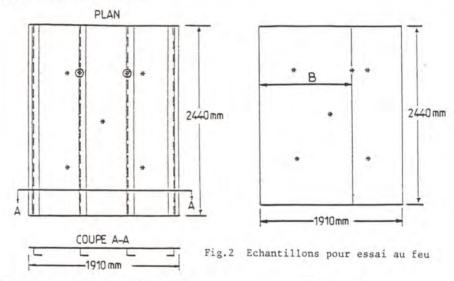
- . au centre de chaque quartier
- . au centre du panneau
- . sur les 2 raidisseurs centraux, pour les cloisons du type "A"
- . sur un joint au moins, s'il y a lieu, pour les cloisons du type "B".

Pour les portes les mesures sont faites en 5 points.

Température moyenne de l'âme

Dans le cas de cloisons en alliage d'aluminium supportant des charges, la température moyenne de l'âme mesurée au moyen de thermocouples ne doit pas s'élever de plus de 200°C par rapport à sa température initiale à aucun moment de l'essai d'une heure, dans le cas d'une cloison du type "A", de l'essai d'une demi-heure dans le cas d'une cloison du type "B".

Lorsque l'âme est en un matériau autre que l'acier ou un alliage d'aluminium, l'Administration doit décider de la hausse de température à ne pas dépasser pendant l'essai.



cloison type "A" et pont type "B"

pont type "B"

* positions des thermocouples de surface

Les thermocouples (*) ne sont pas exigés sur l'échantillon de pont type "B"

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 55 à 64

Contribution à l'étude du comportement de stratifiés réalisés avec une matrice hybride.

C. BALEY* , P. BONO** , M. CAILLER***

Résumé: Le produit formulé par dispersion d'écailles de verre dans des résines thermodurcissables peut selon la formulation être utilisé comme revêtement de protection (Coatflake) ou comme matrice de stratification (Resoflake).

L'introduction d'écailles "ensimées" dans les résines polyester entraîne plusieurs conséquences :

- la modification de la polymérisation avec formulation d'un pseudo réseau solide" qui correspond à l'état B de la résine, bien avant la gelification proprement dite.
- l'amélioration globale de l'étanchéité du revêtement ou du stratifié.
- une amélioration de certaines propriétés mécaniques des stratifiés , dont la rigidité.

Une meilleure connaissance de l'apport de ce type de matrice permettra à optimiser les formulations.

Mots clés : écailles — paillettes — thermodurcisable — propriétés chimiques mécaniques de stratifié — Polymérisation

Définition : une matrice hybride est une matrice thermodurcissable dans laquelle on été introduit des écailles de verre à l'aide de différents additifs

1. Polymérisation

- 1.1 La comparaison de la perméabilité à la vapeur d'eau en régime statonnaire de 2 types d'échantillons : l'un en Gel Coat (polyester isophtalique), l'autre en Coatflake, montre que la perméabilité diminue avec la présence d'écailles (graphique 0). Les propriétés physiques de la matrice lors du cycle de polymérisation varient par rapport à celles de la résine de base, ainsi qu'il est démontré dans la première partie de l'exposé. La deuxième partie traitera des propriétés mécaniques des matrices hybrides et des stratifiés réalisés à partir de ces matrices.
- 1.2 Le graphique numéro 1 présente la variation de viscosité de la matrice pendant la polymérisation ; la présence d'écaille réduit le temps de gelification des résines.

Courbe 1 : 50 g de résine A

Courbe 2 : 60 q de Coatflake dont 50 g de résine A

^{*} I.N.E.R.N rue Didier Bestin 56100 LORIENT

^{**} ISODECO Z.I.Park C'hastel 29170 FOUESNANT *** M. CAILLER Professeur à l'ENSM - 1 rue Delanoe 44072 NANTES

1.3 - L'étude de Viariation de la viscosité des resines en fonction du pourcentage d'écailles (graphique numéro 2) montre que celui-ci influe directement sur la vitesse de polymérisation.

Courbe 1:8.4 % d'écailles Courbe 2:17.2 % d'écailles Courbe 3:23.7 % d'écailles

Le graphique numero 3 présente la variation de température de transition vitreuse en fonction du pourcentage d'écailles ; le Fg diminue quand le pourcentage d'écailles augmente.

1.4 - Avec certaines dispersions d'écailles de verre, la formation d'un pseudo "rèseau solide",(rèversible sous l'effet de la temperature mais stable sous action mécanique), s'observe avant durcissement de la rèsine, ceci correspond grossièrement à la formation d'un reseau bidimensionnel, dit état B.

Les graphiques 4 et 5 présentent l'évolution de la viscosité pendant la polymérisation d'une résine polyester (1) et (3) et celle de la dispersion correspondante de résine avec écailles (2) et (4).

Système (1) et (2) : Cobalt à 0.3% Butanox M50 0.5% T = 19° Système (3) et (4) : Cobalt à 0.3% Butanox M50 : 1% T = 19°

Il est supposé qu'à la surface des écailles, se produit, par adsorption sélective, une augmentation de concentration de l'initiateur de réaction de polymérisation de la résine.

- 1.5 L'influence de la nature de la surface des écailles sur la vitesse de polymérisation d'une dispersion résine / écaille est vérifiée par ailleurs. Ainsi toutes choses étant égales par ailleurs, la polymerisation de deux dispersions résines écailles différera selon que la teneur en eau à la surface des écailles est inférieure à 0,05 % dans un cas et égale0,02 % dans l'autre ; le temps de gel passera de 20 minutes pour la matrice a écailles sèches, à 34 minutes pour la martrice à écailles humides.
- 1.6 La perméabilité à la vapeur d'eau d'un revêtement à base d'écailles de verre est inversement proportionnelle à l'augmentation de concentration des écailles.
 Il existe cependant un optimum lié à l'épaisseur de la couche du revêtement , à la viscosité du milieu ainsi qu'a la formulation de la dispersion.

2. Propriétés mécaniques

En fonction du type de renforcement souhaité les renforts utilisés dans les plastiques peuvent être répartis en trois classes : unidirectionnel (fibres), bidimensionne (écailles-paillettes), ou tridirectionne (billes ou sphères). Parmi ces trois classes les deux premières sembient les plus attrayantes parce qu'elle permettent une meilleur amélioration de la rigidité du produit réalisé. Les fibres sont plus efficaces que les écailles en terme de transfert de charges et donnent donc des performances mécaniques supérieures. Les paillettes présentent l'avantage de renforcer le produit simultanément dans deux directions d'où un intérêt pour les stratifiés plans.

2.1 - L'evolution du module d'Elasticité d'une resine hybride en fonction du poucentage d'écailles est présenté dans le graphique numéro 6. Les écailles utilisées dans cette étude sont en verre C , ont pour diametre 0.4 mm et pour epaisseur 0.004 mm.

Le module d'Young caractérise la résistance à la déformation du matériau. Sa valeur en flexion augmente avec le pourcentage d'écailles pour une résine polyester isophtalique.

Ce graphique porte égalementles résultats de calculs théoriques correspondant aux valeurs experimentales dans les % d'écailles étudies.

Pour que ce renforcement soit aussi significatif il faut disperser les écailles correctement, leur assurer une bonne itaison avec la matrice et adapter la formulation pour que lors de la polymerisation les écailles se trouvent orientées parallellement au plan de stratification.

Une étude du comportement micromécaniques des matrices hybrides par eléments finis est aujourd'hui en cours (voir graphique numéro 7) et permet d'appréhender l'importance sur les propriétés de la matrice hybride:

- de la dimension des écailles

- de leur rapport d'aspect
- des propriétés élastiques de chaque composant
- du poucentage volumique de renfort
- de la qualité de l'adhésion
- 2.2 Les matrices hybrides peuvent servir pour la stratification de renforts fibreux.

Quelques résultats expérimentaux d'essais mécaniques seront présentés en comparant deux séries d'éprouvettes, l'une stratifié avec un Resoflake, l'autre avec la résine de base de sa formulation, afin de montrer de montrer l'apport de ce tupe de matrice. Toutes les éprouvettes ont été stratifiées le même jour, par la même personne et dans les mêmes conditions

2.2.1 - Essais de traction sur tissu de verre (exemple nº1).

Le tissu choisi est un taffetas équilibre de grammage 300 gr/m2, le pourcentage de fibres dans les éprouvettes stratifiées par moulage au contact est de 50%.

Des essais de traction sont éffectués en faisant varier l'angle de sollicitation par rapport à la chaîne du tissu. Les quatres plis composant les éprouvettes sont tous crientés de la même façon

La matrice de base est une polyester isophtalique.

La polaire présentant la variation du module d'Voung (Voir graphique numero 7) des éprouvettes stratifiées avec le Resoflake en fonction de l'angle chaîne/ axe de sollicitation présente une rigidité supérieure dans tous les cas

L'étude la polaire présentant les contraintes à la ruptures (graphique 8) des deux série d'eprouvettes montre que les contraintes à la rupture ne varient pas avec la présence d'écailles. (ces résultats étaient previsibles)

2.2.2 - Essais de flexion sur empilement monolithique (exemple n°2) L'empilement est composé d'une alternance de tissus de 170 gr/m2 (3 plis) et de Mat 300 gr/m2 (2plis). La matrice de base est une résine polyester orthophtalique. Le module d'Young moyen des éprouvettes stratifiées avec la matrice de base est de 1236 daN/mm2 et celui des éprouvettes stratifiées avec le Resoflake est de 1473 daN/mm2 (+19%). La différence constatée est donc

2.2.3. – Essais de flexion sur éprouvettes sandwiches (exemple n°3). L'empilement est composée d'une alternance de 2 Mat 300 gr/m2 et tissu roving 500 gr/m2 sur chaque face, et d'une âme en balsa bois debout de 18.5 mm d'épaisseur. La résine de base est une polyester isophtalique. Les essais en flexion 3 points ont montré que le moment fléchissant moyen pour les éprouvettes de résine de base est de 746 daN*mm par mm de largeur d'éprouvette et dans le cas de la stratification avec le Resoflake de 888 daN*mm; soit une augmentation du moment fléchissant à la rupture de 20 % environ

On constate donc pour ces essais une nette augmentation de la rigidité de la pièce stratifiée avec écailles ce qui est intèressant puisque la "souplesse" des matériaux sandwichs constitue un frein à leur développement.

2.3 - La présence d'écailles dans le stratifié conduit à une une augmentation de la masse volumique du stratifié et il est intéressant d'en étudier la variation de rigidité relative.
La densité d'un tissu équilibre stratifié (vf = 32 %) est de 1.63 pour la résine de base et de 1.69 pour le Resoflake.
Le module d'Young en flexion de ce tissu est de 1621 daN/mm2 dans un cas et de 1937 daN/mm2 dans l'autre (+19%).(Résultats provenant d'essais expérimentaux).
Le rapport (E/d) est égale 994daN/mm2 dans un cas et à 1146 daN/mm2, dans l'autre, l'augmentation de rigidité relative avec le Resoflake est dans ce cas de 15%.

- 2.4 Les paramètres influençant les performances mécaniques du stratifié sont :
 - Nature et formulation du Resoflake
 - Fibres . * % de fibres en volume dans le stratifié
 - * Traitement de surface des fibres
 - * Nature des fibres
 - * Présentation des fibres
 - Technique de mise en geuvre
 - Type de structure

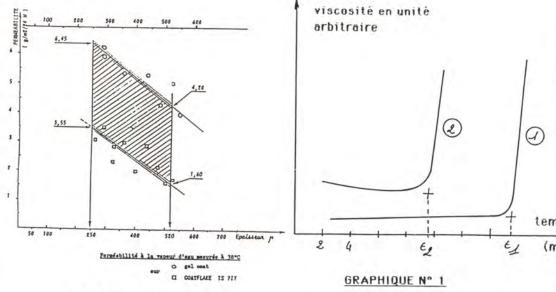
significative (Dispersion ? -> t).

Les résultats présentes concernent des éprouvettes réalisées par moulage contact. D'autres méthodes de mise en oeuvre sont à l'étude pour obtenir des taux de fibres supérieurs. Le plus important taux de fibres obtenu expérimentalement dans le stratifié est de 55% en volume avec des écailles. Cette présentation ne présente qu'une partie restreinte des résultats obtenus.

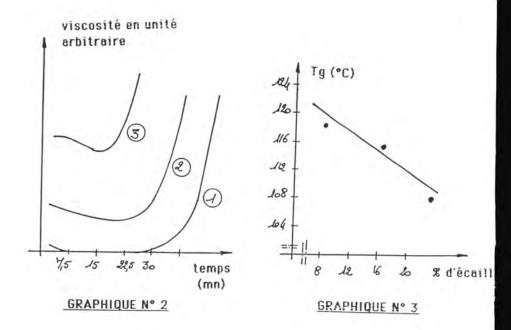
Conclusion

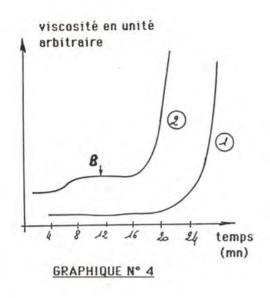
Les études de comportement ne sont pas terminées. Il semble que les renforts de type écailles peuvent apporter des solutions à un ensemble de problèmes rencontrés dans la mise en œuvre des stratifiés. Les études en cours dont le but est d'améliorer:

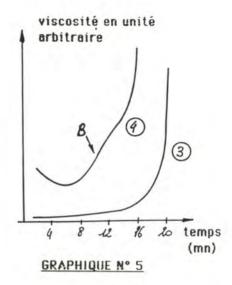
- la connaissance du comportement des pièces réalisées avec ces nouvelles matrices.
- la formulation au regard des effets à obtenir, ouvrant d'intéressantes perspectives.

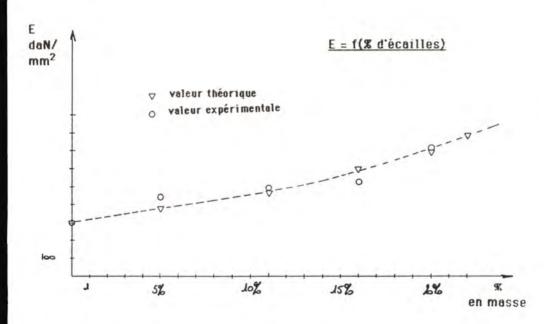


GRAPHIQUE Nº 0

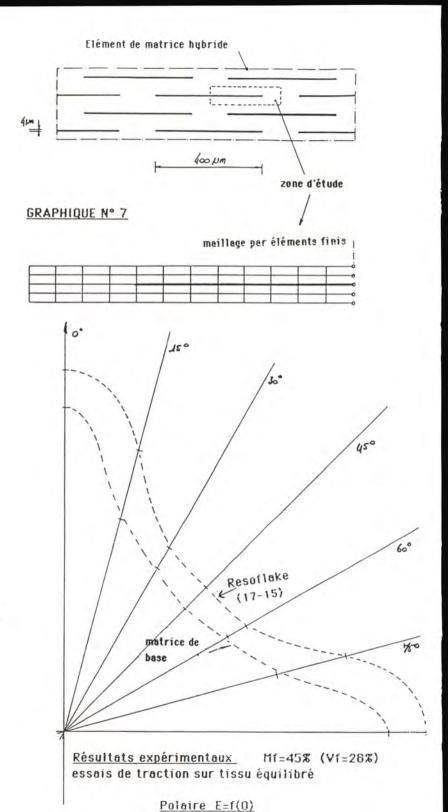




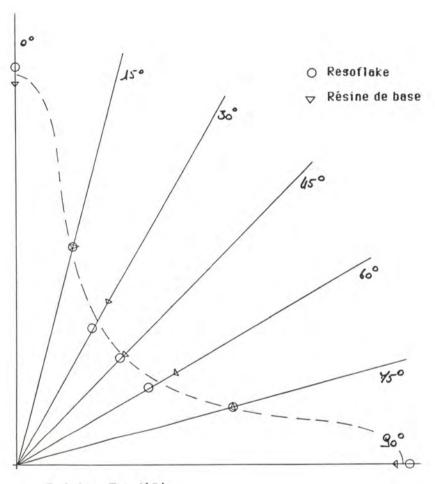




GRAPHIQUE Nº 6



GRAPHIQUE Nº 8



Polaire T = f(0)traction sur tissu équilibré ; Vf=0,28 ; Mf=0,45

GRAPHIQUE Nº 9

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 65 à 80

ETUDE DU COMPORTEMENT AU VIEILLISSEMENT DE STRATIFIES POLYESTER/ VERRE E EN MILIEU MARIN.

JACQUEMET R. (1) LAGRANGE A. (1) GROSPIERRE A. (2) LEMASCON A. (2)

RESUME - L'importance de la structure chimique d'une résine polyester, du renfort de fibres de verre, de la température et de la nature du milieu sur le comportement au vieillissement physico-chimique de différents stratifiés polyester/verre E est étudiée.

La sorption d'eau à différentes températures (5, 25, 40, 60°C) en eau de mer et en eau distillée est analysée.

Un suivi de l'évolution des caractéristiques mécaniques (flexion, cisaillement) en fonction du temps met en évidence après vieillissement une meilleure tenue mécanique en cisaillement de stratifiés à base de résine isophtalique due à l'absence d'hydrolyse et de décohésions d'interface fibre/résine sur une période de 6 mois à 60°C en eau distillée.

mots-clés : vieillissement, matériaux composites, résine polyester, milieu marin

<u>ABSTRACT</u> - This study shows the impact of chemical structural of a resin polyester, glass fiber reinforced, temperature and natur of water on the physical and chemical ageing for different composites materials polyester with glass E reinforced.

The water absorption at different temperature (5, 25, 40, 60°C) in sea-water and in distilled water is presented.

A variation of mechanicals properties (bending, shear) in ageing time shows the best mechanical comportement in shear for the composites materials with isophtalic resins because no hydrolysis and delamination resin/fiber this results has been noted after 6 months in distilled water at 60°C .

Key-words: ageing, composites materials, resin polyester, marine environmental.

⁽¹⁾ IFREMER Brest, BP 70, 29263 PLOUZANE

⁽²⁾ CETIM, 74 Route de la Jonelière, BP 957, 44076 NANTES CEDEX

INTRODUCTION

Le manque de connaissance du comportement à long terme des matériaux composites sous chargement mécanique dans un environnement agressif, est une des limites actuelles à leur introduction dans les applications structurelles. Peu de résultats, concernant la chute des propriétés mécaniques au cours du temps, sont connus sur les résines polyester bien qu'elles soient utilisées principalement en technologie navale.

La finalité de cette étude est de comparer le comportement au vieillissement de résines polyesters de nature chimique différente .

Des mécanismes de dégradations réversibles (diffusion de l'eau, gonflement différentiel ou plastification) et irréversibles (hydrolyse de la résine ou décohésions d'interface fibre/Matrice) sont mis en évidence.

Des essais mécaniques (flexion, cisaillement) effectués au cours du temps sur les différents stratifiés polyester/verre E permettent de quantifier les différents processus de dégradation.

Seule une meilleure connaissance des différents mécanismes d'endommagement permettra d'expliquer la chute des caractéristiques mécaniques.

1 MATERIAUX ETUDIES

1.1 RESINES

Il s'agit de 4 types de résines dont 3 utilisant le même agent thixotropique, et approvisionnées par CDF chimie :

- Une résine polyester tetrahydrophtalique (tétra)
- Une résine polyester isophtalique (iso)
- Une résine polyester orthophtalique (ortho)
- Une résine polyester isophtalique-thixotrope

(ISO-THIXO)

l'agent thixotropique de la résine (ISO-THIXO) est une charge (microbilles de verre)

Accélérateur : octoate de cobalt NLP 51 P (AKZO) = 0,15 à 0,2%

Catalyseur : Butanox M50 : 1.5%

Peroxyde de Méthyl-Cétone

1.2 RENFORT

Un renfort de fibres de verre E à armure unidirectionnelle de 230gr/m2 à ensimage textilo-plastique est utilisé.

1.3 MISE EN OEUVRE

Les éprouvettes sont élaborées au CETIM de Nantes par moulage au contact à froid (20°C), sous presse, sous forme de plaques de 400 x 400 mm2 et d'épaisseur 2mm.

Le temps de gélification est de 11 minutes. Le temps de polymérisation est de 30 minutes et le pic exothermique se situe à 150°C environ.

Une post-cuisson de 2 heures à 100°C, optimisée par analyse enthalpique différentielle, permettant de stabiliser et de réticuler les résines à 80-90%, est effectuée sur chacun des matériaux.

2 ETUDE DE LA DIFFUSION DE L'EAU

2.1 METHODOLOGIE D'ESSAIS

a) Effet de la température

L'étude des cinétiques de sorption de l'eau dans un matériau à différentes températures donne accès à l'énergie d'activation de la diffusion par la connaissance du coefficient de diffusion D à ces températures ; lequel suit une loi d'Arrhénius.

$$D(T) = Do \exp(-EA/RT)$$
 (1)

D = coefficent de diffusion en mm²/h

EA = Energie d'activation en KJ/mol R = constante des gaz parfaits en $J/mol^{-1}oK^{-1}$

Do = constante dépendant du materiau et du milieu d'immersion

T = température en Kelvin

b) Détermination des paramètres D et Ms

Après la post-cuisson de 2h à 100°C, les éprouvettes (stratifiés et résines pures) sont mises en étuve à 45°C jusqu'à stabilisation de leur masse Mo. Elles sont ensuite immergées dans le milieu donné et pesées à différents temps d'exposition. Pour la prise en poids, les échantillons sont retirés du milieu, essuyés et séchés superficiellement. La valeur obtenue au bout du temps t, est exprimée comme la moyenne arithmétique des prises en eau Mt% de 3 échantillons du même matériau.

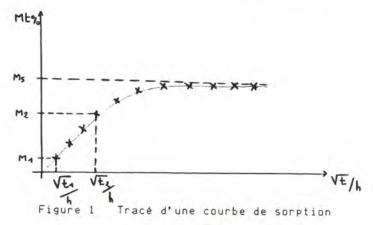
La prise en poids s'écrit

$$Mt\% = \frac{M(t) - Mo}{Mo} * 100$$
 où $M(t)$ est la mesure à t
$$Mo = M(t=0)$$

La courbe de sorption de l'eau Mt% = fct $(\sqrt[4]{t})$ est tracée à une température donnée (fig.1).

h est l'épaisseur de l'éprouvette

Dimensions des éprouvettes = $50 \times 100 \times 2.5 \text{ mm}^3$



Mt% = fct (√t/h) A partir du calcul de la pente

PENTE =
$$\frac{M2 - M1}{\sqrt{\frac{t2}{h}} - \frac{\sqrt{t1}}{h}} = \frac{4 \text{ Ms} \sqrt{D}}{\sqrt{\pi}}$$
 (2)

t = temps en heure

h = épaisseur de l'éprouvette en mm

D = coefficient de diffusion en mm2/h

Ms en %

La détermination du taux de saturation en eau Ms et de la pente de la courbe permettent d'accéder au coefficient de diffusion D par l'utilisation du modèle de SPRINGER (1) (2) (3).

2.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

a) Influence de la température sur les cinétiques de sorption

L'influence de la température $(5,15,25,32,40,60,80^\circ\text{C})$ sur la cinétique de sorption d'un stratifié polyester orthophtalique/verre E en immersion en eau distillée est mise en évidence sur les figures 2 et 3.

Une élévation de la température du milieu entraîne une augmentation :

- de la pente de la cinétique de diffusion

- du taux de saturation d'eau dans le matériau à l'équilibre.

Ceci est dû à une augmentation du volume libre dans le réseau moléculaire tridimensionnel des différentes résines.

A haute température (de 40 à 80°C), l'hydrolyse de la résine entraîne une rupture de liaisons moléculaires et provoque une chute irréversible des caractéristiques mécaniques du matériau. Ce mécanisme de dégradation chimique, thermiquement activé, modifie les cinétiques de diffusion de l'eau se traduisant par une absence de palier de saturation. (fig 3). Les lois de Fick ne sont plus vérifiées.

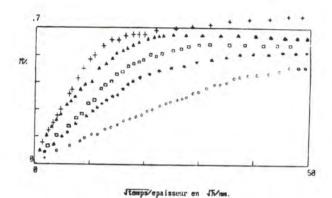
 b) Influence du renfort de fibres de verre sur les cinétiques de diffusion

Le renfort de fibres de verre constitue un obstacle à l'acheminement de l'eau dans le stratifié, ce qui a pour effet de retarder l'équilibre de concentration d'eau dans l'échantillon. A 5°C, en eau distillée, le seuil de saturation Ms est atteint après 13 mois d'immersion sur un stratifié polyester tétrahydrophtalique/verre E et après une période de 5 mois seulement pour la résine pure. (fig 4)

Il semble que la concentration en eau dans un stratifié ne soit pas uniforme à l'équilibre contrairement au cas de la résine pure.

Pour un taux de renfort de fibres de verre de 50% en masse, le taux de saturation MS de la résine pure est supérieur à deux fois le taux de saturation du stratifié à température donnée.

Lors d'un vieillissement accéléré en eau distillée à 60°C, l'hydrolyse des résines polyester orthophtalique après 1 mois, et tétrahydrophtalique après 4 mois (figure 5c et 5d) met en évidence une différence de comportement à la sorption entre la résine pure et le stratifié. Cette modification est dûe à une attaque chimique de l'interface fibre/résine provoquant des décohésions visibles par microscopie électronique à balayage (photo 1). Ce phénomène n'apparaît pas sur les deux résines polyester isophtalique (figures 5a et 5b), mais une désorption d'eau, dûe au rejet de produits de dégradation dans la phase aqueuse, est observée.



+ 40°C; • 32°C; • 25°C; • 15°C; • 5°C.

Fig. 2:INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA CINETIQUE DE DIFFUSION DU POLYESTER ORTHOPHIALIQUE/VERRE E (DE 5 a 40°C.)

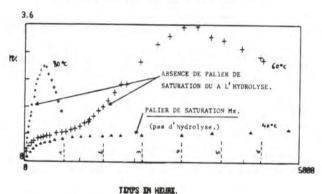


fig 3:ACTIVATION THERMIQUE DE L'HYDROLYSE DE LA RESINE SUR UN POLYESTER ORTHOPHTALIQUE/VERRE E (DE 40 280°C.)

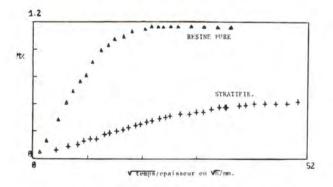


fig 4: INFLUENCE DU RENFORT DE FIBRE DE VERRE È SUR LA CINETIQUE

DE DIFFUSION DU POLYESTER TETRAHYDROPHTALIQUE
EN EAU DISTILLEE A 5°C.

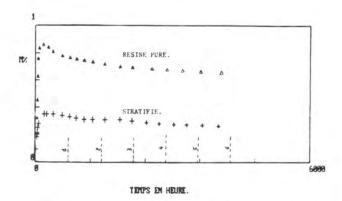


fig. 5a:INFLUENCE DU RENFORT DE FIBRE DE VERRE È SUR LA CINETIQUE $\label{eq:definition} \mbox{DE DIFFUSION DU POLYESTER ISOPHTALIQUE EN EAU DISTILLIE A <math>60^{\bullet}_{\rm A}$.

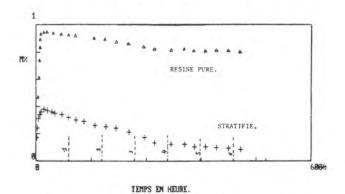


fig 5b: INFLUENCE DU RENFORT DE FIBRE DE VERRE E SUR LA CINFTIQUE DE DIFFUSION DU POLYESTER ISOPHTALIQUE-THIXOTROPIQUE Λ 60°C.

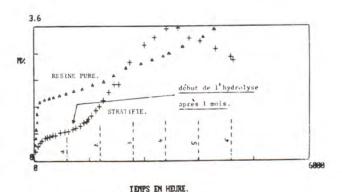


fig 5c:INFLUENCE DU RENFORT DE FIBRE DE VERRE E SUR LA CINETIQUE DE

DIFFUSION DU POLYESTER ORTHOPHTALIQUE EN EAU DISTILLEE À 60°C.

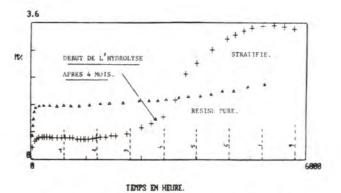
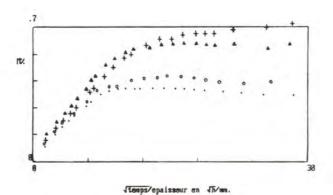


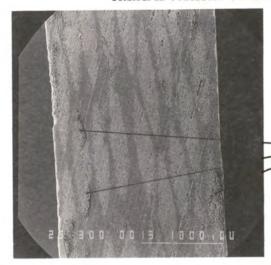
fig 5d:Influence du Renfort de Fibre de Verre e sur la cinetique de Diffusion du polyester tetrahydrophtalique a 60°C.



РНОТО 1 :

APRES 3 MOIS D'IMMERSION EN EAU DISTILLEE A 60°C:

STRATIFIE POLYESTER ORTHOPHTALIQUE/VERRE E.



VUE GLOBALE.

ATTAQUES LOCALISEES DE L'INTERFACE

FIBRE/RESINE PAR L'EAU.



DECOHESIONS A L'INTERFACE ABSENCE DE RESINE AUTOUR FIBRE/RESINE.



DE CETTE FIBRE DE VERRE E.

C) Détermination des paramètres de Diffusion D, Ms, EA

A partir des différentes cinétiques expérimentales et aux températures étudiées les coefficients de diffusion D (en mm2/h) et les taux de saturation en eau (résine pure et stratifié) sont déterminés pour les 4 matériaux.

Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

MATERIAUX	TYPE 5°C		5°C	15*C		7	25°C		32°C		40°C	
	11112	Ms %	D(mm2/H)	Ms %	D(mm2/H)	Ms I	0(mm2/H)	Ms %	D(mm2/H)	MX	D(mm2/h)	
	RESINE											
POLYESTER	PURE	1,22	0,44.103			1,38	1,7.18 ⁻³			1,4	5,2.10	
ORTHOPHTALIQUE	STRATIFIE	0,506	0,11.103	0,58	 0,18.10 ³	0,61	0,53.103	0,65	0,93.103	0,66	1,3.18	
	RESINE											
POLYESTER TETRAHYDRO-	PURE	1,25	18,6.18-3			1,3	2,2.10 ⁻³			1,44	6,5.10	
-PHTALIQUE	STRATIFIE	0,5	8,16.183	0,16.18 ³ 0,61 0,31.18 ³ 0,61	8,61 1,1.10 ⁻³ 8,665 1,58.10	1,58.183	0,62 1	1,97.10				
	RESINE										1	
POLYESTER	PURE	0,72	1,2.18 ⁻³			0,75	4,3.10 ⁻³			9,83	9.10-3	
ISOPHTALIQUE	STRATIFIE	0,28	0,47.183	0,35	0,77.10 ³	0,35	1,7.10 ⁻³	0,37	2,6.10-3	0,38	3,4.18	
	RESINE											
POLYESTER ISOPHTALIQUE-	PURE	0,77	1,2.10 ⁻³			0,81	3,7.10-3			0,92	7,8.10	
THIXOTROPIQUE	STRATIFIE	9,36	0,4.10 ⁻³	0,38	[9,7.10 ⁻³]	0,4	1,6.19-3	0,45	1,9.10 ⁻³	8,43	2,6.10	

Tableau 1 = EVOLUTION DE D(Coefficient de diffusion) et Ms (taux de saturation) EN FONCTION DE LA TEMPERATURE (5,15,25,32,40°C) EN EAU DISTILLEE Les résines polyesters isophtaliques sont moins hydrophiles que les résines polyester orthophtalique ou tetrahydrophtalique (fig 6)

L'addition d'un agent thixotropique (microbilles) dans la résine polyester isophtalique augmente la sorption et le seuil de saturation d'eau, mais ne modifie pas le coefficient de diffusion D.

Les valeurs de l'énergie d'activation de la diffusion EA sont présentées dans le tableau 2 ci-dessous.

MATERIAUX	TYPE	EA en kJ/mole	Ecart type EA	r 2
ODTHODUTAL TOUE	RESINE PURE	50,7	3,1	0,996
ORTHOPHTALIQUE	STRATIFIE	54,7	4,6	0,978
TETRAHYDRO- PHTALIQUE	RESINE PURE	48,9	3,1	0,996
	STRATIFIE	56,1	6,5	0,961
23025252	RESINE PURE	41,7	1,3	0,997
ISOPHTALIQUE	STRATIFIE	43,5	4,5	0,969
ISOPHTALIQUE	RESINE PURE	38,7	1,2	0,997
THIXOTROPHIQUE	STRATIFIE	40.1	3,5	0,977

Tableau 2 = Valeurs de EA pour les résines pures et les Stratifiés polyester/verre E

Une différence d'énergie d'activation de la diffusion apparaît entre les 2 résines isophtalique et les résines polyester tétrahydrophtalique ou orthophtalique. (tableau 2)

Aucune différence d'énergie d'activation EA n'est mise en évidence entre la résine pure et le stratifié polyester/verre E correspondant.

Ces valeurs sont proches de celles obtenues sur des résines époxydes à renfort de fibres de verre (3).

D) Comparaison EAU DISTILLEE/EAU DE MER

Une étude comparative de l'influence du milieu d'immersion sur la cinétique de diffusion a été effectuée sur de l'eau distillée et de l'eau de mer maintenue à température constante à 40°C.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous

	E	AU DISTILLEE	EAU DE MER			
**************************************	Pente	D en	Ms	Pente	Den	Ms
MATERIAUX	aa/Vh	10 ⁻³ nn ² /h	ĭ,	aa/4Ti	18-3am ² /h	ı
ORTHOPHTALIQUE	0,0539	1,3	9,66	0,0526	1,72	0,56
TETRA - HYDROPHTALIQUE	0,0618	1,97	0,61	0,8617	2,65	8,53
ISOPHTAL IQUE	0,0499	3,4	0,38	0,0519	3,8	0,37
ISOPHTALIQUE/ THIXOTROPIQUE	0,0499	2,6	0,43	0,0478	3,6	0,35

Tableau 3 = Comparaison à la sorption en eau de mer et en eau distillée à 40°C.

Les résultats expérimentaux mettant en évidence un taux de saturation inférieur en eau de mer sur chacun des stratifiés, mais la pente de la courbe et le coefficient de diffusion sont semblables compte tenu de la dispersion des résultats.

A basse température (5,15°C), aucune différence de comportement à la sorption n'a été observée entre ces deux milieux.

3 EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES EN FONCTION DU TEMPS (4)

3.1 CONDITIONNEMENT DES ECHANTILLONS

Un vieillissement accéléré en eau distillée à 60°C est effectué sur chacun des stratifiés pendant une période de 6 mois. Des essais mécaniques en flexion 3 pannes (NORME AFNOR NFT 57 - 105) et en cisaillement (NORME AFNOR NFT 57-104) pour caractériser l'endommagement de l'interface fibre/résine effectués à différents temps d'immersion (tous les mois) permettent de quantifier les dégradations physico-chimiques des 4 stratifiés polyester/verre E.

Après vieillissement, les éprouvettes sont reconditionnées, c'est à dire séchées en étuve à 60°C jusqu'à obtention d'un poids constant avant d'être sollicitées mécaniquement. Les différences observées entre l'état initial (avant immersion) et l'état de vieillissement après reconditionnement rend en compte des dégradations irréversibles uniquement (hydrolyse de la résine décohésions d'interface fibre/Résine.)

3.2 INTERPRETATION DES RESULTATS

L'influence de la nature chimique d'une résine polyester sur le comportement au vieillissement mécanique d'un stratifié en fonction du temps d'immersion est mis en évidence sur les figures 7 et 8.

En flexion 3 pannes, il apparaît une bonne tenue au vieillissement de la résine polyester isophtalique et tétrahy-drophtalique (avant le début de l'hydrolyse 4 mois). Une chute de TR en fonction du temps est observée pour la résine isophtalique – thixotropique (fig 7), dûe vraisemblablement à l'interface (microbilles de verre/résine) qui fragilise la résine. L'apparition de l'hydrolyse et de décohésions d'interface fibre/résine entraînent une chute irréversible de la contrainte à la rupture en flexion et en cisaillement pour les résines orthophtalique et tetrahydrophtalique. En cisaillement, un meilleur comportement des stratifiés polyester isophtaliques/verre E est observé principalement dû à l'absence de décohésions d'interface.

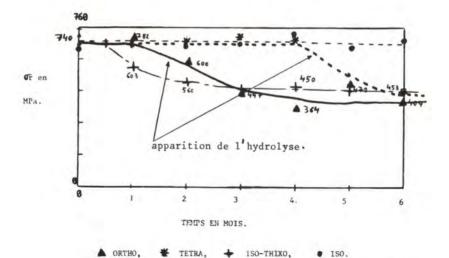


fig 7: EVOLUTION DE LA CONTRAINTE A LA RUPTURE EN FLEXION 3 PANNES OF EN FONCTION DU TEMPS POUR LES 4 STRATIFIES POLYESTER/VERRE E (apres reconditionnement.) EN EAU DISTILLEE A 60°C.

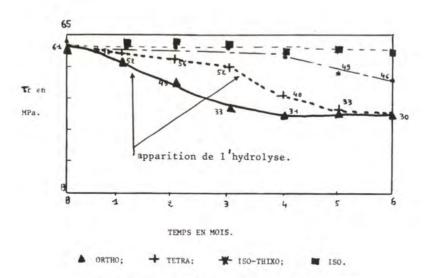


fig 8:EVOLUTION DE LA CONTRAINTE A LA RUPTURE EN CISAILLEMENT TO EN FONCTION DU TEMPS POUR LES 4 STRATIFIES POLYESTER/VERRE E (après reconditionnement) EN EAU DISTILLEE A 60°C.

CONCLUSION

Cette étude a permis de définir des protocoles d'essais de vieillissement accéléré en laboratoire et d'établir des méthodes de qualification et de quantification des différents processus de dégradations physico-chimiques de ces matériaux. Un essai de vieillissement en eau distillée à 60°C (T°C < Tg (transition vitreuse de la résine)), active thermiquement la diffusion de l'eau, l'hydrolyse et la plastification d'une résine, en étant très représentatif de la réalité car les phénomènes physiques mis en évidence à cette température sont confirmés à 40°C.

Les résultats mettent en évidence l'importance de la nature et de la formulation chimique des résines sur leur tenue au vieillissement en milieu marin.

- Aucune hydrolyse notable et décohésions d'interface fibre/ résine n'ont été constatées sur les isophtaliques sur une période de 6 mois à 60°C ce qui explique leur bonne tenue mécanique en cisaillement.
- L'agent thixotropique de la résine (ISO-THIXO) entraîne une augmentation de la sorption d'eau et provoque une chute des caractéristiques mécaniques (en flexion) contrairement à la résine isopthalique.
- La résine tétrahydrophtalique résiste mieux à l'hydrolyse (4 mois) que la résine orthophtalique (1 mois) en eau distillée à 60°C.
- L'hydrolyse de la résine dans un stratifié à renfort de fibres de verre E provoque une attaque de l'interface renfort/résine se traduisant par une chute de la contrainte à la rupture (flexion et cisaillement) de 50% environ.

Des essais de fluage en flexion 3 pannes, en eau distillée à différentes températures (20,40,60°C), prenant en compte l'influence d'une contrainte mécanique permanente et d'un endommagement initial des structures, sont actuellement en cours, et permettront d'établir des lois de comportement à long terme.

- (1) GS SPRINGER et S.W TSAI "Thermal conductivies of unidirectionnal Matérials" J. Composite matérials, Vol 1. (1967), p 166
- (2) Vieillissement hydrothermique d'un matériau composite fibres de verre - Résine Epoxyde. Thèse de B. DEWIMILLE 1981
- (3) Effets de l'absorption sur les propriétés mécaniques et électriques des Matériaux composites à matrice organique. Thèse de P. BONNIAU 1983.
- (4) Action de l'eau par Jacques VERDU.

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 81 à 90

ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE DES SOLUTIONS SALINES ET UN COMPOSITE EPOXY-VERRE À PARTIR DES CARACTERISTIQUES VISCOELASTIQUES DU MATERIAU

A. CHATEAUMINOIS*, B. CHABERT*, J.P. SOULIER*

RESUME - Des échantillons d'une matrice polyépoxyde et de composites polyepoxydes renforcés fibres de verre sont immergés dans des solutions de concentrations variables en NaCl. La présence de chlorure de sodium ne modifie pas la nature des mécanismes diffusionnels mais provoque une diminution des quantités d'eau sorbées. L'analyse viscoélastique de la matrice et du composite après immersion met en évidence un dédoublement du pic de relaxation associé à la transition vitreuse. Celui-ci est attribué à l'existence d'une plastification différentielle du réseau dans la zone de transition vitreuse. En diminuant les quantités d'eau sorbées, le chlorure de sodium réduit l'ampleur des phénomènes de plastification.

mots-clés : polyepoxyde/fibre de verre - plastification - eau - chlorure de sodium - sorption fickienne.

ABSTRACT - Samples of a glass fibers reinforced polyepoxyde matrix are immersed in Nacl solutions. The effect of sodium chloride is only to reduce weight gain at equilibrium but it doesn't modify the nature of diffusional phenomena viscoelastic analysis shows a splitting of the glass transition relaxation peak. A differential plasticization of the network can explain this splitting. By reducing amount of sorbed water, sodium chloride leads to a decrease of plasticization phenomena.

key words : polyepoxy/glass fibers - plasticization - water - sodium chloride - fick's law

INTRODUCTION

L'utilisation croissante de composites dans diverses industries (aéronautique, construction navale ...) pose le problème de la tenue en service de ces matériaux, notamment sous environnement humide. De nombreuses études font en effet état de dégradations de propriétés mécaniques des composites en milieu humide et notamment en environnement marin (Macander, 1977 - Nakaniski, 1982). Ces dégradations proviennent de deux types de processus :

^{*} Laboratoire d'Etudes des Matériaux Plastiques et Biomatériaux, Université Claude Bernard - 43 boulevard du 11 Novembre 1918 - 69622 VILLEURBANNE cedex.

- 1) La plastification du réseau macromoléculaire par l'eau (DEENAN, 1979). Celle-ci est en particulier la conséquence de la rupture de liaisons intramoléculaires au profit de liaisons intermoléculaires eau/polymère, induisant un degré de mobilité supplémentaire dans les mouvements de segments de chaîne.
- 2) La formation de craquelures et de microvides dans la résine et à l'interface, notamment à température et humidité relative élevées.

 Dans l'optique d'une utilisation en milieu marin, nous nous attacherons ici à l'étude de l'action conjuguée de l'eau et du chlorure de sodium sur le comportement viscoélastique de composites époxy-verre.

MATERIAU

* <u>La matrice polyépoxyde</u> est obtenue par polycondensation d'un prépolymère diépoxyde, le diglycidil ether de bisphénol A (DGEBA) avec une diamine aromatique, le **44**'diaminodiphenyl méthane (DDM). Le DGEBA et le DDM sont mélangés en proportions stoéchiométriques à 80°C sous vide. Le mélange est ensuite versé dans des moules en téflon et soumi au cycle de cuissont suivant : 3 heures à 80°C et 3 heures à 170°C.

DGEBA

DDM

* Le composite :

Les fibres de renfort utilisées sont des fibres de verre R (hautes performances mécaniques) fournies par la Société VETROTEX SAINT GOBAIN. Ces fibres ont reçu un dépôt d'ensimage contenant notamment (Jeanne, 1986):

- un agent collant (prépolymères époxydes type DGEBA)
- un agent lubrifiant
- un agent pontant aminosilance (¥ aminopropyl triethoxy silane A1100). Les éprouvettes sont obtenues par moulage de mèches préimprégnées. Le taux volumique de fibres, contrôlé par perte au feu est de 57 ± 3%.

TECHNIQUES

a) Gravimètrie

Des échantillons de matrice et de composite sont immergés dans des solutions de NaCl en concentrations variables (0,9%,35%,70%,150%,350%) à 37°C. Les éprouvettes sont périodiquement retirées des solutions, séchées, puis pesées sur une balance METTLER Type B6 (précision : 0,1 mg). Les prises de poids sont exprimées en % du poids sec initial.

b) Analyse viscoélastique

L'analyse viscoélastique des échantillons est réalisée sur un viscoélasticimètre commercialisé sous le nom de "Dynamic Mechanical Thermal Analyser" par la société "Polymer Laboratories". L'appareil est constitué:

- d'un four contenant la tête de mesure (fig.1)

- d'un système de régulation et de programmation de température

 d'un ensemble imposant à l'échantillon une détermination sinusoidale à des fréquences variables.

- d'un système de traitement de données (ordinateur HP 9000/216) couplé à une table tracante.

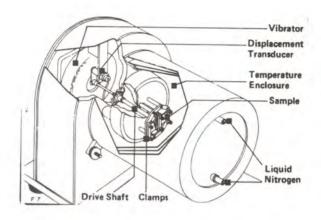


Fig. 1 : PLDMTA - Schéma de l'ensemble de mesure et du four

Les conditions d'utilisation retenues pour l'étude sont les suivantes :

- fréquence : 0,33 ; 3 et 30 Hz

- température : de 25 à 210°C

- vitesse de montée en température : 2;5 ou 8°C/min sous air

- sollicitation en flexion de l'échantillon encastré à une de ses extrémités (flèche de 15 $\mu m)$

Le principe de la mesure est le suivant :

L'échantillon est soumis à une déformation sinusoidale imposée ϵ :

 $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$ (ω : pulsation de la sollicitation)

La contrainte qui a été nécessaire pour créer cette déformation est également sinusoidale mais déphasée de δ :

 $\sigma = \sigma_0 \sin (\omega t + \delta)$

soit $\sigma^*(\omega) = \sigma_0 e^{(i}\omega^t + \delta)$ $\epsilon^*(\omega) = \epsilon_0 e^{(i}\omega^t)$

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(\omega)}{\epsilon^*(\omega)} = E' + iE''$$

avec
$$E' = |E^*| \cos \delta$$
 et $tg\delta = \frac{E''}{E'}$
 $E'' = |E^*| \sin \delta$

- E' est la composante du module en phase avec la déformation et est appelée module de conservation car elle caractérise l'énergie accumulée sous forme élastique et récupérable.

- E" est la composante du module en déphasage de $\pi/2$ avec la déformation et en phase avec la vitesse de déformation. E" est appelé module de perte ou de dissipation car il caractérise l'énergie dissipée par frottements internes dûs au caractère visqueux du matériau viscoélastique.

E' et tano sont enregistrées en fonction de la température.

c) Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique est réalisée sur une thermobalance METTLER. La montée en température se fait sous air à 2 ou 8°C/min, de 25 à 250°C. La géométrie des échantillons est semblable à celle de ceux utilisés en viscoélasticimétrie afin de pouvoir superposer les thermogrammes obtenus aux spectres viscoélastiques.

METHODOLOGIE D'ETUDES DES PHENOMENES DE SORPTION

a) Calcul du coefficient de diffusion

- matrice seule

Quelque soit le milieu d'immersion, on constate que les courbes donnant la prise de poids M_t en fonction de $\sqrt{t/h}$ (t: durée d'immersion, h: épaisseur de l'éprouvette) présentent une partie linéaire initiale ainsi qu'un palier d'équilibre (fig.3). Il est donc possible de mesurer un coefficient de diffusion D correspondant à une sorption fickienne (Cranck, 1975):

$$D = \frac{1}{M_{\infty}^2} \frac{\pi}{16} \left(\frac{\mathrm{d}M_t}{\mathrm{d}\sqrt{t/h}} \right)^2 \tag{1}$$

M- = gain de poids relatif à l'équilibre

 $\left(\frac{dM_t}{d\sqrt{t/h}}\right)$ = pente de la portion linéaire de la courbe donnant M_t en fonction de $\sqrt{t/h}$

Ce coefficient de diffusion est alors corrigé des effets de bords d'après les formules proposées par Springer (Springer, 1981):

$$D = D_{x} \left(1 + \frac{h}{2b} + \frac{h}{2l} \right)^{2}$$
 (2)

- composite :

Les coefficients de diffusion perpendiculairement et parallèlement à la direction des fibres sont calculés à partir de la fraction volumique de fibres

(Vf) et du coefficient de diffusion de la matrice (Dm), au moyen des formules proposées par Springer (Springer, 1981).

$$D_z = D_{ff} = (1 - V_f) D_{ff}$$
 (3)

$$D_x = D_y = D_{\perp} = (1 - 2 \sqrt{V_f/\pi}) D_{re}$$
 (4)

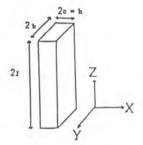


Fig. 2 : Géométrie de l'échantillon

b) Calcul des prises de poids en fonction du temps

Les prises de poids sont calculées à partir des formules de Fick adaptées à un parallélépipède (Dewimille, 1982) afin de prendre en compte les effets de bords.

$$\frac{M_t}{M_{\bullet\bullet}} = 1 - \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{e^{-iq_{m,n,p}}}{(2m+1)^2(2n+1)^2(2p+1)^2}$$
 (5)

$$q_{m,n,p} = \frac{\pi^2}{4} \left[Dx \left(\frac{2m+1}{c} \right)^2 + Dy \left(\frac{2n+1}{b} \right)^2 + Dz \left(\frac{2p+1}{\ell} \right)^2 \right]$$
 (6)

RESULTATS

1) SORPTION DANS LA MATRICE ET LE COMPOSITE

a) Diffusivité du sodium dans la matrice

Afin de déterminer la part de l'eau et du chlorure de sodium dans la prise de poids globale, un dosage du sodium est effectué par absorption atomique sur les échantillons de matrice seule parvenus à l'équilibre dans la solution de NaCl à 350%. On constate que les quantités de sodium dosées (\approx 60 ppm) sont négligeables devant la prise de poids globale. Le chlorure de sodium ne semble donc pas pénétrer de façon appréciable dans le réseau.

b) Cinétiques de sorption

Pour les temps d'immersion considérés, les cinétiques de sorption dans la matrice et le composite peuvent être décrites de façon satisfaisante par une cinétique Fickienne (fig.3). Les valeurs des coefficients de diffusion sont indépendantes de la concentration en NaCl du milieu d'immersion. Les formules proposées par SPRINGER ((3) et (4)) permettent une estimation correcte des coefficients de diffusion dans le composite. Il convient toutefois d'être très prudent quand à l'extrapolation à des pièces entières des résultats obtenus sur de petites éprouvettes, les valeurs de D étant susceptibles d'être

affectées par la géométrie de l'échantillon.

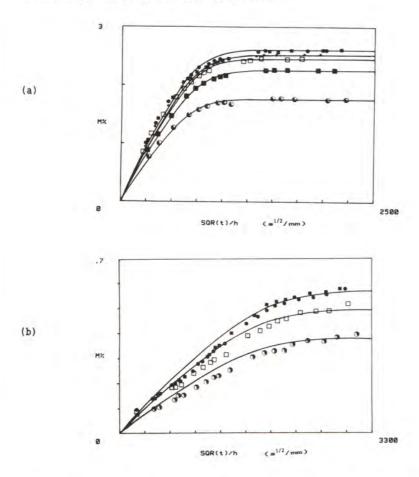


Fig. 3 : Cinétiques de sorption de la matrice (a) et du composite (b) immergés dans des milieux de concentration en NaCl variable.

On note également une décroissance quasi-linéaire de M- en fonction de la concentration en NaCl (fig.4). Cette diminution est à relier à une baisse du potentiel chimique de l'eau avec l'augmentation de la concentration en NaCl.

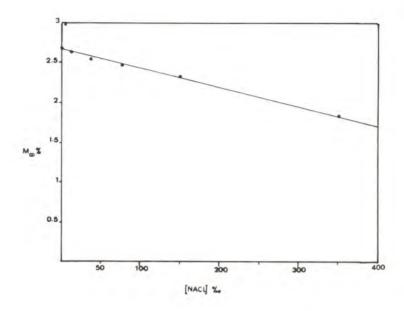


Fig. 4 : Variation de la prise de poids à l'équilibre en fonction de la concentration en NaCl (matrice).

2) COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE

L'allure des spectres obtenus dépend étroitement de la vitesse de montée en température, de la fréquence et du contenu initial en eau du matériau. Que ce soit pour la matrice seule ou le composite, les phénomènes de plastification sont marqués par :

- un abaissement de la température du maximum de tgδ

- un élargissement et une diminution de la hauteur du pic de $tg\delta$ dont la surface est augmentée d'environ 1,3 fois ce qui traduit un amortissement acru au sein du matériau

- dans certains cas, un dédoublement du pic de $tg\delta$. Ceci traduit l'existence au niveau de la transition vitreuse d'une morphologie biphasique. Celle-ci peut être interprétée en considérant la coexistence de deux phases différement plastifiées : les spectres obtenus résulteraient alors de la juxtaposition d'un pic à basse température et d'un pic à haute température caractérisant respectivement la phase la plus plastifiée et la phase la moins plastifiée.

a) Immersion dans l'eau distillée

- À fréquence fixée, on constate que pour des vitesses de montée en température croissantes, la hauteur du pic basse température tend à augmenter aux dépens de celle du pic haute température (fig.5).

- A vitesse de montée en température fixée, on observe la même évolution des deux pics lorsque la fréquence diminue (fig.6).

Que ce soit à fréquence ou à vitesse de montée en température variable, l'analyse thermogravimétrique (fig.7) permet alors de corréler l'abaissement du pic basse température et l'augmentation du pic haute température à un séchage de plus en plus prononcé au sein du matériau. Le séchage provoque également un déplacement du spectre vers les hautes températures.

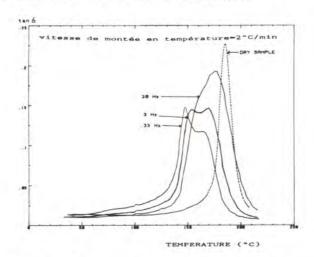


Fig. 5 : Comportement viscoélastique du composite immergé dans l'eau distillée (fréquence variable).

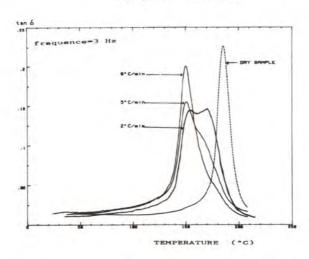


Fig. 6 : Comportement viscoélastique du composite immergé dans l'eau distillée (vitesse de montée en température variable).

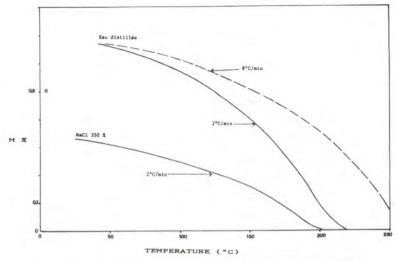


Fig. 7 : Analyse thermogravimétrique du composite

b) Immersion dans les solutions de NaCl

Dans le cas de la matrice et du composite immergés dans des solutions de concentrations croissantes en NaCl on observe (fig.8) :

- un déplacement des spectres vers les hautes températures

- la présence aux plus fortes concentrations (350%) d'un seul pic correspondant vraisemblablement au pic haute température observé dans le cas de l'immersion dans l'eau distillée. La disparition du pic basse température est à relier à un séchage important du matériau au voisinage du Tg du fait d'un contenu initial en eau faible (fig.7).

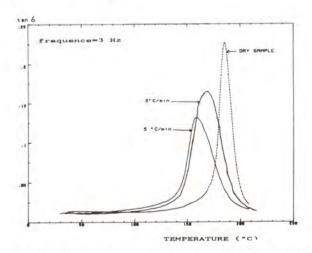


Fig. 8 : Analyse viscoélastique du composite immergé dans une solution de NaCl à 350% (vitesse de montée en température variable).

c) Réversibilité des phénomènes de plastifications

La réversibilité de la plastification induite est étudiée par une seconde montée en température au viscoélasticimètre à 20°C/min, après s'être assuré, par pesée, du séchage complet du matériau lors du premier passage : dans tous les cas, on observe une réversibilité des phénomènes de platification caractérisée par un retour aux températures de transition du matériau non plastifié. L'analyse viscoélastique ne permet donc pas de mettre en évidence des dégradations dans le composite pour les températures et temps d'immersions considérés.

CONCLUSION

Quelque soit la concentration en NaCl du milieu d'immersion, les cinétiques de sorption d'eau peuvent être décrites de façon satisfaisante par une loi de Fick. La présence de NaCl ne modifie pas la nature des mécanismes diffusionnels mais provoque simplement une diminution des prises de poids à l'équilibre. L'analyse viscoélastique montre au voisinage de la transition vitreuse une plastification différentielle du réseau se traduisant par un dédoublement du pic de relaxation. Ceci peut être expliqué:

- soit par un séchage hétérogène du matériau lors de la montée en température (séchage préférentiel de la périphérie de l'éprouvette) - soit par l'existence d'une plastification hétérogène du réseau dès la température ambiante

La détermination de la distribution de l'eau au sein du matériau (par RMN par exemple) serait un des moyens envisageables pour déterminer la validité de chacunes de ces deux hypothèses.

La présence de NaCl semble seulement avoir un effet indirect sur les phénomènes observés : en diminuant les quantités d'eau sorbées, le NaCl réduit l'ampleur de la plastification.

CRANCK J., 1975, The mathematics of Diffusion, Oxford at the Clarendon press. DEENAN J., SEFERIS J.C., 1979, Effects of moisture and stoechiometry on the dynamical properties of a high performance structural epoxy. Journal of Appl. Polym. Sc., Vol. 24, 2375-2387.

DEWINILLE B., BUNSELL A.R., 1982, The modelling of hydrothermal aging in glass fiber reinforced epoxy composites, Journal of Phys. D : Appl. Phys., Vol. <u>15</u>, 2077-2091.

JEANNE P., 1986, Contribution à l'étude des zones interfaciales dans les composites polyepoxyde fibres de verre, thèse LYON.

MACANDER A., SILVERGLEIT M., 1977 The effect of the marine environment on stressed and unstressed graphite/epoxy composites, Naval. Eng. Journal, 65-72. NAKANISHI Y., SHINDO A., 1982, Deterioration of CFRP and GFRP in Salt Water, Progress in Sci. and Eng. of Comp., 1009-1016.

SPRINGER G.S., 1981, Environmental effects on composite materials. Technomic publishing co., Westport.

COMPORTEMENT DES GELCOATS POLYESTERS EN CONTACT AVEC L'EAU ANALYSE DE LA PHASE AQUEUSE APRES VIEILLISSEMENT

BELLIARD P. (1) FOUSSARD T. (2) GAUDIN D. (3) MOREL J. (2)

RESUME - Six gelcoats polyesters de différentes natures ont été sélectionnés pour un vieillissement accéléré en contact avec l'eau distillée à 50° C. Le comportement des stratifiés réalisés à froid est suivi pendant 4 mois.

après vieillissement, a été analysée. Un processus d'extraction compatible avec une analyse chromatographique en phase aqueuse pour les produits hautement polaires a été mise au point. Une analyse complémentaire a été effectuée pour déterminer les espaces de tête.

Après migration, les produits retrouvés dans la phase aqueuse ont été identifiés par spectrométrie de masse.

Quelques hypothèses sur l'origine des composés identifiés sont proposées.

mots-clés : gelcoat polyester,

ABSTRACT - Six different gelcoats were chosen for accelerated ageing in distilled water at 50° C. The reactions of the G.R.P. were observed over a period of 4 months.

After ageing, the water was tested. An extracting procedure high polar soluble products in water has been elaborated. A further analyse was carried out to determine the head space.

The soluble products found in the water phase were analysed through mass spectrometry.

Certain hypothesises on their origin are proposed.

key-words : gelcoat

⁽¹⁾ Société TECHNIBAT, BP 257 - 27002 EVREUX CEDEX(2) Université du HAVRE, BP 540 - 76058 LE HAVRE CEDEX

⁽³⁾ Service spectrométrie de masse : CEA SACLAY

1 - INTRODUCTION

La formation des cloques sur la surface des stratifiés polyesters au contact de l'eau a fait l'objet de nombreux travaux (1-6).

L'influence exercée par la nature des matériaux choisis et la technique de mise en oeuvre sont maintenant bien connues. Une syn-

thèse sur ces études a été présentée récemment (7).

Une connaissance plus approfondie de l'osmose passe cependant par l'analyse chimique et physico-chimique du phénomène. Les analyses du liquide contenu dans les cloques (8, 9) permettent une première interprétation du processus de dégradation au sein du composite.

Plus récemment (10), des études de reprise de poids par immersion montrent la rapidité de la diffusion de l'eau au sein de la résine. Cette absorption varie suivant la sensibilité à l'hydrolyse du polymère testé. BURRELL (10) parle même d'une "solubilisation" plus ou moins grande de la résine en rapport étroit avec la vitesse de formation des cloques dans le temps.

Les conséquences de l'osmose sont donc la manifestation d'une dégradation chimique interne du matériau, dégradation résultant

des échanges entre le composite et son milieu ambiant.

Sous cet aspect, l'identification des composés chimiques dissous dans la phase aqueuse lors du vieillissement accéléré des stratifiés au contact de l'eau, constitue une information complémentaire importante pour l'amélioration de la qualité des gelcoats de surface.

Les résultats présentés, avec la mise au point d'une méthode analytique fiable et l'identification de la nature chimique des produits dissous, constituent une première étape vers l'objectif que nous nous sommes fixés.

2 - REALISATION DES STRATIFIES

Six gelcoats : 3 Iso/NPG ; 3 Iso/PG, sont sélectionnés pour cette étude. Les stratifiés réalisés à température ambiante sont composés des éléments suivants :

- Une couche de gelcoat sur 700 à 800 microns, appliqué à l'air less, catalysé avec 2 % de PMEC.
- Trois couches de mat 450 projeté, à base de verre Silane chrome, avec une matrice en résine orthophtalique.
- Une couche de Roving 580.

La stratification est conduite sur un moule traité avec un démoulant type silicone à faible transfert.

Les stratifiés, non recuits, sont conservés 21 jours à température ambiante avant vieillissement.

3 - METHODES DE VIEILLISSEMENT

La méthodologie de vieillissement accéléré des composites contact de l'eau a fait l'objet d'études systématiques (11, sur l'influence de la température et la nature de l'eau utilisée.

Nous travaillerons avec de l'eau permutée en utilisant un dispositif permettant un contact permanent du gelcoat avec la phase liquide et la phase vapeur. La cellule est placée dans une étuve à 50° C. Le test est conduit pendant 4 mois. L'eau permutée est remplacée tous les mois pour éviter un équilibre éventuel au niveau des échanges (Fig. 1).

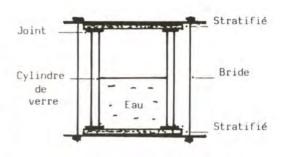


Figure 1 - Cellule de Vieillissement

Les analyses présentées ont été effectuées sur un échantillon d'eau prélevé après le premier mois de vieillissement.

4 - ANALYSE DE L'EAU

A) Extraction par un solvant

L'analyse de produits organiques à l'état de traces dans l'eau est un problème analytique nécessitant le choix d'une technique rapide, sensible et sélective (13).

La chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (G.C.M.S.), est la technique la plus appropriée à ces trois objectifs.

Cette méthode occupe une place de choix pour l'identification des fractions chromatographiques ; elle peut, de plus, être facilement couplée avec une colonne capillaire (14).

Des techniques proches ont été utilisées pour étudier les volatils émis par les SMC lors de la cuisson des peintures

chaîne (15).

La présence de composés très polaires et de monomères peu volatils nécessite une transformation préalable de l'échantillon afin de diminuer le temps de rétention de ces composés. Ce traitement nous impose le choix d'un solvant d'extraction dépourvu

d'hydrogènes mobiles.

Malgré le développement de la chromatographie en phase liquide à haute performance (H.P.L.C.) qui ne nécessite pas en principe de telles transformations, la G.C.M.S. possède les avantages suivants : séparation d'homologues de même fonction chimique, recherche facilitée des conditions expérimentales et identification des produits plus facile (14).

Choix des solvants d'extraction - Après avoir testé trois solvants à l'aide d'une solution aqueuse équimassique (10 mg/l) de cinq étalons (Ethylène glycol, Diéthylène glycol, Alcool Benzylique, Acide Maleïque, Acide Phtalique), l'acétate d'éthyle est retenu pour son pouvoir d'extraction (Fig. 2).

Après extraction, la phase organique est séchée puis concen-

trée.

Dérivatisation par silvlation (14, 16)

Après plusieurs essais sur l'anhydride phtalique, nous avons choisi le BSTFA pour sa bonne réactivité sur un étalon.

$$CF_3 - C = N - Si(CH_3)_3$$

0 - Si(CH₃)₃

Bis-(Triméthylsilyl) Trifluoroacétamide

L'expérience renouvelée sur des glycols a confirmé ce résultat suivant les réactions .

$$R - OH \xrightarrow{BSTFA} > R - O - Si(CH_3)_3$$
 $R - COOH \xrightarrow{BSTFA} > R - COO - Si(CH_3)_3$

La présentation, pour un même échantillon, de chromatogrammes obtenus avant et après silylation, démontre l'importance de cette dérivatisation pour la détection des produits (Fig. 3).

dérivatisation pour la détection des produits (Fig. 3).

Il est nécessaire de conduire la réaction pendant 12 heures à 20° C pour obtenir une transformation complète de toutes les fonc-

tions.

Le temps de réaction relativement long peut s'expliquer par l'encombrement stérique résultant de la silylation de deux fonctions rapprochées (Fig. 4).

Cette technique d'extraction présente le risque de laisser échapper les composés chimiques les plus volatils lors de la concentration.

B) Piégeage des composés volatils

Pour pallier cet inconvénient, nous avons extrait les composés volatils dissous dans l'eau par la technique d'entraînement

par gaz (17).

Une préconcentration de l'échantillon est effectuée en piégeant les produits sur une colonne de Tenax (18). Ce polymère présente l'avantage d'être un absorbant sélectif piégeant les produits tout en laissant passer l'eau. Sa stabilité thermique permet de l'utiliser dans la technique d'injection à piège froid et à thermodésorption (TCT) que nous avons choisie (19).

5 - RESULTATS ET DISCUSSION

Les produits extraits sont présentés dans les tableaux suivants (Tab. 1 et 2).

On note en premier lieu toute une famille de produits dérivés

du styrène par oxydation lors la polymérisation.

Nous retiendrons l'hypothèse de V.A. BRIGHTON (20) pour expliquer la formation de Benzaldéhyde par rupture d'une chaîne polystyrénée contenant des groupements péroxydes.

L'acide Benzoïque et l'alcool benzylique résultent de cet ensemble de réactions par oxydation ou réduction. La formation de styrène glycol peut être expliquée par un mécanisme de dihydroaddition (21) selon :

$$\phi$$
 - CH = CH₂ $\xrightarrow{\text{H}_2\text{O}_2}$ > ϕ -C-C- $\xrightarrow{\text{C}}$ $\xrightarrow{\text{H}_2\text{O}}$ + ϕ -CH-CH₂OH

L'acétophénone présente lors de l'analyse des volatils peut provenir de l'hydratation du monomère suivie de l'oxydation de l'alcool ainsi formé.

L'acide 2-Ethyl hexanoïque, le diméthylphtalate présents dans tous les échantillons avec le monométhyl-ester de l'acide phtalique, proviennent de l'accélérateur et des catalyseurs de polymérisation utilisés habituellement.

Nous trouvons enfin toute une série de glycols, de diacides et de monoesters phtaliques provenant de la matrice polyester de

base.

L'intensité beaucoup plus faible des pics observés indique sans doute une concentration très faible de ces produits dans la solution.

Ces composés résultent d'une extraction des composants de base non combinés ou de l'hydrolyse éventuelle des chaînes de très faible masse.

6 - CONCLUSION

Nous avons porté nos investigations sur l'interface gelcoat - eau en déterminant, par la mise au point d'une technique chromatographique adaptée, la nature des composés chimiques migrant dans la phase aqueuse.

Les produits identifiés en quantités sensibles résultent pour la plupart de l'oxydation et de l'hydrolyse des composés organi-

ques formés ou introduits par réaction de polymérisation.

Les composés provenant de la matrice polyester, non condensés

ou résultant de l'hydrolyse de très faibles masses, sont présents à l'état de traces.

Ces premières constatations montreraient l'influence déterminante de la conduite de réaction de durcissement sur les proprié-

tés du gelcoat durci.

Cette première étude présente une analyse qualitative des produits dissous ; elle nous permet d'envisager maintenant une investigation quantitative plus poussée pour suivre le comportement dans le temps des gelcoats au contact de l'eau.

- (1) R.F. REGESTER -22nd SPI Conference, Section 16-D.
- (2) L.S. NORWOOD, D.W. EDGELL, A.G. HANKIN -36th SPI Conference, Section 23-F.
- (3) R.C.ADAMS 37th SPI Conference, Section 21-B.
- (4) W.H.BRUEGGEMANN 38th SPI Conference, Section 17-C.
- (5) S. CRUMP 41st SPI Conference, Section 13-C.
- (6) B. CURRY 42nd SPI Conference, Section 15-A.
- (7) C. BALEY, F. SALIOU, A. CONNAN I.N.E.R.N. - Deuxièmes journées d'Automne 1986.
- (8) W.H. BRUEGGEMANN 34th SPi Conference, Section 4-E.
- (9) R. DAVIS, J.S. GHOTRA, T.R. MALHI, G. PRITCHARD 38th SPI Conference, Section 17-B.
- (10) P.P. BURRELL, D.J. HERZOG, R.T. McCABE 42nd SPI Conference, Section 15-E.
- (11) J. KLUNDER Journées du Verre Textile - Paris 12.13/04/1978.
- (12) H.R. EDWARDS 34th SPI Conference, Section 4-D.
- (13) U.S. EPA "Methods for organic chemical analysis of Municipal and industrial wastewater" - Cincinnati -Ohio 45268 (July 1982).
 - (14) J. TRANCHANT Manuel pratique de chromatographie en phase gazeuse (3ème Edition) - MASSON

- (15) A. BARTOLI, M.J. PASTEL, T.W. SMEAL 41st SPI Conference, Section 24-E.
- (16) L.T.K. CHUNG, H.P. MEIER, J.M. LEACH USA 1979 T.A.P.P.I. Vol 62 n° 12 pp 71-74.
- (17) D.P. BEGGS Hewlett Packard - Note d'application - CPG/SM 176-24
- (18) MIEURE, DIETRICH J. of Chrom. Sci. 11, 559 (1973).
- (19) R. TERMONIA, G. ALAERTS J. Chrom. 328 (1985), 367.
- (19) A. BRIGHTON, G. PRITCHARD, G.A. SKINNER "Styrene polymers: Technology and environmental aspects" Applied Science Publishers Ltd London (1979).
- (20) LOMBARD et SCHROEDER Bull. Soc. Chim. Fr 2800 - 1963.

MODE OPERATOIRE

METHODOLOGIE D'EXTRACTION PAR UN SOLVANT

Acidifier 50 cm3 d'échantillon par HCl concentré jusqu'à pH 4. Ajouter 10 g de NaCl.

Effectuer l'extraction avec 50 cm3 d'acétate d'éthyle dis-

tillé, sécher et filtrer.

Concentrer la solution à 3 cm3 par un débit d'azote et silyler pendant 12 heures avec 200 μl de BSTFA.

PIEGEAGE DES COMPOSES VOLATILS MODE D'INJECTION A PIEGE FROID ET A THERMODESORPTION

50 cm3 d'échantillon sont versés dans un barboteur maintenu à 40° C au bain-marie.

Un courant d'hélium traverse l'échantillon à analyser avant de traverser un piège contenant le Tenax. L'échantillonnage est arrêté lorsque 2 litres d'hélium ont traversé la colonne.

En chauffant le tube absorbant rempli de Tenax, les constituants sont désorbés et transportés par courant gazeux vers le piège froid à - 120° C.

Lorsque la désorption est achevée et que tous les constituants sont retenus dans le piège froid, celui-ci est chauffé à 250° C en quelques secondes.

Cette technique permet l'injection instantanée des composés organiques volatils dans une colonne de chromatographie avec une bonne séparation avant la détection dans le spectrométre de masse.

TABLEAU 1 - PRODUITS EXTRAITS PAR PHASE SOLVANT

TEMPS DE	FORMULES	PRODUITS	ECH. ISO/MPG	ECH. ISO/PG	ECH. ISO/PG	ECH. ISO/NPG	ECH. ISO/PG	ECH. ISO/NP
112	♦ - CHO	benza l déhyde	×					
141	но-сн-сн ₂ -он	1-2 propenedial	×	х.	х	×	×	×
179	HOCH2-(CH2)3-CH2OH	pentanediol	×	×		x		×
193	носн ₂ -сн-сн ₂ -сн ₂ -он	2 méthyl-butanediol	×	x	x	×		×
201	#-CH2-OH	alcool benzylique	x				×	
206	сн ₃ -(сн ₂) ₃ -сн-соон	acide 2-éthyl hexanoïque	×	×	×	×	×	×
234	∳-СООН	acide benzoique	x	×	×	×	×	×
299	COOCH3	diméthyl phtalate	×	x	×	×	×	×
302	♦-СНОН-СН₂ОН	styrène glycol	×	×	×	x	x	×
315	♦-СНОН-СООН	acide mandélique		×	×	x		
322	HOOC-(CH ₂)4-COOH	acide adipique			×			-
343	COOCH3	acide phtalique monométhylester	×	×	×	х	x	×
378	СООН	acide phtalique OMP	×	x	×	×	×	x
383	♦-снон-сн₂осн₂-сн₂он	diéthylène glycol monophényl ether	×					
396	COOH	acide phtalique OMP	×	×	×	×	x	
448	COO-CH-CH ₂ OH	acide phtalique OMP 1-2 propanediol monoester		x				īī
451	COO-CH-CH ₂ OH	acide phtalique CMP 1-2 propanediol monoester		×				
472	COOH COO-CH-CH2-CH2OH	acide phtalique OMP 1-2 propanediol monoester		x	x	x	x	
- 1	COO-CHCHCH-ON	acide phtalique 1-3 propanediol monoester		×	×	×	x	
526	COO-(CH ₂)4-CH ₂ OH	acide phtalique 1-5 pentanediol monoester		x			×	
598	COOKCH ⁵) ⁵ -0-(CH ⁵) ⁹	scide phtalique diéthylème glycol monoester		x				



TABLEAU 2 : PRODUITS EXTRAITS PAR ENTRAINEMENT GAZEUX

FORMULES	PRODUITS	ECH. 1SO/NPG	ECH. ISO/PG	ECH. ISO/NPG
Ф-СО-СН3	acétophénone	×	x	x
CH3-C-(CH2)3-CH3	2 hexanone	x	x	
ø-CH=CH ₂	styrène	х	x	
(CH ₃)-(CH ₂) ₄ -CHO	hexana l x		x	
(CH ₃) ₃ C-C-C(CH ₃) ₃	2-2-4-4 tetraméthyl 3 pentanone		x	x
0=0	cyclohexanone	×		
Ф-С-С ₂ Н ₅	propiophenone	×		×
CH3-(CH2)3-CH2OH	pentanol	×		
ф-соосн ₃	méthylbenzoate	×		-55
CH3-(CH5)5-C-(CH5)5-CH3	4 - heptanone		×	
СН ₃ -СН ₂ -С-(СН ₂)4-СН ₃	3 - octanone		x	
ф	benzène			×
ф-с-(сн ₂) ₂ -сн ₃	butyrophénone		x	
CH3-(CH2)3-CH-CH2OH	2 éthyl-1 hexanol			×

CONDITIONS D'ANALYSE :

Colonne : Tenax T A 60-80 mesh L = 3 m, ϕ int 1/8 Acier inox

Détecteur : spectromètre de masse

Injecteur : T.C.T. débit de désorption : 10 ml/mn

Enregistreur : ordinateur

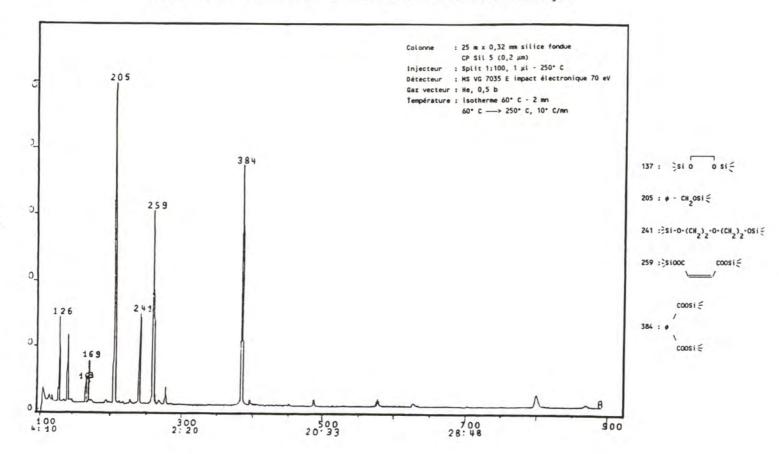
Durée d'analyse : - 15 mn d'analyse - 16 mn d'analyse chromatographique

CONDITIONS OPERATOIRES :

Température :
- désorption : 250°C 15 mn
- piège : - 120° C
- injection : 250° C
- ligne de transfert : 250° C

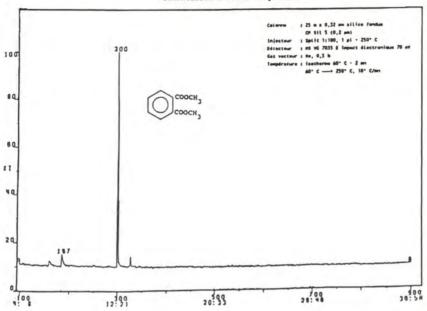
Gaz vecteur : Hélium Pe : 1,5 b

Programmation de température : - 20° C pendant 5 mn - 10° C/mn jusqu'à 220° C

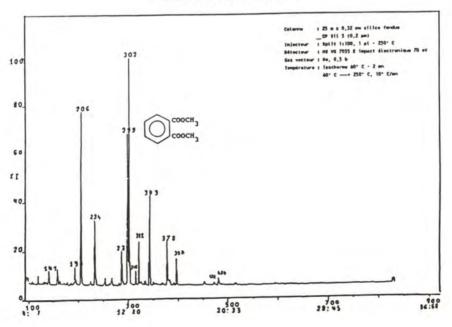


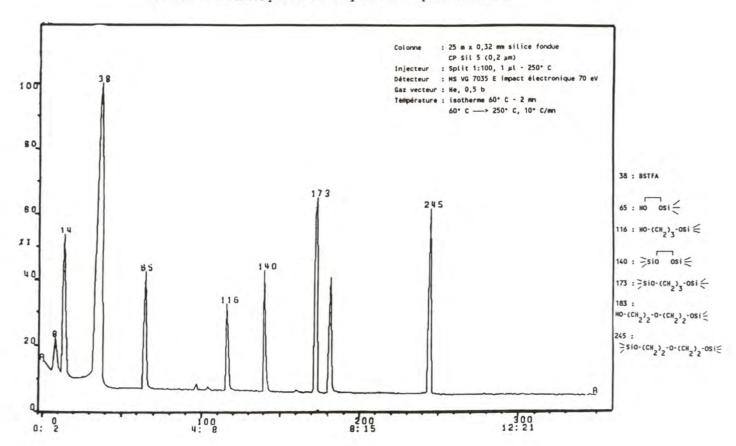
100

FIGURE 3
Echantillon C avant silylation



Echantillon C après silylation





102

COMPORTEMENT SOUS CHOC DES COMPOSITES A FIBRES DE VERRE [E] INFLUENCE DES PARAMETRES

DANNAWI M. [1] - EL HABBAK A. [2] - TOURNIER P. [3]

RESUME – Nos études menées sur les composites à fibres de verre, soumis à des sollicitations de compression, traction, cisaillement statique et dynamique et à l'impact sur panneaux, ont permis de définir l'influence sur les contraintes, les énergies de rupture et l'endommagement des paramètres tels que : la vitesse de déformation $\mathring{\epsilon}$, le taux en % des fibres (τ) , la liaison fibres-matrices, la séquence d'empilement, le type d'armature U D et B D, l'angle d'orientation des fibres par rapport au sens de la sollicitation (α) , la résine, les séquences d'empilement et l'effet d'échelle.

Mots-clés : chocs - résistance - verre E - lois de comportement - délaminage - vitesse de déformation - résine - taux de fibres - liaison fibres-matrices - séquences d'empilement - type d'armature - orientation des fibres.

ABSTRACT – Our studies carried out on composites materials glass fibre, submitted to static and dynamic compression, tension, shear and impact panel allowed us to defin the effect on failure stress, failure energy and visible damage the parameter such as : strain rate ($\hat{\epsilon}$), fibre ratio (Vf), matrice-fibre linking, resin, sequence of layer set up, type of reinforcement U D or B D, angle (α) of fibre orientation regard to the sollicitation direction and scale effect.

Key-words: strenght - glass E - stress-strain curve - strain rate - fibre ratio - matrix-fibre linking - sequence of layer set up - type of reinforcement - direction of fibre - resin.

Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, Laboratoire E.N.S.M.-Impact, 1, rue de la Noë, 44072 NANTES Cedex

^[2] Faculty of engineering, Dept. of M.D. & P., Cairo University, Guiza, Egypt.

I - INTRODUCTION

Une coque, en matériau composite, d'un bateau peut être sollicitée en choc sous différents chargements : accostage sur les quais, impact de la houle surtout si la vitesse du bateau est assez grande, où on peut rencontrer les problèmes de dislocations du matériau par chocs ou par chocs répétés, collisions à faibles vitesses, impact des masses tombantes et impact des projectiles à grande vitesse (énergie critique et perforation). Ces cas de chargement réels de la structure sont très difficiles à simuler ou à calculer et le problème se ramène à l'étude de la résistance au choc du matériau de base et de quelques structures composées sollicitées dynamiquement par des moyens spécifiques des laboratoires.

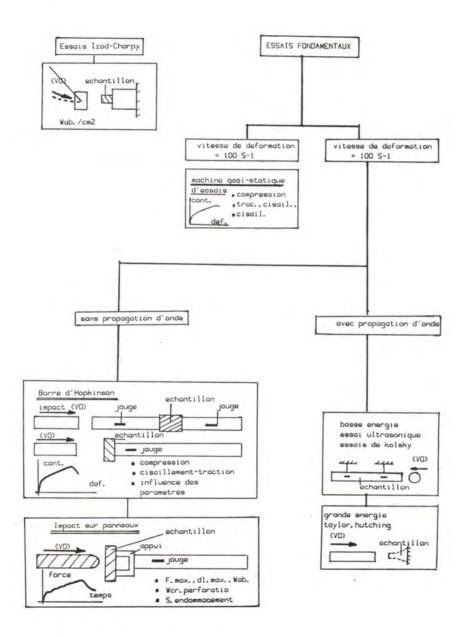
La caractérisation dynamique des matériaux composites a pris, ces dernières années, un intérêt considérable [1 - 5]. Mais les difficultés d'interprétation des résultats d'expérimentation dues aux types d'essais ont rendu beaucoup de ces tests sans effet.

Certains travaux ont été effectués en utilisant la pendule de Charpy [6, 7]. Les enregistrements force-temps sont utilisés pour estimer l'énergie absorbée avant rupture de l'échantillon. Ce type d'essais masque la possibilité d'obtenir la courbe contrainte déformation dans une direction donnée et empêche l'étude de l'influence des paramètres dynamiques et matériaux sur celle-ci.

Les techniques d'essais ont évolué ces dernières années et ont permis l'étude en compression, traction et cisaillement dynamique des matériaux composites [8, 10]. Ces techniques sont basées sur le principe de barres d'Hopkinson associées avec un lanceur pneumatique (canon à gaz) ou électro-élastométrique (arbalette). Ces essais en sollicitations uniaxiales permettent d'étudier l'influence des paramètres tels que : vitesse de déformation é, résine, liaison fibres-matrices, angle d'orientation de la sollicitation, la séquence d'empilement, le taux de renfort, [11, 13]. Ces essais uniaxiaux sont complétés par des essais triaxiaux (impact sur panneau) qui permet de valider en sollicitation réelle l'influence de ces paramètres sur la résistance au choc du matériau, d'étudier l'endommagement localisé par délaminage dû au choc, et de définir la valeur de l'énergie critique absorbée avant perforation dans des conditions aux limites précises [14, 15].

Le but de cette communication est de montrer, par des travaux effectués dans notre laboratoire sur des composites (verre E), l'influence de ces paramètres sur la résistance au choc de ces matériaux et cela en utilisant ces techniques modernes d'essais adaptées ou améliorées.

II - CLASSIFICATION DES ESSAIS A MOYENNE ET GRANDE VITESSE DE DEFORMATION



III - MATERIAUX UTILISES (Verre E)

Matériaux N°	Géométrie épaisseur h au diamètre (mm)	Résine	Type armature	Utilisé pour détecter l'influence de :	% Fibre ten poids 60 % en volume	
i	Plaque h * 12	Epoxyde M10	UD	c, angle 8		
2	Plaque h * 10	Epoxyde M10	Tissu B D sergé O*	e et résine	45,8	
3	φ 15	Polyester orthophotique	Arbres U D	Influence de t	79 %	
4	• 15	•	•	•	75,61 %	
5	h-8				83,82	
6	•8				75,7	
7	• 12		•	influence de t et influence du facteur d'échelle	80,8	
8	●8				81,39	
9	• 18			Influence de τ	64,68	
10	• 28		•		61,16	
11	Φ8			Influence de t	64,3	
12	• 12	•			39,75	
13	h-8		•	•	36,37	
14	n-8	*	•	•	43,45	
15	h-8				27,68	
16	Plaque n = 10	Polyester	B D Sergé O*	Résine	47 %	
17	Plaque h * 10	Vinylester			48 %	
18	h • 1,2,4,6	Polyester ensimé	B D 0*	Liaison fibres - matrices et facteur d'échelle	* 58 %	
19	h = 1,2,4,6	Polyester désenzimé 3 mn à195°C + 2h à 140°C		•	* 50 %	
20	h = 1,2,4,6	Vinylester enzimé	B D	Liaison fibres - matrices	58	
21		Vinylester désenzimé i h à 60°C •2h à 140°C	B D 0*		58	
22	•	Epoxyde enzimė		- 1	66	
23		Epoxyde désenzimé 30mn à 125°C • 2h à 140°C • 4h à 170°C			58	

IV - INFLUENCE DE LA VITESSE DE DEFORMATION ε - CAS U D ou B D

L'influence de la vitesse de déformation se manifeste par l'augmentation de la contrainte de rupture au fur et à mesure que la vitesse de choc augmente. Cette sensibilité à $\dot{\epsilon}$ se matérialise par un coefficient $\beta = \Delta \sigma/\Delta \log \dot{\epsilon}$ tiré de l'expérimentation.

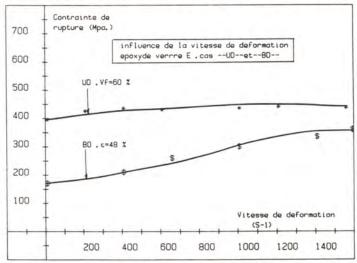


Fig. 1 - Influence de & sur la contrainte de rupture Matériau n°2 B D et matériau n°1 U D.

Les figures 1 et 2 montrent l'influence de $\tilde{\epsilon}$ sur les paramètres de rupture (contraînte et énergie) de l'U D et du B D où le UD est > BD.

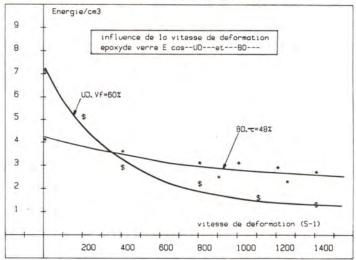


Fig. 2 – Influence de $\hat{\epsilon}$ sur l'énergie de rupture Matériau n°2 (B D) et matériau n°1 (U D)

V - INFLUENCE DU TAUX DE RENFORT

Les essais en compression mode 1 effectués sur les matériaux n°3 à n°15 à différents taux de renfort ont permis de matérialiser la variation de la contrainte de rupture en fonction de τ . La courbe, fig. 3, montre à $\hat{\epsilon}$ = 300 s⁻¹ l'évolution de ces deux paramètres.

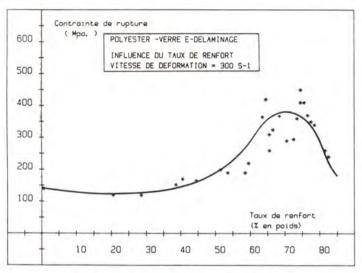


Fig. 3 - Influence du taux de renfort sur σ rupture Matériaux n°3 à n°15

Ces travaux ont conclu à la détermination du taux de renfort optimum :

t # 65 %

VI - INFLUENCE DE L'ORIENTATION DE LA SOLLICITATION

L'orientation de la sollicitation en choc a une importance capitale sur la valeur de la contrainte de rupture. Les travaux effectués sur les matériaux n°1 ont mis en évidence cet aspect. Les angles sélectionnés sont :

Les courbes, fig. 4 et fig. 5, matérialisent ces conclusions. On y conclut que le rapportd'abaissement du niveau de la contrainte de rupture (R) est de :

R = 1,8 pour
$$\theta$$
 = 10°; R = 2,25 pour θ = 30°
R = 2,4 pour θ = 45° et R = 1,875 pour θ = 90°

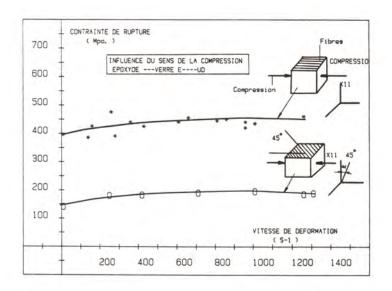


Fig. 4 – Variation de la contrainte de rupture en fonction de $\hat{\epsilon}$ pour θ = 0° et θ = 45°. Matériau n°1. θ = angle d'orientation des fibres par rapport au sens de la compression

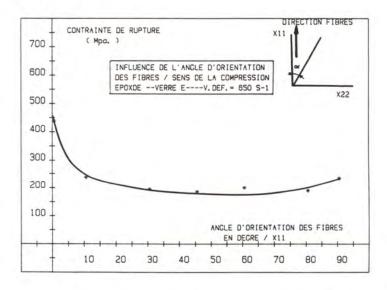


Fig. 5 - Influence de l'angle d'orientation des fibres (0) par rapport à la direction de la compression. Influence de 0 sur la contraînte de rupture à $\hat{\epsilon}$ = 650 s⁻¹. Matériau n°1.

VII - INFLUENCE DE LA SEQUENCE D'EMPILEMENT

Les matériaux sélectionnés sont des plaques en Epoxy. M10 avec les séquences d'empilement suivantes :

Matériau N°	Plaque N°	Séquence	Taux	
24	(1)	[0, 0, 45, 45, -45, -45, 90, 90] _S	τ = 69,3 %	
25	(2)	[0, 45, 90, -45, 0, 45, 90, -45] _S	τ = 66,48 %	
26	(3)	[0, 90, 45, -45, -45, 45, 90, 0] _s	τ = 68,63 %	
27	(4)	[0, 45, 90, 0, 90, 0, -45, 0] _s	τ = 74,5 %	
28	(5)	[0, 45, 0, 90, 0, -45, 90, 0] _s	τ = 69,05 %	
29	(6)	[0, 0, 45, 0, 0, -45, 90, 90] _s	τ = 69,39 %	

Le sens de la compression étant dans la direction principale des couches. Les courbes, fig. 6, montrent l'influence de la séquence d'empilement sur la variation de la contrainte de rupture en fonction de $\hat{\epsilon}$

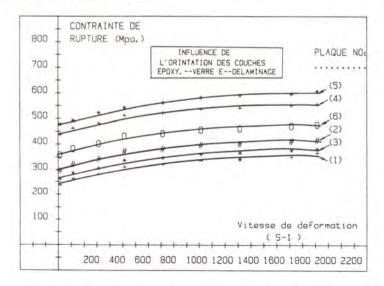


Fig. 6 – Influence de la séquence d'empilement sur (σ_{rupt}) = $f(\tilde{\epsilon})$. Epoxyde M10. Verre E. τ * 69 % (Matériaux n°24 à n°29)

Le rapport d'abaissement de la contrainte (R) défini précédemment (paragraphe V) permet de calculer, moyennant la connaissance du comportement d'une plaque à séquence 0°, les contraintes de rupture des autres plaques obtenues en faisant varier la séquence d'empilement par la méthode du <u>diagramme d'homogénéisation</u>.

^{*} Ce diagramme fera l'objet d'une autre publication.

VIII - INFLUENCE DU FACTEUR D'ECHELLE

C'est la non conservation de la loi de comportement pour ces matériaux donnés lorsqu'on fait varier soit l'épaisseur de la plaque, soit le diamètre de la barre. Les figures 7 et 8 donnent la démonstration de la non conservation de ce facteur d'échelle.

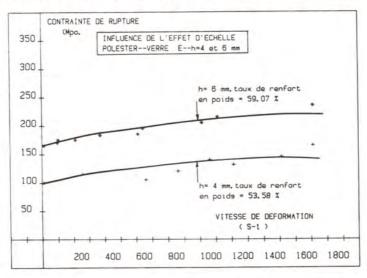


Fig. 7 - Influence de l'épaisseur sur le comportement en compression dynamique. Matériaux n°18 et 19 même définition mais épaisseur différente h=6 et 4 mm

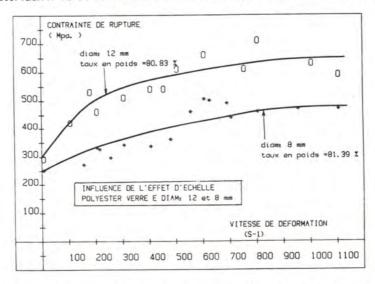


Fig. 8 – Influence du diamètre sur le comportement en compression dynamique. Matériaux n°7 et 8 même définition mais diamètres différents Φ =16 et 8 mm

IX - INFLUENCE DE LA LIAISON FIBRES-MATRICES.

Paramètre très important sur le comportement en choc des composites. Les matériaux sélectionnés sont les n° 18, 19, 20, 21, 22 et 23 où les éléments variables sont la résine. l'épaisseur et la liaison fibre-matrice (ensimé ou désensimé). Les travaux en compression dynamique ont montré l'influence de ces paramètres sur la variation de la contrainte critique de rupture en fonction de É (fig. 9) où on distingue :

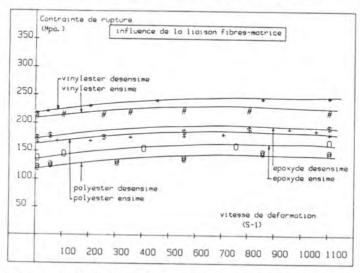


Fig. 9 - Influence de la résine et de la liaison fibre-matrice sur le comportement en compression dynamique des composites verre E. Matériaux n° 18 à n° 23.

que le composite époxyde est détaché, en comportement, vers radiographies X ont montré l'existence d'un taux de porosité assez important dans le matériau à résine époxyde qui explique ses faibles performances en compression (fig. 10). L'influence de l'ensimage ou le désensimage n'affecte pas d'une facon sensible, en compression, les caractéristiques du matériau. Des essais en cisaillement on révélé l'influence de l'ensimage (fig. 11). Mais les travaux en perforation ont montré d'une facon indiscutable l'influence prépondérante de la liaison fibre-matrice sur la valeur de l'énergie critique de perforation (fig. 12).

le bas.

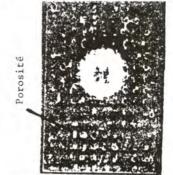


Fig. 10 - Radiographie X, échantillon après perforation. Existence de porosité (Epoxyde + Verre)

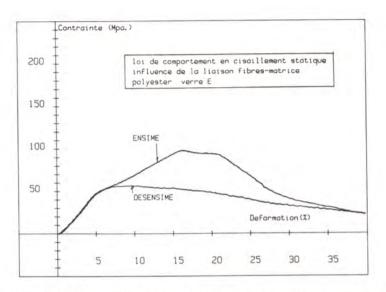


Fig. 11 - Influence de la liaison fibre-matrice sur le comportement en cisaillement statique. Matériaux n°18 et 19 (Polyester + Verre E).

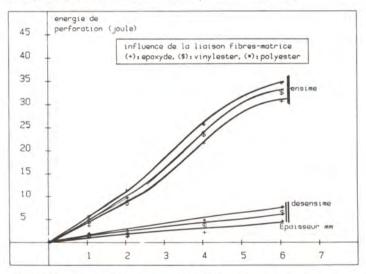


Fig. 12 - Influence de la résine, de la liaison fibres-matrices et de l'épaisseur h sur l'énergie critique de perforation. Matériaux n°18 à 23 (Résines + Verre E). Vitesse de déplacement = 15 m/s.

où on distingue que le rapport de l'énergie critique de perforation pour un matériau donné varie de 1 à 6 selon que la liaison est désensimée ou ensimée.

La liaison la meilleure est l'ensimage.

X - INFLUENCE DE LA RESINE

Si l'influence de la résine en sollicitation uniaxiale (compression, traction, cisaillement) n'a pas été très évidente pour distinguer une classification au choc, par contre, les essais d'impact sur panneaux ont permis de détacher un paramètre permettant cette classification qui est la surface endommagée par délaminage.

Les travaux effectués sur les matériaux n°1, 16 et 17 où le seul paramètre variable est la résine ont abouti à :

- en sollicitation uniaxiale, la différence de comportement, soit en contrainte ou soit en énergie, est faible, quel que soit le mode de rupture, pour détacher un classement.
- en impact sur panneaux où les paramètres mesurables sont : F_{max}, W_{absorbée}, W_{incidente}, surface d'endommagement, ... ont permis d'observer que si la force maximale ou l'énergie absorbée ne sont pas affectées par la nature de la résine (fig. 13 et fig. 14), par contre, la surface endommagée par délaminage dû au choc (fig. 15) est plus faible dans le cas du vinylester que du polyester ou de l'époxyde.

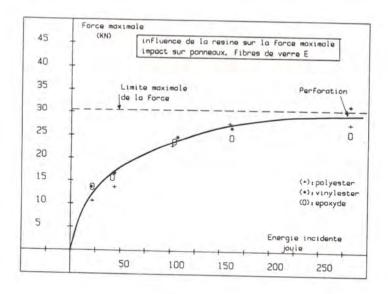


Fig. 13 - Variation de la force maximale de choc en fonction de l'énergie incidente. Impact sur panneaux. Matériaux n°1, 16 et 17. Influence de la résine.

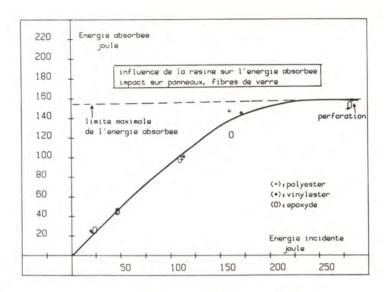


Fig. 14 - Variation de l'énergie absorbée en fonction de l'énergie incidente de choc. Impact sur panneaux. Matériaux n°1, 16 et 17. Influence de la résine.

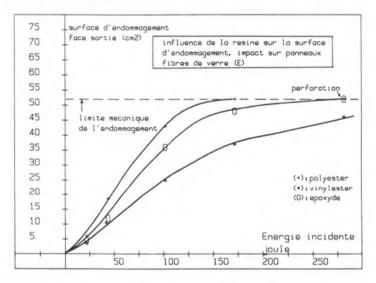


Fig. 15 - Variation de la surface d'endommagement en fonction de l'énergie incidente de choc. Impact sur panneaux. Matériaux n°1, 16 et 17. Influence de la résine.

Ceci nous amène à la classification suivante :

Vinylester > Epoxyde > Polyester

CONCLUSION

Nous venons de voir, d'une façon générale, l'influence des paramètres sur le comportement en choc des composites fibres de verre. Ces études ont permis de mettre en évidence les paramètres qui nous paraissent les plus influants, à savoir : la sensibilité à $\hat{\epsilon}$, le taux de renfort, le type d'armature U D ou B D, la liaison fibre-matrice, l'orientation de la charge par rapport à la direction principale des fibres et la séquence d'empilement des couches. Si les essais uniaxiaux de caractérisation (compression, traction et cisaillement) permettent d'accéder aux informations localisées traitant l'un ou l'autre de ces paramètres, il reste, quand même, que la configuration type d'essais en choc c'est l'impact sur panneaux où la sollicitation est triaxiale et simule l'influence de tous ces paramètres et la mesure de l'endommagement localisé par choc.

Le matériau composite à usage naval doit résister d'une façon très satisfaisante aux conditions de choc rencontrées pendant la mise en service d'un bateau. Les cas de chargements type rencontrés sont : le slaming, le choc de paquet de mer, les chocs répétés des paquets de mer, et la perforation ajoutée à ces cas normalement rencontrés, ceux exceptionnels de collisions avec d'autres structures.

La résistance au choc d'un panneau composite se matérialise par des énergies absorbées avant endommagement localisé et par délaminage avant perforation les plus grandes possibles. Cela est fonction bien sûr du matériau, mais aussi des conditions aux limites du panneau.

Cette résistance augmente si :

- , (σ_{CΓ})_{rupture} augmente et module élastique fibre diminue
- . Module élastique matrice augmente et $(\sigma_{CP})_{PUPture}$ matrice diminue
- . La résine employée est la vinylester à V_f # 50 %
- . Pour une résine époxyde, le V_f est # 58 %
- . Pour une résine polyester, le Vf est # 50 %
- . La liaison fibre-matrice est ensimée, reste à définir le niveau de l'ensimage
- Le type d'armature est le bidirectionnel; l'utilisation de l'unidirectionnel augmente la résistance élastique, mais augmente aussi le risque de délaminage.
- . La cellule de base est [45, 0, 0, -45]; cette cellule est en cours d'évaluation dans notre laboratoire.

Ces travaux ont été financés par CETIM-NANTES et STCAN (Service Technique Central de l'Armement Naval).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NOYAK, R.C. and De CRESCENTE, M.A. in Composite Materials: testing and design, ASTM, STP 497, 311 (1972).
- [2] GRESZCZUK, L.B. in Foreing objet impact damage in composites, ASTM, STP 568, 183 (1975).
- [3] ROSS, C.A. and SIERAKOWSKI, R.L. "Studies on the impact resistance of composite plate". Composites, 4, pp. 157–161 (July 1973).
- [4] TAKEDA and Al. "Studies of impacted glass fiber reinforced composite laminates". SAMPE Quart., 12 (2), pp. 9-17 (1981).
- [5] SAKA, K. and HARDING, J. "Behaviour of fiber reinforced composites under dynamic tension". OUEL Rep. n°1543/84, Univ. of Oxford, 1984.
- [6] HAYES, S.Y. and ADAMS, D.F. "Rate sensitive tensile impact properties of fully and partially loaded unidirectional composites" J. Test. Eval. (ASTM), 10, pp. 61–68 (1982).
- [7] CHAMIS, C.C. and Al. "Impact resistance of unidirectional fiber composites". ASTM, STP 497, pp. 324-349 (1972).
- [8] OGAWA, K. "Impact tension-compression test by using split-Hopkinson bar". Exp. Mech. June 1984, pp. 81-86.
- [9] ALBERTINI, C. and Al. "Development of the Hopkinson bar for testing large specimen intension". J. de physique, Colloque CS, pp. 449-503, août 1985.
- [10] DANNAWI, M. and EL HABBAK, A. "Comportement des composites fibre de verre sous chocs en utilisant une installation à base de barre d'Hopkinson". Rapport contrat CETIM n°84-02, décembre 1984.
- [11] HARDING, J. and WISH, L.M.
 "A tensile technique for fibre-reinforced composites at impact rates of strain". Journal of Materials Science 18 (1983), pp. 1810-1826.
- [12] DANNAWI, M. and EL HABBAK, A. "Mechanical behaviour of laminate composite under impact load". 1er ECCH, Bordeaux, 1985, pp. 315-321.
- [13] FARLEY, L. "Energy absorption in composite materials for crashworthy structures". 2ème ECCH (European Conference on Composite material), pp. 357–366 (1987).
- [14] CRESZCZUK, L.B. "Damage in composite materials due to low velocity impact". Impact dynamic, J. Wiley and Sons (1982).
- [15] WILLIAMS, J.G. and Al. "Recent developments in the design, testing and impact-damage tolerance of stiffened composite panels. Fibrous composites in structural design". Plenum press, New York and London, pp. 259-291 (1980).

CARACTERISATION INITIALE ET VIEILLISSEMENT HYDROLYTIQUE EN IMMERSION A 100°C DE CINQ RESINES POLYESTER INSATURE

B. MORTAIGNE (1), V. BELLENGER (2), P.A. HOARAU (1), J. VERDU (2)

RESUME

Cinq résines polyester insaturé à base des diacides maléïque et isophtalique ont été caractérisées par des méthodes physico-chimiques et mécaniques avant vieillissement hydrolytique. Cette caractérisation a été effectuée tant au niveau du prépolymère dilué dans le styrène qu'au niveau du réticulat.

L'augmentation du taux d'acide maléïque diminue l'allongement à la rupture du matériau.

L'évolution des matériaux au cours d'un vieillissement accéléré en immersion à 100°C est décrite par suivi de la variation de masse des échantillons.

La résine à base de néopentylglycol semble être celle qui présente la meilleure tenue à l'hydrolyse.

mots-clés : vieillissement, polyesters, sorption d'eau, hydrolyse, essais mécaniques, traction, RMN, infrarouge.

ABSTRACT

The characterization of five unsatured polyester resins with maleïc and isophtalic diacids was carried out by physico-chemistry and mechanical methods before hydrolytic ageing. This characterization was performed on the prepolymer, diluted with styrene, and on the crosslink polyester.

The increase of maleïc diacid percentage decrease the breaking

elongation of material.

The material modification during the accelerated ageing provoked by immersion in water at 100°C is explained by weight sample changing.

The neopentylglycol resin seems to be the best for hydrolysis resistance.

key-words: ageing, polyester resin, water sorption, hydrolysis, mechanical tests, strength, NMR, infrared.

⁽¹⁾ ETCA CMCM/CM 16bis, avenue Prieur de la Côte d'Or - 94114 ARCUEIL Cedex (2) ENSAM 151, boulevard de l'hôpital - 75013 PARIS

1 INTRODUCTION

A la demande de la Direction des Recherches et Etudes Techniques (DRET) et de la Direction des Constructions Navales (DCN), l'ETCA a entrepris depuis deux ans l'étude de l'interaction chimique eau-polymère sur des résines polyester de formulations identiques ou proches de celles utilisées par la DCN pour la fabrication du chasseur de mines tripartite.

Ce nouvel axe de recherche, concernant un matériau utilisé en construction navale, est surtout dirigé vers l'étude du comportement à long terme du matériau employé, au stade final, sous forme de composite.

Cette étude a été menée sur ce type de résine, afin de tenter d'expliquer au niveau de la molécule, les interactions chimiques eau-polymère,

- d'une part, sur le plan mécanistique avec l'étude tridimensionnelle du réseau formé,
- d'autre part, sur le plan cinétique avec l'étude de la résistance au vieillissement et la détermination d'une loi de dégradation.

2 MATERIAUX

2.1 Définition des résines étudiées

Cinq résines ont été étudiées. Elles résultent de la polycondensation entre deux diacides et un glycol, la nature des glycols employés variant pour chacune des quatre premières nuances de résine de façon à pouvoir évaluer l'influence de la nature du diol sur le vieillissement hydrolytique, le paramètre variable dans la cinquième nuance étant le rapport des diacides.

Ces cinq résines sont définies comme suit :

- acide maléique/acide isophtalique/propylèneglycol (PG) 0,5/0,5/1
 acide maléique/acide isophtalique/néopentylglycol (NPG) 0,5/0,5/1
 acide maléique/acide isophtalique/diéthylèneglycol (DEG) 0,5/0,5/1
 acide maléique/acide isophtalique/dipropylèneglycol (DPG) 0,5/0,5/1
- acide maléique/acide isophtalique/propylèneglycol (PG0703) 0,7/0,3/1

Elles sont toutes élaborées à masse moléculaire constante et diluées à un taux fixe de 45% en masse de styrène.

2.2 Polymérisation

Ces résines sont polymérisées par voie radicalaire par ajoût successif de :

- 0,6 % d'octoate de cobalt (AKZO NL51P) qui a un rôle de catalyseur ,
 - 1,5 % peroxyde de méthyléthylcétone (BUTANOX M50) qui a un rôle d'amorceur.

Après ajoût de ces deux réactifs, le mélange est dégazé 3 minutes sous 15mm de Hg (sous trompe à eau) de façon à éliminer tout le gaz inclus au cours de l'addition et de la réaction entre l'amorceur et le catalyseur, puis la résine est coulée à température ambiante et par gravité dans un moule permettant l'obtention de plaques de résine partiellement polymérisées de dimension 250 x 180 x 0,7 mm.

Les plaques sont démoulées après 3 heures de polymérisation et des échantillons de dimension 10 x 50 x 0,7 mm sont découpés puis placés entre deux plaques de verre avant d'être placées en étuve pour subir un cycle thermique de 10 h à 80 °C suivi de 2 h à 120 °C de façon à obtenir une réticulation maximale.

3 CARACTERISATION DES RESINES

L'étude du vieillissement hydrolytique, et de tout vieillissement en général, nécessite une caractérisation initiale des matériaux ainsi qu'une bonne connaissance des paramètres susceptibles d'intervenir sur leur structure.

Cette caractérisation est effectuée :

- sur le prépolymère par différentes méthodes chimiques (dosages) et spectrochimiques infrarouge (IR), résonance magnétique nucléaire (RMN), spectrométrie de masse (MS), chromatographie de perméation sur gel (GPC),
- sur le polymère par les mêmes méthodes physico-chimiques complétées par d'autres analyses comme l'analyse enthalpique différencielle (AED), l'analyse thermogravimétrique (ATG), les essais mécaniques en traction.

3.1 Masses moléculaires

Ce paramètre est important à étudier puisqu'il influe directement sur la densité de réticulation du réseau après polymérisation.

L'évaluation des masses moléculaires moyennes en nombre (Mn) se fait

- d'une part à partir des indices d'acide (Ia) et d'hydroxyle (Iom) obtenus par dosages chimiques, en appliquant la formule,

- d'autre part par GPC, les solutions étant réalisées avec du tétrahydrofuranne (THF) distillé à des concentrations variant entre 2 et 5 mg/ml, et la calibration s'effectuant à partir de polystyrènes homodisperses de différentes masses moléculaires (390000 à 1800).

Résine	Ia (mole	Iон /g rés)	Ia (mg F	Iон OH/g rés)
PG	25,6 10-5	44,6 10-5	14,4	25
NPG	15,9 10-5	24,9 10-5	8,9	14
DEG	17,5 10-5	44,6 10-5	9,8	25
DPG	22,6 10-5	46,3 10-5	12,7	26
PG0703	21,0 10-5	30,3 10-5	11,8	17

Indices d'acide (Ia) et d'hydroxyle (IoH) des résines

		Mn à p	GPC						
Résine	Styrèn	Ia	Іон	Ia'	Іон '	Mn	Mn	Mw	P
PG	0,37	14,4	25	23	40	1800 ± 300	2100	8500	3
NPG	0,45	8,9	14	16	25	2700 ± 900	2700	7800	3
DEG	0,38	9,8	25	16	40	2000 ± 400	2000	5900	3
DPG	0,42	12,7	25	22	43	1700 ± 300	1850	7400	4
PG0703	0,45	11,8	17	22	31	2100 ± 500			-

Masses moléculaires des résines obtenues par dosages chimiques et par GPC

Remarque: Les valeurs des masses moléculaires moyennes en nombre obtenues par dosage chimique et celles obtenues par GPC sont très voisines les unes des autres.

3.2 Analyses thermiques

Deux analyses thermiques différentes, l'analyse enthalpique différentielle (AED) (ou DSC) et l'analyse thermogravimétrique (ATG) sont effectuées avec des appareils PERKIN-ELMER.

3.2.1 analyse enthalpique différentielle (AED)

Les analyses sont effectuées de 30 à 250°C avec un gradient de température de 20°C/min sur un appareil type DSC4. La sensibilité est réglée au maximum (1 mcal) de façon à obtenir un signal le plus intense possible.

La température de transition vitreuse (Tg) de chacun des matériaux est déterminée au point d'inflexion de la courbe dH/dT = f(température).

Résine	Tg							
PG	378	±	10	К				
NPG	370	±	10	K				
DEG	343	+	5	K				
DPG	353	+	5	K				
PG0703	418	±	10	K				

Températures de transition vitreuse

La post réticulation des échantillons, qui a lieu aux températures de 80 puis 120 °C (393 K), se situe à des températures supérieures aux Tg des résines ce qui favorise la réticulation maximale.

L'allure des courbes permet également de contrôler l'exotherme résiduel de réticulation, l'énergie mesurée étant d'autant plus faible que la réticulation est forte. Cet exotherme est très peu prononcé dans l'analyse des résines DEG et DPG, tandis qu'il est beaucoup plus marqué dans le cas des autres résines.

3.2.2 analyse thermogravimétrique (ATG)

Les analyses sont effectuées de 40 à 900°C avec gradient de 20°C/min, sous air reconstitué, avec un appareil TGS2. Cette technique d'analyse, qui permet d'évaluer la perte de masse d'un échantillon en fonction de sa température, visualise deux points d'inflexion sur les courbes.

Résine	ler point inflexion	2ème point inflexion			
PG	398°C	515°C			
NPG	449°C	625°C			
DEG	432°C	643°C			
DPG	403°C	498°C			
PG0703	384°C	513°C			

Températures de dégradation thermique

Cette analyse permet de conclure à la non dégradation du réseau polyester à la température de 120 °C, température à laquelle l'échantillon est porté pendant deux heures pour parfaire la réticulation.

3.3 Essais mécaniques en traction

Des essais mécaniques en traction pour mesurer le module d'YOUNG (E), l'allongement à la rupture (ε), la force à la rupture (σ), sont effectués sur une machine de traction INSTRON type 1121 équipée d'un capteur de force étaloné entre 0 et 10000 N en employant un extensomètre INSTRON ayant 12,5 mm d'écartement entre couteaux de façon à pouvoir contrôler les valeurs obtenues sur nos résines polymérisées en laboratoire avec les valeurs connues des résines industrielles,

Résine	E (MPa)	€ (%)	σ (MPa)			
PG NPG DEG DPG PG07/03	4139 ± 170 3654 ± 88 3141 ± 85 3360 ± 188 3798 ± 150	1,3 ± 0,3 3,7 ± 0,6 1,8 ± 0,4	47 ± 10 60 ± 3 50 ± 11			

Essais mécaniques en traction

Les propriétés mécaniques de nos différents polyesters, comparées aux propriétés mécaniques des matériaux industriels, sont très voisines. La technique de laboratoire employée pour l'élaboration de nos échantillons, donne donc des échantillons représentatifs de la réalité industrielle.

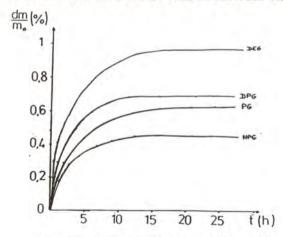
Les courbes de traction des plaques de polyester à base de DEG révèlent un phénomène de fluage avant la rupture, tandis que les autres résines cassent brusquement lorsque leur allongement maximum est atteint.

L'augmentation du taux d'acide maléïque dans la résine diminue l'allongement à la rupture du matériau. Ceci peut s'expliquer par un nombre de ponts de réticulation plus élevé.

4 GONFLEMENT EN ATMOSPHERE HUMIDE

L'échantillon de polyester étant placé dans une atmosphère de solvant, un gain de masse correspondant à l'insertion de molécules de solvant dans le réseau est constaté au cours du temps. Cette augmentation, dans la vapeur d'un solvant donné, est directement liée à la structure du polymère.

Des essais de sorption d'eau sont effectués à une température de 50°C et à une humidité relative contrôlée (HR) de 100%. Des mesures de prise en solvant et de diffusivité de l'eau au sein du matériau sont effectuées.



Sorption d'eau des résines à 50°C - 100% HR

Le comportement des échantillons en début de sorption est considéré comme étant << fickien>>, c'est-à-dire que la sorption obéit à la loi de Fick

$$\frac{\delta c}{\delta v} = D * \frac{\delta^2 c}{\delta x^2}$$

- Mesure de diffusité :

Le coefficient de diffusivité Dt est calculé sur la première heure de sorption pour des échantillons à base de propylèneglycol (PG) ayant subi une cuisson plus ou moins longue à 80°C et pour les résines DEG, DPG, NPG réticulées 10h à 80°C (réticulation maximale).

CUISSON	CUISSON Oh		4h	6h	8h	10h	
Dt (cm².s-1	9,53.10-8	3.2710-8	3,35.10-8	7,71.10-8	3,61.10-8	3,06.10-8	

Coefficient de diffusivité Dt pour des échantillons à base de propylèneglycol (PG)

	DEG	DPG	NPG
Dt (cm ² .s ⁻¹	4,77.10-8	5,05.10-8	4,83.10-8

Coefficient de diffusivité Dt pour les échantillons DEG, PDG, NPG

Il ressort de ces essais que :

- l'équilibre est atteint au bout de 15 heures environ,

- les valeurs des taux de gonflement sont inférieures à 1% (0,77 maxi),

- le taux de gonflement à l'équilibre ne diminue pas avec la durée de réticulation,

- les échantillons ne présentent pas à court terme de dégradation (absence de fissuration),

 les mesures de diffusivité sont cohérentes avec la structure interne des matériaux, celles-ci augmentant avec la longueur des chaînes du polymère (moins il y a de noeuds, plus l'eau pénètre rapidement).

5 VIEILLISSEMENT

Les premières expositions dans des conditions dures par immersion à 100 °C dans de l'eau distillée, la température étant régulée par la température d'ébullition de l'eau, ce qui correspond à un vieillissement très accéléré, ainsi que les suivis de vieillissement hydrolytique en utilisant les mêmes méthodes de caractérisation que celles utilisées pour la caractérisation initiale, ont été effectuées sur ces cinq résines et ont permis de nous donner une idée de la cinétique de dégradation hydrolytique.

Les expositions des éprouvettes dans des conditions moins dures faisant varier la température et l'humidité relative (T = 70 et 20°C, HR = 100, 75, 50, 25 et 0 %) sont en cours et doivent permettre une modélisation

de la cinétique de vieillissement incluant et différenciant ces deux paramètres.

$$v = K * f(HR)^{\alpha} * exp (-E/RT)$$

K et α étant des constantes ; -E/RT étant le facteur d'ARRHENIUS

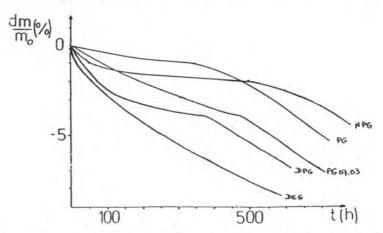
Avant d'être analysés, les échantillons sont essuyés, séchés au dessicateur chauffant à 40 °C sous vide pendant 2 heures, séchés au dessicateur rempli de gel de silíce anhydre à température ambiante pendant 48 heures, puis laissés reconditionner à température et à humidité ambiante pendant 72 heures, ce qui correspond à une stabilisation en poids de l'échantillon.

5.1 Suivi du vieillissement hydrolytique par variation de masse

Plusieurs pesées des échantillons sont effectuées :

- avant vieillissement, sans conditionnement particulier,
- aussitôt après sortie de l'enceinte de vieillissement et essuyage,
- après reconditionnement, par séchage sous vide jusqu'à perte de poids nulle, puis jusqu'à reprise de poids constant dans des conditions d'humidité et de température ambiante.

Ces pesées permettent de tracer des courbes de variation de masse en fonction du temps d'exposition et par la suite de déterminer les paramètres de cinétique de vieillissement.



Variation de masse des résines en fonction du temps d'immersion à 100°C après reconditionnement

5.2 Analyse des bains d'immersion

La phase aqueuse du bain d'immersion est extraite à l'éther éthylique; les produits solubles dans l'eau sont récupérés dans la phase organique (éthérée) puis concentrés au rotavapor.

Le condensat est analysé par IR, par GPC puis par couplage entre un chromatographe en phase gazeuse et un détecteur de masse (GC-MS).

L'analyse par couplage chromatographe en phase vapeur - spectromètre de masse (GC-MS) permet la détection :

- de plusieurs produits provenant des solvants employés pour diluer l'amorceur et le catalyseur,
- de composés aromatiques pouvant provenir de l'acide isophtalique ou du styrène,
- d'acide isophtalique. Cet acide semble être hydrolysé beaucoup plus rapidement que l'acide maléique qui n'est pas détecté dans les produits d'extraction.

Les diols restent piégés sur la colonne capillaire apolaire avec les produits fortement polaire du fait de cette polarité.

L'analyse par GPC confirme les produits détectés par GC-MS ; elle permet de détecter la présence de styrène monomère en quantité très faible et de confirmer l'absence de composés de haut poids moléculaire.

6 ANALYSE D'UN TRONCON DE COQUE DE BATEAU

L'analyse physico-chimique d'un tronçon de coque, fabriqué il y a une quinzaine d'années à partir d'une résine tétrahydrophtalique, et vieilli en bassin à LORIENT, a été effectuée par les mêmes méthodes d'analyse que celles précédemment décrites.

Il ressort principalement de cette analyse que la réticulation du matériau est très faible malgrè les quinze années passées, et cette réticulation n'est pas homogène dans tout le matériau mais varie en fonction de son exposition à la chaleur (rayonnement solaire).

7 CONCLUSION

La caractérisation initiale du prépolymère et de la résine polymérisée avant vieillissement a permis de mieux connaître les matériaux à étudier. Elle a permis de mieux appréhender les modifications de stucture susceptibles de se produire dans le réseau tridimensionnel.

Bien que les travaux aient porté essentiellement sur la résine pure, pour laquelle l'influence de divers paramètres de composition a été étudiée, les résultats obtenus vont pouvoir être transposés aux polyesters employés en tant que composite en facilitant la compréhension des mécanismes de dégradation hydrolytique.

L'augmentation du taux d'acide maléïque dans la résine polyester augmente la résistance à l'hydrolyse mais diminue les propriétés mécaniques, en particulier l'allongement à la rupture.

Les premiers résultats de vieillissement semblent indiquer que le polyester résistant le mieux à l'hydrolyse soit celui à base de néopentylglycol; ceci reste à vérifier dans le cas de composites. D'autres paramètres comme la nature des diacides, la masse moléculaire moyenne, les différents adjuvants employés doivent être étudiés avant de formuler un avis définitif.

MOYENS D'ANALYSE APPLIQUÉES A L'EXPERTISE D'ENDOMMAGEMENT DE PIECES NAVALES EN MATÉRIAUX COMPOSITES

A.LEMASCON *; A.GROSPIERRE *

INTRODUCTION

L'attrait des matériaux composites du point de vue gain de poids, facilité de transformation, intégration de plusieurs fonctions, a favorisé leur entrée dans des domaines techniques (aéronautique, navale, automobile, ...) ainsi que leur substitution aux métaux pour un certain nombre d'applications.

Cependant, qu'il soit composite ou pas, le problème de choix du matériau constituant la structure que l'on veut réaliser et la conception de la pièce vont dépendre des conditions de sollicitation et de fonctionnement. Un choix inopiné de la matière, une conception approximative conduisent bien souvent à une rupture prématurée des pièces. Par ailleurs, la structure peut être amenée pour diverses raisons à fonctionner dans des conditions anormales qui conduisent à une sollicitation extrême et à un endommagement.

La pièce cassée, il reste à faire la part des choses, essayer de reconstituer la rupture afin de comprendre ce qui s'est passé. Ceci est le travail de l'expert qui dispose d'une panoplie de techniques de :

- contrôle non destructif
- caractérisation mécanique
- caractérisation physico-chimique
- analyse microscopique
- calcul

Le but de cet exposé est de présenter ces moyens ainsi que la démarche couramment utilisée pour assembler les divers morceaux du puzzle .

MOYENS ET DEMARCHE

Lorsqu'un problème parvient à l'expert, le niveau de difficulté conditionne l'emploi des outils précédemment cités. Le diagramme 1 résume quelle peut être la démarche entreprise en vue de comprendre les origines d'une avarie.

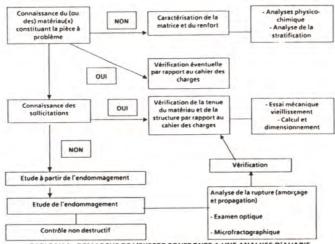


TABLEAU 1 : DEMARCHE DE L'EXPERT CONFRONTE A UNE ANALYSE D'AVARIE

^{*} CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES MÉCANIQUES (CETIM) NANTES - FRANCE

Un certain nombre de méthodes physico-chimiques permet de caractériser et contrôler le stratifié constituant la pièce défaillante :

- Identification de la résine de base (utilisée comme matrice dans le stratifié) par spectrophotométrie infrarouge à partir des principales fonctions présentes dans la formulation (figure n° 1).
- Détermination du taux de polymérisation de la résine, évaluation de la TG par DSC (figure n° 2)
- Détermination du taux de renfort du stratifié par ATG (figure n° 3).
- Examens du renfort après calcination de la matrice
- Détermination du module d'élasticité par analyse viscoélastique

Les essais mécaniques et essais de vieillissement menés sur éprouvettes dans les conditions de sollicitations imposées en service (effort, température, humidité ...) précisent les caractéristiques mécaniques des matériaux et leur tenue dans le temps (figure 4).

Des programmes de calcul de prévision du comportement élastique des matériaux composites (CETIM ANASTRA par exemple) ou de calcul de structures par éléments finis (CASTOR) sont des aides précieuses pour apprécier si le comportement des pièces en service est satisfaisant ou si le dimensionnement des structures est suffisant.

Des techniques de contrôle non destructif comme le ressuage (figure 5) la radiographie avec ou sans pénétrant (figure 6), les ultrasons ... donnent une première idée de l'importance de l'endommagement interne des pièces. En plus des indications sur la manière dont s'est propagée la fissuration, elles facilitent le choix du prélèvement nécessaire à la phase microfractographique.

Enfin l'examen de la ruine par méthode optique ou (et) par microscopie électronique à balayage (MEB) est généralement indispensable pour suivre la propagation et remonter à la zone d'amorçage de la rupture. (figures 7 et 8)

Bien qu'il n'existe pas encore d'atlas de fractographie des matériaux composites, un certain nombre de surfaces "type" et l'expérience des opérateurs permettent souvent de cerner la rupture et d'apporter des informations qui, cumulées aux résultats des autres analyses, décrivent l'histoire de l'avarie.

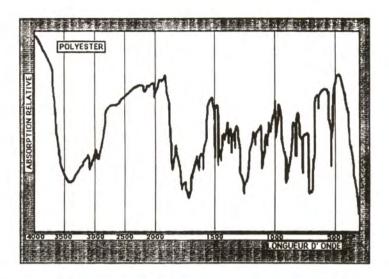


FIGURE 1 : SPECTRE INFRAROUGE D'UNE RESINE POLYESTER (DOCUMENTATION CETIM)

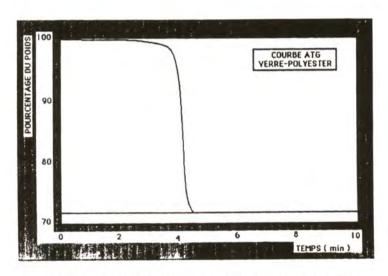


FIGURE 2 : DETERMINATION DU TAUX DE RENFORT DE VERRE DANS UN STRATIFIE VERRE - POLYESTER (DOCUMENTATION CETIM)

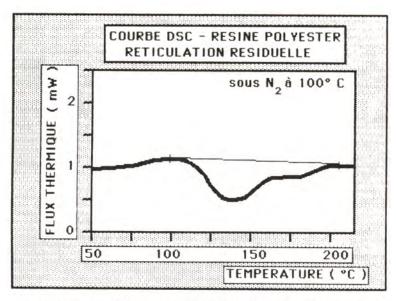


FIGURE 3 : DETERMINATION DE LA RETICULATION RESIDUELLE D'UNE RESINE POLYESTER par DSC (DOCUMENTATION CETIM)

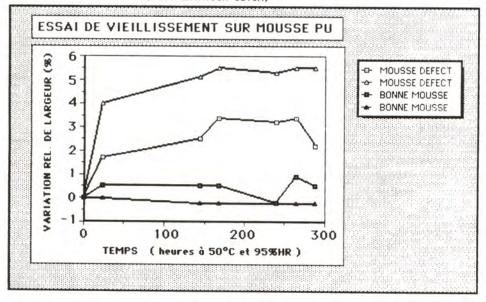


FIGURE 4: DETERMINATION DE LA TENUE DE MOUSSE POLYURETHANE SOUS VIEILLISSEMENT ACCELERE (DOCUMENTATION CETIM)

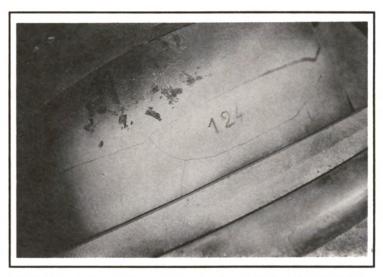


FIGURE 5 : ENDOMMAGEMENT D'UNE QUEUE DE PALE REVELE PAR RESSUAGE (DOCUMENT CETIM)

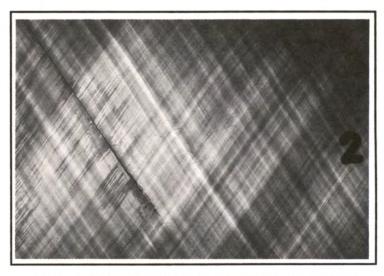


FIGURE 6 : RADIOGRAPHIE AVEC PENETRANT METTANT EN EVIDENCE L'ENDOMMAGEMENT D'UN TUBE EN VERRE-EPOXYDE SOUMIS à LA PRESSION HYDRAULIQUE INTERNE (DOCUMENT CETIM)



FIGURE 7

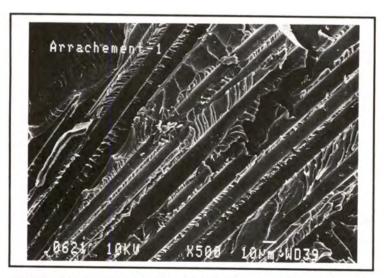


FIGURE 8 : ASPECTS CARACTERISTIQUES DU FACIES DE RUPTURE D'UNE STRUCTURE SOUMISE A DES EFFORTS D'OUVERTURE (DOCUMENTS CETIM)

SESSION III - CALCUL

Présidence: M. BABINET, Conseiller technique de la direction du Bureau Véritas.
M. GERALD, Chef de la section structure navale - STCAN.

Le bureau Véritas et l'expérience de la surveillance des constructions neuves et des navires en service J.N. BABINET, J. BENOIT

Calculs d'empilements optimaux pour des structures multicouches composites/
nid d'abeille M. HITTINGER, G. BERTRAND, P. MANIGOT

Elément fini coques multicouches

B. PESEUX, S. DUBIGEON

Conception et réalisation d'un bras de multicoque

M. CHEVALLEY, M. COQUET

Les catamarans de course et les matériaux composites

G. OLLIER, H. OUDIN, B. PESEUX, J.P. QUEVAT

Revue de quelques unités en CVR ayant dépassé dix ans d'âge

M. EBERSOLT

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 137 à 166

LE BUREAU VERITAS ET L'EXPERIENCE DE LA SURVEILLANCE DES CONSTRUCTIONS NEUVES ET DES NAVIRES EN SERVICE

J.N. BABINET, J. BENOIT

RESUME

Réflexion sur les propriétés particulières des composites et leur influence sur l'échantillonnage des coques de navires. Critique de résultats. Expérience de l'approbation des plans. Expérience des visites des navires en service.

Reconnaissance de chantier constructeur et approbation de type. Evaluation du système qualité du chantier. Traçabilité. Références.

Mots clés : composites, échantillonnage, surveillance, assurance de qualité.

ABSTRACT

Reflexion about the particular properties of the composites and their influence on the scantlings of the ship's hull. Analysis of some test results. Experience of the hull drawing approval. Experience of the inspection of the ships in service.

Recognition of a ship building factory and type approval. Assessment of the builder's quality assurance system. Recordability and references.

Key words: composites, scantlings, inspection, quality assurance.

RAPPEL HISTORIQUE

Le Bureau Veritas, Société de Classification, surveille la construction de navires depuis 1828.

La surveillance de construction des premiers navires en composites a eu lieu en 1960.

Depuis cette date, le nombre d'unités surveillées par an n'a cessé de croître.

En 1970, le Bureau Veritas a publié une Note d'Information sur la surveillance des embarcations en polyester renforcé de verre textile. Ce document traitait des différents problèmes qualitatifs de mise en oeuvre des composites.

En 1979, le Bureau Veritas a publié le "Règlement pour la construction et la classification des navires en polyester renforcé au verre textile".

L'expérience du Bureau Veritas n'est pas limitée au domaine de la construction des navires mais elle couvre, par les autres branches de la Société, la construction des avions, celle des immeubles et celle des matériaux industriels en général. Chacune de ces activités comporte la surveillance de produits stratifiés.

LE REGLEMENT

Les règlements publiés par le Bureau Veritas décrivent les conditions que doit remplir un navire pour pouvoir recevoir une cote de classification.

Ils comportent une partie qualitative sur les installations et les méthodes et une partie quantitative sur les calculs d'échantillonnage.

Les matériaux composites ont un comportement particulier qui justifie un règlement spécial qui apparaît plus clairement en faisant la comparaison entre les matériaux métalliques et les matériaux composites.

1) Module d'élasticité et résistance à la rupture

Comparons les courbes de résistance à la traction de l'acier ordinaire, de l'alliage léger et des composites (figure 1).

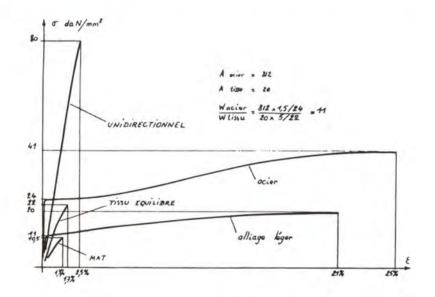


Figure 1

Comparaison des courbes de traction de l'acier, de l'alliage léger et des composites renforcés avec MAT ou TISSU EQUILIBRE ou UNIDIRECTIONNEL

Pour l'acier ordinaire, le module d'élasticité est 21 000 daN/mm2, pour l'alliage léger 8 000 daN/mm2 et pour les composites verre polyester, il est variable suivant la nature du renforcement et sa teneur en masse, les valeurs centrales étant 850 pour le MAT, 1 600 pour le TISSU EQUILIBRE et 3 300 pour l'UNIDIRECTIONNEL.

Le composite est donc entre 25 et 6 fois plus déformable que l'acier.

Les limites d'élasticité n'existent que pour les métaux : 24 daN/mm2 pour l'acier, et 11 daN/mm2 pour l'alliage léger soudé.

Pour les composites, il n'existe pas de limite d'élasticité. Le comportement est presque linéaire jusqu'à la rupture.

Le tableau ci-dessous résume ces comparaisons :

			C	omposite po	lyester verre
	Acier ordinaire	Alliage leger	MAT	TISSU EQUILIBRE	UNIDIRECTIONNEL
Module d'élasticité daN/mm²	21 000	7 000	850	1 600	3 300
Plasticité	oui	oui	non	non	non
Limite d'élasticité daN/mm²	24	11			
Limite de rupture daN/mm²	41	20	10,5	22	80
Allongement à la limite d'élasticité	0,11 %	0,16 %			
Allongement à la rupture	25 %	21 %	1,3 %	1,7 %	2,5 %

2) Plasticité

La différence fondamentale entre les métaux et les composites est que les métaux sont très déformables plastiquement alors que les composites n'ont aucune plasticité. En effet, quand l'acier atteint sa limite d'élasticité, il a seulement un allongement de 0,11 % alors qu'il atteint la rupture pour un allongement de 25 %, c'est-à-dire un allongement 230 fois plus grand qu'à la limite d'élasticité.

Quand un composite est déformé par flexion, il a un comportement presque linéaire jusqu'à la rupture. Cette constatation est essentielle pour les méthodes d'échantillonnage. Un métal est échantillonné par rapport à la limite d'élasticité en lui appliquant un coefficient de sécurité dont l'ordre de grandeur est 1,5 alors que le composite sera échantillonné par rapport à la rupture en lui appliquant un coefficient de sécurité de l'ordre de 5.

Dans ces conditions, comparons les énergies de rupture de deux barres calculées pour résister à la même force F. Un calcul simple des aires des courbes de traction montre que le barrot en acier peut absorber en traction une énergie environ onze fois plus forte que le composite.

Comparons maintenant les comportements en flexion des bordés supportés par des lisses régulièrement espacées (figure 2).

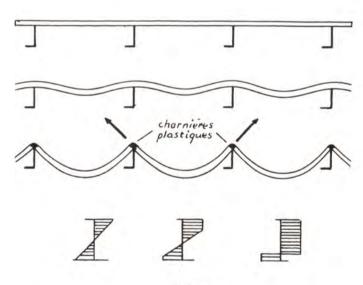


Figure 2

Déformations d'une tôle métallique chargée par une pression croissante Distribution des contraintes dans l'épaisseur de la tôle aux appuis La tôle en acier commence par se comporter comme une poutre encastrée à ses extrémités puis, si la pression croît, des charnières plastiques apparaissent à chaque appui et il en résulte une redistribution des contraintes dans l'épaisseur de la tôle qui prend une déformation permanente mais se comporte comme une chaîne tendue entre deux appuis. Il en résulte que la pression de rupture est largement supérieure à 41/24 fois celle où la limite d'élasticité est dépassée. Avec le composite, il n'y a pas de plasticité ni de redistribution de contrainte, ce qui explique que l'on doive prendre un coefficient de sécurité par rapport à la rupture bien plus élevé que 1,5 x 41/24 = 2,56.

3) Hétérogénéité

Les métaux sont homogènes et isotropes. Les composites sont hétérogènes et anisotropes. Cette particularité rend plus compliquée l'étude des composites et l'interprétation de leurs performances car les contraintes de ruptures ne sont pas les mêmes dans toutes les couches ni dans toutes les directions.

Les ruptures ne se produisent pas systématiquement en couche externe et il peut apparaître des délaminages entre couches. Cependant, très généralement, les directions principales des tissus chaîne ou trame sont perpendiculaires aux raidisseurs, ce qui permet fréquemment de considérer seulement les propriétés dans ces directions.

L'hétérogénéité globale due à la présence de diverses couches est accompagnée d'une hétérogénéité locale due à l'existence des fibres et de la matrice, ce qui fait apparaître plusieurs modes de rupture, rupture des fibres, rupture de la matrice, rupture de l'interface fibre matrice et combinaison de ces différentes ruptures. En cela, les composites sont totalement différents des métaux.

4) Tenue aux agents extérieurs

Les aciers sont corrodables et perdent de l'épaisseur de façon accélérée dans le temps.

Les composites absorbent de l'eau plus ou moins rapidement, ce qui réduit leurs performances mais la perte de performance a plutôt tendance à se stabiliser dans le temps. Cependant, si la prise d'eau est accompagnée de gel avec un grand nombre de cycles, la détérioration peut avoir de graves conséquences.

Certains composites sont sensibles aux rayons ultra violets alors que les métaux y sont insensibles.

5) Tenue en fatigue

Le comportement des matériaux en fatigue se traduit par un affaiblissement de la charge de rupture quand le nombre de cycles augmente.

Les métaux comme les composites subissent cet affaiblissement mais de façon très différente.

Les performances en fatigue des métaux sont considérablement réduites par la soudure qui crée des contraintes thermiques internes et des défauts géométriques à chaque cordon. Ces performances sont encore abaissées par la corrosion.

Enfin, l'homogénéité des métaux facilite la propagation des fissures.

Comme les métaux, les composites subissent un affaiblissement de la résistance de rupture quand le nombre de cycles augmente. Cependant, à l'inverse des métaux, il n'existe pas de soudure pour affaiblir la résistance à la fatigue d'un bordé. De même, pour la fatigue, l'influence de l'immersion est nettement plus faible que celle de la corrosion pour les métaux.

L'hétérogénéité des composites est également un avantage pour ralentir et limiter la propagation des fissures.

Dans les composites, l'énergie absorbée pour propager une fissure est généralement importante à cause de la décohésion de la liaison fibre matrice qui est très consommatrice d'énergie.

6) Mise en oeuvre

La mise en oeuvre des métaux, acier ou alliage léger, est actuellement très bien maîtrisée et elle dépend peu du facteur humain car une très grande partie des opérations est presque totalement automatisée.

Dans la fabrication des composites par procédé de contact, l'habileté de l'ouvrier a beaucoup plus d'importance. Il en résulte une dispersion des performances du composite dont il est nécessaire de tenir compte pour les calculs d'échantillonnage (variation d'épaisseurs des couches de MAT projeté, variation de la teneur en résine d'imprégnation, variation de teneur en vide suivant l'ébullage, variation de l'épaisseur totale, variation des vitesses de polymérisation, etc...)

La disposition du raidissage est également différente dans le composite et dans les constructions métalliques soudées.

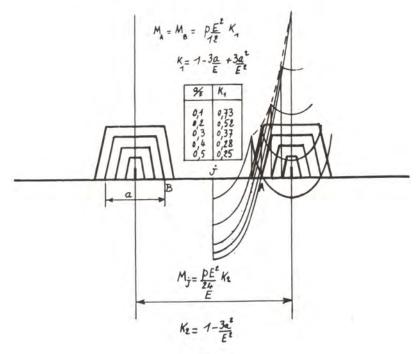


Figure 3

Influence de la largeur du profilé à base large sur la répartition des contraintes dans le bordé

Les composites sont, pour la plupart, raidis par des profils Ω ce qui modifie la répartition des contraintes de flexion dans le bordé comme le montre la figure 3. La réduction du moment aux appuis A et B est fonction du rapport a/E entre la base a de l' Ω et l'espacement E des Ω . Le moment aux appuis peut être réduit de 75 % dans le cas extrème où la base a des Ω est égale à la moitié de l'espacement. On peut calculer également le moment au milieu J du bordé.

La réduction de moment créée par la présence des Ω montre les précautions à prendre pour l'interprétation de mesures de contraintes dans le bordé quand on veut en déduire la pression.

Il faudra d'ailleurs comme pour un bordé en métal, tenir compte du rapport de maille E/l entre l'écartement E des Ω et leur portée l.

La présence des augmentations locales d'épaisseurs dues aux corniérisations cause une réduction de contrainte du côté extérieur à $1\sp 1\Omega$. Finalement, le seul endroit accessible à la mesure est le milieu J de la maille.

L'ensemble des considérations ci-dessus n'a qu'un seul but, éclairer les différences et les similitudes entre les composites et les métaux pour faciliter le choix du coefficient de sécurité en fonction du type de chargement.

En ce qui concerne les chargements, ils sont indépendants du type de matériau et les connaissances des chargements acquises sur les navires métalliques sont directement utilisables sur les navires en composites.

PERFORMANCES THEORIQUES DES COMPOSITES ET ESSAIS D'EPROUVETTES EN LABORATOIRES

La détermination des performances théoriques des composites utilisés pour la fabrication des coques de navires a fait l'objet de nombreuses publications. Le Règlement du Bureau Veritas explicite une méthode qui permet d'obtenir les caractéristiques correspondant à deux directions principales. Cette méthode ne présente aucune difficulté théorique mais, pratiquement, son emploi est très laborieux et long dès que le nombre de couches dépasse quelques unités.

La programmation du calcul est indispensable et c'est pourquoi le Bureau Veritas a réalisé les programmes PLACAL BORDE et PLACAL RAIDISSEUR de la chaîne CLASS et les met à la disposition de ses clients.

Ces programmes ont été décrits au précédent colloque organisé par IFREMER sur les composites en 1984.

							ween		IMINARY	==		-		10.0		==	
			NI/	UTF	E-E	1		1	WOVEN	i		IE	LASTICIT	Y	MODULUS	1	-
	I.T.	tali	AYER			ESI	MASS	13	BALANCE	1	PS1	1	Dir.1	1	Dir.2	1	THE.
				.==		-==		-		=:	******			==	********		Prefer
		01	MAT	1	G	1	300	1		1	0.2888	1	785.3	1	785.3	1.	.7310
1	1		MAT		6	i	300	1		1	0.2888	1	785.3	1	785.3	1	. 7310
2	1	01		1	G	- 1	300	1		ï	0.2888	1	785.3	1	785.3	1	. 7310
3		01	MAT	- 1	E	- 1	550		E	i	5500		1776.0	1	1671.1	1	.6185
4		01	K.F.	1	6		200				1,2863	1	785.3	1	7E5. 7	i	.7510
5	1	6	W		2		22		.5101		0.5500	i	1759.1	-1	1666.2	1	.885
6	1	01	W.F.	1	C	- 1	E		516.	4	0.2888		785.3	û	785.3		.731
7	1	01	MAT	1	6	1	200		202077	3			1755.1	1	1688.2		.885
В	1	01	W.F.	- 1	E	1	816		0.5161	1	0.5500			1	785.3		.487
9	1	01	MAT	1	G	- 4	200	-		1	0.2888		785.0	. !			.885
	1	0.1	W.R.		G	1	830		0.5161	Ţ	0.5500		1759.1	,	1688.2		
	1	01	MAT	1	6	- 1	200	-		-1	G. 2888	1	785.3	- 1	785.3		.731
-		01	W.R.		6	- 1	B70	1	0.5161	1	0.5500	1	1759.1	1	1688.2	1	.885

Figure 4a

Programme PLACAL exemple de présentation de l'empilement d'un bordé

GEN	EFAL	RESULTS			
*********************				***********	**********
FLATING :	BOT	MOT	ZONE	1	
	1	Units	- 1	Direction 1	Direction 2
	====	********		***********	***********
Thickness	1	mm	- 1	9.0323	9.0323
	1		1		
iotal mass of reinforcements	- 1	hg/ml	1	5.900	5.900
	1		- 1		
Total mass of laminate	-1	Fg/m2	- 1	14.016	14.016
	1		1	1,000,000,000	
ntent of reinforcement	1		1	0,4209	0.4209
	1		1		
	1		- 1		
Equivalent elasticity moduli	1		1		
	1		1	0.000	March 2012
- Tension	1	daN/mm2	- 1	1234.8	1199.9
	4	1.70.00	-1	13300000000	336212
- Bending	1	daN/mm2	,	1155.5	1107.5
	- 1		- 1	1 - A - A - A - A	1.12.1
Distance N. amis/Layer No 1	1	mm	1	4.9500	4.9760
			- 1		4.0955
Distance N. ams/Later 1: 12		r -	1	4.0797	4.0955
	- 15		1		
Rigidity	1	daN. mml	- 2	69.58939E+03	68.00741E+0
	1	40.4	- 1		229.6
Rending Moment / Layer No 1	1	daN.mm	- 4	234.2	227.6
		4-64	- 1	284.3	276.8
Linding Moment / Layer No 12	1	daN. n.n	- 1	.04.	270.6
	1	4.41	- 1	8.75	8.76
Shear force	1	deli	- 1	6.75	0.70

Figure 4b

Programme PLACAL exemple de résultats du calcul de l'empilement du bordé de la figure 4a

Rappelons leurs possibilités (figures 4a et 4b).

Ils peuvent traiter tous les types de composants entrant dans la constitution d'un stratifié.

- Résines : polyester ou époxy, introduites par leur module d'élasticité, leur densité et leur coefficient de Poisson
- Fibres : verre, KEVLAR, Carbone, introduites également par leur module d'élasticité, leur densité et leur coefficient de Poisson
- Types de renforcements : MAT, TISSUS ROVING, UNIDIRECTIONNELS introduits par leur poids au ${\rm m}^2$, leur coefficient d'équilibrage (tissus), leur teneur en poids de verre et leur angle d'orientation
- Types d'âmes : BALSA, feutre, mousses, nid d'abeille, contre-plaqué, etc.

Les résultats sont donnés suivant les deux directions de référence perpendiculaires.

Ces programmes sont indispensables au stade du projet pour prédire les performances des empilements mais, encore plus, pour optimiser le nombre de couches, leur disposition et constater l'influence des variations dans les teneurs en résine et de l'épaisseur totale du composite.

ESSAIS

Les prédictions théoriques des performances d'un empilement doivent obligatoirement être confirmées par des essais sur éprouvettes en laboratoire, avec vérification des résistances à la rupture en traction et en flexion et des densités et poids total de verre au m2 par perte au feu.

En effet, de nombreux facteurs interviennent dans les performances finales tels que :

- qualité de la résine, notamment son allongement à la rupture
- agents d'accrochage entre fibres et matrice
- tissage : SERGE, SATIN ou UNIDIRECTIONNEL déformant plus ou moins les fibres
- régularité de l'imprégnation, c'est-à-dire précision avec laquelle est obtenue la teneur en résine prévue au projet et donc l'épaisseur totale
- absence de déformation des fibres pendant la pose surtout pour les UNIDIRECTIONNELS
- qualité de l'ébullage
- concentration des catalyseurs et accélérateurs
- conditions d'environnement et respect des cadences
- etc...

A ce jour, le Bureau Veritas dispose des résultats d'essai de rupture de 5 000 éprouvettes qui constituent une banque de données en cours d'exploitation.

On constate que les comportements en flexion sont assez variables suivant l'empilement.

Les courbes de rupture en flexion peuvent avoir, par exemple, les particularités suivantes :

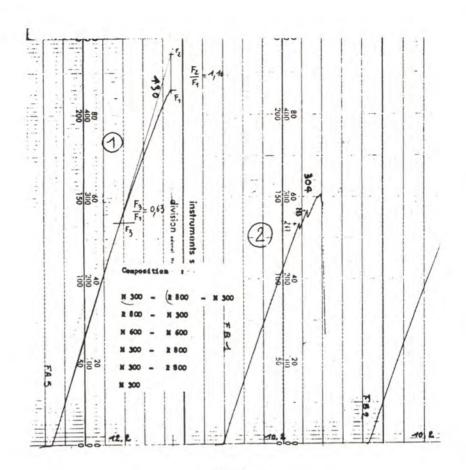


Figure 5 essai de flexion

a) Elles peuvent avoir un domaine linéaire assez étendu comme sur la courbe 1 (figure 5) où l'apparition de la non linéarité se situe à 63 % de la charge de rupture. L'écart entre l'extrapolation de la droite de linéarité ${\bf F}_2$ et le point ${\bf F}_1$ de rupture est ici ${\bf F}_2/{\bf F}_1$ = 1,10 (10 %).

Ce rapport est habituellement de l'ordre de 1,18 (18 %).

b) Sur la courbe 2 (figure 5), qui provient du même empilement, mais dans la direction perpendiculaire, la rupture est précédée de deux dents de scie de faible hauteur, ceci correspond à la rupture des deux MATS de surface.

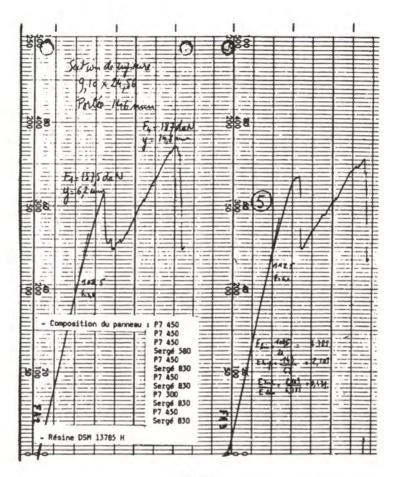
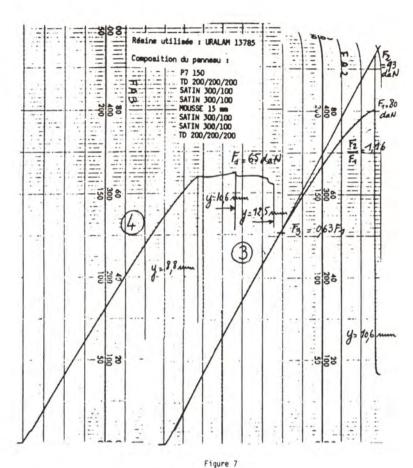


Figure 6
Essai de rupture en flexion d'un composite ayant
3 couches de MAT en surface

c) Sur la courbe 5 (figure 6), le même phénomène se produit mais avec une chute beaucoup plus importante due à la rupture simultanée des 3 MATS de surface. La prédiction correcte du moment de rupture doit être faite en considérant le stratifié sans les MATS externes et en tenant compte d'un allongement à la rupture plus grand dû aux tissu sergé.

Ces exemples mettent en évidence que les MATS externes affaiblissent les composites et qu'il vaut mieux les éviter si possible dans la mesure où ils ne sont pas indispensables pour d'autres raisons.



Essai de rupture en flexion d'un composite sandwich ayant une âme en mousse

- d) Sur la courbe 3 (figure 7), la non linéarité à la rupture correspond à un rapport ${\rm F_2/F_1}$ = 1,16 (16 %). La limite de linéarité se produit à ${\rm F_3}$ environ 63 % de la charge de rupture ${\rm F_1}$.
- e) La courbe 4 (figure 7) est celle d'une éprouvette du même empilement sandwich. Elle a un comportement très différent de la précédente dû à un écrasement local de l'âme. Ceci met en évidence la nécessité d'une résistance minimale à la compression des matériaux d'âme.

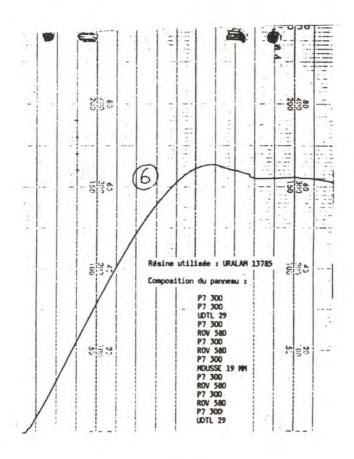
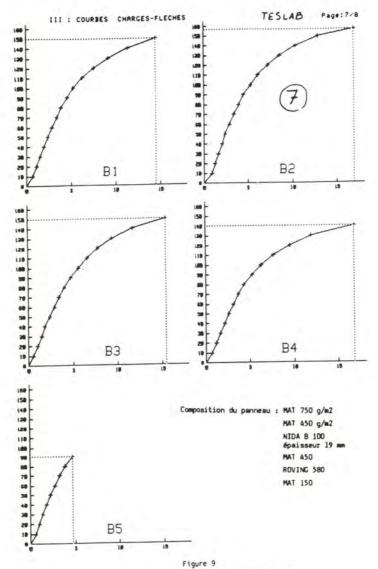


Figure 8

Essai de rupture en flexion d'un composite sandwich
qui s'effondre par écrasement d'âme

f) La forme de la courbe 6 (figure 8) lui est comparable ; après que le maximum de la force ait été atteint, la courbe présente un palier, ce qui montre que le phénomène de ruine est, dans ce cas, beaucoup plus progressif et consommateur d'énergie. Il s'agit ici également d'un panneau sandwich qui se ruine par écrasement d'âme en mousse.



Exemple des résultats graphiques du programme TESLAB

g) La courbe 7 (figure 9) est également celle d'un panneau sandwich dont l'âme est en nid d'abeille. L'écrasement du matériau d'âme se traduit par une absence complète de partie linéaire de la courbe flèche - force.

Longueur de la portee utilisee = 526mm

	Dimensions sections de rupture		Rup	ture	Moment de rupture	Contrainte
		epaisseur	fleche (mm)	(dah)	par mm (daHmm/mm)	(daN/mm2)
A1	50.80	26.61	34.86	128.0	331.339	2.81
A2	50.78	26.65	35.62	123.8	319.824	2.70
АЗ	51.30	26.86	24.82	140.8	358.869	2.98
R4	51.00	26.85	27.77	105.0	278.735	2.25
A5	58.18	26.77	28.65	97.0	254.601	2.13

Longueur de la portee utilisee = 526mm

	Dimensions sections de rupture		Rup	ture	Moment de rupture	Contrainte
	1 argeur	epaisseur	fleche (mm)	(daH)	(daNma/mm)	(daH/mm2)
31	50.88	26.75	33.11	128.0	331.339	2.78
32	50.50	27.29	34.77	128.0	333.307	2.69
33	51.48	27.19	32.37	126.0	322.354	2.62
34	50.78	26.99	37.10	130.0	357.929	2.95
35	51.00	26.55	33.16	130.0	335.196	2.85

Figure 10

Résultats numériques du programme TESLAB moyenne X, écart quadrique S, rapport S/100 x = V

- h) Pour chaque série d'éprouvettes, l'étude des dispersions est faite par le programme TESLAB qui donne la moyenne, l'écart-type et le rapport de l'écart-type à la moyenne (figure 10).
- i) L'expérience des essais montre que la symétrie théorique des stratifiés par rapport à leur fibre moyenne n'implique pas systématiquement une symétrie des performances avec la force appliquée du côté gel coat ou du côté opposé.

Il est recommandé, dans la plupart des cas, de faire les deux essais. Nous avons, par exemple, constaté un rapport extrème de 1 à 3 sur un panneau sandwich.

LES PROGRAMMES GENERAUX DE CALCUL

Il existe maintenant un certain nombre de programmes généraux de calculs en éléments finis. La possibilité de traiter des éléments anisotropes quelconques a été développée dans quelques-uns.

Le Bureau Veritas dispose de deux programmes ayant cette possibilité, les programmes ABAQUS et GIFTS.

Pour être efficace, un programme qui traite des éléments anisotropes doit comporter, en outre, un préprocessor qui calcule les coefficients d'un élément composite à partir d'une description couche par couche.

Il doit également être muni d'un postprocessor analysant les dépassements de contraintes par un critère approprié couche par couche.

L'utilisation de ces programmes est donc très laborieuse. Elle peut concerner deux types de problèmes complètement différents.

a) Des analyses théoriques des plaques rectangulaires locales, limitées par deux lisses et deux varangues pour comparer une plaque isotrope et un composite anisotrope.

Dans le cas très courant où la direction de la chaîne des tissus est parallèle aux raidisseurs, les résultats de nos calculs par ABAQUS ont montré que la différence entre une plaque isotrope et un stratifié anisotrope était négligeable.

b) L'autre utilisation possible concerne l'étude d'un navire entier en éléments finis anisotropes. A notre avis, cette étude n'a d'intérêt que pour un grand navire pour que les contraintes d'ensemble soient échantillonnantes. En effet, sur un petit navire, ces dernières sont faibles devant les contraintes de flexion locales des bordés qui sont déterminantes pour l'échantillonnage.

Ces programmes ont plus d'intérêt pour les structures de révolution fabriquées par enroulement filamentaire, comme les engins sous-marins travaillant à grande profondeur. Pour être efficace, le programme doit également vérifier la tenue au flambement sous pression extérieure.

Une dernière utilité éventuelle de ces programmes est l'interprétation de certains résultats d'essais extensométriques sur composites mais la complication introduite par l'anisotropie n'est justifiée que si le reste des données est connu avec la même précision. Cette remarque s'applique surtout aux chargements de pression dynamique qui sont rarement connus avec précision et qui, au contraire, sont habituellement définis statistiquement.

L'EXPERIENCE DE L'APPROBATION DES PLANS

En dehors de la détermination des échantillonnages de base et des calculs d'échantillonnage minimum en faisant varier l'écartement des raidisseurs, le Bureau Veritas met à la disposition des constructeurs son expérience concernant les détails de structures pour lesquels la continuité des éléments et la façon d'éviter des points durs sont essentiels.

L'énumération de ces détails est illimitée. On peut citer, entre autres

- les corniérisations
- les attaches de cadènes
- les boulonnages de quille
- les attaches de chaises d'arbres
- les passages de tube d'étambot
- les intersections de carlingues et de varangues
- les intersections de lisses et de membrures renforcées
- les supports de mats
- les attaches de jambettes
- les liaisons des fibres de catamarans avec les flotteurs
- etc...

Pour tous ces problèmes, l'expérience du Bureau Veritas permet d'éviter des avaries coûteuses aux constructeurs.

L'EXPERIENCE DES NAVIRES EN SERVICE

Les unités classées au Registre du Bureau Veritas doivent subir des visites à des intervalles réguliers tous les 2 ans, et tous les 4 ans.

A cette occasion, le Bureau Veritas peut constater le comportement des stratifiés en général.

Dans presque tous les cas, l'endurance des composites est excellente.

La majeure partie des défauts de coque à réparer concerne des accidents d'échouage ou d'abordage qui ne mettent pas en cause l'échantillonnage.

Les défauts constatés dans quelques cas concernent une résistance à l'abrasion insuffisante de certains gel coats dans des zones d'échouage.

Si la construction initiale est bonne, la longévité est excellente. La qualité de l'ébullage est déterminante. Un mauvais ébullage se traduit, à terme, par des délaminages inter-couches et des fibres qui apparaissent nues en surface. Ces défauts se traduisent par des performances d'éprouvettes très basses.

Dans certains cas, la technique de construction sans moule a été à l'origine de fissures aux raccordements interplaques.

Les attaches des cloisons transversales sur les bordés ont une excellente tenue à condition que la continuité de matière soit réalisée entre les deux cornérisations à l'aide d'un bourrage convenablement lissé. Il faut, en outre, une préparation de dégraissage convenable du contreplaqué de cloison pour être sûr d'une bonne résistance au cisaillement de l'interface cornière - cloison. Certains contreplaqués sont dégraissés en cours de fabrication et n'ont pas besoin de cette préparation.

Il est intéressant de prévoir un gel coat intérieur dans les parties où il y a stagnation d'eau.

Les réparations de bordé, si elles sont faites avec soin, ont une tenue équivalente au bordé d'origine. Les conditions minimales consistent à réaliser des délardages à faible pente, à meuler soigneusement les interfaces, à ramollir la surface d'accrochage par un produit convenable et à faire toutes ces opérations en atmosphère protégée de l'humidité et des poussières.

Les gel-coats d'origine tiennent plus de dix ans dans la majorité des cas.

Les réparations importantes sont très souvent faites dans le chantier constructeur.

Les sandwichs à âme en balsa massif, dans les premières constructions, étaient susceptibles de destruction par putréfaction. Nous avons eu l'occasion de constater ce phénomène de disparition presque complète de l'âme en certains emplacements d'une coque. L'utilisation de balsa en petits cubes de bois debout a l'avantage de créer des cloisonnements de résine qui sont des obstacles à la progression de l'humidité et de la putréfaction et qui créent un léger réseau d'âme complémentaire. Le traitement d'imputrescibilité des bois est, cependant, à prévoir systématiquement.

Les sandwichs à âme mousse sont imputrescibles. Il faut qu'ils aient une résistance à la compression minimale pour écarter le risque de flambement local des peaux surtout dans les pièces courbes.

Les réservoirs à liquide soumis à forte pression cassent quelquefois leurs corniérisations dans les zones d'intersection avec les raidisseurs. Une étude attentive de ces détails doit être faite au stade du projet et dans certains cas, il vaut mieux prévoir de terminer les raidisseurs en sifflet au pied de la cloison qui peut alors avoir une corniérisation simple.

Tous les détails de structure, tels que ceux qui ont été énumérés ci-avant, peuvent être à l'origine de suintements. En général, le système de bride et contrebride boulonnées est efficace à condition que les efforts perpendiculaires au bordé soient repris par des carlingues ou varangues (chaises d'arbres par exemple).

RECONNAISSANCE DU CHANTIER CONSTRUCTEUR ET APPROBATION DE TYPE PAR LE BUREAU VERITAS

INTRODUCTION

Les opérations décrites ci-avant sont normalement pratiquées dans le cadre de la classification des navires, unité par unité, qui repose sur trois principes essentiels :

- la vérification, par la Société de Classification, de la conformité du navire au Règlement de cette Société, incluant l'examen des plans et la surveillance de construction
- l'attribution par celle-ci de symboles de classification, marques et mentions
- le suivi du navire en service par des visites annuelles, périodiques ou spéciales.

Traditionnellement, cette mission de classification ne concerne que les unités d'un certain tonnage, et n'est pas toujours adaptée aux petites unités industrielles et encore moins à celles destinées au grand public (bateaux de plaisance).

Or, il se trouve que de plus en plus souvent, l'exportation de bateaux de petite ou de moyenne taille, notamment ceux dont la coque est constituée de plastique renforcé au verre textile (P.R.V.T.), passe, pour le constructeur, par la nécessité de pouvoir présenter à son client potentiel un CERTIFICAT INDIVIDUEL D'INSPECTION émis par une Société de contrôle indépendante.

La question que pose le constructeur à la Société de Classification est la suivante : "Pouvez-vous délivrer un tel Certificat Individuel d'Inspection sans pour autant nécessairement appliquer les principes 2 et 3 précités sur lesquels repose la classification, et ceci pour un coût qui soit compatible avec le prix de vente de l'unité ?"

Il apparaît qu'un compromis tout à fait acceptable entre les critères techniques imposés par la surveillance de construction et le coût de cette surveillance est réalisable lorsque celle-ci est effectuée selon un plan bien déterminé reposant sur la RECONNAISSANCE du chantier constructeur par le BUREAU VERITAS.

Nous allons exposer succinctement comment se déroule ce plan de surveillance et en quoi consiste la RECONNAISSANCE préalable du chantier par le BUREAU VERITAS.

I. LA RECONNAISSANCE PAR LE BUREAU VERITAS D'UN CHANTIER CONSTRUCTEUR DE COQUES EN P.R.V.T.

1) Définition

La Reconnaissance par le BUREAU VERITAS d'un Etablissement Industriel - ici le chantier constructeur - est la reconnaissance de l'APTITUDE de cette entreprise - pour un chantier ou un atelier donné - à réaliser des produits définis.

Elle est prononcée après l'évaluation CONJOINTE des deux éléments du couple Produit/Organisation et moyens de l'entreprise.

2) Référentiels utilisés

2.1 Référentiels généraux

Le Référentiel général appliqué par le BUREAU VERITAS aux fins de Reconnaître un établissement industriel est sa Note d'Information NI 001 "La Reconnaissance des Etablissements Industriels".

Celui-ci est éventuellement complété par des référentiels spécifiques du domaine industriel concerné par l'entreprise. Dans le domaine naval, deux notes d'information sont disponibles :

NI 195 DNC DT3 MI "Approbation du Système Qualité des chantiers navals pour la construction des navires en acier"

NI 204 DTO "Approbation du système Qualité de chantiers pour la construction de structures à usage offshore".

2.2 Référentiels complémentaires relatifs aux produits

L'évaluation de l'élément Produit du couple Produit/Organisation et moyens de l'entreprise s'effectue, en général, selon le règlement applicable publié par la Société. Dans le cas des coques de navires en P.R.V.T., il s'agit du Réglement pour la Construction et la Classification des Navires en Polyester au Verre Textile, édition 1979, révisée en 1980.

2.3 Référentiels complémentaires relatifs à l'organisation et aux moyens de l'entreprise

L'évaluation de l'organisation et des moyens de l'entreprise peut être conduite conformément aux normes nationales ou internationales relatives aux systèmes de Qualité, et notamment aux recommandations ISO série 9000 (Normes 9001 à 9003).

A noter, cependant, que la Reconnaissance n'implique pas la stricte conformité à de telles normes.

3) Déroulement de la Reconnaissance

Généralement, la Reconnaissance comporte trois phases :

- la phase d'approbation de type des produits à fabriquer ici les coques de bateaux en P.R.V.T.
- la phase de pré-évaluation ("pre-assessment") du système Qualité de l'entreprise ou de son équivalent
- la phase proprement dite d'évaluation du système Qualité (ou de son équivalent).

Commentons brièvement ces trois phases :

3.1 Phase 1 - Approbation de type de la coque

Les plans de structure de chaque nouveau type de coque sont vérifiés par la Société conformément aux prescriptions du Règlement Navires en P.R.V.T.

Le cahier des charges des principaux matériaux de base (Résines, additifs, fibres de renforcement) est examiné, de même que celui des procédés de mise en oeuvre.

Les caractéristiques mécaniques du bordé de coque sont vérifiées en laboratoire sur au moins un panneau représentatif de ce bordé.

Certificat d'Approbation de Type

Le présent Certificat per le BUREAU VERITAS et ju		nception du produit/matériel désign	né ci-après a été examinée
at qu'il a subi les essais de type à	la satisfaction de l'E	xpert de la Société.	
Fabricant :			
Lieu de fabrication :			
Désignation du type :			
Nom commercial et/ou descripti	on :		
sous réserve des conditions parti	culières suivantes :		
L'approbation impli présence de l'Expert du BURE ments industriels en accord avec	AU VERITAS ou se	natériel fasse l'objet des contrôles ion les modalités prévues per la Re nt le ces.	prévus par la Société, en connaissance d'Établissa-
L'approbation est va mais pourra perdre sa validité :	elable jusqu'au		
- en cas de modifications appointé portées à la connaissance		tériel ou à ses conditions d'utiliset	ion et qui n'auraient pas
- en cas d'enomalies en service.			
		3.6	19
		Pour le Bureau Verites	
		A Samuel Marie & British VE	

A l'issue satisfaisante de ces examens et de ces essais, l'Approbation de Type est prononcée et formalisée par la délivrance d'un Certificat d'Approbation de Type modèle Ad ME 532, valable quatre ans (figure 11).

BV Mod. Ad.ME 536

Figure 11

Certificat d'approbation de type

3.2 Phase 2 - Pré-évaluation du chantier

La pré-évaluation du chantier a pour but de s'assurer que les documents disponibles en matière d'organisation et de moyens et leur application effective sur le chantier permettent d'entamer la phase d'évaluation proprement dite du chantier ou, au contraire, qu'il convient d'en différer la date pour permettre au chantier de procéder à des actions correctives préalables.

C'est normalement à cette occasion que sont remis pour examen au BUREAU VERITAS le Manuel Qualité (ou son équivalent) et les procédures essentielles annexes.

3.3 Phase 3 - Evaluation proprement dite du système Qualité (ou de son équivalent)

L'évaluation du système Qualité ou de son équivalent est généralement conduite par trois représentants du BUREAU VERITAS : un maître Auditeur ayant une expérience confirmée en matière d'évaluation de systèmes Qualité, un spécialiste de coques en P.R.V.T. et l'Expert qui sera chargé de mettre en oeuvre la surveillance ultérieure de construction.

L'audit dure généralement deux jours, la première matinée étant réservée à une table ronde en présence des principaux responsables du chantier et pendant laquelle seront posées les questions préalablement préparées par le Maître Auditeur.

(A noter que ces questions ont été préparées après examen du Manuel Qualité et, éventuellement, des procédures, et qu'elles ont été remises au chantier préalablement à l'audit).

Le reste de l'audit consiste à s'assurer sur site de l'application effective du système Qualité et des procédures annexes.

A l'issue de cet audit, les actions correctives à entreprendre sont signifiées au chantier, et d'autres commentaires sont éventuellement formulés ; le programme d'actions futures peut être utilement ébauché.

L'audit fait l'objet d'un rapport écrit adressé au chantier sous huitaine. Les actions correctives prescrites éventuellement au préalable à la Reconnaissance sont signifiées.



Figure 12

Certificat de reconnaissance d'établissement industriel

Une fois les actions correctives prescrites, effectuées, la Reconnaissance du chantier est prononcée. Elle donne lieu à la délivrance d'un Certificat probatoire valable un an et à un diplôme (fig.12).

Le plus souvent, la Reconnaissance du chantier est prolongée par la Reconnaissance des fabricants des principaux produits de base.

Après l'année de probation, la Reconnaissance sera reconduite pour quatre ans sous réserve d'audits périodiques destinés à vérifier qu'il n'y a pas déviation dans le temps du système Qualité ou de son application effective.

2) But du Plan de surveillance

C'est dans ce cadre que va s'effectuer la surveillance du BUREAU VERITAS aux fins de satisfaire à l'un ou l'autre des deux objectifs suivants :



CERTIFICATE No.

INSPECTION CERTIFICATE FOR CONSTRUCTION OF G.R.P. HULL

based on the Recognition of Industrial Plants, Cert	ificate number
granted to	
	,.,
Product : G.R.P. Hull for Pleasure boet	
Туре:	Serial Number
povered by the Certificate of Type Approval numb Main characteristics:	d
Overall length	Hull length
Maximum beam	Maximum draught
Depth amidship including solid keel	
its construction within the Recognition of Indus NI 001 Jen 86.	eference has been surveyed by Bureau Veritas during trial Plants Scheme as per Society's Guidance Note
This survey covers in particular :	
- the general conditions of building plant and wor	rkmen ship
- the use of materials and process complying with	the Bureau Veritas Rules
- the storage of raw materials in good conditions	
- the mounting of equipment adapted to the reint	forced plastic working
- the performance of the works by skilled staff for	r this kind of work.
YACHT/P.R.V.T.	proved by Bureau Veritas for the service notation :
examined by Bureau Veritas.	ipment, spars and standing rigging have not been
Within the scope of type approval of the produ Bureau Veritas Rules and are recorded in the Test	ct, Laboratory Tests have been carried out as per Report No
At	, on 19

For Bureau Veritas

Mod. Ad.E 1630

This Certificate is delivered within the scope of the General Conditions of the Marine Branch

Figure 13 Certificat de surveillance de coque

a) délivrer à chaque coque construite un Certificat individuel d'inspection selon modèle Ad E 1530 (fig.13) et apposer sur chaque unité le label coque de type certifié construite sous la surveillance du BUREAU VERITAS (fig.14).



Figure 14

Label apposé sur chaque coque construite sous la surveillance du BUREAU VERITAS

b) autoriser le chantier à apposer sur chaque unité le label "Coque construite dans un Etablissement reconnu par le BUREAU VERITAS".

Généralement, la prestation (a) est réservée aux unités de taille moyenne alors que la prestation (b) concerne plus spécialement les petites unités de grande série généralement destinées au grand public.

Dans ce qui suit, il ne sera fait mention que de la première de ces deux prestations, la seconde étant une conséquence directe de la Reconnaissance, ne nécessitant pas de commentaires particuliers.

Le Plan de surveillance aura donc pour but de pouvoir délivrer à chaque unité construite un Certificat individuel d'inspection sans pour autant que la surveillance <u>directe</u> de l'Expert du BUREAU VERITAS ait porté sur une coque plutôt que sur une autre.

Ce point est fondamental ; il convient de le développer.

3) Déroulement de la surveillance

Chaque série de coques donnera lieu à l'élaboration par le chantier d'un Plan Qualité spécifique de cette série, définissant dans le cadre du système Qualité, les documents spécifiques (plans d'échantillonnage et plans de réalisation), les procédés et le plan de contrôle propres à cette série.

Les essais mécaniques sur panneaux, déjà effectués au laboratoire lors de l'approbation de type, seront à nouveau effectués sur les deux premières constructions de la série et à intervalle régulier en fonction de la cadence de fabrication.

L'Expert du BUREAU VERITAS procédera à des visites régulières programmées, complétées, le cas échéant, par des interventions non programmées selon les circonstances. Ses centres d'intérêt évolueront au fur et à mesure de l'efficacité de sa surveillance et de celle de la mise en place par le chantier du système Qualité, mais concerneront deux objectifs essentiels :

- 1) Collaborer à l'efficacité toujours accrue du système Qualité en examinant avec méthode et en profondeur tous les rouages de celui-ci (en passant en revue successivement tous les postes de construction montage coque, montage pont, montage etc.. et tous les services Achats, Bureau d'études, stockage, etc...)
- 2) S'assurer de la "Traçabilité" du système Qualité, c'est-à-dire de la possibilité de retrouver, pour une coque donnée, tous les documents et renseignements la caractérisant dans le cadre du système Qualité.

Ces deux points sont essentiels car ce sont les deux propriétés qui, conjointes, permettent à l'Expert, par interpolation, de délivrer à chaque unité construite selon un plan Qualité, un Certificat individuel d'inspection sans pour autant que ses missions d'inspection effectuées dans le cadre du Plan de Surveillance aient porté sur une coque particulière plutôt que sur une autre. Pour résumer :

Le Plan Qualité sous surveillance de l'Expert Fidélité d'une coque à l'autre + Traçabilité propre à chaque coque

Délivrance par l'Expert du Certificat individuel d'inspection

III) REFERENCES

Le schéma indiqué ci-avant - Reconnaissance suivie d'un Plan de Surveillance - est applicable à tout domaine sans exclusion.

Le BUREAU VERITAS publie chaque année la liste des Etablissements Reconnus. Cette liste internationale intéresse des secteurs industriels aussi variés que la construction de moteurs Diesel, moteurs électriques, réparation d'aéronefs, fabrication de peintures, chantiers navals, etc...

Dans le domaine plus spécifique des chantiers constructeurs de coques de bateaux en P.R.V.T., la référence la plus significative à signaler est la Reconnaissance des chantiers BENETEAU, leader mondial de la construction des bateaux à voile, prononcée fin 1986 et effective début 1987, accompagnée d'un Plan de Surveillance qui couvre toutes les constructions.

CALCUL D'EMPILEMENTS OPTIMAUX POUR DES STRUCTURES MULTICOUCHES COMPOSITES / NID D'ABEILLE

Marc HITTINGER - Gérard BERTRAND - Pascal MANIGOT CISI INGENIERIE B.P. 24 C.E.N. de SACLAY 91190 GIF sur YYETTE

Dans notre présentation, nous nous proposons de décrire comment nous effectuons le calcul des bobinages optimaux pour des structures en matériaux composites soumises à des cas de charges aéro- et hydrodynamiques.

Dans une première partie, nous décrirons les lois de comportement choisies pour la simulation de ces matériaux: matrice d'élasticité et critères de rupture pour le composite et le nid d'abeille. Nous préciserons les difficultés pour la description des paramètres géométriques (description des repères d'orthotropie et d'anisotropie) et comment celles-ci sont résolues dans les codes du système CASTEM (INCA, BILBO, CASTEM 2000).

Puis nous présenterons les différents types d'éléments finis développés dans ces codes: formulation coque multicouche et massif, géométrie plane ou axisymmètrique, tridimensionnelle, inconnues aux noeuds, réponse aux efforts de membrane et de flexion, domaine de validité. Nous présenterons des exemples simples sur des cas tests pour des structures composites à fibres longues et pour des matériaux sandwichs (cylindres en pression, poutres en flexion ...).

Nous concluerons notre présentation par des exemples de structures calculées pour le compte de certains de nos clients comprenant un grand nombre de couches: fonds hémisphèriques en pression, cylindre composite + aluminium...

1 INTRODUCTION

Les matériaux composites, du fait de leur légèreté et de propriétés exceptionnelles des fibres (verre, kevlar, graphite) possèdent de très bons rapports résistance / poids et rigidité / poids dans la direction des fibres par rapport à des matériaux classiques. Les propriétés de la couche dans les directions transverses sont en général moins bonnes et dans le cas de chargements non uni directionnels, on est amené à empiler un certain nombre de couches d'orientation differente de manière à retrouver une bonne rigidité et une bonne résistance dans les diverses directions de chargement pour l'ensemble de la structure.

Ces structures sont donc des coques généralement assez minces qui devraient principalement travailler en membrane. Dans le cas où la flexion devient importante, on utilise souvent des matériaux sandwichs où les fibres résistantes sont repoussées rélativement loin de la surface moyenne, l'intérieur est alors rempli d'un materiau léger par exemple du nid d'abeille. Ces matériaux généralement possèdent un coefficient de vide important et leur résistance mécanique est faible (sauf dans la direction normale à la surface moyenne).

Les couches avec fibres ont, en général, un comportement orthotrope transverse, la direction priviligiée étant celle de la fibre. Pour le nid d'abeille, au contraîre la direction priviligiée est la direction normale à la surface, la forme des cellules (symétries) entraîne ou non la symétrie transverse, la résistance au cisaillement est en général très faible.

Pour les matériaux des couches à fibres, on peut utiliser un certain nombre de critères de rupture, mais le plus général est celuie de Tsai-Wu (1971) qui, du fait de sa forme très général, permet après un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (découplage des résistances en cisaillement, orthotropie transverse ...) d'englober d'autres critères.

Les composites sont utilisés principalement dans des domaines où le poids de la structure doit être minimum pour un certain niveau de charge (aéronautique, espace, automobile ...) c'est pourquoi, il est important d'orienter les fibres de façons à mobiliser le maximum de leur résistance pour un ou généralement plusieurs cas de charge.

Dans le cadre des avant projets, il est en général fait des calculs simples qui permettent de prédimensionner les pièces: calcul du nombre de couches et de leur orientation (Massard, 1984). Des études récentes s'appuyant sur des systèmes experts permettent non seulement d'obtenir ces paramètres, mais aussi de choisir le type de fibres et de résine et le procedé de fabrication:drapage, autoclave, projection ... (voir les travaux de Griffiths et Desbordes, 1987 et de l'Aérospatiale).

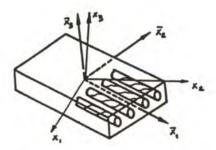
Le programme PENELOPE permet alors d'optimiser plus finement l'orientation des couches par la minimisation d'une fonction économique basée sur le critère de Tsai-Wu calculé en chaque noeud des éléments finis modélisant une structure en matériaux composites en modifiant les directions de bobinage des differentes couches. Un calcul semi explicite des derivées de la fonction économique permet de diminuer la quantité de calculs éléments finis à effectuer pour obtenir un minimum (Hittinger 1984, 1986).

2 COMPORTEMENT MECANIQUE DES COMPOSITES

2.1 Comportement élastique

Pour traiter des structures en matériaux composites, on suppose en général que le matériau à un comportement orthotrope transverse. Dans ce cas, le plan perpendiculaire à la direction de la fibre est isotrope et les deux directions principales sont indifférentes dans ce plan. En supposant que la direction de la fibre est la première direction (voir figure 1), la matrice d'élasticité (dite matrice de Hooke) peut s'exprimer de la façon suivante:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E1} & \frac{-\nu12}{E1} & 0. & 0. & 0. \\ \frac{-\nu12}{E1} & \frac{1}{E2} & \frac{-\nu32}{E2} & 0. & 0. & 0. \\ \frac{-\nu12}{E1} & \frac{-\nu23}{E2} & \frac{1}{E2} & 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & \frac{1}{G12} & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & \frac{1}{G23} & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & \frac{1}{G12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix}$$



1 - Description des axes d'orthotropie

Le matériau étant pris isotrope dans le plan transverse, on a alors:

$$\begin{bmatrix} E2 & = & E3 \\ \nu_{23} & = & \nu_{32} \\ \nu_{12} & = & \nu_{13} \\ \nu_{21} & = & \nu_{31} \\ G_{23} & = & \frac{E2}{2(1.-\nu_{23})} \end{bmatrix}$$

On se rappellera des relations suivantes entre les différents coefficients de Poisson et les modules d'Young:

$$\begin{bmatrix} \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \\ \frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3} \\ \frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3} \end{bmatrix}$$

La saisie de données concernant les directions d'orthotropie n'est pas en général simple: les variations d'angles par rapport au repère global étant lié au procédé de fabrication (bobinage, drapage) au glissement autorisé de la fibre ... Dans les codes du système CASTEM, plusieurs possibilités sont donc offertes correspondant à different cas de figures:

- -Bidimensionnel plan avec chargement dans le plan, on utilise ce que l'on pourrait appeler une orthotropie x, y, c'est à dire pour laquelle, en plus des coefficients de la matrice de Hooke, on donne l'angle de la direction de la fibre avec l'axe 0x, il s'agit en général de problèmes de contraintes planes. En déformations planes, les fibres sont généralement dans la direction 0z et l'angle peut être quelconque dans le ces de l'orthotropie transverse.
- -2D axisymétrique pur, les fibres sont alors enroulées circulairement (angle quelconque dans le plan) ou verticales (angle = 90°)
- -Géomètrie axisymétrique à enroulement avec un angle quelconque par rapport à l'axe d'enroulement, la solution doit alors être développée en séries de Fourier symétriques et antisymétriques couplées.
- -Tridimensionnel, l'orthotropie peut être à angles constants par rapport aux axes globaux (orthotropie xyz), le repèrage se fait alors avec deux vecteurs dans le programme BILBO: le vecteur directeur de la fibre et un vecteur quelconque du plan transverse.
- -Tridimensionnel à orthotropie hélicoidale, c'est à dire avec un angle constant par rapport à l'axe de bobinage, (pour des cylindres à base quelconque ou des volumes généraux).
- -Tridimensionnel coque, pour lesquels on pourra donner l'angle par rapport qu premier coté de l'élément fini utilisé.

D'autres types d'orthotropies peuvent être envisagés correspondant à des types de bobinage plus complexes. Il est toujours possible d'autre part de passer par un pré processeur qui permet de générer les données correspondantes aux angles par rapport au repère global.

2.2 Critère de rupture

Plusieurs critères de rupture peuvent être utilisés dans le cas de composites (contraintes ou deformations maximales, critères de Tsai-Hill, Tsai-Wu, Sandhu...).

Dans notre étude, nous avons utilisé le critère de Tsai-Wu. On suppose alors qu'il existe une surface convexe de rupture dans l'espace des contraintes:

$$F(\sigma) = Fij\sigma i \sigma j + Fi \sigma i$$
 (i,j=1,6)

Dans le programme, on pourra utiliser tous les coefficients. Du fait du cout et des difficultés à mesurer les paramètres, on fait en général, un certain nombre de simplifications de sorte que l'on utilise seulement:

- -les résistances à la traction (Xt) et à la compression (Xc) dans le sens de la fibre;
- -les résistances à la traction (Yt) et à la compression (Yc) dans le plan transverse;
- -la résistance au cisaillement (S)

Caci nous donne en fait seulement un critère de type Pagano avec:

$$F_{11} = \frac{1}{X_{t} X_{c}}$$

$$F_{1} = \frac{1}{X_{t}} - \frac{1}{X_{c}}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_{t} Y_{c}} = F_{33}$$

$$F_{2} = \frac{1}{Y_{t}} - \frac{1}{Y_{c}} = F_{3}$$

$$F_{44} = \frac{1}{S^{2}} = F_{66}$$

$$F_{4} = F_{6}$$

et des coefficients croisés semblables à ceux du critère de Tsai-Hill:

$$F_{12} = \frac{-1}{2 X_{t} X_{c}} = F_{13}$$

$$F_{23} = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{Y_{t} Y_{c}} - \frac{1}{X_{t} X_{c}} \right]$$

$$F_{55} = 2 \left[\frac{1}{Y_{t} Y_{c}} - F_{23} \right]$$

tous les autres coefficients étant nuls

Une meilleure approximation des coefficients peut être obtenue si l'on a les résultats des résistances pour des essais biaxiaux.

3 DESCRIPTION DES ELEMENTS

De nombreux éléments ont été développés pour simuler les composites dans le système CASTEM d'abord en 2D dans INCA, en 3D dans BILBO, pour les calculs statiques, dynamique ou de recherche de modes de vibration.

Il est possible en général d'utiliser les éléments standards (Q8, TRI6, COQUE, COEP et Q6 en 2D, CUBE et PRISME en 3D) avec une loi de comportement orthotrope ou anisotrope pour simuler des composites. Des éléments particuliers ont aussi été développés de manière tenir compte des propriétés des composites (épaisseur rélativement faible) en formulation massive ou coque. Nous décrivons ci-après seulement ces éléments particuliers:

Elément LC8

Il s'agit d'un élément composite pour les structures axisymétriques à fibres enroulées circulairement ou avec un angle quelconque.

Cet élément permet de faire des calculs à géométrie axisymétrique avec développement ou non en séries de Fourier (chargement non axisymétrique).

Avec son jumeau le LC8B, il permet de faire des calculs d'optimisation des directions des fibres dans le cadre du système PENELOPE (pré et post-processeur de INCA composite) par minimisation d'une fonction économique, elle-même fonction du critère de Tsai-Wu (Yon Mises généralisé).

Du fait du non-découplage des composantes symétriques et antisymétriques pour les harmoniques autre que la fondamentale dans le dévelopement en séries de Fourier, cet élément a 6 degrés de liberté par noeud (3 symétriques urs, u s et 3 antisymétriques ura, uza, u a).

Elément HE16

C'est un élément tridimensionnel massif, linéaire dans l'épaisseur et bi-quadratique sur sa surface (2 faces de Q8) qui peut être utilisé en isotrope, orthotrope "classique" et hélicoidele, anisotrope complet. Il a 16 noeuds à 3 degrés de liberté par noeud. Il utilise la même formule d'intégration à 27 points de Gauss que le cube à 20 noeuds de BILBO.

Elément HE24

C'est aussi un élément tridimensionnel massif, linéaire dans l'épaisseur et bi-cubique sur sa surface (2 faces à 12 noeuds serendipity d'ordre 3), qui peut ête utilisé en isotrope, orthotrope "classique" et hélicoidal, anisotrope. Il a 24 noeuds à 3 degrés de liberté par noeuds. Il utilise une formule d'intégration à 50 points de Gauss: 2 rangées dans l'épaisseur, et 5 points dans chacune des directions de la surface. Les contraintes sont aussi calculées dans le repère local d'orthotropie ou d'anisotropie.

Elément STR8

Il s'agit d'un élément de type coque mince à 8 noeuds stratifié pour lequel on peut définir plusieurs couches. Il utilise des fonctions de forme quadratiques.

Il est basé sur l'élément de Panda at Natarajan à 5 degrés de liberté par noeuds: u, v, w, , , soit 3 déplacements et 2 rotations.

Les hypothèses de bases sont les suivantes:

- -les couches sont liées de façon perfaite;
- -les déplacements sont l'inécires dans l'épaisseur;
- -la contrainte z normale à la surface est nulle.

L'orthotropie est soit définie par l'angle par rapport à la direction du premier coté, soit hélicoïdale par rapport à un axe du repère global.

Grace à l'utilisation importante de ces différents éléments par nos différents clients, nous avons pu tester l'intérêt des industriels, voir le type de problème qu'ils souhaitaient traiter: composites purs et sandwich en flexion, impact de structure en composite. Nous avons donc pu jugé des taux d'intérêt des différents éléments proposés et de leurs limitations. Suite à cette expérience , nous avons donc développé deux nouveeux éléments dans les codes de la nouvelle génération CASTEM 2000 et PLEXUS.

Elément de PLEXUS

C'est un élément coque basé sur l'élément triangulaire à 3 nœuds du code TRICO dont les performances ne sont plus à démontrer. Les couches sont définies par leur excentricité et empilées les unes sur les autres, chaque couche possède son matériau dont le comportement peut être isotrope ou orthotrope. L'orthotropie est ici définie par rapport au premier coté de l'élément.

Elément DKT (CASTEM 2000)

il s'agit d'un élément de coque mince à 3 noeuds (Batoz et Dhatt) qui peut être excentré par rapport à son plan moyen. Un matériau composite se définit donc comme un empilement continu (ou non) d'éléments coques, affecté chacun de son propre excentrement et de son propre matériau. Ce matériau peut être isotrope ou orthotrope evec une direction d'orthotropie (par rapport à un repère fixe, radiale, hélicoïdale, ...)

La mode de définition, très souple, permet de définir une grande variété de composites (composite pur ou sandwich, mais aussi beton armé).

4 EXEMPLE D'APPLICATION

Dans ce qui suit, on présente des cas tests simples de validation, quelques exemples d'optimisation ainsi que quelques exemples plus industriels.

Cylindre monocouche en pression

On a calculé 6 modèles de cylindres en pression interne en composites les fibres étants toutes enroulées circulairement de manière à tester les réponses en membrane des différents éléments. Le cylindre a un rayon interne de 10 cm et un rayon externe de 11 cm, pour les éléments coques on a pris un rayon moyen de 10,5 cm avec une épaisseur de 1 cm, et est supposé être en fibres de verre à matrice epoxyde.

On supposera que le cylindre est sans fond de sorte que la contrainte axiale sera la plus forte et voisine de:

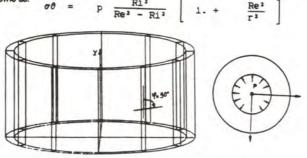


Fig. 2: Cylindre monocouche en pression interne

pour les cylindres isotropes, soit une variation entre 10.5238 et 9.5238 Pa de l'intérieur vers l'extérieur pour une pression de 1 Pa. On supposera que la solution la plus précise est donnée par le modèle à 10 LC8 dans l'épaisseur.

Le tableau ci-dessous présente les résultats pour chacun des types d'éléments:

	1 LC8	10 LC8	16 STR8	64 STR8	16 HE16	12 HE24
uri E-6	0.23512	0.23656	0.22230	0.22266	0.23393	0.23407
ure E-6	0.22368	0.22265			0.22275	0.22265
σθί	10.787	10.659	10.471	10.465	10.751	10.390
σθe	9.253	9.069	9.539	9.539	9.218	9.527
				-	-	-

Cylindre bicouche en pression

Il s'agit du même cylindre avec un rayon interne de 10 cm et un rayon externe de 11 cm, les deux couches ayant la même épaisseur soit 5 mm. Pour les éléments coques on a pris un rayon moyen de 10.5 cm avec deux épaisseurs égales de 5 mm. On a calculé 5 modèles de cylindres en pression interne en composites les fibres étant toutes enroulées à -45/+45 par rapport à l'axe comme présenté sur la figure 8. Les propriétés mécaniques sont les mêmes que pour le cylindre monocouche. Dans ce cas test, comme dans le précédent, le comportement des éléments stratifiés STR8 semble un peu rigide, ce qui peut s'expliquer pour une épaisseur du cylindre rélativement importante.





Fig. 3: Cylindre bi-couche en pression interne

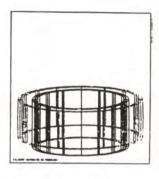




Fig. 4 : Déformée du cylindre en 36 H16

Fig. 5 : Déformée du cylindre en 64 STR8

Plaques en pression sur appuis simples

On veut vérifier ici le comportement en flexion des différents éléments. On calculera une plaque multicouche carrée de coté L d'épaisseur e, en appuis simples soumise à une pression unitaire (p).

La plaque est composée de 9 couches d'orientation $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$, comme présenté sur la figure 11. Les sommes des épaisseurs des couches à 0° et à 90° étant épaiss.

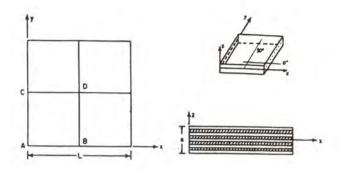


Fig. 6 : Description géométrique de la plaque multicouche

Les conditions aux l'imites sont des appuis simples sur les cotés AC et AB, à mi-hauteur (en haut de la 4e couche) dans le cas des éléments massifs. Nous n'avons pas fixé ux ni y sur le coté AB ni non plus uy et x sur le coté AC pour le calcul avec les STR8.

La solution analytique a été donnée par Noor et Mathers pour le déplacement vertical w au centre de la plaque et la rotation maximale (au point B ou C). Les résultats sont aussi comparés avec ceux obtenus avec l'élément TRIPLT de Lakshminarayan et Sridhara Murthy qui est triangulaire à 3 noeuds et 15 degrés de libertés par noeuds (u, à u/à x, ∂ u/à y, v, ∂ v/ ∂ x, ∂ v/ ∂ y, ∂ x, ∂ 0y, ∂ 0, ∂ 0y, ∂ 0, ∂ 0y, ∂ 0y,

Plusieurs maillages ont été utilisés: en coques multicouches avec 25 STR8 donc déjà assez fin, pour les éléments massifs, on a utilisé 1 élément par quart de plaque (donc 9 éléments puisque la structrue comporte neuf couches) avec les éléments HE16, HE24, et aussi l'hexaèdre à 20 nœuds (CUBE). Avec le HE16, on a aussi utilisé un maillage à 4 éléments par quart de plaque.

Pour les éléments massifs, les rotations sont calculées à partire des déplacements des faces externes des couches 1 et 9. Le matériau est supposé être un graphite/epoxyde.

Pour un rapport e/L = 0.1

	25 STR8	9 HE16	36 HE16	9 CUBE	9 HE24	32 TRIPL	Analyt.
- w	4.4948	1.6281	4.2857		2.7565	4.4846	4.4855
- θу	1.46423	0.69526	1.4508		0.7397	1.4668	1.533

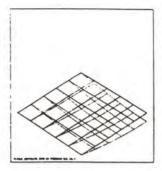




Fig. 7 : Plaque en 25 STR8-Déformée en perspective - e/L = 0.1

Fig. 8 : Plaque en 36 HE 16 -Déformée en perspective - e/L = 0.01

Optimisation d'un cylindre bicouche

Le cylindre est formé de 8 éléments: 2 hauteurs et 2 couches de 2 éléments chacune radialement.

Le cas de charge est un cisaillement sur l'anneau supérieur du cylindre: force dans la direction circonférentielle antisymétrique (voir figure ${\cal F}$ a).

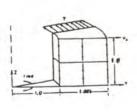
De manière à fixer le cylindre en rotation, on a fixé les déplacements circonférentiels antisymétriques et les déplacements verticaux à la base du cylindre.

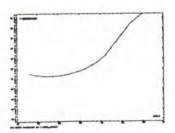
Les résultats théoriques sont connus puisqu'il s'agit d'un cisaillement simple. On devrait avoir un angle proche de 45° (aux effets des conditions aux limites près).

On a pris pour valeur de l'angle initial $\mathscr{V}=90^\circ$ et on a commencé l'optimisation avec un pas de 30°.

On converge assez rapidement vers le minimum absolu soit très proche de 45°.

Les résultats sont montrés par les figures 9 b) à 9 d).





 a) Cas de cisaillement d'un bicouche

b) F(s) en fonction de l'angle des fibres

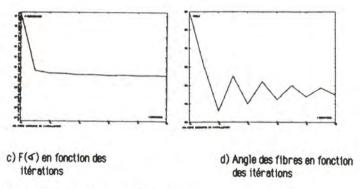


Fig. 9: Test de cisaillement sur un cylindre bicouche

Autres exemples industriels

Du fait de la difficulté de mise en œuvre de structures complexes, la plupart des pièces calculées sont de cylindres qui peuvent comporter un grand nombre de couches (20 à 50), elles sont parfois composée de couches carbone/epoxyde recouvert d'une couche externe métallique. Beaucoup de calculs font intervenir une combinaison de composite et de métal. Les composites sont aussi utilisés pour bon nombre de fonds hémisphériques, ellipsoides de revolution, fonds plats, qui peuvent comporter aussi un grand nombre de couches et peuvent être soit en composite pur, ou en sandwichs avec une ême en nid d'abeille. On montre ci-dessous un exemple de bride modelisé en élément HE24.

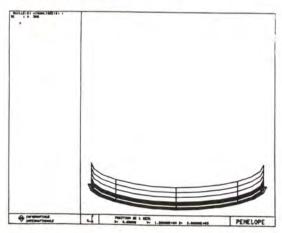


Fig. 10: Bride à 5 couches

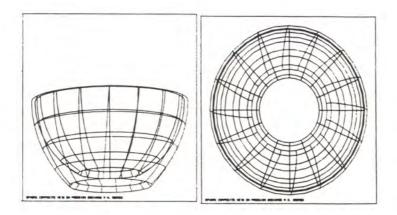


Fig. 11 : Fond hém isphérique en pression monocouche

CONCLUSION

Nous avons présenter dans cet exposé les différents possibilités de calcul de composite avec le système CASTEM (éléments, loi de comportement), présenter quelques calculs fait avec les anciens codes. La nouvelle génération de codes (CASTEM 2000 et PLEXUS) permettra de traiter de nouveaux problèmes (choc, impact, sandwich).

- M. HITTINGER 'Le programme PENELOPE, un programme d'Optimisation de Structures Fibrées 2D-axisymètrique et 3D'. Comptes Rendus des journées du GAMNI et de l'AMAC sur le Calcul de Structures en Matériaux Composites, SAINT ETIENNE, Novembre 1984.
- M. HITTINGER 'Calcul des structures en matériaux composites 2-D axisymétrique et 3D optimisation des directions des couches des fibres'. Table ronde sur la meilleure conception des produits, Ministère de la Recherche et de la Technologie, PARIS, Avril 1985.
- M. HITTINGER, X. DESROCHES, G. BERTRAND, 'Calcul et optimisation des directions des couches de structures en matériaux composites à enroulements hélicoldeux', Comptes Rendus du 3e Colloque Tendances Actuelles en Calcul de Structures', BASTIA (Corse), Novembre 1985.
- M. HITTINGER, X. DESROCHES, 'Calcul des bobinages optimaux pour des structures 2D et 3D en composites'. Comptes Rendus des 5e Journées Nationales sur les Matériaux Composites AMAC', PARIS 9-11 Septembre 1986.
- H.Y. LAKSHMINARAYANA, S. SRIDHARA MURTHY, 'A shear-flexible triangular finite element model for laminated composite plates', International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 20, pp 591-623 (1984).
- T. MASSARD 'Conception et dimensionnement automatique de matériaux composites stratifiés'. Rapport CEA/DAM Service Métallurgie 1984.
- A.K. NOOR, M.D. MATHERS, 'Shear flexible finite element model of laminated composite plates and shells', NASA TN D-8044 (1975).
- S.W. TSAI et E.M. WU 'A General Theory of Strength for Anisotropic Materials'. <u>Journal of Composite Materials</u>, Vol. 5, p. 58 (January 1971).

UN ELEMENT FINI COQUE MULTICOUCHES

PESEUX B.(1) - DUBIGEON S.(2)

<u>RESUME</u> - Le calcul des matrices raideurs des éléments finis en matériau multicouches se fait en général en exprimant l'énergie de déformation dans une couche, l'énergie totale s'obtenant alors en additionnant ces énergies élémentaires.

Afin d'une part de diminuer le temps de calcul de ces matrices qui peut devenir long si le nombre de couches est grand, d'autre part d'obtenir des informations précises sur les contraintes, sur les cisaillements transverses en particulier, nous définissons à partir d'un élément fini coque de type Ahmad, un élément monocouche équivalent au multicouches en utilisant une méthode variationnelle de Reissner.

mots-clés : élément fini coque, matériaux composites, principe de Reissner - cisaillements transverses

<u>ABSTRACT</u> - Usually the stiffness matrix of finite element in multilayers composite material are obtained by the calculation of strain energy in a layer and after these elementary energies are additionned.

On the one hand to reduce the time of calculation of these matrices which can become very long if the number of layers is large, and on the otherhand to obtain accurate informations on the stresses, in particular on the transversal shears, from the Ahmad shell finite element we construct an equivalent one layer element based on the Reissner variational principle.

key-words: shell finite element, composite material, Reissner principle, transversal shears.

⁽¹⁾ Maître de Conférences

⁽²⁾ Professeur Laboratoire de Mécanique des Structures - E.N.S.M. - 1 Rue de la Noë 44072 NANTES Cédex 03, France

I - INTRODUCTION

Une première approche de l'étude du comportement des flotteurs de multicoques consiste à les assimiler à des poutres à parois minces en matériau composite multicouches. Les caractéristiques mécaniques et géométriques équivalentes, les contraintes dans les différentes couches sont déterminées par le module de calcul développé au Laboratoire de Mécanique des Structures et présenté dans la communication "Les catamarans de course et les composites" [1]. Cette approche simplifiée permet d'étudier le comportement global du bateau et d'utiliser le logiciel de dimensionnement de multicoques [2] dans des conditions très aisées et économiques.

Mais si l'on veut faire une analyse fine de la répartition des contraintes au voisinage des liaisons bras-coque, ou des trous d'accès à l'intérieur des flotteurs par exemple, l'étude avec une hypothèse de comportement poutre n'est plus suffisante et l'analyse locale doit se faire avec une hypothèse de type coque.

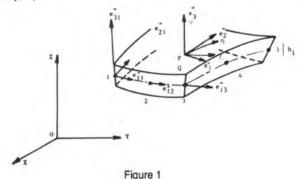
Cette analyse locale peut se faire en utilisant un élément fini coque en matériau composite de type Ahmad classique, ou un élément équivalent monocouche. Ces deux types d'éléments sont développés ci-dessous.

II - ELEMENT FINI COQUE DE AHMAD

Nous rappelons içi les caractéristiques essentielles de l'élément fini de Ahmad qui sont largement décrites dans les références [3], [4], [5] et qui nous seront utiles pour définir un élément homogènéisé équivalent.

II.1 - Définition de la géométrie

On considère un élément quadrilatère à 8 noeuds (Q8) ou triangle à 6 noeuds (T6) dans le repère global $(0, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.



Soit P(x,y,z) un point de la surface moyenne de coordonnées $(\xi,\eta,0)$ dans le système de coordonnées curvilignes local (ξ,η,ν) avec ν normal à la coque. La géométrie est définie par la relation :

$$\begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = \sum_{i} N_{i} (\xi, \eta) \begin{cases} x_{i} \\ y_{i} \\ z_{i} \end{cases}$$
 (2.1)

 $N_i(\xi,\eta)$: fonctions d'interpolation classique des éléments Q8 ou T6.

 \vec{V}_{ξ} et \vec{V}_{η} étant les 2 vecteurs du plan tangent en P à la surface moyenne de la coque, on définit une base orthonormée $(\bar{x},\bar{y},\bar{z})$ de vecteurs unitaires $(\vec{e}_1,\vec{e}_2,\vec{e}_3)$ telle que :

et $\vec{e}_2 = \vec{e}_3 \wedge \vec{e}_1$

On définit en particulier une base locale en chaque noeud i (\vec{e}_{1i} , \vec{e}_{2i} , \vec{e}_{3i}) avec \vec{e}_{3i} normal à la surface moyenne de composantes (e_{3ix} , e_{3iy} , e_{3iz}). Si h_i est l'épaisseur de la coque au noeud i alors les coordonnées d'un point quelconque Q avec $\vec{P}Q$ colinéaire à \vec{e}_3 sont données par :

II.2 - Champ des déplacements

 (u_i, v_i, w_i) désignant les composantes sur $(0, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ du déplaclement du noeud i et $\vec{\theta_i}$ = $\vec{\alpha_i}$ $\vec{e_{2i}}$ + $\vec{\beta_i}$ $\vec{e_{1i}}$ désignant la rotation de $\vec{P_i}Q_i$, on choisit un champ de Hencky pour le déplacement d'un point courant Q.

On obtient : $\vec{u}_Q = \vec{u}_P + \vec{\theta} \land \vec{P}Q$

$$\overrightarrow{u_{p}} = \begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases}_{p} = \sum_{i} N_{i} (\xi, \eta) \begin{cases} u_{i} \\ v_{i} \\ w_{i} \end{cases}$$

En confondant $\stackrel{\longrightarrow}{e} \land \stackrel{\longrightarrow}{PQ} = \stackrel{hv}{2} \stackrel{\longrightarrow}{(\alpha e_1 - \beta e_2)}$ avec $\sum_i N_i (\xi, \eta) h_i \stackrel{v}{2} (\alpha_i e_{1i} - \beta_i e_{2i})$, on obtient

ou encore
$$\begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases}_{Q} = [N_{Q}] \begin{cases} \{a_{1}\} \\ \{a_{2}\} \\ . \end{cases} = [N_{Q}] \{a\}$$

avec $\{a_i\}^{\dagger} = \{u_i, v_i, w_i, \alpha_i, \beta_i\}$, $M_i = v N_i h/2$

$$et \quad [N_{iQ}] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & M_i e_{1ix} & -M_i e_{2ix} \\ 0 & N_i & 0 & M_i e_{1iy} & -M_i e_{2iy} \\ 0 & 0 & N_i & M_i e_{1iz} & -M_i e_{2iz} \end{bmatrix}$$

II.3 - Champ des déformations - Relation Contraintes déformations

Le déplacement de Q ayant les composantes $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ sur la base locale cartésienne $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ le vecteur déformation $\{\bar{\epsilon}\}$ s'exprime par :

$$\{\widetilde{\epsilon}\}^t = \{\widetilde{u}_{,\overrightarrow{x}}, \, \widetilde{v}_{,\overrightarrow{u}}, \, (\widetilde{u}_{,\overrightarrow{u}} + \widetilde{v}_{,\overrightarrow{x}}) \;, \, (\overrightarrow{w}_{,\overrightarrow{u}} + \widetilde{v}_{,\overrightarrow{z}}), \, (\overrightarrow{w}_{,\overrightarrow{x}} + \widetilde{u}_{,\overrightarrow{u}})$$

la composante w z est ignorée compte tenu du comportement de la coque.

Le vecteur déformation $\{\varepsilon\}$ dans la base générale est tel que : $\{\varepsilon\} = [W] \{\varepsilon\}$, [W] matrice construite à partir de la relation entre les matrices [E] et $[\bar{E}]$ associées au tenseur des déformation \bar{E} .[6].

Dans chaque couche et dans la base locale, la loi de Hooke généralisée [7], [8], [9] s'exprime par :

$$\{\overline{\sigma}\} = [\overline{D}] \{\overline{\varepsilon}\} = [\overline{D}] [W] \{\varepsilon\}$$
 (2.4)

$$\text{où} \quad \{\overline{\sigma}\}^t = \{\overline{\sigma_{xx}}, \, \overline{\sigma_{yy}}, \, \overline{\sigma_{xy}}, \, \overline{\sigma_{yz}}, \, \overline{\sigma_{zx}}\}$$

et où $[\overline{D}]$ est une matrice (5 x 5) obtenue à partir de $[\overline{D}^*]$ caractérisant le matériau, avec l'hypothèse de coque, dans les axes d'orthotropie par : $[\overline{D}] = [T]^t [\overline{D}^*]$ [T].

II.4 - Matrice raideur - Energie de déformation

Le vecteur déformation $\{\epsilon\}$ est calculé à partir de (2.3) et conduit à : $\{\epsilon\} = [B] \{a\}$ (2.5)

L'expression de l'énergie de déformation s'obtient à partir de la relation :

$$2Ed = \int_{V} \{\bar{\epsilon}\}^{t} \{\bar{\sigma}\} dV$$

Soit en utilisant (2.4) et (2.5)

2Ed = $\{a\}^t \int_V [B]^t [W]^t [\overline{D}] [W] [B] dV \{a\}$ on en déduit la matrice raideur :

$$[k] = \sum_{e=1}^{n} \int_{V_{e}} [B]^{t} [W]^{t} [\overline{D}]_{e} [W] [B] dV$$
 (2.6)

n : nombre de couches du matériau [D] : matrice élasticité de la couche

V_e : Volume de la couche e sur un élément fini.

Le calcul de cette matrice peut devenir très long si le nombre de couches est important, pour cette raison nous avons construit un élément fini monocouche homogénéisé équivalent au multicouches.

III - ELEMENT FINI PLAQUE HOMOGENEISE

Afin de bien mettre en évidence la démarche qui nous conduit à la définition d'un élément coque en matériau monocouche équivalent, nous commençons par décrire complètement un élément plaque à 8 noeuds, cet élément étant un cas particulier de l'élement coque.

III.1 - Définition de la géométrie

Afin de simplifier la mise en oeuvre, nous considérerons que l'élément plaque est parallèle au plan xoy et que le plan moyen est à la côte z_G , le repère local d'indice i (\overrightarrow{e}_{1i} , \overrightarrow{e}_{2i} , \overrightarrow{e}_{3i}) se déduit du repère local par une translation.

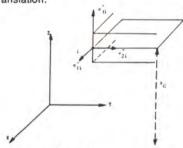


Figure 2

Dans ces conditions la relation (2.1) devient :

et la relation (2.2)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z_{\mathbf{G}} \end{bmatrix}_{\mathbf{P}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i} N_{i}(\xi, \eta) \frac{h}{i} v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i} N_{i}(\xi, \eta) x_{i} \\ \sum_{i} N_{i}(\xi, \eta) y_{i} \\ \vdots \\ z_{\mathbf{G}} + \frac{vh}{2} \end{bmatrix}$$
 (3.2)

III.2 - Champ des déplacements

lci $\vec{\theta}$ a les composantes notés θ_x , θ_y , $\vec{P}Q = v^h/_2 \vec{z}$ ($v \in [-1, 1]$) donc :

$$\begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases} = \begin{cases} u + z \theta_{y} \\ v - z \theta_{x} \end{cases}$$
(3.3)

III.3 - Champ des déformations - Relation contraintes déformations

Le vecteur des déformations {ε} qui est directement exprimé dans la base générale s'écrit :

$$\{\epsilon\}^{1} = \{\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}$$
 avec:
$$\epsilon_{xx} = u_{,x} + z \theta y_{,x} ; \epsilon_{yy} = v_{,y} - z \theta x_{,y} ; \gamma_{xy} = u_{,y} + v_{,x} + z (\theta y_{,y} - \theta x_{,x}) ;$$

$$\gamma_{yz} = w_{,y} - \theta_{x} ; \gamma_{zx} = w_{,x} + \theta_{y}$$
 (3.4)

les glissement γ_{VZ} et γ_{ZX} sont constants suivant la direction normale à la couche.

Dans une couche particulière (e) d'épaisseur h_e dont le plan moyen est à la cote z_{Ge}, la relation contraintes-déformations s'écrit :

$$\{\varepsilon\}_{\Theta} = [C]_{\Theta} \{\sigma\}_{\Theta}$$

$$\{\sigma\}_{\theta}^{\ t} = \{\sigma_{xx},\,\sigma_{yy},\,\sigma_{xy},\,\sigma_{yz},\,\sigma_{zx}\}_{\theta}$$

$$\begin{bmatrix} C \end{bmatrix}_{e} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ & C_{22} & C_{23} & & 0 \\ sym & & C_{33} & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & \\ & &$$

 $[C]_e$: s'obtenant à partir de la matrice de souplesse $[C^*]_e$ dans le repère d'orthotropie

$$\begin{bmatrix} C^* \end{bmatrix}_{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & & & & & & & & & & & & \\ c_{12} & c_{22} & & & & & & & & & & \\ & & & c_{33} & & & & & & & & \\ & & & & & c_{44} & & & & & & \\ & & & & & & c_{55} \end{bmatrix}_{\mathbf{e}} = \overline{[D^*]}^{-1}$$

III.4 - Loi de variations des contraintes - Contraintes généralisées

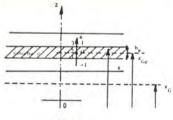


Figure 3

La cote z d'un point de la couche e est donnée par :

$$z = z_{Ge} + z_{e}$$
 $z_{e} \in [-h_{e}/2, h_{e}/2]$ $s \in [-1,1]$ $z_{e} = sh_{e}/2$

Pour les composantes du vecteur contrainte dans le plan xoy de la couche e, $(\sigma_{\chi\chi})_e$, $(\sigma_{\chi\gamma})_e$, $(\sigma_{\chi\gamma})_e$, on adopte une loi de variation linéaire soit :

$$\begin{cases} (\sigma_{xx})_e = (\sigma_{x_0})_e + z (\sigma_{x_1})_e \\ (\sigma_{yy})_e = (\sigma_{y_0})_e + z (\sigma_{y_1})_e \\ (\sigma_{xy})_e = (\sigma_{xy_0})_e + z (\sigma_{xy_1})_e \end{cases}$$

$$(3.6)$$

et on associe les contraintes généralisées $(N_{\chi\chi})_e$, $(N_{yy})_e$, $(N_{\chi y})_e$ et $(M_{\chi\chi})_e$, $(M_{yy})_e$, $(M_{\chi y})_e$ obtenues par intégration sur l'épaisseur de $(\sigma_{\chi\chi})_e$, $(\sigma_{yy})_e$, $(\sigma_{\chi y})_e$ et de $z(\sigma_{\chi\chi})_e$, $z(\sigma_{yy})_e$, $z(\sigma_{\chi y})_e$

On obtient alors :

$$\begin{cases} (\sigma_{xx})_e = \frac{1}{h_e} (N_{xx})_e + \frac{12}{h_e^3} z (M_{xx})_e \\ (\sigma_{yy})_e = \frac{1}{h_e} (N_{yy})_e + \frac{12}{h_e^3} z (M_{yy})_e \\ (\sigma_{xy})_e = \frac{1}{h_e} (N_{xy})_e + \frac{12}{h_e^3} z (M_{xy})_e \end{cases}$$
(3.7)

Pour les composantes $(\sigma_{xz})_{\theta}$ et $(\sigma_{yz})_{\theta}$ du cisaillement on adopte une loi de variation quadratique définie par :

$$(\sigma_{xz})_{\theta} = \langle N_1, N_2, N_3 \rangle \begin{cases} \sigma_{xz_1} \\ \sigma_{xz_2} \\ \sigma^{xz_3} \end{cases}_{\theta}$$
(3.8)

avec $N_1 = -1/2 \text{ s } (1 - \text{s})$, $N_2 = (1 - \text{s}^2)$, $N_3 = 1/2 \text{ s } (1 + \text{s})$ et 1, 2, 3 respectivement les points de la couche e à s = -1, 0, 1.

De même $(\sigma_{vz})_e = \langle N \rangle \{\sigma_{vz}\}_e$

En notant $\{\widehat{\sigma}\}_{e}$ le vecteur des contraintes généralisées

$$\widehat{\{\sigma\}}_{e}^{1} = \{(N_{xx})_{e}, (N_{yy})_{e}, (N_{xy})_{e}, (M_{xx})_{e}, (M_{yy})_{e}, (M_{xy})_{e}, \{\sigma_{xz}\}_{e}^{1}, \{\sigma_{yz}\}_{e}^{1}\}$$
On a alors la relation:

$$\{\sigma\}_{e} = [\mathcal{N}]_{e} \{\sigma\}_{e}$$

133 : matrice unité de dimension 3.

III.5 - Loi de comportement global

La loi de comportement global d'une couche puis du multicouches s'obtiendra par application du principe de Reissner, soit en notant $W(\sigma)$ l'énergie complémentaire élémentaire de déformation, $\overline{\widetilde{\Sigma}}$ le tenseur des contraintes et $\overline{\widetilde{E}}$ le tenseur des petites déformations :

$$\delta_{\sigma} \{ \int_{V} (W(\sigma) - \overline{\overline{\Sigma}} : \overline{\overline{E}}) dV \} = 0$$
 pour toute variation des contraintes

III.5.1 - Calcul de l'énergie complémentaire de déformation

$$2Ed(\sigma)_{e} = \int_{V_{e}} W(\sigma) dV = \int_{S_{e}} \widehat{\{\sigma\}}^{t} \int_{-\frac{h_{e}}{2}}^{\frac{h_{e}}{2}} [\pi]^{t} [C] [\pi] dz. \widehat{\{\sigma\}} dS$$

l'intégrale en z s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{h_{e}} & [C] \\ \frac{12}{3} & [C] \\ [Q_{e}] & C_{44} & [Q_{e}] & C_{45} \\ [Q_{e}] & C_{45} & [Q_{e}] & C_{55} \end{bmatrix}$$

$$[Q_{e}] & C_{45} & [Q_{e}] & C_{55}$$
avec
$$[Q_{e}] = \begin{cases} \frac{h_{e}}{2} \\ < N > \\ < N > dz = \frac{h_{e}}{30} \begin{bmatrix} 4 & 2 & -1 \\ 2 & 16 & -2 \\ -1 & 2 & 4 \end{bmatrix}$$

III.5.2 - Calcul de l'énergie de déformation

$$2Ed_{e} = \int_{S_{e}} \int_{\frac{h_{e}}{2}}^{\frac{h_{e}}{2}} \frac{\frac{1}{\sum \frac{h_{e}}{h}} \frac{1}{\sum \frac{h_{e}}{2}} dz dS} = \int_{S_{e}} \int_{\frac{h_{e}}{2}}^{\frac{h_{e}}{2}} (\sigma)^{\frac{1}{2}} \{\epsilon\} dz\} dS$$

- $\{\sigma\}$ vecteur contrainte associé au tenseur des contraintes Σ
- $\{\epsilon\}$ vecteur déformation associé au tenseur des déformations $\overline{E} = (\overline{h} + \overline{h}^{\dagger})/2$

Le vecteur déformation {ε} peut s'écrire :

$$\{\epsilon\}^t = \left\{ \{\epsilon_m^t\}, \ \gamma_{xy}, \ \gamma_{yz} \right\} \qquad \text{avec} \qquad \{\epsilon_m\}^t = \{\epsilon_{xx}, \ \epsilon_{yz}, \ \gamma_{xy} \}$$

$$\{\epsilon_m\} = \{\epsilon_m\} + z_e \begin{cases} \theta_{y,x} \\ \theta_{x,y} - \theta_{x,y} \\ \theta_{y,y} - \theta_{y,y} \end{cases}$$

Soit :

$$\begin{split} \{\epsilon_m\} &= \{\overline{\epsilon_m}\} + z_{\Theta} \, \{\Theta\} \\ \text{avec} \quad \{\overline{\epsilon_m}\} &= \{\epsilon_m\}_{Z \; = \; Z_{G\Theta}} \\ \text{Soit} \quad \{\overline{\epsilon_m}\} &= \{\overline{\epsilon_o}\} + z_{G\Theta} \, \{\Theta\} \end{split} \qquad \text{et} \qquad \{\Theta\}^t = \{\theta_{y,x} \; ; \; \theta_{x,y} \; ; \; \theta_{y,y} \; - \theta_{x,x} \} \end{split}$$

D'où l'intégrale en z s'écrit :

III.5.3 - Application du Principe de Reissner - Loi de comportement global

III.5.3.1 - Contraintes généralisées du plan xoy

En prenant la variation des (Nii)e dans (3.10) et (3.11), on obtient :

$$\begin{cases}
N_{xx} \\
N_{yy} \\
N_{xy}
\end{cases} = h_e [CT_e^{-1} {\{\overline{\epsilon_m}\}}]$$

De même la variation des $(M_{ii})_e$ conduit à :

Les contraintes généralisées pour l'épaisseur totale de la plaque s'obtiennent par sommation

$$\{N\} = \sum_{\Theta} \{N\}_{\Theta} = \sum_{\Theta} h_{\Theta} [C]_{\Theta}^{-1} \{\overline{\epsilon_{m}}\} = \sum_{\Theta} h_{\Theta} [C]_{\Theta}^{-1} \Big(\overline{\{\epsilon_{0}\}} + z_{G\Theta} \{\Theta\}\Big)$$

$$\{M\} = \sum_{e} (\{M\}_{e} + z_{Ge} \{N\}_{e}) = \sum_{e} [C']_{e}^{-1} \left(\frac{h_{e}^{3}}{12} \{\Theta\} + h_{e} z_{Ge} \{\overline{\epsilon_{o}}\} + h_{e} z_{Ge}^{2} \{\Theta\} \right)$$

Soit finalement :

avec
$$[D_{11}] = \sum_{e} h_{e} [C]_{e}^{-1}$$
 $[D_{12}] = \sum_{e} h_{e} z_{Ge} [C]_{e}^{-1}$ $[D_{22}] = \sum_{e} (\frac{h_{e}^{3}}{12} + h_{e} z_{Ge}^{2}) [C]_{e}^{-1}$

Dans le cas où les empilements sont symétriques par rapport au plan moyen de la plaque, la matrice de couplage $[\mathsf{D}_{12}]$ est nulle.

III.5.3.2 - Cisaillements transverses

La variation des dernières composantes de {σ} fournit les expressions :

$$\begin{split} & \sum_{\mathbf{e}} \left\{ \delta \; \sigma_{yz} \right\}_{\mathbf{e}}^{t} \; \left[\left[Q_{\mathbf{e}} \right] \left\{ C_{44_{\mathbf{e}}} \left\{ \sigma_{yz} \right\}_{\mathbf{e}} + C_{45_{\mathbf{e}}} \left\{ \sigma_{zx} \right\}_{\mathbf{e}} - \frac{h_{\mathbf{e}}}{2} \; \left\{ v_{o} \right\} \gamma_{yz} \right] = 0 \\ & \sum_{\mathbf{e}} \left\{ \delta \; \sigma_{zx} \right\}_{\mathbf{e}}^{t} \; \left[\left[Q_{\mathbf{e}} \right] \left\{ C_{54_{\mathbf{e}}} \left\{ \sigma_{yz} \right\}_{\mathbf{e}} + C_{55_{\mathbf{e}}} \left\{ \sigma_{zx} \right\}_{\mathbf{e}} - \frac{h_{\mathbf{e}}}{2} \; \left\{ v_{o} \right\} \gamma_{zx} \right] = 0 \end{split}$$

Soit après assemblage, en assurant la continuité aux interfaces :

$$[Q_{11}] \{\sigma_{xz}\} + [Q_{12}] \{\sigma_{yz}\} = \frac{1}{6} \{g\} \gamma_{yz}$$
 (3.13)

$$[Q_{12}] \{\sigma_{xz}\} + [Q_{22}] \{\sigma_{yz}\} = \frac{1}{6} \{g\} \gamma_{zx}$$

avec
$$\{g\}^{t} = \frac{1}{6} < h_1, 4h_1, h_1 + h_2, 4h_2, ..., h_n >$$

$$[Q_{11}] = \sum_{e} \frac{h_e}{30} C_{44_e} [Q_e] , \quad [Q_{11}] = \sum_{e} \frac{h_e}{30} C_{45_e} [Q_e] , \quad [Q_{22}] = \sum_{e} \frac{h_e}{30} C_{55_e} [Q_e]$$

Les cisaillements transverses dans chaque couche sont obtenus en fonction des glissements γ_{XZ} et γ_{YZ} , en résolvant le système linéaire (3.13) et en imposant des cisaillements nuls sur les faces de la plaque.

On peut alors calculer les efforts tranchants résultants :

$$Q_{x} = \begin{cases} \frac{h}{2} \\ \sigma_{xz} dz = \sum_{e} \int_{e}^{h_{e}} \frac{\sigma_{xz} dz}{\sigma_{xz} dz} = \sum_{e} \frac{h_{e}}{2} \langle v_{o} \rangle \langle \sigma_{xz} \rangle_{e} \\ \frac{h}{2} \\ \frac{h}{2} \end{cases}$$

et
$$Q_y = \begin{cases} \frac{h}{2} \\ \sigma_{yz} dz = \sum_{e} \frac{h_e}{2} < v_o > {\{\sigma_{yz}\}_e} \end{cases}$$

Soit également :

$$Q_{x} = H_{1} \gamma_{xz} + H_{2} \gamma_{yz}$$

$$Q_{y} = H_{2} \gamma_{xz} + H_{3} \gamma_{yz}$$
 (3.14)

III.5.3.3 - Loi de comportement global

Cette loi est obtenue en regroupant les équations (3.12) et (3.14)

$$\begin{bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{12} & D_{22} \\ & & H_1 & H_2 \\ & & H_2 & H_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\epsilon_0} \\ \{\Theta\} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}$$

IV - UN ELEMENT FINI COQUE HOMOGENEISE DE TYPE AHMAD

Soit un élément coque en matériau multicouches défini par :

$$\overline{z} \in \left[-\frac{h}{2}, \frac{h}{2} \right]$$
 $v \in [-1, 1]$

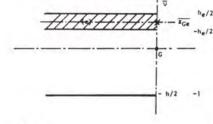
comptés suivant e3 normale à la coque en G(xG, yG, zG).

Considérons une couche (e) caractérisé par $z_{\mbox{Gi}}$ "cote" de la fibre moyenne, $h_{\mbox{i}}$ son épaisseur

$$\overline{z_{G_{\underline{\theta}}}} = \sum_{j=1}^{\underline{\theta}=1} h_j + \frac{h_{\underline{\theta}}}{2}$$

par la variable locale $v \in \left[-\frac{h_e}{2}, \frac{h_e}{2} \right]$

alors:
$$\overline{z} = \frac{h}{2}v$$
, $\overline{z} = \overline{z_{G_{\Theta}}} + \overline{v}$ et $v = \frac{2}{h}(\overline{z_{G_{\Theta}}} + \overline{v})$



En chaque point de la coque on définit :

$$\overline{\{\,\epsilon\,\}} = \{\bar{\epsilon}_{\overline{\mathsf{x}}}^{-}, \bar{\epsilon}_{\overline{\mathsf{u}}}^{-}, \bar{\epsilon}_{\overline{\mathsf{z}}}^{-}, \overline{\gamma}_{\overline{\mathsf{x}}\overline{\mathsf{u}}}^{-}, \overline{\gamma}_{\overline{\mathsf{u}}\overline{\mathsf{z}}}^{-}, \overline{\gamma}_{\overline{\mathsf{z}}\overline{\mathsf{x}}}^{-}\}$$

dans la base locale (\vec{e}_1 , \vec{e}_2 , \vec{e}_3)

et dans chaque couche e à partir de (2.5) $\{\overline{\sigma}\}_{e} = [\overline{D}_{e}] \{\overline{\epsilon}\}_{e} = [\overline{D}] [W] \{\epsilon\}_{e}$

 $\{\epsilon\}_{e}$ vecteur déformation dans la couche e calculé à partir de $\{\epsilon\}$ = [B] (a)

Le calcul de [B], montre que l'on peut mettre la relation précédente sous la forme :

$$\{\epsilon\} = \left([\mathsf{B}_0] + \frac{\mathsf{vh}}{2}\;[\mathsf{B}_1] + (\frac{\mathsf{vh}}{2})^2\;[\mathsf{B}_2] + (\frac{\mathsf{vh}}{2})^3\;[\mathsf{B}_3]\right)\{a\}$$

Les matrice $[B_0]$, $[B_1]$, $[B_2]$, $[B_3]$ ne dépendant que de (ξ, η) , on peut donc écrire le vecteur déformation sous la forme :

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_0\} + (\frac{\mathsf{vh}}{2}) \{\epsilon_1\} + (\frac{\mathsf{hv}}{2})^2 \{\epsilon_2\} + (\frac{\mathsf{hv}}{2})^3 \{\epsilon_3\}$$

et de même puisque {ɛ} = [W] {ɛ}

$$\overline{\{\varepsilon\}} = \overline{\{\varepsilon_0\}} + (\frac{vh}{2}) \overline{\{\varepsilon_1\}} + (\frac{vh}{2})^2 \overline{\{\varepsilon_2\}} + (\frac{vh}{2})^3 \overline{\{\varepsilon_3\}}$$
(4.1)

4.1 - Contraintes généralisées dans le plan tangent à la coque

La forme de la variation de $\{\bar{\epsilon}\}$ nous conduit à adopter la même loi de variation cubique pour les composantes $\bar{\sigma}_{x\bar{x}}$, $\bar{\sigma}_{y\bar{y}}$ et $\bar{\sigma}_{x\bar{y}}$ et à définir pour chaque couche les éléments de réduction par rapport au plan moyen suivant :

$$\{\vec{N}\}_{e} = \begin{cases} \frac{h_{e}}{2} & \frac{h_{e}}{2} & q+1 \\ (\vec{\sigma_{p}})_{e} d\vec{z} & (\vec{\sigma_{m}})_{e} = \begin{cases} \frac{h_{e}}{2} & q+1 \\ (\vec{\sigma_{p}})_{e} \vec{v} & d\vec{z} \end{pmatrix}, q = 0,1,2$$

avec $\{\vec{\sigma}_p\}_{\theta}^t = \{\vec{\sigma}_{xx}, \vec{\sigma}_{uu}, \vec{\sigma}_{xu}\}$

 $\{\bar{N}\}_{e}$: efforts résultants, $\{\bar{\sigma}\,\bar{m}_{e}\}_{e}$: Comoments résultants d'ordre 0,1,2

 $(\{ \overline{c} \, \overline{m}_0 \}_e = \{ \overline{m} \}_e \text{ moment résultant }$

En notant :

 $\{\overline{\sigma}\}^t = \{\{\overline{N}\}^t, \{\overline{\sigma}, \}^t, \{\overline{\sigma}, \}^t, \{\overline{\sigma}, \}^t\}, \text{ contraintes géralisées, pour l'épaisseur totale de la coque, définies par :}$

$$\begin{split} &\{\overline{N}\} = \sum_{e=1}^{n} \{\overline{N}\}_{e} \quad, \quad \{\overline{m}\} = \sum_{e=1}^{n} (\overline{z_{Ge}} \ \{\overline{N}\}_{e} + \{\overline{m}\}_{e}) \\ &\{\overline{c}\,\overline{m}_{1}\} = \sum_{e=1}^{n} \left(\overline{z_{Ge}^{2}} \ \{\overline{N}\}_{e} + 2\overline{z_{Ge}} \ \{\overline{m}\}_{e} + \{\overline{c}\,\overline{m}_{1}\}_{e}\right) \\ &\{\overline{c}\,\overline{m}_{2}\} = \sum_{e=1}^{n} \left(\overline{z_{Ge}^{3}} \ \{\overline{N}\}_{e} + 3\overline{z_{Ge}^{2}} \ \{\overline{m}\}_{e} + 3\overline{z_{Ge}^{2}} \ \{\overline{c}\,\overline{m}_{1}\}_{e} + \{\overline{c}\,\overline{m}_{2}\}_{e}\right) \end{split}$$

et $\{\epsilon_p\}^t = \{\epsilon_{xx}^-, \epsilon_{uu}^-, \gamma_{xu}^-\}$, alors la variation des contraintes conduit à :

$$\{\overline{\sigma}\} = [D_{eq}] \{\overline{\epsilon}_{p}\} = [C_{eq}] \{\{\overline{\epsilon}_{p_{0}}\}\} \{\overline{\epsilon}_{p_{1}}\}\} \{\{\overline{\epsilon}_{p_{2}}\}\} \{\overline{\epsilon}_{p_{3}}\}$$

$$\{\overline{\epsilon}_{p_{3}}\}$$

avec:

$$\begin{split} &[D_{eq}] = \sum_{e=1}^{n} [CT]_{e}^{-1} \begin{bmatrix} d_{1} & l_{33} & d_{2} & l_{33} & d_{3} & l_{33} & d_{4} & l_{33} \\ & & d_{3} & l_{33} & d_{4} & l_{33} & d_{5} & l_{33} \\ & & & d_{5} & l_{33} & d_{6} & l_{33} \end{bmatrix} \\ &d_{1} = h_{e} \ ; \quad d_{2} = h_{e} & \overline{z_{Ge}} \ ; \quad d_{3} = h_{e} & \left(\overline{z_{Ge}} \right) + \frac{h_{e}^{2}}{12} \ ; \quad d_{4} = h_{e} & \overline{z_{Ge}} \left(\overline{z_{Ge}} \right) + \frac{h_{e}^{2}}{4} \ \end{bmatrix} \\ &d_{5} = h_{e} & \left(\overline{z_{Ge}} \right) + \frac{z_{Ge}^{2} h_{e}^{2}}{2} + \frac{h_{e}^{4}}{80} \) \\ &\vdots \qquad d_{6} = h_{e} & \overline{z_{Ge}} \left(\overline{z_{Ge}} \right) + \frac{5}{6} & \overline{z_{Ge}} h_{e} + \frac{h_{e}^{4}}{80} \) \\ &d_{7} = h_{e} & \left(\overline{z_{Ge}} \right) + \frac{5}{4} & \overline{z_{Ge}} h_{e}^{2} + \frac{3}{16} \overline{z_{Ge}} h_{e}^{4} + \frac{h_{e}^{6}}{7 \times 64} \) \end{split}$$

IV.2 - Contraintes généralisées associées aux cisaillements

On suppose à nouveau une loi de variation quadratique dans chaque couche et les glissements transversaux sont à variation cubique suivant l'épaisseur totale. Les termes de

(3.15) correspondant aux cisaillements transverses sont donc conservés par contre les termes correspondants aux glissements sont modifiés et font intervenir l'intégrale J telle qu'en notant

$$\left\{ \overline{\gamma} \right\} = \begin{cases} \overline{\gamma}_{XZ} \\ \overline{\gamma}_{YZ} \end{cases} = \left\{ \overline{\gamma} \right\}_{0} + \left(\frac{vh}{2} \right) \left\{ \overline{\gamma} \right\}_{1} + \left(\frac{vh}{2} \right)^{2} \left\{ \overline{\gamma} \right\}_{2} + \left(\frac{vh}{2} \right)^{3} \left\{ \overline{\gamma} \right\}_{3}$$

$$J = \begin{cases} \frac{h_{e}}{2} \\ \left\{ -N \right\}_{1}^{t} \\ \left\{ \overline{\gamma} \right\}_{1}^{t} \right\} = \left\{ \overline{\gamma} \right\}_{1}^{t} = \left\{ \frac{N}{2} \right\}_{1}^{t} = \left\{ \frac{N}{2} \right\}_{1}^{t} = \left\{ \overline{\gamma} \right\}_{1}^{t} + \left\{ \overline$$

avec $v = \frac{h_e}{2}$ s

$$\begin{split} &\{\bar{\Gamma}_{0}\} = \{\bar{\gamma}_{0}\} + \bar{z}_{Ge} \{\bar{\gamma}_{1}\} + z_{Ge}^{2} \{\bar{\gamma}_{2}\} + z_{Ge}^{3} \{\bar{\gamma}_{3}\} \\ &\{\bar{\Gamma}_{1}\} = \frac{h_{e}}{2} \{\bar{\gamma}_{1}\} + h_{e} z_{Ge} \{\bar{\gamma}_{2}\} + \frac{3h_{e}}{2} z_{Ge}^{2} \{\bar{\gamma}_{3}\} \\ &\{\bar{\Gamma}_{2}\} = \left(\frac{h_{e}}{2}\right)^{2} \{\bar{\gamma}_{2}\} + 3\left(\frac{h_{e}}{2}\right)^{2} z_{Ge} \{\bar{\gamma}_{3}\} \\ &\{\bar{\Gamma}_{3}\} = \left(\frac{h_{e}}{2}\right)^{3} \{\bar{\gamma}_{3}\} \\ &\{\bar{\Gamma}_{3}\} = \left(\frac{h_{e}}{2}\right)^{3} \{\bar{\gamma}_{3}\} \\ &\int_{-1}^{1} \langle N_{2} \rangle ds = \langle 1/3 \rangle \langle 4/3 \rangle \langle 1/3 \rangle = \langle v_{0} \rangle \\ &\int_{-1}^{1} s^{2} \langle N_{2} \rangle ds = \langle 1/5 \rangle \langle 4/5 \rangle \langle 1/5 \rangle = \langle v_{2} \rangle \\ &\int_{-1}^{1} s^{3} \langle N_{2} \rangle ds = \langle 1/5 \rangle \langle 1/5 \rangle = \langle v_{3} \rangle \end{split}$$

l'intégrale s'écrit :

$$\frac{h_{e}}{2} \begin{bmatrix} \{v_{o}\} \ , \ 0 \ , \ \{v_{1}\} \ , \ 0 \ , \ \{v_{2}\} \ , \ 0 \ , \ \{v_{3}\} \ , \ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\overline{\Gamma_{o}}\} \\ \{\overline{\Gamma_{1}}\} \\ \{\overline{\Gamma_{2}}\} \\ \{\overline{\Gamma_{3}}\} \end{bmatrix}$$

Soit en fonction des $\{\overline{\gamma}_0\}$, $\{\overline{\gamma}_1\}$, $\{\overline{\gamma}_2\}$, $\{\overline{\gamma}_3\}$

$$\frac{h_{\underline{e}}}{2} \begin{bmatrix} \{v_{\underline{o}}\} \ , \ 0 \ , \ \{w_{\underline{1}}\} \ , \ 0 \ , \ \{w_{\underline{2}}\} \ , \ 0 \ , \ \{w_{\underline{3}}\} \ , \ 0 \\ 0 \ , \{v_{\underline{o}}\} \ , \ 0 \ , \ \{w_{\underline{1}}\} \ , \ 0 \ , \ \{w_{\underline{2}}\} \ , \ 0 \ , \ \{w_{\underline{3}}\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\bar{\gamma}_{\underline{o}}\} \\ \{\bar{\gamma}_{\underline{1}}\} \\ \{\bar{\gamma}_{\underline{2}}\} \\ \{\bar{\gamma}_{\underline{3}}\} \end{bmatrix}$$

avec
$$\{w_1\} = \overline{z_{Ge}} \{v_0\} + \frac{h_e}{2} \{v_1\}$$

 $\{w_2\} = \overline{z_{Ge}}^2 \{v_0\} + \overline{z_{Ge}} h_e \{v_1\} + (\frac{h_e}{2})^2 \{v_2\}$
 $\{w_3\} = \overline{z_{Ge}}^3 \{v_0\} + 3\overline{z_{Ge}} \frac{h_e}{2} \{v_1\} + 3\overline{z_{Ge}} \frac{h_e}{2} \{v_2\} + (\frac{h_e}{2})^3 \{v_3\}$

Donc dans les relations (3.13), les seconds membres sont à modifier.

En résolvant on obtient donc $\{\overline{\sigma_{x}}_{\overline{z}}\}$ et $\{\overline{\sigma_{y}}_{\overline{z}}\}$ en fonction des $\{\overline{\gamma_{0}}\}$, $\{\overline{\gamma_{1}}\}$, $\{\overline{\gamma_{2}}\}$, $\{\overline{\gamma_{3}}\}$.

On définit les nouvelles contraintes intégrées.

$$\frac{1}{Q_{X}^{r}} = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \overline{\sigma_{XZ}} z^{r} dz \qquad \overline{\sigma_{Y}^{r}} = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \overline{\sigma_{YZ}} z^{r} dz \qquad r = 0,1,2,3$$

$$\frac{1}{Q_{X}^{0}} = \sum_{e} h_{e} < 1/6, 2/3, 1/6 > \{\overline{\sigma_{XZ}}\}_{e} = \sum_{e} \frac{h_{e}}{2} < v_{o} > \{\overline{\sigma_{XZ}}\}_{e}$$

$$\frac{1}{Q_{X}^{1}} = \sum_{e} \frac{h_{e}}{2} \left(\overline{z_{Ge}} < v_{o} > + \frac{h_{e}}{2} < v_{1} > \right) \{\overline{\sigma_{XZ}}\}_{e}$$

$$\frac{1}{Q_{X}^{2}} = \sum_{e} \frac{h_{e}}{2} \left(\overline{z_{Ge}} < v_{o} > + h_{e} \overline{z_{Ge}} < v_{1} > + \left(\frac{h_{e}}{2}\right)^{2} < v_{2} > \right) \{\overline{\sigma_{XZ}}\}_{e}$$

$$\frac{1}{Q_{X}^{2}} = \sum_{e} \frac{h_{e}}{2} \left(\overline{z_{Ge}} < v_{o} > + 3z_{Ge} \overline{z_{Ge}} < v_{1} > + 3z_{Ge} \overline{z_{Ge}} - \frac{h_{e}}{2} z^{2} < v_{2} > + \left(\frac{h_{e}}{2}\right)^{2} < v_{2} > + \left(\frac{h_{e}}{2}\right)^{3} < v_{3} > \right) \{\overline{\sigma_{XZ}}\}_{e}$$

de même pour les composantes $\overline{Q_y^0}$, $\overline{Q_y^1}$, $\overline{Q_y^2}$, $\overline{Q_y^3}$, $\overline{Q_y^3}$.

On peut donc construire la loi de comportement global.

IV - APPLICATIONS

Pour valider ces différentes formulations nous comparons tout d'abord les résultats donnés par les 3 éléments : Ahmad classique, plaque homogénéisée et coque homogénéisée aux résultats théoriques de Pagano [10] concernant la flexion de plaques rectangulaires en matériaux composites. Ces comparaisons montrent que les éléments classiques et homogénéisés sont absolument équivalents pour ces problèmes et ont des performances satisfaisantes (écart sur les flèches < 1% avec la théorie).

Nous comparons d'autre part les éléments Ahmad classique et Ahmad homogénéisé en traitant un problème de déformation de cylindre, la différence entre les résultats des deux types d'éléments n'est pas significative. Par contre le temps de calcul est plus faible pour l'élément équivalent et les contraintes connues avec une plus grande précision.

Ces quelques tests étant satisfaisants l'élément est utilisé pour les calculs de coque de bateaux.

- [1] OLLIER G., OUDIN H., PESEUX B., QUEVAT J.P. 1988. Les catamarans de course et les matériaux composites. Colloque la Construction Navale en Composites, Nantes, 16-17-18 Mars
- [2] **DELHOMMEAU G., PESEUX B., QUEVAT J.P.** 1980. Comportement d'un multicoque sousmis à l'action de la houle. Journées d'Automne (1980) (GAMI-ENSM)
- [3] AHMAD S., IRONS B.M., ZIENKIEWICZ O.C. 1970. Analysis of thick and thin shell structure by curved finite elements. (Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.2, n°3)
- [4] ZIENKIEWICZ O.G. 1977. The finite element method. 3ème édition. Ed. Mac Graw Hill
- [5] HINTON E., OWEN D.R.J. 1984. Finite elements software for plates and shells. Ed. Pineridge Press
- [6] DUBIGEON S. 1986. Mécanique des milieux continus. Tech. et Doc. Ed. Lavoisier
- [7] TSAI S.W., HAHN H.T. 1980. Introduction to composite materials. Ed. Technomic.
- [8] TSAI S.W., MASSARD T. 1985. Le guide des composites. Ed. EACM
- [9] WEISS J., BORD C. 1983. Les matériaux composites. Tomes 1 et 2. Editions de l'Usine. CETIM
- [10] PAGANO N.J.1970. Exact solutions for rectangular bidirectional composites and sandwich plates. J. Composite Materials, Vol.4, January.

CONCEPTION ET REALISATION D'UN BRAS DE MULTICOQUE

CH. CHEVALLEY *- M. COQUET *

RESUME : Différentes étapes de la conception à la réalisation d'un bras de liaison en matériau composite pour un trimaran de course

océanique.

MOTS CLES : Matériau composite - poutre - élément fini - sandwich - drapage -

bobinage

ABSTRACT: Conception and realization of a beam for multihull. Differents stages from the conception to the realization of a beam of connection made of composite materials for a trimaran.

KEY WORDS : Composite material - beam - finite elèment - sandwich - wraping -

filament winding

CHAPITRE 1

PRESENTATION DU PROJET

Les multicoques destinés à la compétition doivent, pour être compétitifs, concilier des impératifs apparemment contradictoires : légèreté, solidité, stabilité sous voile.

Pour accroître cette dernière, les architectes sont fréquemment amenés à concevoir des trimarans dont l'"envergure" est importante.

Dans ce cas, les poutres qui relient les flotteurs latéraux à la coque centrale sont évidemment très sollicités mécaniquement.

Leur conception et leur réalisation en matériaux composites est seule à permettre d'allier une résistance satisfaisante à un devis de poids minimum.

L'utilisation des techniques issues de l'aéronautique permet d'obtenir ce résultat.

La première partie décrit les étapes de la conception des bras de liaison d'un trimaran de course océanique de type "foiler". Chaque flotteur est relié à la coque centrale par un bras unique.

La deuxième partie traite de la réalisation.

^{*}I.M.C., rue G. Monge, Parc industriel, Zone 7, 33600 PESSAC

CHAPITRE 2

LA CONCEPTION

2.1.- L'EVALUATION DES CHARGES

Les charges sont les efforts subis par le voilier dans les conditions de navigation les plus sévères. Trois cas de chargement ont été répertoriés. Il s'agit de trois configurations différentes dans lesquelles le bras de liaison ne travaille pas de la même manière.

Le cas de chargement n° 1 correspond à la configuration suivante :

- foil sous le vent entièrement immergé
- tout le reste du voilier hors de l'eau
- voilier à sa vitesse maximale estimée.

Il s'agit bien sûr d'une position instantanée et non d'une position d'équilibre.

L'effort sur un foil se décompose en un effort normal F provenant de la portance du foil et un effort axial F, provenant de la trainée du foil (fig. 1). On a:

$$F_n = \frac{1}{2} P SV^2 C_n$$
 et $F_x = \frac{1}{2} P SV^2 C_x$

avec : **e** = masse volumique de l'eau en kg/m³ S = surface du foil en m²

V = vitesse du bateau en m/s

 ${\sf C}_{\sf v}^{\sf n}$ = coefficient de portance du profil ${\sf C}_{\sf v}^{\sf n}$ = coefficient de trainée du profil

Fx et F en Newton.

Pour l'exemple traité, on a les valeurs suivantes :

et on obtient :

$$F_{x}^{n} = 34080 \text{ N, soit } 3400 \text{ daN}$$

 $F_{x}^{n} = 3408 \text{ N, soit } 340 \text{ daN}$



Cet effort est transmis à la coque par l'intermédiaire du bras de liaison. L'effort F conduit \tilde{a} un effort F = F et \tilde{a} un moment de flexion M_{χ} = F_n x d (fig. 1) appliqués en bout de bras.

L'effort F_v conduit à un moment de torsion $M_v = F_x \times h$ (fig. 1).

Le calcul de la résistance à rupture du bras de liaison se fait en appliquant à ces efforts un coefficient de sécurité de 1,5.

Le cas de chargement n° 2 correspond à l'effort de trainée causé par l'immersion complète du flotteur sous le vent, alors que le voilier navigue à sa vitesse maximale estimée. L'effort généré est :

$$F_x = \frac{1}{2} \mathbf{e} \ Av^2 \ C_x + \frac{1}{2} \mathbf{e} \ S_f \ v^2 \ C_f$$

avec : e = masse volumique de l'eau en kg/m³

A = surface du maître cougle du flotteur immergé en m²

S_f = surface mouillée en m² V = vitesse du voilier en m/s

 $C_f = coefficient de trainée$ $<math>C_f^{X} = coefficient de frottement$

On prend les valeurs suivantes :

et on obtient :

F = 8946 N soit 900 daN

A cet effort F il y a lieu d'ajouter un effort F du à la poussée d'Archimède sur le flotteur ainsi qu'un éventuel moment de torsion si cette poussée s'applique en avant ou en arrière de l'axe longitudinal du bras (c'est à dire si le centre de carène du flotteur totalement immergé est situé en avant ou en arrière de cet axe).

Le calcul de la résistance à rupture du bras de liaison se fait en appliquant à ces efforts un coefficient de sécurité de 1,5.

Le cas de chargement n°3 correspond à l'effort introduit par le hauban au vent.

La résultante des efforts aérodynamiques sur les voiles est

$$R = \frac{1}{2} e Sv^2 C_T$$

avec : **e** = masse volumique de l'aig en kg/m³ S = surface de voilure en m'

V = vitesse du vent apparent en m/s C_{τ} = coefficient aérodynamique

on obtient: R = 7013 N soit 700 daN

Nota : la résultante des efforts aérodynamiques R a une composante transversale F qui s'applique à une hauteur h au-dessus du centre de carène. La vitesse du Vent apparent V est choisie de telle manière que le couple de chavirage R x h soit égal au couple de redressement du voilier.

L'effort que l'on obtient dans le hauban au vent est tire du calcul du mât, effectué sur ordinateur par la méthode des éléments finis. Il est de 3400 daN.

Le calcul de la résistance à rupture du bras de liaison se fait en appliquant à l'effort dans le hauban indiqué ci-dessus un coefficient de sécurité de 2,25 (soit 1,5 x 1,5, le premier coefficient étant destiné à tenir compte d'une surcharge dynamique).

2.2.- LE SCHEMA : DE CALCUL

Le calcul du bras fait appel à la méthode dite des "éléments finis".

La modélisation effectuée représente le bras de liaison seul.

Les éléments sont du type plaques constituées d'un empilement de couches de composite fibre/résine d'orientations variables. Le matériau de base est le carbone/époxide.

Cette méthode impose qu'un prédimensionnement ait été effectué au préalable, car il faut introduire dans l'ordinateur les caractéristiques des éléments (orientation des fibres, nombre de couches, type de matériau). On peut ensuite, au vu des résultats, et par itérations successives, optimiser l'échantillonnage.

La figure n° 2 montre les épaisseurs des éléments dans la section courante.

La figure n $^{\circ}$ 3 donne l'orientation des fibres et le nombre de couches dans chaque direction pour cette même section.

Les conditions aux limites sont celles d'un encastrement au niveau de la coque centrale.

2.3.- L'ECHANTILLONNAGE

a) Les calculs de base

Les résultats du calcul sont obtenus sous forme de :

- déplacements aux noeuds
- contraintes principales dans les éléments
- critères de rupture.

La figure n° 4 montre la déformée sous l'action du chargement n° l.

Les renseignements que l'on peut tirer de la déformée sont les suivants:

- flèche verticale en bout de bras sous l'action du hauban au vent : la rigidité de l'ensemble bras-coque conditionne la raideur du gréement.
- rotation de l'extrêmité du bras sous le vent sous l'action de la trainée du foil : on en déduit une variation de l'angle d'incidence du foil.

La figure n° 5 montre les contraintes principales sous l'action du chargement nº 1.

La connaissance de la direction des efforts internes les plus importants permet de créer une anisotropie dans le matériau par le choix judicieux de la direction des fibres de renfort (optimisation). Les propriétés mécaniques du matériau composite varient en effet fortement suivant le pourcentage de fibres dans le sens de l'effort. Un exemple est donné figure n° 6 pour un composite carbone/époxyde.

La figure n° 7 montre les critères de rupture pour le cas de chargement nº 1.

Il s'agit d'un critère C dit "critère de Hill". Dans chacune des couches du matériau, le programme calcule un critère

$$c = \sqrt{\frac{(\underline{\sigma_x})^2}{\sigma_{xR}}^2 + \frac{(\underline{\sigma_y})^2}{\sigma_{yR}}^2 + \frac{(\underline{\tau_{xy}})^2}{(\underline{\tau_{xyR}})^2} - \frac{\underline{\sigma_x}\underline{\sigma_y}}{(\underline{\sigma_{xR}})^2}}$$

avec : σ_x = contrainte sens 0° σ_x = contrainte admissible sens 0° σ_x = contrainte admissible sens 90° σ_x = contrainte admi

Lorsque le matériau composite est soumis à un chargement combiné sous la forme de traction (ou compression) longitudinale, transverse, et de cisaillement, il y a rupture lorsque le critère C atteint la valeur de 1 dans l'une des couches.

Le critère indiqué sur la planche est le critère dans la couche la plus chargée.

Les valeurs obtenues permettent de savoir quelle est, en chaque point du bras, la marge par rapport à la rupture :

Marge =
$$(\frac{1}{c} - 1) \times 100 \text{ en } \%$$

En conclusion, l'optimisation de l'échantillonnage consiste à :

- orienter les fibres dans le sens des efforts internes
- diminuer la marge en chaque point de la structure tout en s'assurant que celle-ci reste suffisamment rigide.

b) Les problèmes de stabilité

Les calculs par éléments finis, effectués dans le domaine linéaire du matériau et ne tenant compte que de l'état initial de la structure, ne donnent pas de renseignements sur sa stabilité.

On appelle stabilité ou plutôt instabilité des structures les phénomènes de flambage (flambage général, flambage local) qui surviennent sous un chargement de compression.

On vérifie l'absence de risque de flambage général du bras de liaison sous l'action de l'effort normal par la formule d'Euler.

Si le bras n'est pas sujet au flambage général, il l'est en revanche au flambage local. En effet, dans son travail en flexion :

- la partie supérieure de la poutre est comprimée.
- les flancs travaillent en cisaillement.

Ces problèmes ont été résolus en prévoyant une structure "sandwich", dont la peau interne est très fine et n'a pour but que de "stabiliser" la peau externe.

La figure 8 donne la section du bras dans la zone courante.

c) L'introduction des efforts locaux

Enfin, l'échantillonnage prévoit les renforts locaux :

- couches de fibre/résine supplémentaires
- densification de l'âme
- ferrures de reprise
- contre-ferrures

au niveau de tous les points de fixation ou d'introduction d'efforts.

CHAPITRE 3

LA REALISATION

Les principaux problèmes rencontrés dans la réalisation des pièces à grand élancement sont ceux de la tenue mécanique du mandrin et de son extraction.

Le mode de conception choisi interdit en effet une réalisation en deux demi-coquilles assemblées ultérieurement.

La première opération consiste à réaliser un premier pli en fil continu sur un mandrin démontable.

Avant mise en forme, le Nomex est recouvert de 2 peaux aramide époxyde avec interposition d'un film de colle.

La plaque ainsi réalisée est, après polymérisation, découpée au jet d'eau, puis mise en forme sur le premier pli en carbone époxyde bobiné.

On procêde alors à un frettage de l'ensemble par bobinage à + 45°.

La disposition des plis suivants par drapage ne pose pas de problème particulier sauf à respecter scrupuleusement les orientations préconisées.

La réalisation de la peau extérieure se fait par enroulement filamentaire.

Après habillage d'un tissu à délaminer, l'ensemble est polymérisé en étuve avec rotation du mandrin.

Une telle alternance de plis bobinés et de plis drapés permet de réaliser tout renfort localisé par simple apport de plis drapés supplémentaires.

Les inserts métalliques nécessaires à la reprise des efforts sont incorporés lors du drapage et non rapportés.

Afin d'éviter les déformations dues aux contraintes thermiques résiduelles, le refroidissement s'effectue dans l'étuve porte fermée.

Il ne reste plus alors qu'à démonter le mandrin qui sort par l'une des extrêmités de la poutre.

C.A. MARCHAJ: Sailing theory and practice - Adlard Coles Ltd - Granada

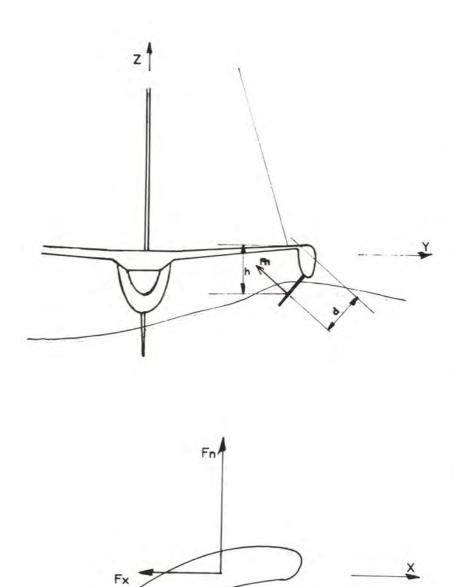
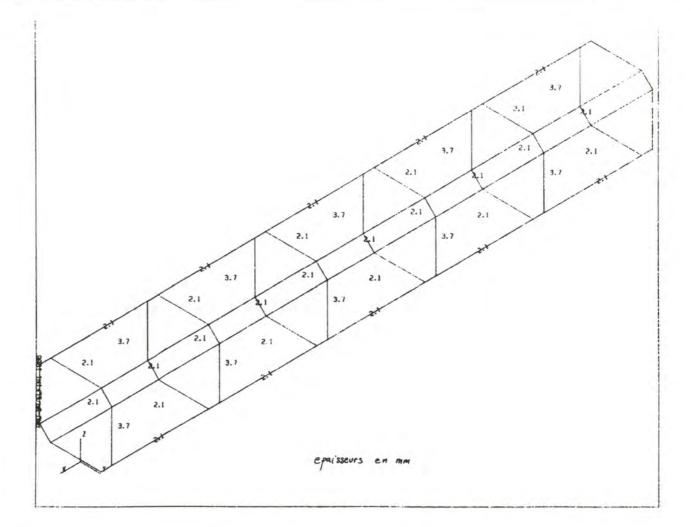


Figure 1



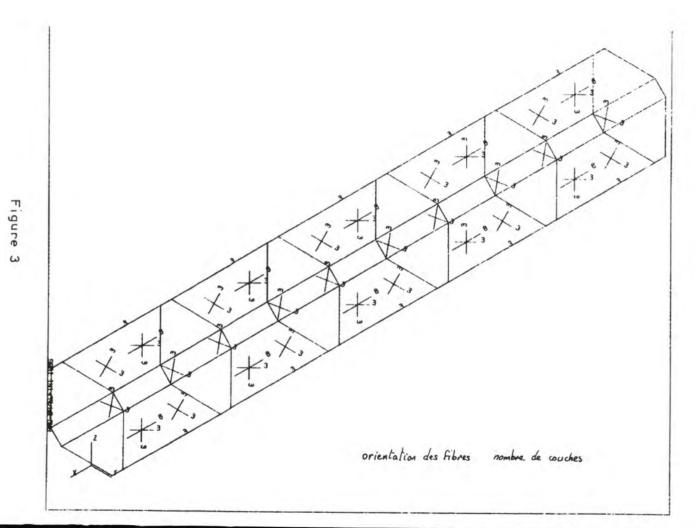




Figure 4

DEFORMEE PLAN XOZ CHARGE : ACTION DU FOIL z ____x

10.0	A STATE OF THE STA	×1/4,0	Ž.	****	×14,	\$	×2,	×.	200	, in ,	19 7 -5-1	11.5	10.
+ 13.6 + 12.6	13.7	+12°	X,	£100	Ž.	***	\$\$	* · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	*	10.0	10.5		
***	***	200	The state of the s	**	×v.	**	****	××,	10.0	×1.	*****	17.4	×3.

Figure

EFFORT FOIL (PORTANCE + TRAINEE)
CONTRAINTES (DAN/MM2) BRAS DROIT FACE SUPERIEURE

Txy Gxy Gxy										
Drapag	e			*	*					
σ_{x}	M Pa	1600	800	500	880					
E×	M Pa	140000	70 000	55000	77000					
σγ	MPa	60	800	500	200					
Ey	МРа	4 00 0	70 000	55 000	15 000					
Сxy	MPa	80	8 0	280	280					
Gxy	M Pa	3000	3000	19 000	19000					

Caractéristiques d'un stratifié carbone epoxyde en fonction de l'orientation des couches

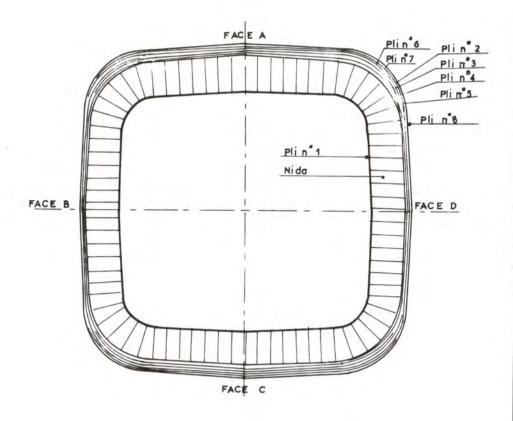
figure 6

Figure 7

0.426	6.214 6.312	0.171	0.298	9.186 9.216	6.117	9.206	#.201 #.200	6.212	185.0	0.252 0.295	0.394	0.284	9.526	0.505
	P. 248			0.132			0.195			6.253			0.404	
8-294		9.236	0.193		0.123	8.151		0.126	0.226		0.294	8.367		0.397
	6.276			0.165			0.125			0.222			0.957	
0.271	6.275	6.276	0.137	8.129 8.052	0.133	0.674	9.042 8.041	9.060	0.213	0.190 0.118	6.191	0.362	0.334 0.193	8.339

Y X

EFFORT FOIL (PORTANCE - TRAINEE)
CRITERE MAX PROS DROLL FACE SUPERIEURE



```
Pli n° 1 : bobiné carbone époxyde \frac{1}{4} 45° ep. 0,7 Pli n° 2 : bobiné carbone époxyde \frac{1}{4} 45° ep. 0,7 Pli n° 3 : drapé carbone époxyde 0° ep. 2 x 0,2 Pli n° 4 : drapé carbone époxyde 0° ep. 2 x 0,2 Pli n° 5 : bobiné carbone époxyde \frac{1}{4} 45° ep. 0,7 Pli n° 6 : drapé carbone epoxyde \frac{1}{4} 6° ep. 2 x 0,2 Pli n° 7 : drapé carbone époxyde 0° ep. 2 x 0,2 Pli n° 8 : bobiné carbone époxyde \frac{1}{4} 45° ep. 0,7
```

Fig. 8 : Section courante

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 211 à 222

LES CATAMARANS DE COURSE ET LES MATERIAUX COMPOSITES

OLLIER G.(1) OUDIN H. (2) - PESEUX B. (2) - QUEVAT J.P. (2)

RESUME - Après une présentation rapide et générale du logiciel de dimensionnement des éléments structuraux de bateaux multicoques, nous montrons comment les éléments finis poutre classiques doivent être modifiés pour prendre en compte des matériaux composites. Nous décrivons alors les différentes étapes du module de calcul des caractéristiques équivalentes qui doivent être introduites dans les éléments finis poutre et de calcul des contraintes dans les différentes couches du matériau.

mots-clés : couplage fluide-structure, élément fini poutre, matériaux composites.

<u>ABSTRACT</u> - After a rapid and general presentation of the code used to design the structural elements of catamarans, we show how to modify classical beam finite element to take composite materials into account.

Then we describe the steps of the program which computes the equivalent characteristics which have to be defined for the beam finite elements, and the stresses in layers.

key-words: fluid structure interaction, beam finite element, composite materials

⁽¹⁾ Architecte Naval - Société MULTIPLAST - 56000 VANNES, France

⁽²⁾ Maîtres de Conférences - Laboratoire de Mécanique des Structures - E.N.S.M. - 1 Rue de la Noë - 44072 NANTES Cédex 03, France

INTRODUCTION

L'objectif numéro un de l'architecte naval qui conçoit des bateaux de compétition est d'obtenir un bateau qui gagne et ce but ne peut être atteint qu'avec des bateaux légers d'une part et solides d'autre part.

La lègèreté est en effet un critère essentiel pour que les performances soient intéressantes quelles que soient les conditions de vent et de mer qui seront rencontrées.

La solidité également est primordiale, le bateau est très souvent soumis à des sollicitations proches des maximums admissibles. Et pour gagner il faut au moins arriver.

Les éléments de liaison des coques doivent être suffisamment raides pour que l'amplitude des mouvements relatifs des flotteurs soient faibles, un bateau souple n'est pas compétitif.

Ces critères légèreté, solidité-raideur sont assez incompatibles avec des matériaux traditionnels, c'est pourquoi l'utilisation des matériaux composites a pris une telle importance dans la construction des bateaux de compétition et des multicoques en particulier.

Il est donc nécessaire d'adapter ou de définir des outils de calcul pour obtenir un dimensionnement optimum des différents éléments du bateau.

1 - HYPOTHESES DE CALCUL

Un bateau à voile de type multicoques conduit à un problème qui fait intervenir 3 éléments :

 l'eau, le vent et la structure du bateau on a donc un double couplage : air-structure

fluide-structure

chacun de ces éléments intervenant de façon très complexe. Il est nécessaire de faire certaines hypothèses simplificatrices.

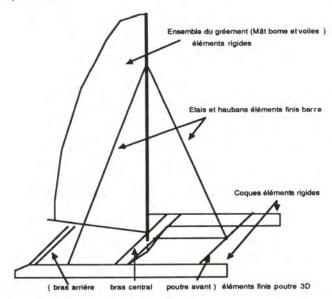


Figure 1

1.1 - Couplage Air-Structure

Dans l'étude qui nous préoccupe ici : dimensionnement optimum des éléments de liaison des flotteurs, le couplage air-structure n'est pas pris en compte c'est-à-dire que tous les problèmes de voilure ne sont pas abordés. L'action du vent sur le bateau se traduit alors uniquement par des efforts statiques appliqués sur les coques ou sur les bras de liaison :

- effort de traction dans l'étai
- effort de traction sur le hauban au vent
- effort de compression du mât
- effort de dérive
- efforts de traction dans les écoutes de Grand-voile, Foc et Spinaker.

1.2 - Couplage fluide-structure

Les efforts dynamiques pris en compte sont ceux calculés pour le problème simplifié suivant :

a) Le bateau est assimilé à un ensemble de poutres tridimensionnelles et d'éléments indéformables liés entre eux.

Les éléments poutres déformables pourront être :

- les bras de liaisons
- les flotteurs
- le mât et son gréement

Les éléments indéformables pourront être :

- les flotteurs
- la nacelle si elle existe
- le mât.

La structure est analysée en prenant en compte l'hypothèse de petits mouvements, de petites déformations et d'élasticité linéaire pour les éléments déformables.

- b) Le bateau est placé dans un milieu fluide incompressible, non visqueux, siège d'un écoulement dérivant d'un potentiel des vitesses Φ, soumis à l'action d'une houle monochromatique unidirectionnelle. Ces hypothèses conduisent à déterminer des efforts hydrodynamiques qui sont de trois types :
 - les efforts dus à la houle incidente : efforts incidents
- les efforts dus à la présence du bateau dans le fluide qui perturbe le mouvement initial du fluide efforts de diffraction
 - les effets dus aux mouvements du bateau efforts de radiation.

Compte tenu des hypothèses retenues pour le fluide, ces trois effets sont supposés indépendants et on peut donc appliquer le principe de superposition.

Ces efforts sont calculés en utilisant le logiciel de calcul AQUADYN [1], [2], [3], [4] du Laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'E.N.S.M.

Ce logiciel conduit à la détermination de différentes quantités :

[KA] "matrice raideur hydrostatique"

[MA] "matrice masse ajoutée"

[BA] "matrice des coefficients d'amortissement"

{Fox} vecteur des forces généralisées d'excitation

La dimension de ces matrices est égale au nombre de flotteurs multiplié par le nombre de degré de liberté retenu pour exprimer le mouvement des flotteurs, c'est-à-dire par exemple :

- monocoque, flotteur supposé indéformable :

6 degrés de liberté : 3 translations - 3 rotations

la dimension des matrices est alors : 6

- catamaran avec coques indéformables :

 $2 \times 6 = 12.$

2 - ANALYSE DE LA STRUCTURE

2.1 - Elément de type solide rigide

Les mouvements de ces éléments sont caractérisés par le vecteur déplacement à 6 composantes d'un point P de référence

Le déplacement d'un point quelconque M s'obtenant avec l'hypothèse des petits mouvements par la relation

 $\vec{u}(M) = \vec{u}(P) + \vec{\theta} \Lambda \vec{P}M$

Ces éléments sont d'autre part caractérisés par leur matrice d'inertie.

2.2 - Elément poutre

Ces éléments déformables sont analysés par la méthode des éléments finis [5], [6] et dans le cas présent en utilisant des éléments finis de type poutre à deux noeuds de caractéristiques suivantes :

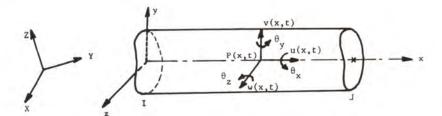


Figure 2

Pour un élément en matériau homogène, isotrope, de section constante, avec :

 $\{\bar{\delta}\}^t = \{u_i, v_i, w_i, \theta x_i, \theta y_i, \theta z_i, u_j, v_j, w_j, \theta x_j, \theta y_j, \theta z_j\}$ vecteur des déplacements nodaux dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, base locale de l'élément I.J.

 $\{\delta\}^{\dagger} = \{U_j, \ V_j, \ W_j,\}$ déplacements nodaux dans la base (\vec{X} , \vec{Y} , \vec{Z}), base générale de la structure assemblée.

ρ, E, G : masse volumique, module d'élasticité, module de glissement, caractéristiques

mécaniques du matériau.

 ℓ : longueur, S, I_y, I_z: aire de la section droite, moments quadratiques, caractéristiques géométriques de l'élément, J tel que GJ soit la rigidité de torsion.

Les matrices raideur et masse sont :

$$[k]_{6} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ [k_{12}]^{1} & k_{22} \end{bmatrix} \qquad [m]_{6} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ 1 & m_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{ES}{1} \\ \frac{12EI_{z}}{3} & \frac{6EI_{z}}{2} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{4EI_{z}}{1} \end{bmatrix} \qquad k_{12} = \begin{bmatrix} \frac{ES}{1} \\ \frac{12EI_{z}}{3} & \frac{6EI_{z}}{2} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{6EI_{z}}{2} \\ \frac{6EI_{z}}{2} & \frac{2EI_{z}}{1} \end{bmatrix}$$

$$k_{22} = \begin{bmatrix} \frac{ES}{1} \\ \frac{12EI_{z}}{3} & \frac{6EI_{z}}{2} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{2} \\ \frac{GJ}{2} & \frac{GJ}{2} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{2} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{2} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{2} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GEI_{z}}{2} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} & \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ}{1} \\ \frac{GJ$$

Les termes de [m] s'expriment en fonction de plo et pS.

2.3 - Caractéristiques équivalentes d'un élément poutre multicouches.

Pour utiliser les matrices précédentes, il faut déterminer des caractéristiques (ES), (El_y), (El_z), (GJ), (ρS), (ρI_o) d'une poutre de section homogène, équivalente à la poutre en matériau composite. Ces caractéristiques sont calculées en considérant que la poutre est de section à parois minces, constituée de différentes zones avec un nombre de couches et des matériaux différents.

La section est repérée dans un système d'axes Oyz parallèle au système principal d'inertie GYZ.

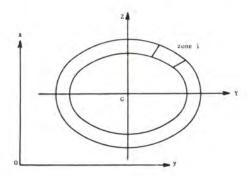


Figure 3

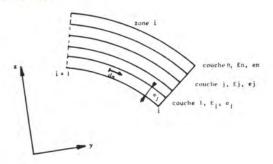
2.3.1 - Détermination de la position du centre de flexion G. Module de traction équivalent (ES)

La position de G est calculée par :

$$\mathbf{y}_{\mathbf{G}} = \frac{\sum\limits_{i}^{} \mathbf{y}_{i}^{} \; (\mathsf{ES})_{i}^{}}{\sum\limits_{i}^{} (\mathsf{ES})_{i}^{}} \qquad \qquad \mathbf{z}_{\mathbf{G}}^{} = \frac{\sum\limits_{i}^{} \mathbf{z}_{i}^{} \; (\mathsf{ES})_{i}^{}}{\sum\limits_{i}^{} (\mathsf{ES})_{i}^{}}$$

 $\Sigma(\text{ES})_i$ est le module de traction $(\text{ES})^*$ de la section droite.

Pour une zone i, nous avons :



$$(ES)_i \sum_{j=1}^n \int_i^{i+1} Ej \ ej \ ds \qquad \qquad s \ abscisse \ curviligne \ locale$$

$$et \quad y_i(ES)_i = \sum_{j=1}^n \int_i^{i+1} Ej \ ej \ y_j(s) \ ds \qquad , \qquad z_i(ES)_i = \sum_{j=1}^n \int_i^{i+1} Ej \ ej \ z_j(s) \ ds$$

La position de G étant ainsi déterminée, la section droite est alors repérée dans le système GYZ.

2.3.2 - Calcul des modules de flexion équivalents (Ely)*, (Elz)*

L'hypothèse de base pour ce calcul est l'hypothèse classique des poutres :

les sections droites restent planes.

Donc, la dilatation linéique longitudinale s'exprime par :

$$\varepsilon_{X} = a_{0} + a_{1}Y + a_{2}Z$$

et dans chaque couche k on obtient :

$$\sigma_k = E_k \epsilon_x$$

Les constantes a₀, a₁, a₂ sont déterminées en appliquant le principe d'équivalence, soit si N, M_y, M_z sont les efforts résultants (effort normal, moments de flexion) en G de la section droite alors :

$$N = \int_{S} \sum_{k} \sigma_{k} dS_{k} \qquad M_{Y} = \int_{S} \sum_{k} \sigma_{k} z_{k} dS \qquad M_{Z} = -\int_{S} \sum_{k} \sigma_{k} y_{k} dS$$

Soient trois équations :

$$N = a_0 I_1 + a_1 I_2 + a_3 I_3$$

$$M_Y = a_0 J_1 + a_1 J_2 + a_3 J_3$$

$$M_Z = -(a_0 K_1 + a_1 K_2 + a_3 K_3)$$

avec :

$$\begin{split} I_1 &= \int_S \sum_k \, E_k \, dS = (ES)^* \qquad J_3 = \int_S \sum_k \, E_k \, z^2 \, dS = (EI_y)^* \qquad K_2 = \int_S \sum_k \, E_k \, y^2 \, dS = (EI_z)^* \\ I_2 &= \int_S \sum_k \, E_k \, y \, dS = 0 \qquad \qquad \text{dans le repère principal} \\ I_3 &= \int_S \sum_k \, E_k \, z \, dS = 0 \qquad \qquad \text{dans le repère principal} \\ J_2 &= \int_S \sum_k \, E_k \, y \, z \, dS = 0 \qquad \qquad \text{"produit d'inertie" \'equivalent} \end{split}$$

$$K_3 = J_2 = K_1 = I_2 = J_1 = I_3 = 0$$

Donc:
$$a_0(ES)^* = N$$

 $a_2(El_Y)^* = M_Y$
 $a_1(El_Z)^* = -M_Z$

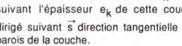
2.3.3 - Calcul du module de torsion équivalent (GJ)*

On applique à nouveau le principe d'équivalence, soit :

$$\label{eq:mass_mass_mass_mass_mass} \begin{split} \underset{t}{\longrightarrow} & \xrightarrow{} \int \underset{S}{\longrightarrow} \underset{T}{\longrightarrow} \underset{T}{\longrightarrow} \underset{T}{\longrightarrow} \underset{T}{\longrightarrow} \underset{S_k}{\longrightarrow} \underset{S_k}{\longrightarrow} \underset{T}{\longrightarrow} \underset{$$

τk : cisaillement dans la couche k, Sk surface de cette couche.

On suppose que le cisaillement tk est constant suivant l'épaisseur ek de cette couche et est dirigé suivant s direction tangentielle en M aux parois de la couche.

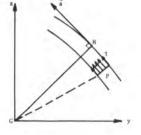


Donc:

$$M_{t} \overset{\longrightarrow}{\times} = \sum_{k} \int_{C_{k}} \overset{\longrightarrow}{\operatorname{GP}} \wedge \tau_{k} \overset{\longrightarrow}{e_{k}} \overset{\longrightarrow}{\operatorname{s}} dC$$

Ck : courbe fermée caractérisant la couche k

D'autre part dans chaque couche τk = Gk γk



 G_k : module de cisaillement transverse du matériau constituant la couche k, γ_k : distorsion angulaire.

Soit $\theta_{,x}$ la rotation unitaire de la section droite. On a donc la relation :

$$(GP)_k \theta_{,x} = \gamma$$
 P point moyen de la couche k, $\vec{\gamma}$ glissement suivant s'

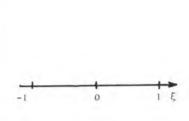
$$\mathsf{M}_{t} = \sum_{k} \left. \int_{C_{k}} \mathsf{GH}^{2} \, \mathsf{G}_{k} \, \mathsf{e}_{k} . \mathsf{dC.} \theta_{,x} \right.$$

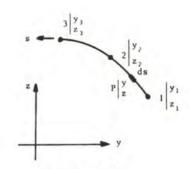
Et (GJ)* tel que
$$M_t = (GJ)* \theta_{.x}$$

Soit
$$(GJ)^* = \sum_{k} \int_{C_k} GH^2 (G_k e_k) dC = \sum_{k} G_k e_k \int_{C_k} GH^2 dC$$

2.4 - Programme de calcul des caractéristiques équivalentes

Le calcul des intégrales sur chaque zone, se fait numériquement par une méthode de Gauss en utilisant des éléments curvilignes à 3 noeuds.





Elément réel

Elément de référence

Définition de la géométrie

$$y = N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3$$

 $z = N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3$

avec:
$$N_1 = -\frac{1}{2} \xi (1 - \xi)$$
 $N_{1,\xi} = \frac{1}{2} (-1 + 2 \xi)$ $N_2 = 1 - \xi^2$ $N_{2,\xi} = -2 \xi$ $N_{3,\xi} = \frac{1}{2} (1 + 2 \xi)$

Donc

$$dy = \sum_{i=1}^{3} N_{i,\xi} y_i d\xi$$

$$dz = \sum_{i=1}^{3} N_{i,\xi} z_i d\xi \qquad \text{et} \qquad ds^2 = dy^2 + dz^2$$

Les coordonnées des noeuds dans la couche k, s'obtiennent à partir de celles des noeuds dans la couche (k - 1) en calculant :

$$(y_i)_k = (y_i)_{k-1} + (e_y)_{k-1}$$

 $(z_i)_k = (z_i)_{k-1} + (e_z)_{k-1}$

avec:
$$(e_y)_{k-1} = (e)_{k-1} \times ({}^{dy}/_{ds})_{k-1}$$

 $(e_z)_{k-1} = (e)_{k-1} \times ({}^{dz}/_{ds})_{k-1}$

(e)k : épaisseur de la couche k.

Le calcul des intégrales (ES)*, (El_v)* et (El_z)* est alors immédiat.

Pour calculer $\int_{Ck} \mathrm{GH^2} \, \mathrm{dC}$, on exprime GH sous la forme :

$$= |(y \mid +z \mid) \wedge (dy \mid +dz \mid)| \frac{1}{\sqrt{dy^2 + dz^2}} = \frac{1}{\sqrt{dy^2 + dz^2}} (y dz - z dy)$$

Les quantités (ρ S)* et (ρ I $_0$)* qui interviennent dans les matrices masses sont calculées dans ce module, en additionnant les (ρ S) et (ρ I $_0$) de chaque couche.

Nous disposons donc de matrices raideurs et masses élémentaires caractérisant le matériau composite.

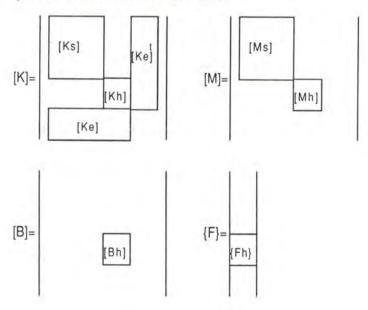
3 - RESOLUTION

L'assemblage des différentes quantités précédentes :

matrices masse, raideur, amortissement, conduit au système matriciel suivant, où les éléments de type solide rigide interviennent sous forme d'équations de liaison. [7]

$$[M] \{X\} + [B] \{X\} + [K]\{X\} = \{F\}$$

avec les configurations suivantes des différentes matrices



avec :

$$\{F\} = \{F_1\} \cos \omega t + \{F_2\} \sin \omega t$$

{Δ_f} : vecteur des déplacements des noeuds associés aux flotteurs

{λ} : multiplicateurs de Lagrange associés aux équations de liaison.

La solution est cherchée sous la forme :

$$\{X\} = \{X_1\} \cos \omega t + \{X_2\} \sin \omega t$$

et l'on obtient à partir de l'équation matricielle précédente

$$\begin{array}{l} - \ \omega^2 \ [M] \ (\{X_1\} \ \cos \ \omega t \ + \ \{X_2\} \ \sin \ \omega t) \ + \ \omega [B] \ (- \ \{X_1\} \ \sin \ \omega t \ + \ \{X_2\} \ \cos \ \omega t \ + \ \{K] \ (\{X_1\} \ \cos \ \omega t \ + \ \{X_2\} \ \sin \ \omega t) \ = \ \{F_1\} \ \cos \ \omega t \ + \ \{F_2\} \ \sin \ \omega t \end{array}$$

([K] -
$$\omega^2$$
 [M]) {X₁} + ω [B] {X₂} = {F₁} - ω [B] {X₁} + ([K] - ω^2 [M]) {X₂} = {F₂}

La résolution du système se ramène donc à la résolution du système d'équations linéaires

$$[A][U] = [Y]$$

$$[\mathsf{U}] = \begin{bmatrix} \{\mathsf{X}_1\} \\ \{\mathsf{X}_2\} \end{bmatrix} \qquad \qquad [\mathsf{Y}] = \begin{bmatrix} \{\mathsf{F}_1\} \\ \{\mathsf{F}_2\} \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [K] - \omega^2 & [M] & \omega & [B] \\ -\omega & [B] & [K] - \omega^2 & [M] \end{bmatrix}$$

La connaissance de $\{\Delta_s\}$ déplacements des noeuds de la structure permet de déterminer les efforts internes dans chaque élément de la structure.

4 - CONTRAINTES

En injectant les valeurs de N, Mf_y, Mf_z, Mt calculées par le module précédant dans le programme de calcul des caractéristiques équivalentes on peut, moyennant les hypothèses adoptées, calculer les contraintes normales et de cisaillement dans chaque couche d'une section droite quelconque.

4.1 - Contraintes normales

Les coefficients a_0 , a_1 , a_2 qui interviennent dans l'expression de ϵ sont maintenant connus en fonction de N, M_Y et M_Z . On peut donc calculer $\epsilon(P)$, P étant un point quelconque de la section droite ; ce point P appartenant à une couche de matériau de module E_k .

Donc:
$$\sigma(P) = E_k \epsilon(P)$$

Pratiquement on fixe les coordonnées de quelques points de calcul, les contraintes sont déterminées alors en ces points dans chaque couche de matériau.

4.2 - Contrainte de cisaillement due à Mt

(GJ) permet d'exprimer la rotation unitaire

$$\theta_{,X} = \frac{M_t}{GJ}$$
 d'où $\gamma(P) = GP \times \theta_{,X}$

et
$$\tau_k(P) = G_k \gamma_k(P)$$

cette contrainte de cisaillement est calculée aux mêmes points que les contraintes normales.

5 - APPLICATIONS

Ce logiciel a été utilisé pour vérifier et affiner le dimensionnement des bras de liaison des catamarans de course conçus et réalisés par G. Ollier :

- JET II, JET IV, JET V, JET Formule 40
- Crédit Agricole II
- 33 Export.

D'autre part le module de détermination de caractéristiques équivalentes et de calcul de contraintes dans les matériaux d'un multicouches a été utilisé pour vérifier le dimensionnement de mâts-aile en fibre de carbone, en particulier les mâts de JET IV et JET V.

^[1] GUEVEL P., DAUBISSE J.C., DELHOMMEAU G., 1978. Oscillations des corps flottants soumis aux actions de la houle, Bulletin A.T.M.A., Paris.

^[2] GUEVEL P., DAUBISSE J.C., DELHOMMEAU G., 1972-1982. Détermination de l'action de la houle sur une structure, problème de diffraction-radiation. Cours de la S.S.H.N.A., Nantes.

^[3] GUEVEL P., DAUBISSE J.C., DELHOMMEAU G., Aquadyn-code de calcul de diffraction-radiation. Section Hydrodynamique Navale, E.N.S.M. Nantes

^[4] **DELHOMMEAU G.,1987.** Les problèmes de diffraction-radiation et de résistance de vagues: étude théorique et résolution numérique par la méthode des singularités. Thèse de Doctorat ès Sciences

^[5] DUBIGEON S., 1986. Mécanique des milieux continus. Ed. Tech. et Doc. Lavoisier

^[7] DELHOMMEAU G., PESEUX B., QUEVAT J.P., 1980. Comportement d'un multicoque soumis à l'action de la houle. GAMI - Journées d'Automne 1980, Nantes.

REVUE DE QUELQUES UNITÉS EN CVR AYANT DÉPASSÉ DIX ANS D'AGE.
EBERSOLT M.⁽¹⁾

RESUME - Deux types de vedettes rapides professionnelles en CVR construites pendant les années 1974/1978 sont présentés. La manière dont elles ont été exploitées est examinée ainsi que les avaries de structure qu'elles ont subies. Il en est tiré un certain nombre de réflexions devant conduire la méthode de définition de l'échantillonnage.

ABSTRACT - Two types of professional motor launches, GRP build, which have been built between 1974-1978 are presented. The way they have been operated as well as their structural damages is staded. This survey lieds few considerations about scantling methods.

INTRODUCTION

Les composites verre-résine ont conquis sans problème le domaine de la construction nautique de plaisance. Bien plus, ce mode de construction a participé largement à l'épanouissement de cette industrie.

Par contre, pour ce qui concerne les unités à usage professionnel, il en a été tout autrement. Le milieu maritime étant par essence conservateur sur le plan technique, la mise sur le marché de petites unités construites en stratifié de verre polyester s'est heurtée à des difficultés considérables. En effet, vers les années 60/70, on ne connaissait qu'imparfaitement l'influence du temps sur les propriétés de ce matériau, contrairement au bois et à l'acier.

Ayant eu à vaincre les réticences de notre clientèle envers les composites, il est intéressant de jeter un regard sur ce que sont devenues des réalisations de première génération et de montrer qu'elles ne méritaient pas tant de suspicions.

⁽¹⁾ SARL Genimar-Tecimar, 75014 Paris

DEUX REALISATIONS

1. LES VEDETTES VOLTE 43

Ces unités de 13,30 M de long, conçues avec le concours de S. Langevin, ont été construites pour la surveillance côtière ; équipées de deux moteurs de 275 CV, elles ont atteint, aux essais, 23 Noeuds.

Les coques sont à bouchain vif sur toute leur longueur.

Deux de ces unités appartenant à la Marine Nationale sont en service au Port de Brest (Fig. 1)



Figure 1 Vedettes VOLTE 43
Longueur H.T. 13,30 M - Longueur Flottaison 12,00 M - Largeur 4,20 M

Actuellement, elles totalisent plus de 12.000 heures de service. Après leur recette, progressivement divers matériels ont été rapportés, ce qui a eu pour effet d'augmenter leur déplacement et de diminuer leur vitesse.

Pendant plusieurs années, ces vedettes ont été exploitées à l'allure maxima que le seuil d'inconfort des équipages pouvait tolérer.

Récemment, le nombre de tours maximum des moteurs a été diminué, ramené de 2100 T/min à 1800 T/min. Il a été observé des ruptures sur des varangues transversales situées sur l'avant au voisinage du bouchain. Des avaries de moindre importance ont été constatées sur l'arête du bouchain.

Ces avaries se sont espacées après diminution du nombre de tours des moteurs, comme précisé ci-dessus.

Chaque groupe propulsif est constitué par un moteur sur suspension souple entraînant une ligne d'arbre montée rigidement sur la coque. La liaison entre ces deux organes est réalisée par un accouplement élastique.

Sur une autre unité du même type, le montage entièrement rigide des groupes propulsifs a entraîné des mécomptes du fait d'une trop grande souplesse de la coque. Les carlingues des moteurs étaient insuffisamment prolongées en arrière du compartiment des moteurs.

2. LES VEDETTES DE PILOTAGE

Plus longs de un mêtre que les "VOLTE 43", ces engins sont équipés de moteurs de la même puissance, bien que leur déplacement soit un peu plus élevé. Leur vitesse aux essais, de ce fait, était plus faible, soit 21 Nocuds.

Par contre (Fig. 2), leurs formes sont arrondies sur l'avant, le bouchain vif n'apparaissant que sur la partie arrière.

Ces unités mises en service en 1978 totalisent 15 000 heures de marche. Compte tenu des astreintes du service, l'exploitation a été toujours conduite au maximum possible de la puissance, indépendamment des conditions de mer.

Il n'a pas été observé d'avaries importantes sur la coque. Contrairement aux réalisations précitées, il n'a pas été procédé par les Armateurs, à des adjonctions de matériels augmentant le déplacement.



Figure 2 Vedette de Pilotage Longueur H.T. 14,30 M - Longueur Flottaison 13,00 M - Largeur 4,20 M.

QUELQUES REFLEXIONS SUR L'ECHANTILLONNAGE

1. DEUX BASES DE COMPARAISON

Ces deux types d'unités, grâce à un temps de service étendu, représentent un remarquable banc d'essais pour la structure et le matériau. De plus, on peut estimer leurs performances identiques, soit 20 Noeuds par mer plate.

Au moment de la conception de l'échantillonnage, il n'existait, comme règles de construction, qu'un document du Lloyd's

Register.

Pour les Vedettes rapides, la zone la plus sensible est le bordé des fonds. Ces parties de la coque sont exposées à l'effet dynamique de la rencontre entre le flotteur et les vagues.

Les autres parties de la coque, murailles, pont superstruc-

tures, sont beaucoup moins sollicitées.

C'est donc sur cette zone particulière qu'il convient d'examiner le comportement de la structure. Le traité de Gibbs et Cox indique comment on détermine la composition du bordé en fonction d'une pression appliquée au bordé supposé encastré entre deux lisses et deux varangues contiguës.

Les deux types de Vedettes présentent des échantillonnages différents, celui des VOLTE 43 étant plus léger, soit 4.350 grammes par mètre carré, au lieu de 4.700 pour l'autre type. De même, l'entraxe des lisses du "VOLTE 43" est plus grand, de l'ordre de 500 millimètres, au lieu de 440 pour les Vedettes Pilotes.

Par contre, les éléments transversaux de raidissement sont très voisins, même hauteur d'âme, soit 100 m/m, même composi-tions des stratifiés, soit 2 unidirectionnels de 500 grammes par mètre carré et 3 mâts de 600 grammes par mètre carré.

Si l'on applique les méthodes de Gibbs et Cox au bordé de fond, on constate que, dans les deux cas, les compositions sont adéquates, avec une sécurité plus grande pour les Vedettes

Pilotes.

Par contre, si l'on examine les porques, on constate que celles-ci sont insuffisantes dans les deux cas.

Dans les deux exemples choisis, le bordé a résisté de manière satisfaisante. La méthode de Gibbs et Cox est donc satisfaisante.

Remarquons qu'elle s'applique d'une manière quelque peu simpliste (Fig. 3).

On se borne à considérer l'élément de bordé comme encastré au droit du flanc d'un raidisseur, et l'on prend un facteur de sécurité de 1,5, ce qui semble bien faible. La méthode retenue par le Bureau Veritas est plus élaborée car elle prend en compte la forme exacte du raidisseur qui supporte le bordé.

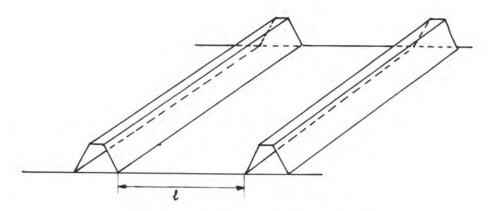


Figure 3 Schéma de chargement du Bordé

p = Pression totale, soit somme de la pression statique et de la pression dynamique

M = Moment de flexion par unité de largeur

1 = portée

 $M = \frac{p1^2}{12}$

Par contre, comme on l'a constaté, il n'en est pas de même pour les éléments de raidissement de l'avant. Les écarts de largeur de semelle ou d'entraxe ne sont pas suffisamment grands pour expliquer la persistance des avaries des "VOLTE 43".

Nous estimons que l'explication la plus plausible de cette anomalie réside dans la différence des formes, arrondies pour ce qui a donné satisfaction, à bouchains vifs pour ce qui s'est rompu en service.

2. QUELQUES ELEMENTS DETERMINANTS POUR L'ECHANTILLONNAGE

a) La vitesse effective de service

La vitesse à prendre en compte doit faire l'objet d'un examen approfondi.

De toutes manières, elle doit être inférieure à la vitesse

aux essais par beau temps.

La perte de vitesse doit être d'autant plus grande que l'engin est de faible taille. Une perte de 2 à 3 Noeuds est tout à fait normale pour les petites unités examinées. Un clapot de 1,4 mètre de creux, soit le dixième de la longueur, est déjà un élément perturbateur redoutable à 20 Noeuds. Par contre, pour un engin de 50 mètres de long, une vague de 5 mètres de creux est beaucoup moins probable.

b) Programme d'exploitation

La vocation de l'unité est un autre facteur à prendre en

Compte.
Une vedette militaire sera poussée au maximum de ses performances pendant un temps très court, alors qu'un engin civil

sera davantage ménagé, mais cumulera beaucoup plus d'heures de fonctionnement.

c) Configuration du flotteur

Les formes de la coque jouent un rôle important comme l'a prouvé l'expérience décrite. On conçoit aisément que les impacts dynamiques soient plus violents, pour une forme à bouchains vifs. Cette dernière rabat la lame d'embruns vers le bas. La comparaison entre le coefficient de trainée des deux corps de la figure 4 donne une idée des écarts que l'on peut attendre.

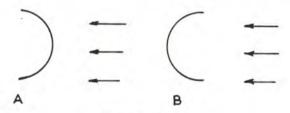


Figure 4
Coefficient de trainée de deux cylindres creux entre parois

d) Le critère de déformation

Dans les différents ouvrages ou réglements, il est mentionné que le déplacement du bordé sous l'effet de la pression doit rester inférieur à une certaine limite, par exemple, le centième de la portée. Dans les deux cas examinés, ce critère n'est pas respecté. L'expérience conduit donc à quelques réserves à ce sujet. Par contre, pour les parties apparentes, comme le bordé de muraille, les ponts, ce critère est à conserver car il peut être désagréable pour les utilisateurs de voir des vibrations apparaître sur les murailles, ou des ponts s'affaisser sous le poids des membres de l'équipage.

Par contre, le critère doit être conservé dans une certaine mesure pour les éléments de charpente. Une trop grande flexibilité de la charpente au droit de l'appareil moteur peut être un inconvénient pour l'appareil propulsif.

QUELQUES DETAILS PRATIQUES

1. LES CLOISONS

Beaucoup de cloisons sont réalisées au moyen d'une feuille de contre-plaqué revêtue sur ces deux faces d'une couche de complexe verre-résine. Nous avons pu constater un cas de flambage local du revêtement qui peut être imputé au mode d'assemblage des feuilles de contre-plaqué (Figure 5).



Figure 5 L'assemblage de deux rives verticales d'un contre-plaqué de doit se faire par languettes ou scarfage, sous peine de provoquer des flambages du revêtement.

2. LE COMPORTEMENT DES MATERIAUX SYNTHETIQUES

Qu'ils soient de nature cellulaire comme les expansés ou fibreux comme les stratifiés à base de tissus, ces matières ont une grande faculté de déformation. A titre d'exemple, un bordé sandwich peut s'écraser de manière visible lors d'un élinguage par sangle, l'opération terminée, tout se remet en place.

par sangle, l'opération terminée, tout se remet en place.

Sur une grande unité, à fort déplacement, nous avons vu
l'arrondi du retour de galbord se déformer de manière inquiétante à l'échouage sans que cela n'ait de conséquence fâcheuse.

3. LE DELAMINAGE

De l'avis des utilisateurs, aucune anomalie de cette espèce n'a été constatée sur les réalisations citées ni sur d'autres issues de notre chantier. La précaution de ponçer énergiquement lors de la reprise de la stratification a toujours été prise. Il nous a été fait état de graves problèmes dans d'autres constructions.

CONCLUSION

A l'époque où les deux exemples choisis ont été construits, il n'existait pas de réglement des Sociétés de Classification traitant des Vedettes rapides.

Depuis cette époque, des réglements ont été élaborés par le Bureau Véritas en particulier. La démarche utilisée est la même que celle de Gibbs et Cox. Confronté à la réalité, ce réglement conduit à des facteurs de sécurité peut être trop importants.

Il n'en reste pas moins que d'affiner les méthodes de calcul pour diminuer les coûts de construction sans sacrifier la sécurité est un oeuvre difficile qui reste à faire.

Une connaissance approfondie de la résistance à la fatigue est enfin indispensable pour établir une doctrine solide.

Par contre, les précautions à prendre lors de la mise en oeuvre de ces matériaux sont connues depuis longtemps, ce qui garantit une durée de vie satisfaisante pour les constructions en matériaux composites.

GIBBS & COX Marine Designe Manual (1960) LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING Provisional Rules for the construction of Reinforced Plastic Yachts (1964).

BUREAU VERITAS: Réglement pour la Construction et la Classification des Navires en polyester renforcé de fibres de verre (1979).
GIBBS & COX Marine Designe Manual (1960)

SESSION IV - CONSTRUCTION NAVALE MILITAIRE ET PRODUITS

Présidence: M. NIZERY, Directeur technique à l'IRCN.

M. BALQUET, Sous-direction Navire - bâtiment de surface STCAN.

Structural requirements for small craft

M. RYMILL

L'avenir des matériaux composites dans la construction navale.

R.F.PINZELLI, A. MARCHANT

Système expansible Epoxy de stratification

D. SAGLIER

Les profilés en matériaux composites et la construction navale

M. SIDORE

Construction navale militaire en composite. Conception de bâtiments antimines

M. BEAUGRAND

Structures et matériaux composites hautes performances pour applications sous-marines.

M. NEDELLEC

Vieillissement hydrolytique des polyesters

B. MONTAIGNE, P.A. HOARAU

Structures multicanaux

M. CARBONE

Matériaux composites sandwiches pour construction navale militaire

J. GERALD, J.Y. LELAN, V. OLIVIER

STRUCTURAL REQUIREMENTS FOR SMALL CRAFT

by R. J. Rymill, C. Eng. (i) (Fellow)

SUMMARY: A review of the considerations to be taken into account when designing a motor craft in Glass Reinforced Plastics (G.R.P.). Areas considered are:-

- (i) Design loadings;
- (ii) Selection of construction material;
- (iii) Structural analysis;

INTRODUCTION

As the manufacturing and operating costs for small craft are increasing, designers are striving to reduce the displacement of the craft whilst retaining the current comprehensive outfit arrangement. This practice can be achieved within the structural integrity standard required by Lloyd's Register Yacht and Small Craft Rules, providing the optimisation of the structure is carried out in a reasonable manner and takes into consideration the proposed service requirements in association with the type and size of craft involved.

The purpose of this paper is to review some of the considerations that are appropriate when selecting composite construction materials and the relevant structural analysis methods that may be used when designing to optimum weight and structural performance characteristics.

The paper discusses the design procedure, as indicated in Fig. 1, from the following aspects:-

- (a) The types of loading to be considered in the various areas of the hull, which are irrespective of the construction material to be used.
- (b) The selection of the construction material from their physical and mechanical properties.

⁽i) General Manager, Yacht and Small Craft Services, Lloyd's Register of Shipping, England.

- (c) The factors of safety and structural analysis methods applied by the Society.
- (d) The computerised structural analysis, for G.R.P., carried out by Lloyd's Register to verify compliance and/or equivalence with the structural integrity standard required by the Yacht and Small Craft Rules.

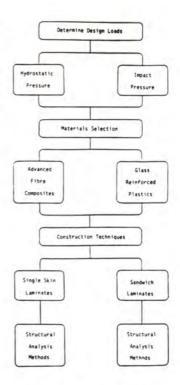


Fig. 1. Design Procedure

DESIGN LOADS

Design requirements for small craft are generally those corresponding to a local strength criteria and are therefore applicable irrespective of the type of construction material selected.

The principal local loadings which should be considered when designing small craft structures are as follows:-

- (i) Hydrostatic and Hydrodynamic loads;
- (ii) Impact pressures for high speed craft;
- (iii) Machinery and equipment loads;
 - (iv) Manoeuvring loads from docking, lifting and/or transporting;
 - (v) Cyclic and vibratory loads from propeller and machinery;

2.1 Hydrostatic and Hydrodynamic Loads

This type of loading is generated from:-

- (a) The steady hydrostatic pressure that acts on the hull in still water and can be related to the actual draft and trim of the craft;
- (b) The steady hydrodynamic pressure caused by the movement of the craft through the water;
- (c) The passage of waves past the craft which impose additional cyclic hydrostatic and hydrodynamic pressure;
- (d) The motion of the craft in heavy seas from pitching, heaving and rolling.

From the above considerations it can be seen that any load prediction method that takes proper account of all these factors and the random nature of wave formations in all the operational areas of the craft would be extremely complicated and very time consuming for general design applications. It is therefore suggested that a design head above the load waterline, incorporating the following aspects, be used:-

- (i) A hydrostatic head of sea water, in a function of the length of the craft, to represent the relative motion between the craft and the wave.
- (ii) A uniform hydrostatic head of sea water representing the normal slap of the sea or the dynamic pressure head resulting from the velocity of waves.

In the case of small craft these two components can be simplified and combined to give an equivalent pressure head above the deep waterline or deck edge as required.

For patrol and service craft the design heads in certain cases can be reduced to 2D and D for the bottom shell and side shell respectively. (i.e. Where D is the depth of craft in metres.)

2.2 Impact Pressures for High Speed Craft

The calculation of impact pressures for high speed craft is a subject that has already been very well documented in the papers indicated under references 1 to 11.

As the information and pressure determination procedures indicated in the above references are comprehensive, the impact pressure aspects have been limited to the following general points that should be taken into consideration when determining the impact pressures for a particular design of craft:-

- (i) The impact pressure loadings for high speed craft are considerably greater than the equivalent static pressure heads suggested in 2.1. However, the methods for scantling determination and safety factors used are different and, therefore, the scantling requirements for certain parts of the structure are still controlled by the basic equivalent hydrostatic design pressure requirements.
- (ii) The items which generally affect the level of impact pressure for a particular craft are:-
 - (a) Displacement and corresponding beam loading coefficient:
 - (b) Speed to length ratio i.e. $V/\sqrt{L_{Wl}}$;
 - (c) Operational wave height to craft length ratio;
 - (d) Longitudinal centre of gravity;
 - (e) The mean running buttock trim angle;
 - (f) Deadrise angle/hull form.
- (iii) Providing the items indicated in 2.2 (ii) are taken into consideration in the calculations for impact pressure, the results obtained will be very similar.

2.3 Machinery and Equipment Loads

As the loading on the hull structure from machinery and equipment are in the opposite direction and usually smaller than the equivalent hydrostatic design pressure, further direct calculations are generally not applicable in the afloat condition.

2.4 Manoeuvring Loads from Docking, Lifting and/or Transporting

The loads imposed on the hull structure from these considerations are generally self explanatory. However, it is recommended that special attention be given to the longitudinal and tranverse strength of the craft where machinery, equipment and/or fuel are located in an unsupported position.

2.5 Cyclic and Vibratory Loads from Propeller and Machinery

Irritating and sometimes destructive vibrations can be set up in the hull by the natural frequency of vibration of an item of structure being similar to the frequencies produced by the engine or propeller.

As the engines generally fitted in small craft are of the medium/high speed type, i.e. of a more exacting nature, and in a number of cases are fitted with or incorporate resilient mountings, it is usually only necessary to check the vibration characteristics of the hull plating in way of the stern. In this region it is suggested that the natural frequencies of the plating vibrating between the stiffening is at least 25% greater than the blade rate frequency at full power.

In addition to the natural frequency consideration the plating in the vicinity of the propeller(s) should be designed to have an appropriate safety factor from the fatigue aspect imposed by the simultaneously acting hydrostatic pressure head and the cyclic variations on this pressure caused by the propeller blades.

3. SELECTION OF CONSTRUCTION MATERIAL

The choice of construction material to be used is not necessarily made from a study of the material properties and is generally influenced by the:-

- (a) Prospective Owner's requirements:
- (b) Intended service and/or operating area of the craft;
- (c) Designer's and/or builder's experience in the use of a particular material;
- (d) Cost and time requirements to produce the craft.

All types of composite materials have advantages and limitations which have previously been documented. However, providing suitable consideration is given when selecting the particular grade of material to be used, a structure with adequate integrity can be produced.

3.1 Glass Reinforced Plastics

3.1.1 Material Considerations for G.R.P.

The material considerations generally applicable to glass reinforced plastics construction, using an unsaturated polyester resin system with "E" glass fibre reinforcements, are indicated in Fig. 2.

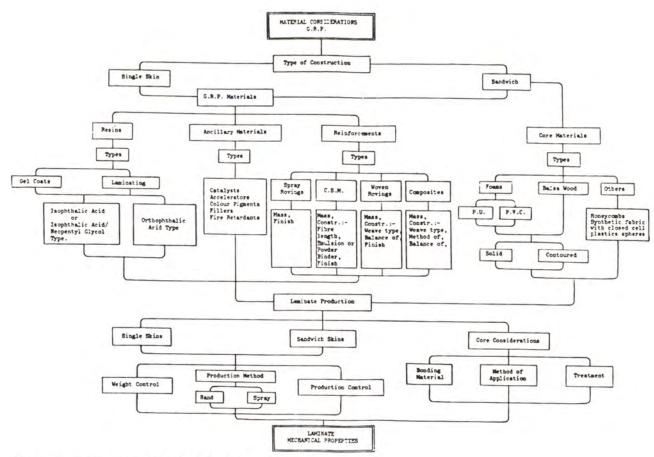


Fig. 2 MATERIAL CONSIDERATIONS FOR G.R.P.

When selecting the respective type of construction and individual materials, it is considered that the following aspects are relevant and, therefore, may assist the designer and/or builder in choosing the most appropriate materials:-

- (a) Type of Construction The choice between single skin and sandwich construction is generally dependant upon the designer's/builder's own experience with a particular type of construction. However, in certain circumstances, such as in the case of the one off type craft, the cost and practical aspects of building may dictate the actual type of construction to be used.
- (b) Type of Resin The types of resin chosen should meet the following requirements:-
 - (i) Cure at ambient temperature;
 - (ii) Be recommended by the manufacturer for marine application and have good abrasion resistance and ageing stability;
 - (iii) Be of the type indicated in Fig. 2;
 - (iv) Have adequate mechanical properties both as the cast resin and in the laminate;
 - (v) Have suitable maximum water absorption values;
 - (vi) Have a suitable minimum heat distortion temperature.

Resins approved by Lloyd's Register meet the above requirements. However, as is the case with any approval scheme, some resins have far better properties than the minimum approval values.

Where the actual selection of resin is influenced by cost, the laminating resin chosen is often of the orthophthalic type irrespective of the size of craft. Whereas the larger type of craft, which are generally moored afloat, could benefit from the enhanced weathering resistance and strength retention properties of an isophthalic resin.

When selecting an isophthalic resin a point to consider is whether the resin is based wholly on isophthalic acid as the unsaturated acid or whether the orthophthalic acid component of the resin has only been replaced in part by isophthalic acid. Where improved resistance to blistering is sought, both the gelcoat resin and the laminating resin used for the initial layers of the structural laminate should be based on the iso form of phthalic acid alone, preferably incorporating neopentyl glycol in the resin formulation. This resistance can be further improved by employing a glass fibre tissue behind the gelcoat and the use of a powder bound, as opposed to an emulsion bound, chopped strand mat for the initial reinforcement.

(c) Type of Reinforcements - The designer's choice of reinforcements is generally dictated by the type of reinforcements used by the particular moulder. However, as the construction, balance, binder, weave type and/or finish of the reinforcement can alter the design properties of the laminate being produced, the selection of reinforcements can make a considerable difference in the total laminate weight for the same load carrying capabilities.

In view of this variation in the properties of the laminate being produced, it is considered that the following points may assist the designer in selecting the most appropriate reinforcements:-

- (i) When using spray rovings, the finish applied to the roving can affect the performance of the cutter mechanism as well as the properties of the laminates produced - (i.e. Rovings with a chrome finish are easier to chop but have poorer wet strength retention properties).
- (ii) Powder bound CSM reinforcements are generally more difficult to wet-out than the emulsion bound type. However, they improve the blistering resistance of the laminate when used as the gelcoat back up and subsequent initial reinforcements.

(Note:- To avoid as far as possible entrapment of air voids next to the gelcoat, the gelcoat back up reinforcement should be of the lightweight CSM powder bound type).

- (iii) The basic plain weave woven roving can be obtained in a balanced and unbalanced construction and should, therefore, be used in the appropriate orientation to utilise the available properties.
- (iv) The satin weave woven rovings have better draperbility and generally higher strength values at the proportionality limit than the plain weave materials.
 - (v) The biaxial and triaxial crossplied roving reinforcements, i.e. those reinforcements manufactured from two and three
 layers of uni-directional rovings generally laid in the
 00/900 or +450/-450 and 450/00/-450 respectively.

 The 00/900 reinforcements exhibit even higher tensile
 strength values at the proportional limit than the woven
 rovings as there is an absence of the "kink stress" aspect
 which is associated with straightening out of the weave.
 However, the flexural properties are generally less than the
 conventional woven rovings.
 - (vi) Uni-directional rovings produce very high tensile strengths and are therefore, selected for incorporation into the face of stiffeners. However, it should be noted that, to obtain the benefit of the tensile properties, the continuity of the reinforcement in the chosen direction must be maintained.

- (vii) Composite reinforcements are generally a combination of one of the types of roving reinforcement in association with a CSM reinforcement. The method of linking the two types of reinforcement is generally by stitching or by use of a chemical binder. It is generally noted that the mechanical properties of laminates manufactured from this type of reinforcement are less than those for laminates manufactured from similar individual reinforcements.
- (d) Types and Quantities of Ancillary Materials The types and quantities of these materials incorporated in the resin system are to be those recommended by the resin manufacturer for the particular application.

Lloyd's Register's requirements for these materials are indicated in the Yacht and Small Craft Rules. However, the following points may clarify a number of aspects:-

- (i) When pre-accelerated resins are used, the variation in the pot life of the resin is generally achieved by modifying the catalyst content. This procedure is acceptable, provided the quantity of resin being mixed is such that the overall minimum level of 1% catalyst can be satisfactorily measured. However, this problem can be reduced by using one of the recommended alternative formulations requiring a larger quantity of catalyst.
- (ii) The quantity of pigment and pigment paste can vary considerably to give the same quantity of pigment solids, and in this respect a pigment paste might consist of the pigment solids dispersed in 50% by weight of compatible polyester resin.
- (iii) Where fire retardant additives are incorporated in structural laminates, the initial and long term weathering and strength retention characteristics of the laminate will generally be reduced.
- (e) Types of Core Materials The generally accepted structural core materials for marine application are end grain balsa wood or polyvinyl chloride (PVC) foams, followed by polyurethane (PU) foams and the synthetic fabric incorporating closed cell plastics spheres.

As the mechanical properties of both balsa wood and foam core materials are proportional to their densities, the higher the density of the particular type of material chosen the higher the mechanical properties of that material.

The choice of core material is generally one of the other items dictated by the designer's/builder's own experience with the particular core material. However, it is considered that the following points should be highlighted:-

- (i) The practical aspects of obtaining a satisfactory void free bond on large production panels of rigid foam or balsa to a laminate skin are difficult and, therefore, the majority of materials used are of the contourable nature. This method is satisfactory however, the manufacturing technique by which the contourability of the sheet is produced can affect the published mechanical properties for the rigid sheet material i.e. certain types of material are grooved as opposed to being cut and, therefore, if these grooves are not filled, the shear properties of the material will be reduced and, in the case of damage to the outer skin, water could permeate throughout the hull.
- (ii) The strength retention of balsa cored laminates are superior to foam cored laminates at elevated temperatures, which is a particularly important aspect for deck application.
- (iii) PVC foams are susceptible to styrene monomer attack from the laminating and/or bonding resin prior to cure and, therefore, certain precautions pertaining to the behaviour and property of the foam, when in contact with polyester resin, must be taken.
 - (iv) The density of PVC foam cores used in a structural laminate should generally be not less than 60 kg/m^3 .
 - (v) Polyurethane foams suffer from shear fatigue and, therefore, the density of the foam cores used in structural laminates should generally be not less than 96 kg/m³.
- (f) Laminate Production Now assuming that the designer/builder has selected the most appropriate materials for a particular construction, it is worth noting that all the materials will have been produced by the material manufacturer to a specification or published data and, if they are used correctly, laminates with the predicted characteristics will be produced.

The laminate production process is, therefore, a very important stage because if the moulding environment, moulds equipment and procedures are not satisfactory, the quality and, therefore, the anticipated design properties will not always be achieved.

The quality of laminates is thus directly related to environment and production and it is recommended that the following simple quality control considerations be established:-

- (i) Workshop requirements and construction processes for all laminating should comply with the minimum criteria of some recognised body, i.e. a Classification Society, a Federation of the Plastics Industry or a Trade Association.
- (ii) Standing instructions covering the working environment, construction process, weight control, production control and equipment/tools to be used should be established and a copy prominently displayed on a notice board so that every employee is left in no doubt of his specific responsibility for producing a good product.

It should be noted that failure to comply with many of the above requirements may jeopardise the integrity of the G.R.P. structure.

When sandwich laminates are being produced the following core application aspects are very relevant:-

- (iii) To ensure an even pressure on the core during the initial cure of the bond between the core material and laminate skin, a vacuum bag should be used wherever practicable.
 - (iv) When the vacuum bag method is not employed a metal roller or the more efficient vibrator roller should be used to consolidate the core material to ensure that the resin or bonding material penetrates and/or fills the joint between each individual blocks of contoured core material.
 - (v) A point that has been particularly noted with a balsa core is that if the core is allowed to bridge an undulation in the laminate surface, a local build up of styrene monomer can occur, which can locally inhibit gelation and cure of the resin in that area.

3.1.2 Laminate Mechanical Properties

The general laminate mechanical property considerations are indicated in Fig. 3. However, the actual mechanical properties of a laminate can vary considerably depending upon the type of resin and reinforcement selected and the method and conditions under which it is manufactured. The designer, therefore, has the choice of whether to obtain his design properties from representative test laminates, or assume minimum values for design purposes.

Lloyd's Register Small Craft Rules assume that unless individual test results are obtained for a laminate, the basic mechanical properties of laminates are proportional to a function of nominal glass content and, for scantling calculation purposes, correspond to those determined from the following formulae:-

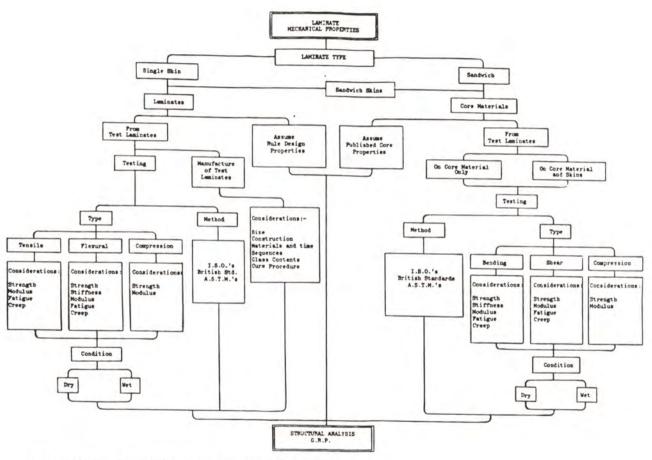


Fig.3 LAMINATE MECHANICAL PROPERTY CONSIDERATIONS.

	1		2
N	/m	m	4

Ultimate tensile strength	1278G2-510G _C +123
T17-	(270 4 75) 203

Tensile
$$(37G_C-4,75)10^3$$
 modulus

Compressive modulus
$$(40G_c-6)10^3$$

Shear modulus

Shear modulus
$$(1,7G_C+2,24)10^3$$

Where G_C = the nominal glass content of the laminate, by weight (excluding the gelcoat) determined from the formula:-

$$G_{C} = \frac{2,56}{\frac{3072T}{W} + 1,36}$$

W = total weight of glass reinforcement in the laminate, in g/m^2

T = nominal laminate thickness, in mm, obtained from the summation of the thicknesses, t, of each layer of reinforcement in the laminate calculated as follows:-

$$t = \frac{w}{3072} \left(\frac{2,56}{g_C} - 1,36 \right) mm$$

w = weight of layer of reinforcement, in q/m²

gc = glass content of layer, by weight

NOTE:- As far as Lloyd's Register is concerned, "glass content" means the ratio of glass weight to total laminate weight, presented in a decimal fraction. The foregoing design values can generally be assumed when using a combination of any of the resins and CSM and/or woven roving reinforcements approved by Lloyd's Register, as one of the requirements for approval is that test laminates manufactured with the material must have certain minimum mechanical properties which are greater that those assumed for design purposes. However, special attention has to be given to composite materials when consolidating at fibre contents greater than approximately 0.44.

Correction factors in the Yacht and Small Craft Rules will take into consideration the actual and/or above assumed flexural and tensile properties. However, the explanation of the question asked by a number of people as to why the laminate reinforcement weight correction factor, $K_{\mbox{\scriptsize W}}$, is greater than 1,0 for glass contents greater than 0,3, when the laminate has increased flexural properties, is as follows:-

- (i) The reinforcement weight correction factor of $K_W=(2,8G_C+0,16)$ is only applicable when the actual flexural properties and overall glass content of the laminate have not been determined from tests.
- (ii) As the requirements for a laminate with increased flexural strength are that the laminate must have the same bending moment resistance as the laminate in the Rule reference material at a glass content of 0,3, the reduction in laminate thickness resulting from the increase in glass content, must also be taken into consideration.
- (iii) These two aspects are taken into consideration in the following fomula, where the first portion increases the reinforcement weight to maintain a constant thickness laminate corresponding to that at a glass content of 0,3, and the portion under the square root sign corrects for the increase in mechanical properties:-

$$K_{W} = \frac{5,27G_{C}}{1.88-G_{C}} \sqrt{\frac{152}{502G_{C}^{2} + 106,8}}$$

(iv) Now if K_W is plotted against glass content, G_C , it will be seen that the line produced is almost identical to that represented by the line $K_W=(2,8G_C+0,16)$

A point to note when assuming design mechanical properties is that the safety factors to be used in association with them must take into consideration the wet strength retention and strength retention at elevated temperatures.

It is considered that the following wet strength retention aspects are relevant and should be taken into consideration by the designer.

- (a) Wet strength retention can be considered as a function of the water absorption properties of the selected resin and, therefore, the lower the water absorption value for the predicted period of immersion, the higher the strength retention.
- (b) The life of a laminate is generally dependent upon:-
 - (i) The creep aspect, which will result in stress rupture after a certain period of time depending upon the percentage of ultimate stress applied
 - (ii) The fatigue aspect, which will result in stress failure after a certain number of cycles depending upon the mean stress, stress amplitude and rate of cycling, see Fig. 4.

The strength retention at elevated temperature is a function of the heat distortion temperature of the cast resin and, therefore, the higher the heat distortion temperature, the higher the strength retention. But generally, it should be noted that, the higher the heat distortion temperature - the higher the water absorption.

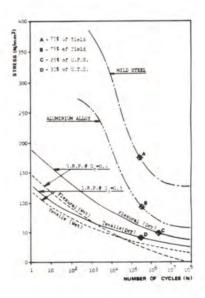


Fig. 4. Typical S-N Curves

3.2. Advanced Fibre Composites

It is often said that Lloyd's Register's Yacht & Small Craft Rules prohibit the use of laminates reinforced with advanced fibres such as carbon and Kevlar. However, this is not the case and by consideration of the physical and mechanical properties of a proposed laminate, it is possible to consider any combination of reinforcement and matrix against the Rule requirements.

Although the Rules are based on a required weight of glass reinforcement, consolidated in a polyester matrix, it can be seen from section 3.1.2 (iii) that for single skin laminates this equates to a simple thickness requirement for a laminate with known flexural properties. Therefore, if the thickness of the proposed laminate can be determined accurately, along with its flexural strength (either by testing or predicted from known data), the proposed laminate can be compared directly with the Rule requirement at a glass content of 0.3 as shown below:

The thickness of a reinforced plastic laminate can be determined from the following general formula:

$$t = \frac{Wf\left(\frac{SGf}{Fc} - (SGf - SGm)\right)}{1000 \times SGf \times SGm}$$

Where:-

t = Consolidated thickness [mm]

Wf = Dry weight of the reinforcement per unit area [g/m²]

SGf = Specific gravity of the dry reinforcement

SGm = Specific gravity of the matrix

Fc = Fibre content by weight (see section 3.1.2)

For a liminate containing only one type of reinforcement, the above equation could be applied to the overall reinforcement weight, although for the more common situation where a laminate contains a range of reinforcements the above equation would be applied to each layer, making allowance for its respective SG and fibre content, with the overall laminate thickness being determined by a simple summation of the individual layer thicknesses. This approach can also be used to determine the thickness of hybrid reinforcements (where two or more types of reinforcements are combined into a single layer; i.e. Kevlar/Glass) by considering the weights per unit area of the constituent reinforcements.

STRUCTURAL ANALYSIS

4.1 Structural Analysis of G.R.P.

The structural analysis procedures and respective safety factors used by Lloyd's Register for calculating the scantlings of G.R.P. motor craft hulls are indicated in Fig. 5, and the actual requirements contained in Part 2, Chapter 2 of the Yacht and Small Craft Rules are based on the following:-

- (i) Hull reinforcement weight: is that determined from an equivalent hydrostatic pressure with a factor of safety of 4 on the flexural strength from a bending moment condition of w12/10 or that corresponding to the impact pressure with a factor of safety of 1.5 on the flexural strength for the above bending moment condition, whichever is the greater.
- (ii) Hull stiffener modulus: is that determined from an equivalent hydrostatic pressure with a factor of safety of 3 on the ultimate tensile strength from simple beam theory with a bending moment condition of w12 upon 8, 10 or 12, depending upon the type of stiffener, or that corresponding to the impact pressure with a factor of safety of 1.5 on the ultimate tensile strength for the above bending theory and moment condition, whichever is the greater.

When applying the above Rule requirements Lloyd's Register also incorporate an "equivalence" procedure, based on the same pressures and factors of safety, to take into consideration the convex curvature or boundary bonding affect on the load carrying capabilities of the laminates.

When calculating the scantlings by direct calculation it is considered that the following points are relevant and, therefore, may assist the designer and/or builder in determining minimum scantlings:-

- (a) Irrespective of the type of craft, the structure should be capable of withstanding the basic equivalent hydrostatic heads with their corresponding safety factors.
- (b) Where panels, of large aspect ratio, incorporate convex curvature, the load carrying capabilities from a compressive buckling consideration may result in reduced laminate requirements.

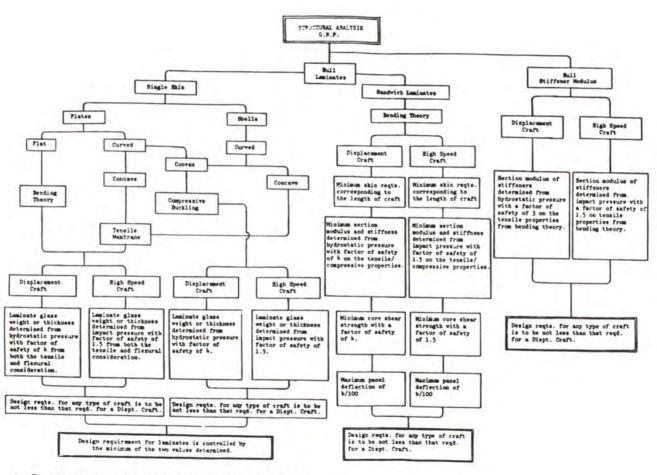


Fig. 5 STRUCTURAL ANALYSIS PROCEDURES FOR G.R.P.

COMPUTERISED STRUCTURAL ANALYSIS

To assist their Surveyors in the plan approval procedure, and to enable builders and designers to consider the various permutations of scantlings available within the structural requirements published in the Yacht and Small Craft Rules, Lloyd's Register have developed computer programs for the structural analysis of G.R.P.

5.1. G.R.P. Construction

The computerised structural analysis procedure for G.R.P. single skin and sandwich constructions, incorporating an equivalence option for convex curvature and boundary bonding for single skin, are as follows: -

.. 5.2. .. -LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING-.. G.R.P MOTOR CRAFT-MAIN HULL SCANTLINGS .. BUILDERS: EXAMPLE TYPE/HOS: 18m Hotor Craft 001 DATE : 26 JAN 88 INITIALS: J.E.C REPORT HO .: YSC EXAMPLE ------

Guidance Information The scantings presented in this report for the above craft are one or more of the permutations of the structural arrangements that would meet the scantlings required by the Society's Yacht and Small Craft Rules This information, although derived from the Society's Rules does not Infer approval of the scantlings by the Society and, has been provided for the general guidance in developing the respective construction of drawings required to be submitted for approval by the Society. When developing the arrangement of structure the following should be complied with: -

(a) Where the actual size of a panel exceeds the maximum size indicated in the report for a particular laminate construction, the laminate reinforcement weight is to be corrected in direct proportion to the panel breadths. (b) Where the actual spacing and/or span of a stiffener exceeds that indicated in the report the section modulus is to be corrected in direct proportion for stiffener spacing and/or in proportion to span squared for stiffener span.

The remaining requirements of the Society's Rules for Glass Reinforced Plastics construction are to be complied with

(c) Lloyd's Register of Shipping 1983. 69 Oxford St, Southampton, England, SO1 1BL.

HULL DATA:

LOA= 18.00 m LWL= 15.30 m L = 16.65 m D . 2.60 m B = 5.00 m STD. DEPTH = 2.85 m V = 30.0 Knots V//LWL= 7.67 RULE BASIC FRAME SPACING . 433 mm DISPLACEMENT: STD. ACTUAL (Tonnes) -----24.57 33.00

LAMINATE RULE VALUES ------

LAMINATES: - Weight in grammes/m2 at Glass Content of 8.3 and Panel AR>2

	WEIGHT	W.HIH	PAHEL BR (mm)
BOTTOM	4697 6878	2735 3305	433.3 433.3
KEEL	7082	HIDTH(mm)=	716

STIFFEHING RULE VALUES

STIFFENING: - Modulus in cm3 at one metre span (But not less than L cm3)

BOTTOM: -	2	Z.HIN	SPACING (mm)	
1 2022200000000	~~~~			
LONGITUDINALS	70.69	43,53	433.3	
TRAIISVERSES	159.32	95.70	433.3	
TRANS. WEBS	244.48	146.86	1000.0	
SIDE:-				
LONGITUDINALS	52.00	32.81	433.3	
TRANSVERSES	50.24	30.18		
TRANS. HEBS	115.97		433.3	
	113,97	69.66	1000.0	

SIDE SHELL

	HE1GH		G.C	THICKHESS (HH)	EQUIV. HT AT GC=0.3(G/H2)	EXT) (H-MH2)	
1	399	CSM	8.286	0.74	312	5832	
2	450	CSH	0.333	0.93	412	7571	
3	899	HR	0.500	0.98	513	13750	
4	450	CSM	0.333	0.93	412	7571	
5	899	HR	0.500	0.98	513	13750	
č	450	CSH	0.333	0.93	412	7571	
7	899	HR	0.500	0.98	513	13750	
9	450	CSM	0.333	0.93	412	7571	
9	899	HR	8.500	0.98	513	13750	
	5338		0.412	8.37	4011	10506	

TOTAL LAMINATE HEIGHT = 12854 G/H2

RESIN HEIGHT (CURED) . 7554 G/M2

KEEL

	HEIGHT		G.C	THICKHESS (HH)	GC=0.3(G/M2)	ELT)
1	399	CSH	0.286	0.74	312	5832
5	458	CSM	8.333	0.93	412	7571
3	898	HR	0.500	0.98	513	13750
4	450	CSM	0.333	0.93	412	7571
5	899	HR	0.500	0.98	513	13750
6	450	CSM	0.333	0.93	412	7571
7	888	HR	8.500	0.98	513	13750
8	450	CSM	0.333	0.93	412	7571
	880	HR	0.500	0.98	513	13750
10	450	CSM	0.333	0.93	412	7571
1.1	888	HR	0.500	0.98	513	13750
12	450	CSH	8.333	8.93	412	7571
13	898	HR	0.500	8.98	513	13750
14	450	CSH	0.333	0.93	412	7571
15	898	HR	0.500	8.98	513	13750
16	450	CSM	0.333	0.93	412	7571
	9500		0,412	15.01	7197	10493

TOTAL LAMINATE WEIGHT = 23868 G/M2

RESIN HEIGHT (CURED) = 13560 G-M2

Report No.YSC EMARLE

BOTTOH SHELL

	HEIGHT (G/H2)	G.C	THICKNESS (MM)	GC=0.3(G/H2)	E(T) (H/HH2)
1	390 C	SH 0.286	0.74	312	5832
2	450 C	SH 0.333	0.93	412	7571
3	898 MI	R 0.500	8.98	513	13758
4	450 C	SM 0.333	0.93	412	7571
5	890 M	R 0.500	0.98	513	13750
6	450 C	SM 0.333	0.93	412	7571
7	898 H	R 0.500	0.98	513	13750
8	450 C	SM 0.333	0.93	412	7571
9	899 H	R 0.500	0.98	513	13758
10	450 C	SM 0.333	0.93	412	7571
11	899 H	R 0.500	0.98	513	13758
12	450 C	SH 0.333	0.93	412	7571
13	899 H	R 0.500	0.98	513	13750
	7808	0.416	12 18	5021	10/25

TOTAL LAMINATE HEIGHT = 18757 G-H2

RESIN HEIGHT (CURED) = 10957 G-H2

BY 1200 mm RR=

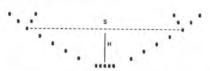
RULE LE	AHIHATE			ACTUAL VALUES
				ACTUAL VALUES
		AT GC=0.300	AT GC= 0.412	AT GC = 0.412

HEIGHT	(G/H2)	4878	6413	5300
THK	(mm)	11.39	10.12	8.37
W. MIN	(G/M2)	2735	3595	5300
T.MIH	(mm)	6.39	5.67	8.37

NOTE: laminate is deficient by: 867g/m2 at GC= 0.300 1113g/m2 at GC= 0.412

A constant section laminate is suitable for the following ma. panel sizes (panel AR correction factor, FP = 0.54 + 0.23AR) AR>2 372 mm, AR=1 483 mm, 1(AR(2 372/FP mm

CONVEX CURVATURE OPTION ------



PAHEL BREADTH(wm): 450 PANEL H(mm): 18.00 H S 0.04000

PAHEL REF: SIDE SHELL CURVED PAREL

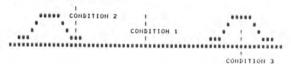
PAHEL REF: BASIC (FORWARD) PANEL DIMENSIONS: 450 mm 1200 MM AR=

RULE LE	AMINATE			ACTUAL VALUES
		AT GC=0.300	AT GC= 0.412	AT GC= 0.412
		***********	**********	
WEIGHT	(G/H2)	4723	5784	5300
THK	(mm)	11.03	9.13	8.37
M. HIH	(G/H2)	2735	3595	5300
T. MIN	(mm)	6.39	5 67	0 37

HOTE: laminate is deficient by: 7129 m2 at GC= 8.300 4849 'm2 at GC= 0.412 Report No. YSC EMANFLE

BOUNDARY BONDING OPTION ------

PANEL REF: SIDE SHELL PANEL BYBONDED PANEL REF: BASIC (FORWARD)



CONDITION 1: CLEAR OF BOUNDARY BONDING --------

PANEL DIMENSIONS: 450 mm BY 1200 mm HR= 2.67

RULE L	AMINATE			ACTUAL VALUES

		AT GC=0.300	AT GC= 0.412	AT GC= 0.412
0.2020	100			
	(G/M2)	4211	5042	5300
THK	(mm)	9.83	7.96	8.37
H.HIN	(G/H2)	2735	3595	5300
T.MIN	(mm)	6.39	5.67	8.37

Report No. YSC ELAMPLE

CONDITION 2: IN MAY OF BOUNDARY BONDING

SIDE SHELL LAMINATE IN WAY OF STIFFENER BONDING IS:-

BASIC SIDE SHELL PLUS STIFFENER BOILDING

SIDE SHELL

	(G/M2)	G.C	THICKNESS (HM)	GC=0.3(G/M2)	E(T) (H/HH2)	
1	300 CSM		0.74	312	5832	
2	450 CSH	0.333	0.93	412	7571	
3	890 HR	0.500	0.98	513	13750	
4	458 CSM	0.333	0.93	412	7571	
5	838 HR	0.500	0.98	513	13750	
6	450 CSM	0.333	0.93	412	7571	
7	888 MR	0.500	8.98	513	13750	
6 7 8 9	450 CSH	0.333	0.93	412	7571	
	838 HR	0.500	0.98	513	13750	
B	450 CSH	0.333	0.93	412	7571	stiff bond
2 B	888 HR	0.500	0.98	513	13750	Stiff bond
3 B	450 CSM	0.333	0.93	412		Stiff bond
1 B	898 MR	0.500	0.98	513	13750	
	7830	0.416	12.18	5861	10636	
	. 000	0.410	12.10	2001	10030	

PANEL DIMENSIONS: 450 mm BY 1200 mm AR= 2.67

RULE L	AMINATE			ACTUAL VALUES	
		AT GC=0.300	AT GC= 0.416	AT GC= 0.416	
				and the second second second	
	(G/M2)	5951	7152	7800	
THK	(mm)	13.90	11.17	12.18	
H. MIH	(G/H2)	2735	3622	7800	
T. MIN	(mag)	6.39	5.65	12.18	

Report No.YSC EMANFLE
COMDITION 3: UNDER BASE OF STIFFEHER FOR 550 (hb) SPACING
Breadth under stiffener bases 108 (hm)

SIDE SHELL LAMINATE IN WAY OF STIFFENER IS:-

SIDE SHELL

BASIC SIDE SHELL

	WEIGH (G/M2		G.C	THICKHESS (MH)	EQUIV. HT AT	ELT:
		-				The line ?
1	398	CSM	9.286	0.74	312	5832
2	458	CSH	0.333	0.93	412	7571
3	898	WR	0.500	0.98	513	13750
4	458	CSM	0.333	0.93	412.	7571
5	898	HR	0.508	8.98	513	13750
6	458	CSM	0.333	0.93	412	7571
7	898	WR	0.500	0.98	513	13750
8	458	CSH	0.333	0.93	412	7571
9	888	HR	0.500	0.98	513	13750

	5388		9.412	8 37	4011	10502

PANEL DIMENSIONS: 450 mm BY 1200 mm AR= 2.6

RULE L	AHIHATE				ACTUAL	VALUES
		AT GC=0.300	AT GC= 0,412		AT GC=	0.412
WEIGHT	(G/M2)	4085	5375		536	10
THK	(mm)	9.54	8.48		3.1	37
H. MIN	(G/H2)	2735	3595			
				*	536	
T.MIN	(mm)	6.39	5.67		8.3	37
HOTE:	lasinate	is deficient by:	73g/m2 at G	C= 0	. 300	

75g/m2 at GC= 0.412

The laminate reinforced by the boundary bonding is suitable for the following maximum panel sizes (Panel RR correction factor, FP=8.54+0.23AR)

CONDITION 1: (Clear of boundary bonding consideration)

AR>2 473 mm, AR=1 614 mm, 1(AR(2 473/FP mm CONDITION 2:(In way of boundary bonding consideration)

AR:2 491 mm, AR=1 637 mm, 1cAR:2 491 FP mm CONDITION 3:(Under base of stiffener consideration :

AR>2 444 mm, AR=1 576 mm, 14AR42 444/FP mm

254

PAHEL DIMENSIONS: 445 mm BY 1200 mm AR=

RULE L	MINATE				ACTUAL VALUES
		AT GC=0.300	AT GC= 0.416		AT GC= 8.416
WEIGHT		7064	9356		7800
THK	(mm)	16.50	14.61		12.18
W. HIH	(G/H2)	3305	4377		7800
1.ntu	(mm)	7.72	6.83	*	12.18

NOTE: laminate is deficient by: 12839/m2 at GC= 0.300 1556g/42 at GC= 0.416

A constant section laminate is suitable for the following was panel sizes (panel AR correction factor, FP = 0.54 + 0.23AR) AR>2 371 mm, AR=1 482 mm, 1(AR(2 371/FP mm

.....

BOUNDARY BONDING OPTION *****************

PANEL REF: BOTTOM SHELL PANEL BYBONDED PANEL REF: BASIC (FORWARD)



CONDITION 1: CLEAR OF BOUNDARY BONDING

PANEL DIMENSIONS: 445 mm BY 1200 mm AR= 2.70

RULE LA	MIHATE				ACTUAL VALUES

		AT GC=0.300	AT GC= 0.416		AT GC= 0.416
WEIGHT	(G/H2)	6097	7328		7800
THK	(mm)	14.24	11.44	*	12.13
W.HIH.	(G/H2)	3305	4377		7800
T.MIN	(mm)	7.72	6.83		12.18

CONDITION 2: IN WAY OF BOUNDARY BONDING ------

BOTTOM SHELL LAMINATE IN WAY OF STIFFENER BONDING IS:-

BASIC BOTTOM SHELL PLUS STIFFEHER BOHDING

BOTTOM SHELL ------

				2002 2000 200	Particular Control			
	MEIGHT		G.C	THICKNESS	EQUIV, HT AT	E(T)		
	(G/M2))		(HH)	GC=0.3(G/M2)	CN-MM2	1	
1	300	CSM	0.286	0.74	312	5832		
2	450	CSM	0.333	0.93	412	7571		
3	899	HR	8.500	0.98	513	13750		
4	458	CSM	0.333		412	7571		
5	800	WR	0.500	0.98	513	13750		
6	450	CSM	8.333	8.93	412	7571		
7	899	HR	8.500	0.98	51-8	13750		
8	458	CSM	0.333	0.93		7571		
9	888	WR	8.500	0.98	513	13750		
10	450	CSH	0.333			7571		
11	800	WR	0.500	0.98	513	13750		
12	450	CSM	0.333		412	7571		
13	888	WR	8.500		513	13750		
1 B	458	CSM	0.333		412		Stiff	bond
2B	888	HR	0.500			13750		
3 B	458	CSM	0.333		412		Stiff	
4 B		HR		0.98	513	13750		
5B		CSM	0.333		412		ISTILL	
	14452				714	1311	231111	DONG
	10750		8.413	16.92	8122	10542		

PANEL	DIMENSIONS	445	B.V	1200	OP-	2.20

RULE LI	AMINATE			ACTUAL VALUES	
		AT GC=0.300	AT GC= 0.413	AT GC= 0.413	

WEIGHT	(G/M2)	8617	10329	10750	
THK	(mm)	20.12	16.25	16.92	
	24000				
W.HIH	(G/H2)	3395	4353	10750	
T. HIH	(mm)	7.72	6.85	16.92	

255

Pepart Ho, YSC EMAHFLE

CONDITION 3: UNDER BOSE OF STIFFEHER FOR 545 (Ma) SPACING

Breadth under stiffener base= 100 (mm)

BOTTOM SHELL LAMINATE IN MAY OF STIFFENER IS:-

BASIC BOTTOM SHELL

BOTTOM SHELL

		G.C	THICKNESS	EQUIV. WT AT GC=0.3(G/M2)	E(T)
300	CSM	0.286	0.74	312	5832
450	CSM	0.333	0.93	412	7571
888	WR	0.500	0.98	513	13750
458	CSM	0.333	0.93	412	7571
899	WR	0.500	0.98	513	13750
450	CSM	0.333	0.93	412	7571
890	NR	8.500	0.98	513	13750
450	CSM	0.333	0.93	412	7571
899	HR	0.500	0.98	513	13750
450	CSM	0.333	0.93	412	7571
899	WR	0.500	0.98	513	13750
450	CSM	0.333	0.93	412	7571
899	WR:	0.500	0.98	513	13750
2888		0.416	12.18	5861	10636
	300 450 800 450 800 450 800 450 800 450 800 450	450 CSM 830 WR 450 CSM 800 WR 450 CSM 830 WR 450 CSM 830 WR 450 CSM 830 WR 450 CSM 830 WR	300 CSM 8.286 450 CSM 8.333 830 MR 9.500 450 CSM 8.333 830 MR 9.500	300 CSM 0.286 0.74 450 CSM 0.333 0.93 800 MR 0.500 0.98 450 CSM 0.333 0.93 800 MR 0.500 0.98	300 CSM 0.266 0.74 312 450 CSM 0.353 0.93 412 800 MR 0.500 0.99 513 450 CSM 0.350 0.99 513 450 CSM 0.350 0.99 513 450 CSM 0.350 0.96 513 450 CSM 0.350 0.96 513 450 CSM 0.350 0.98 513 450 CSM 0.350 0.98 513 450 CSM 0.353 0.93 412 800 MR 0.500 0.98 513 450 CSM 0.333 0.93 412 800 MR 0.500 0.99 513 450 CSM 0.333 0.93 412 800 MR 0.500 0.98 513 450 CSM 0.333 0.93 412 800 MR 0.500 0.98 513 800 MR 0.500 0.98 513

PANEL DIMENSIONS: 445 mm BY 1200 mm AP= 2.70

RULE L	ANINATE				ACTUAL VALUES
		AT GC=0.300	AT GC= 0.416		AT GC= 0,416
HE I GHT	(G/H2)	5910 13.80	7832 12.23	:	7800 12.18
H.HIH T.HIH	(G/H2) (hm)	3305 7.72	4377 6.83	:	7600 12.18

NOTE: laminate is deficient by: 49g/m2 at GC= 0.300 32g/m2 at GC= 0.416

The laminate reinforced by the boundary bonding is suitable for the following maximum panel sizes. (Panel RR correction factor, FP=0.54+8.23AR)

COMBITION 1: (Clear of boundary bonding consideration)

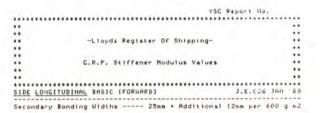
AR>2 474 mm, AR=1 615 mm, 1<AR<2 474/FP mm
CONDITION 2:(In way of boundary bonding consideration >

AR>2 463 mm, AR=1 601 mm, 1<AR<2 463/FP mm
CONDITION 3: (Under base of stiffener consideration)

FRAME REF: SIDE LONGITUDINAL FRAME -BASIC (FORWARD)

SPAN: 1.200 m SPACING: 550 mm

RULE MODULUS 95.05 CH3 RULE MIN 48.64 CH3





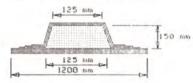
TOP	LAMINA	TION	HEB	LAMINA	TIOH	SHELL LI	HOTTAHINA
Ht	Gc	Thk	Иt	Gc	Thk	Ht !	Gc Thk
g/m2)	(tets)	(g/m2	>	(mm)	(g/m2)	Chille
800	0.500	0.979	808	0.500	8.979		
450	0.333	0.927	458	0.333	8.927		
600	0.540	0.660	808	0.500	0.979		
600	0.540	0.660	450	0.333	0.927		
600	0.540	0.660					
800	0.500	0.979					
450	0.333	0.927					
4300	0.466	5.793	2500	0.424	3.812	5300 0.	412 8.374
WE CCS	M)= 35	04.771	Ht (CSM)	= 21	32.820	Ht (CSH)=	4330.065
EKH/m	m2)=	14265	E(N/mm2	>=	10921	E(N/mm2)=	1049

						Max	A110	wabl	e Heb	Depth .	132.97	74 mm
*****		****	****		****	*****	****			*******	*******	****
	AREA		64.4	48	m2		INER	TIA		640.116	5 cm4	
	Heigh	t per	met	re t	run =	2.	283	Kg/m	(St	iffener	only)	
	LEVER	-1Y	66.	063	mm		MODU	LUS	21=	96.895	5 cm3	
	LEVER						MODU	LUS	22=	277.06	3 cm3	
		****	****		****		****		*****	******	******	****
		MINI	MUM S	TIFE	FENER	HODE	ULUS	-	96.8	95 cm3		
						****		****	****	******	******	

RULE MODULUS 476.27 CH3 RULE MIN 63,59 CH3

YSC Report No. ** -Lloyds Register Of Shipping-.. G.R.P. Stiffener Hodulus Values ** SIDE TRANSVERSE HEB BASIC (FORHARD) J.E.C 26 JAH 88 Primary Bonding Widths ----- 50mm + Additional 25mm per 600 g m2

COPE Motorial FORM
Density = 32.8 Kg/m3
Non-Structural Stiffener Core



TOP	LAMINA	TIOH	HEB	LANTHA	TIOH	SHELL LA	HOLLEHIM
Ht	Gc	Thk	Ht	GC	Thk	Nt C	ic This
g- m2)	(feli)	(9 142)	(hti)	(g-h2)	f helic 2
800	0.500	0.979	800	0.500	0.979		
450	0.333	0.927	450	0.333	8.927		
600	0.540	0.660	450	0.333	0.927	1	
600	0.540	0.660	800	0.500	0.979		
600	8.540	0.660	450	0.333	0.927		
450	0.333	0.927	0				
600	0.540	0.660	10			1	
600	0.540	8.660				1	
600	0.540	0.660					
888	0.500	0.979					
450	0.333	0.927					
6550	0.471	8.701	2950	0.407	4.739	5300 0.4	112 8.374
ut (CS	M) = 53	08.211	NA CCSMO	a 25	64.309	He (CSH)=	4330.065
CH/m	m2)=	15034	Eitt. tota 2)=	10297	E(II/mm2)=	10494

															Ma	×	A	11	04	16	ы	•	14	eb	D	ep	t	h	#	1	71	. 8	49	Bu hi
******				**	**				*									• •												٠.				
	AR	EA			1	22	5.	. 4	8	2	¢	6.2	2				11	IE	RT	1	A	=			67	42		71	5	c	ni-4			
	We	igh	nt	p	-	-	to e	e t	r	e	r	ur	, ,			5.	9	16	K	q.	/ 84			St	16	fe	n	er		ori	14	.)		
							-										-			Ξ.			-				-		-			-		4
	LE	VER	5	Y1	=	1	31	5.	6	36	5	th fo					M	an	UL	U	ŝ	21			4	93	3.	48	0	c	tu 3	3		
	LE	VER	2	Y2			31	3.	4	3	,	80.80					M	ac	UL	U	S	22	=		22	15	5.	18	4	c	m3	3		
******				**																	• •							**				**		
			H	111	11	HU	11	8	T	IF	F	EH	IER	2	NO	DU	IL	JS				45	3	. 4	80		to	3						
******								٠.	+					٠.																	٠.			

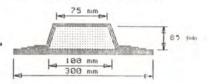
FRAME REF: BOTTOM LONGITUDINAL FRAME -BASIC (FORWARD)

SPAH: 1.200 m SPACING: 545 mm

RULE MODULUS 123.86 CH3 RULE MIN 54.75 CH3

YSC Report No. -Lloyds Register Of Shipping-.. G.R.P. Stiffener Hodulus Values BOTTOM LONGITUDINAL BASIC (FORNARD) J.E.C26 JAH '88 ------Secondary Bonding Widths ---- 25mm + Additional 12mm per 600 g/m2

COPE Material - FORM
Density = 32.0 Kg/m3
Non-Structural Stiffener Core



TOP LAHIHAT		EB LAMINA	HOLTE	SHELL LAHI	HOTTON
	lik H	t Gc	Thk	Ht Gc	Thik
(g-m2)	(mm) (g/	112)	(mm)	(g/m2)	Challed
450 0.333	3.927 45	0.333	8.927	8	
800 0.500	3.979 80	0.500	0.979		
450 0.333	3.927 45	0 0.333	0.927		
600 0.540	0.660 80	0 8.500	0.979		
600 0.540	3.660 45		0.927		
600 0.540	3.660	2 124.116	7.5		
800 0.500	9.979				
458 0.333	3.927				
4750 0.449	5.728 295	0 0,407	4.739	7800 0,416	12.172
Ht(CSM)= 393	5.260 Ht (CS	M)= 2	564.309	Ht (CSM)= 6	331.16
E(H/mm2)=	13364 E(N/m	m2)=	10297	E(H/mm2)=	10642

Max Allowable Heb Depth = 171.849 mm AREA = 90.113 cm2 INERTIA = 1021.204 cm4 Height per metre run = 2.979 Kg/m (Stiffener only) LEVER Y1= 79.390 mm MODULUS 21= 128.631 cm3 LEVER Y2= 24.502 mm MODULUS Z2= 416.785 cm3 MINIMUM STIFFENER MODULUS = 128.631 cm3 ..

SPAH: 2.000 m SPAC 1115: 1200 mm

AT CENTRE: PULE MODULUS 1173.48 CH3 PULE HIN 176.23 CH3 AT SIDE : RULE MODULUS 556.64 CM3 PULE MIH 83.59 CH3

BOTTOM TRANSVERSE WEB (FORWARD) @ KEEL J.E.C 26 JAH 88 . -----

Primary Bonding Hidths ----- 50mm + Additional 25mm per 600 g/m2

COPE Material-FORM Density = 32.0 kg/m3 Mon-Structural Stiffener Core

**

125 mm 65 MM 125 mm 1200 mm

TOP LANIMATION HER LANDHATION SHELL LANINATION Ht Ge This Ge Thk Ht Ge Thi (g-m2) Chete 2 (g/m2) (mits) (g/h/2) Chita 800 0.500 0.979 800 0.500 0.979 450 0.333 0.927 450 0.333 0.927 600 0.540 0.660 600 0.333 1.236 600 0.540 0.660 600 0.333 1.236 600 0.333 1.236 800 0.500 0.979 600 0.540 0.660 450 0.333 0.927 600 0.540 0.660 600 0.333 1.236 600 0.540 0.660 600 0.540 0.660 800 0.500 0.979 450 0.333 0.927 7300 0.451 10.246 3700 0.389 6.284 7800 0.416 12,172 M1 (CSM) = 6484.677 Wt(CSM)= 3283.457 Ht (CSH) = 6331.169 E(11/mm2)= 13924 E(H/mm2)= 9651 E / 11 - tota 2 1 = 10642

HOTE! - Insufficient Heb Thickness - Min. Pule Value = 6.922 Min. Submitted Value = 6.284 mm Max Allowable Web Depth = 236,508 mm

AREA = 339.414 cm2 INERTIA = 27401.545 cm4 Height per metre run = 10.252 Kg/m (Stiffener only) *****-----LEVER Y1= 237.878 mm MODULUS 21= 1151.917 cm3 LEVER Y2= 49.540 mm MODULUS 22= 5531.218 cm3

MINIMUM STIFFENER MODULUS = 1151.917 cm3

YSC Peport Ho. -Lloyds Register Of Shipping-.. G.P.P. Stiffener Modulus Values BOTTOM TRANSVERSE HEB (FORWARD) @ CHINE

Primary Bonding Widths ----- 50mm + Additional 25mm per 600 g m2

COPE Material-FORM

..

..

* *

Density = 32.0 Kg/m3 Non-Structural Stiffener Cora

	125 mm	
		150 1
	125 film (=	
<!--)</del-->	1200 mm	-{:e

	LAMINE			LAMINA	HOLTE	SHELL LANII	HOLLAN
Ht	Gc	Thk	Ht.	Gc	Thk	Hr Gc	This
(g/m2	.)	(mm)	(g/m2)	(mm)	(g:h2)	fin to 3
800	0.500	0.979	800	0.500	0.979		
450	0.333	0.927	450	0.333	0.927		
600	0.540	0.660	600	0.333	1.236		
600	0.548	0.660	600	0.333	1.236	1	
600	0.333	1.236	808	0.500	0.979	1	
600	0.540	0.660	459	0.333	0.927		
600	0.540	0.660					
600	0.333	1.236	1			1	
600	0.540	0.660				1	
600	0.540	0.660				1	
800	0.500	0.979				1	
450	0.333	0.927					
7300	0.451	10.246	3700	0.389	6.284	7800 0,416	12.172
	M)= 64		Wt (CSH)	= 32	83.457	Ht (CSN)= 63	31, 163
E (N/m	m2)=	13924	E(N/mm2) =	9651	E(N/mm2)=	10642

Max Allowable Web Depth = 236.508 mm

..

..

AREA = 317.799 cm2 INERTIA = 8170.132 cm4 Height per metre run = 7.605 Kg/m (Stiffener only) LEVER Y1= 144.542 mm MODULUS Z1= 565.242 cm3 LEVER Y2= 27.875 mm MODULUS Z2= 2930.942 cm3

MINIMUM STIFFENER MODULUS = 565.242 cm3

5.3.

```
..
..
..
     -LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING-
..
..
      G.R.P. SANDUICH PANELS
..
..
..
BUILDERS:
                    EXAMPLE
TYPE/NOS:
                  18m Hotor Craft 002
DATE :
                      26 JAN '88
INITIALS:
                           J.E.C
Hull Data :
                     HOTOR CRAFT
     Loa= 18.00 m
                   Lul= 15.30 m
     L = 16.65 m
                    D . 2.60 m
     B = 5.00 m Std. Depth = 2.85 m
     V = 30.0 Knots
                  V//Lul = 7.67
     Rule Basic Frame Spacing = 433 mm
     Displacement:
                 Std.
                        Actual
      (Tonnes)
```

24.57

33.00

RULE MINIMUM SKIN LAMINATES

Rule Hin Skin Height (g/m2) @ GC=8.3

			-
PANEL TYPE	OUTER SKIN	INNER SKIN	
Bottom Shell	2644	1983	
Side Shell	2188	1641	
Deck, C'Roof & D'kHouse	1358	1012	
Deckhouse Front	1687	1265	

AUTER OF		EUI		
OUTER SE	In			
Height	G.C.	Thickness	Et.	Ec.
(g-m2)	_	(to to)	(11/ to to 2)	CH total 2
330 CSM	0.286	8.74	5832	5440
450 CSH	0.333	0.93	7571	7320
BOO WR	0.500	0.98	13750	14000
600 CSM	0.333	1.24	7571	7320
450 CSH	0.333	0.93	7571	7320
2600	0.363	4.81	8698	8538
Equivalent	CSM Height/A	rea (@ G.C. = 0	.30 1 -	2307 g m
Outer Skin	Total Cured	Height/Area		7.153 kg/m2
SAUDUICH		Mate	rial : EIID G	PAIN BALSA
Thickness =	19.00 mm	Density	* 15	2.000 Fg H
Shear Hodul	us = 134.50	Nom2 Shear S	trength =	
				2.490 H mm
Effective W	eb Tensile H	odulus		
INNER SK		odulus		
*********	<u>IH</u>	Thickness		0.000 II tetr.
INNER SK	<u>IH</u>			6.000 II toto.
INNER SK	<u>IH</u>	Thickness	£t.	0.000 II tetr.

(g/m2)	G.C.	Thickness (mm)	Et.	Ec.
450 CSM	0.333	0.93	7571	7320
450 CSM	0.333	0.93	7571	7320
800 HR	0.500	0.98	13750	14000
300 CSH	0.333	0.62	7571	7320
2000	0.384	3.45	9471	9374
Equivalent	CSH Height	area (0 G.C. = (3.30 > =	1711 g/m2
Inner Skin	Total Cured	Weight/Area		5,204 Kg m2

SANDHICH	PROPERTIES	:
----------	------------	---

LAMINATE STIFFHESS - E! Per c	w Hidth =	9759 Hcm4/mm2
LAMINATE MODULUS/Cm WIDTH : (Relative to CSM @ 0.3 G.C.)	About Outer Skin About Inner Skin	
TOTAL SAUDHICH WEIGHT/AREA		15.245 Fg/m2

SUBHITTED PAHEL :		SIDE	PANEL-	PASTO	LFOF	HARD1
Panel Dimensions:	850 mm >	1200	No dia		AF.	1.41
Rule Single Skin Height	(GC=0.30)=	7968 gri	n2 1/	nter:	2735	9 42

RULE HIHIHUH	SKIN LAMINAT	ES	ACTUAL VALU	ES.
OUTER SKIN	GC= 0.300	GC= 0.363	GC= 0.363	
H(min) g/m2 T(min) mm	2188 5,11	2466 4.56	2600 4,81	Stin Is Hot Deficient
INNER SKIN	GC= 0.300	GC= 0.384	GC= 0.384	
W(min) g/m2 T(min) mm	1641 3.83	1918 3.31	2000 3.45	Skin Is (10) Deficient
RULE REQUIRES	SANDHICH PR	OPERTIES	ACTUAL VALUE	5
MIN MODULUS F	ER Cm HIDTH	(cm3)= 0.889	1.057	06
MIH EI PER C	HIDTH (Non	4/882)= 6020	9759	01
MIN CORE SHEE	R STRENGTH	H/mm2)= 1.679	2.490	01
MAX PANEL DEF	LECTION (mm)	8.50	4.94	01

MAXIMUM ALLOWABLE PANEL BREADTHS :

AR=1.25	AR=1.5	AF=1.75	AR>=2
1376	1203	1061	942
969	906	851	802
1043	976	916	863
1976	1028	980	932
	1376 969 1843	1376 1203 969 906 1043 976	1376 1203 1061 969 906 851 1843 976 916

SANDHICH CORE DEFICIENCIES :

... SANDWICH CORE IS NOT DEFICIENT

Ec.

(H'ma2)

5440

7320

7328

7320

9657

2748 g/m2

8.303 kg/m2

= 152.000 Kg/m2

= 0.000 H/mm2

Ec.

(H/mm2)

7320

7320

7320

9871

14000

14000

14000

BUILDERS PROPOSED BOTTOM SHELL

Et.

(H/mm2)

5832

7571

13750

7571

13750

7571

9733

Material : END GRAIN BALSA

Et.

(H/mm2)

7571

7571

13750

7571

9191

SUBMITTED SANDHICH :

G.C.

0.286

0.333

0.500

0.333

0.500

0.333

0.391

Outer Skin Total Cured Height/Area

Equivalent CSH Height/Area (9 G.C. = 0.38) =

Thickness

(mm)

8.74

0.93

0.98

0.93

9.98

0.93

5.48

Shear Modulus = 134.58 N/mm2 Shear Strength = 2.498 N/mm2

Thickness

(mm)

8.93

0.93

0.98

1.24

4.87

Density

OUTER SKIH

(g'm2)

300 CSM

450 CSM

888 HR

458 CSM

458 CSM

SANDHICH CORE :

THNER SKIN

Height

(g-m2)

450 CSM

458 CSM

600 CSM

888 HR

2300

Thickness = 25.00 mm

Effective Heb Tensile Modulus

G.C.

0.333

0.333

0.500

0.333

0.377

888 WR

3250

Equivalent CSM Height/Area (# G.C. = 0.30)		. 1	994	9/1
Inner Skin Total Cured Height/Area		6.	105	Kg/n
SANDHICH PROPERTIES :		_	-	_
LAMINATE STIFFHESS - EI Per cm Hidth =	1	9074	Her	4/86
LAMINATE HODULUS/Cm WIDTH : About Outer Si	in 2	21 -	2.0	90 cm
(Relative to CSM @ 0.3 G.C.) About Inner SI	in 2	22 =	1.5	56 CM
TOTAL SANDWICH HEIGHT/AREA		18.	208	Kark

Yac Peport Ho.

SUBMITTED PANEL :	BOTTOM PANEL - BASIC	[FORHARD]
Panel Dimensions:	850 mm × 1200 mm	AR= 1.41
Rule Single Skin Height	(GC=0.30)= 11668 g/m2 Nemin)=	3305 g 42

KOLE HINIHUM	SKIN LAMINAT	ES	ACTUAL VALUE	E 9
OUTER SKIN	GC= 0.300	GC= 0.391	GC= 0.391	
W(min) g/m2	2014	2122	*******	
T(min) mm	6.17	3128 5.27		Skin la He
rearity mm	0.17	3+21	5.48	Deficient
INNER SKIN	GC= 8.300	GC= 0.377	GC= 0.377	
W(min) g/m2			2300	Skin 11 ffor
T(min) mm	4.63	4.05	4.07	Deficient
RULE REQUIRES	SANDWICH PR	OPERTIES	ACTUAL VALUES	
MIN HODULUS F	ER Cm HIDTH	(cm3)= 1.544	1.559	06:
MIN EI PER CH	HIDTH CHEM	4/mm2)= 13780	19074	01.
MIN EI PER CM		4/mm2)= 13780 H/mm2)= 2.266	2,490	01

	AR=1	AR=1.25	AR=1.5	AR=1.75	AR : = 2
Core Shear Strength	1172	1020	892	786	693
Min. Modulus Per Cm	959	893	835	784	739
Stiffness El Per Cm	1864	990	926	869	819
Panel Deflection	1153	1103	1052	1001	950
SANDHICH CORE DEFICIENC	IES :				

MAXIMUM ALLOWABLE PANEL BREADTHS :

... SANDWICH CORE IS NOT DEFICIENT

FRAME REF: SIDE LONGITUDINAL FRAME -BASIC (FOPHAPD)

SPAN: 1.200 m SPACING: 1000 mm

RULE HODULUS 172.62 CH3 RULE HIN 73.89 CH3

YSC Report No.

-Lloyds Register Of Shipping
G.R.P. Stiffener Hodulus Values

SIDE LONGITUDINAL BASIC (FORMARD)

J.E.C26 JAN '88

Secondary Bonding Hidths ---- 25mm + Additional 12mm per 600 g/m2

CORE Material FORM

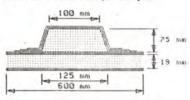
Density = 32.0 Kg/m3

Non-Structural Stiffener Core

SANDHICH Material - BALSA

Density = 152.0 Kg/m3

Non-Structural Sandwich Core



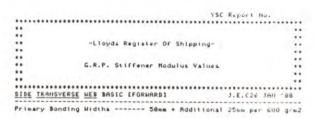
..

TOP	LAHINA	TION	WEB	LAMINA	HOIT	SHELL L	HOLTBHINA
Wt	Gc	Thk	Wt	Gc	Thk	Ht	Gc Thk
(g/h2)	(ha)	(g/m2	>	(mm)	(g/m2)	(fets)
880	0.500	8.979	800	0.500	0.979	2000 0.	384 3.455
450	0.333	8.927	450	0.333	0.927	SAUDHICH C	ORE 19.000
600	0.540	0.660	800	0.500	0.979	2600 0.	363 4.818
600	0.540	0.660	450	8.333	0.927	7 1 2 1	
600	0.540	0.660	450	0.333	8.927		
600	0.540	0.660					
800	0.500	0.979				1	
450	0.333	0.927					
450	0.333	0.927					
5350	8.457	7.380	2950	0.407	4.739	4600 0.	372 27.273
HICES	H) = 53	108.211	HL (CSH)	. 25	64.309	Ht (CSH)#	4206.281
E(H/m	m2) m	14020	E(H/mm2) =	10297	E(H/mm2)=	900

 FRAME REF: SIDE TRANS. HEB FRAME -BASIC (FORMARD)

SPAN: 1.850 m SPACING: 1200 mm

RULE MODULUS 476.27 CM3 RULE MIN 83.59 CM3



CORE Material FORM

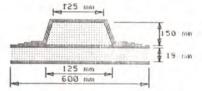
Density = 32.8 Kg/m3

Non-Structural Stiffener Core

SANDHICH Material BALSA

Density = 152.8 Kg/m3

Non-Structural Sandwich Core



	LAMINA		HEB		HOIT	SHELL LANT	HOTTON
Ht	Gc	Thk	Ht	Gc	Thk	Ht Gc	Thk
(g/#2)	(mm)	{g/m2)	(mm)	(g/m2)	(dela)
800	0.500	0.979	800	0.500	0.979	2000 0.384	3.455
450	8.333	0.927	450	0.333	0.927	SANDHICH COPE	19,000
600	0.540	0.660	888	0.500	0.979	2600 0.363	4.818
600	8.540	0.660	450	0.333	0.927	5,500	
600	8.540	0.660	450	0.333	0.927		
600	0.540	0.660				1	
600	0.540	0.660				1	
880	8.500	0.979				1	
450	0.333	0.927	1			1	
450	0.333	0.927					
5950	0.464	8.041	2950	0.407	4.739	4600 0.372	27.273
Ht (CS	H)= 48	50.894	Ht (CSM)	= 25	64.309	Ht (CSM) = 4:	206.231
E (N/m	w2)=	14569	E(H/mm2	>=	10297	E(11/mm2)=	9008

 FRAME REF: BOTTOM LONGITUDINAL FRAME -BASIC (FORHARD)

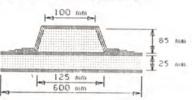
SPAN: 1.200 m SPACING: 1909 NM

RULE MODULUS 234.97 CM3 RULE MIN 100.47 CH3

BOTTOM LONGITUDINAL BASIC (FORHARD) J.E.C26 JHN '88 _____

Secondary Bonding Hidths ---- 25mm + Additional 12mm per 600 g m2

CORE Material- FORM Density = 32.0 Kg/m3 Non-Structural Stiffener Core SANDWICH Material - BALSA Density = 152.0 Kg/m3 Non-Structural Sandwich Core



	LAMINA	HOLL	HEB	LAMINA	TION	SHELL LAM	NATION
Ht	Gc	Thk	Ht	Gc	Thk	Ht Gc	Thk
(g ≥2)	(mm)	(g/m2)	(deta)	(g/m2)	Ctole
800	0.500	0.979	800	0.500	0.979	2300 0.377	4.066
450	0.333	0.927	450	0.333	0.927	SHIDWICH COPE	
600	0.540	0.660	808	0.500	0.979	3250 0.391	
600	0.540	0.660	458	0.333	0.927	2007	
600	0.540	0.660	450	0.333	0.927		
600	0.540	0.660					
800	0.500	0.979					
450	0.333	8.927					
450	0.333	0.927					
5350	0.457	7.380	2950	0.407	4.739	5550 0.335	34.554
HICES	M)= 43	50.894	Wt (CSM)	25	64.309	Nt(CSM)= 4	996.916
(N/to	m2)=	14020	ECH/mm2		10297		949

Max Allowable Heb Depth = 171.849 mm AREA = 119.339 cm2 INERTIA = 2093.949 cm4 Height per metre run = 3.369 Kg/m (Stiffener only) LEVER Y1= 89.713 mm MODULUS Z1= 233.406 cm3 LEVER Y2= 37.221 mm HODULUS 22= 562.572 em3 MINIMUM STIFFENER MODULUS = 233,406 cm3 FRAME REF: BOTTOM TRANS. HER FRAME -BASIC (FORWARD)

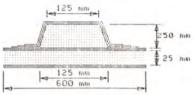
SPAN: 2.800 m SPACING: 1200 total

AT CENTRE: RULE MODULUS 1173.48 CH3 PULE HIH 176,23 CH3 AT SIDE : RULE MODULUS 556.64 CH3 RULE HIH 83.59 CH3

BOTTOM TRANSVERSE HEB BASIC @ KEEL J.E.C26 JAN '88

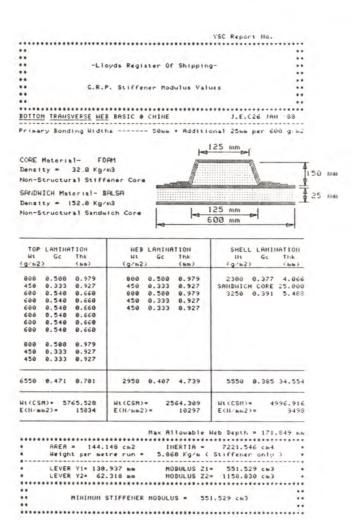
Primary Bonding Widths ----- 50mm + Additional 25mm per 600 g/m2

CORE Material-FORM Density = 32.0 Kg/m3 Non-Structural Stiffener Core SANDNICH Material- BALSA Density = 152.0 Kg/m3 Non-Structural Sandwich Core



SHELL LANIMATION	TION	WEB LANTHA	TION	LAMINA	TOP
Ht Gc Thi	Thk	Wt Gc	Thk	Gc	Wt
(g/m2) (hm)	Chift 2	(g/m2)	(mm))	(g/m2
2300 0.377 4.06	0.979	800 0.500	0.979	0.500	888
SANDHICH CORE 25.00	0.927	450 0.333	0.927	0.333	450
3250 0.391 5.48	0.979	800 0.500	0.660	0.540	688
	0.927	450 0.333	0.660	0.540	600
	0.979	800 0.500	0.660	0.540	600
	0.927	450 0.333	0.979	0.500	800
	0.927	450 0.333	0.927	0.333	450
			0.660	0.540	600
			0.660	0.548	600
			0.660	0.548	688
			0.979	0.500	800
			0.927	0.333	450
			0.927	0.333	450
5550 0.385 34.55	6.645	4200 0.412	10.607	0.462	7600
Ut (CSM)= 4996.91	30.718	Mt (CSH)= 36	374.621	H)= 63	HECES
E(11/mm2)= 949	10477	E(11-mm2)=	14296	m2)=	E(H-m

													- 1	1a	×	A	11	0	u	b	1 4		W	ь	1	9	pr	t	ŀ	w	2	60		350		is di
*****		**	* *	* *	*		٠,		٠.				*				.,		٠.	*	* *	*	* 1	٠.	* 1		*	٠.		٠.					* 1	
	ARE	A.	=		11	89	. 1	63	3	CI	12					1	HE	P	TI	A	=			2	2:	58	6	. 7	7	7	c	n 4				
	Hel	ghi	t	pe	r	m	e t	ri		ri	in			1	0.	6	32	2	Kg	10	la	K	3	t	11	6	61	119	1	0	m	1		>		
					-					-			-	-	-	-		-					-	-			-		-						-	- 1
	LEV	ER	Y	1=		19	3.	5	38		hr ba					11	01	U	LL	15	2	1			1	d	7	. (9-4	4	6	63				
	LEV	ER	Y	2=		10	1.	6	22		5 m					H	01	U	L	JS	3	2	=		2	2	2	. 6	2	0	5	m 3	1			
*****				* *						٠							* 1				. ,		*		* .							٠.	٠.	,		
			HI	141	H	UH	9	T	I F	F	EII	EF	3	10	DU	JL.	US	5	=		11	6	7.	e.	4.	ş.	c	hi 3	3							
							٠.																	٠.											٠.	٠.



5.4 Weight Comparison

A comparison of the weights per square metre for the side shell and bottom shell laminate/plating and associated stiffening is indicated in Table I and have been calculated as follows:-

- (i) Total plate laminate weights: as indicated on the computer output for the respective laminates.
- (ii) Total stiffening weights: the summation of the weights per metre run as indicated in the computer output for the respective longitudinal and transverse web, corrected for the number of longitudinals per metre and the spacing of web frames respectively.

TABLE I Typical Weight Comparison for an 18m Motor Craft.

		Weight per M ² [Kg]						
Position	Item	Single Skin	Sandwich					
Side	Plating	12.86	15.25					
She11	Stiffening	9.08	7.96					
Bottom	Plating	18.76	18.21					
Shell	Stiffening	12.91	10.24					

REFERENCES

- Heller, S.R. and Jasper, N.H.: "On the Structural Design of Planing Craft", Trans. RINA, Vol. 103, Jan. 1961.
- Savitsky, D.: "Hydrodynamic Design of Planing Hulls", Marine Technology, Vol. 1, No. 1, Oct. 1964.
- Crago, W.A.: "Accelerations Sustained by Fast Craft Running in Waves", Ship and Boat Builder International, March 1966.
- Danahy, P.J.: "Adequate Strength for Small High-Speed Vessels", Marine Technology, Vol. 5, No. 1, Jan. 1968.
- Spencer, J.S.: "Structural Design of Aluminum Crewboats", Marine Technology, Vol. 12, No.3, July 1975.
- Sellars, F.H.: "Water Impact Loads", Marine Technology, Vol. 13, No.1, Jan. 1976.
- Savitsky, D. and Brown, P.W.: "Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water", Marine Technology, Vol. 13, No.4, Oct. 1976.
- Henrickson, W.A. and Spencer, J.S.: "A Synthesis of Aluminum Crewboat Structural Design", Marine Technology, Vol. 19, No. 1, Jan. 1982.
- Gibbs and Cox, Inc.: "Marine Design Manual for Fiberglass Reinforced Plastics", McGraw - Hill Book Company, Inc. 1960.
- 10. Kaiser Aluminum and Chemical Sales, Inc.: "Aluminum Boats", 1964.
- Scott, R.J.: "Fiberglass Boat Design and Construction", John de Graff, Inc. 1973.

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 267 à 278

L'AVENIR DES MATERIAUX COMPOSITES DANS LA CONSTRUCTION NAVALE

PINZELLI R.F. (1), MARCHANT A. (2)

RESUME - L'industrie marine est historiquement l'un des plus vieux utilisateurs sur le plan commercial de composites (polymères renforcés de fibres) mais demeure aujourd'hui probablement modeste par rapport à l'industrie aéronautique au niveau des progres technologiques. Il est cependant probable que l'industrie marine présente le plus fort potentiel de développement des matériaux composites en regard de leurs propriétés exceptionnelles.

Ce article fait le point sur l'état de l'art actuel des composites dans l'industrie marine, tente d'analyser le potentiel dans le cas des applications majeures et regarde comment l'industrie se doit d'y répondre. L'accent est mis sur le remplacement de structures métalliques existantes par les composites et sur le role des fibres de renfort à hautes résistance et rigidité telles que le KEVLAR* 49.

mots-clés : Composites PRV, KEVLAR*, Couts des Matériaux, Calculs

ABSTRACT - The marine industry is historically one of the oldest commercial users of composites (fibre reinforced polymers), but now perhaps the aircraft industry's poor relation with respect to technological progress. Yet possibly, it is the marine industry that has some of the greatest potential for exploiting the unique properties of composite materials. This paper examines the current state-of-the-art of composites in the marine industry, attemps to analyse the potential for greater use and examines how the industry needs to respond. Emphasis is placed on the replacement of existing metal structures with composites and the role of higher strength and stiffness reinforcement fibres such as KEVLAR* 49.

key-words : Composites GRP (PRV), KEVLAR*, Material Costs, Calculation

^{*} Marque déposée de Du Pont de Nemours

Engineering Fibre Products Division
 Du Pont de Nemours International S.A., (Genève), Suisse

⁽²⁾ Consulting and Design Engineer Marchant Filler Dixon, (Romsey), Angleterre

1. INTRODUCTION

La majorité des structures marines en terme de composites sont évidemment les structures de bateaux et de navires. Dans cette catégorie les applications principales sont encore dans l'industrie du bateau - navigation de plaisance, petits vaisseaux de commerce, bateaux de pêche, canots à moteur, yachts et pour des navires plus importants tels que les chasseurs de mines. Il est difficile de trouver d'autres applications majeures de matériaux composites en dehors de ces domaines. De ce fait, les structures marines concernent aujourd'hui les bateaux et les navires.

Les PRV ont été sélectionnés pour les qualités suivantes : compatibilité avec le milieu marin, esthétique et bel état de surface, facilité de mise en oeuvre, performances mécaniques en résistance et rigidité, faible poids et coût d'entretien réduit.

Le verre-E et les résines polyesters sont les matières premières les plus courantes. Il n'est pas faux de dire que l'industrialisation du verre-E date du début des années cinquante et qu'elle a probablement atteint maintenant les limites de son développement. Toutefois le verre-E demeure la fibre la plus utilisée en raison de son faible coût relatif, et de sa flexibilité de mise en oeuvre ; mats, tissus, nappes unidirectionnelles. De plus la fibre peut être traitée pour assurer une bonne compatibilité avec les différents systèmes de résines modernes. De la même façon, les résines polyesters ont été développées à un stade précis, lorsque l'industrie marine s'est déplacée lentement des résines ortophthaliques vers les résines isophthaliques afin d'éliminer (ou presque) le phénomène d'osmose.

Aujourd'hui, l'industrie marine consomme 59.000 tonnes de résine en Europe de l'Quest, dont 12.000 tonnes pour la France, premier consommateur, suivie de l'Angleterre avec 10.000 tonnes. Pour mémoire rappelons, que le marché global en Europe de l'Quest est de 275.000 tonnes au travers des industries du batiment, du transport, du secteur industriel, du secteur électrique, de la marine, etc. Le marché du batiment demeure le plus gros consommateur avec 70.000 tonnes de résines.

Afin d'envisager l'avenir et le potentiel des matériaux composites dans la construction navale, il est nécessaire d'analyser plus en détails l'état actuel de l'art, à travers les réalisations, les aspects économiques des matériaux et leur mise en oeuvre, les méthodes de calculs existants et leurs contraintes, et le progrès technologique résultant de la coopération de diverses sociétés et organismes.

^{*} Marque déposée de Du Pont de Nemours.

2. LES REALISATIONS EN COMPOSITES

Le matériau PRV a été choisi pour la construction de chasseurs de mines par diverses Marines Européennes, et celle de l'Australie. Dans ces applications l'emploi de PRV est entiérement justifiée pour l'obtention d'une structure non magnétique liée au role du navire.

Les mavires qui nécessitent des allegements de poids ont bénéficié de l'apparition des composites. Ces matériaux concurencent les alliages d'aluminium. Tel est le cas de bateaux rapides à effet de surface, hydrofolis, hovercrafts, catamarans, etc.... La série Hovermarine International HM500 est un exemple typique de bateaux à effet de surface (SES = Surface Effect Ship) construits à partir de résine isophthalique renforcée de fibre de verre, et concus en optimisant leur masse.

Un des développement le plus important jusqu'à ce jour, est l'introduction de renfort, en fibre aramide (KEVLAR* 49) et parfois en fibre de carbone mariées aux résines époxides réticulables à froid ou à chaud. Leur emploi est resté cependant limité à des bateaux uniques comme les Maxi de 24 mètres qui s'alignent pour la course autour du monde. Une utilisation importante de renforts en KEVLAR* 49 et de carbone est faite également pour les catamarans et trimarans de compétition. Tel est le cas réussi du "Fleury-Michon" de la société Française Jeanneau, trimaran de course moderne.

Pour la fabrication des bateaux de competition, on fait appel aux techniques de moulage de l'industrie aéronautique : moulage en autoclave ou au sac, tissus et nappes unidirectionnelle préimprégnés de résines époxides, orientation préférentielle des renforts pour un comportement optimum en course en vue de victoires convoitées. Le moulage au moyen de pré-imprégnés n'est pas encore disponible ou adapté à la série, même si dans ce domaine, des sociétés comme les CMN à Cherbourg sont très actives.

Le composite sandwich à base de Balsa ou de mousse PVC et de peaux stratifiées, est très attrayant pour la construction de gros catamarans destinés au transport de passagers. Ce concept permet la réalisation de l'unité à partir d'un mannequin en bois et donc de se passer d'un moule onéreux. Par contre, pour les bateaux rapides, 10-40 mètres, aux formes hydrodynamiques complexes, la construction sur moule est nécessaire. Néanmoins, de plus en plus les flancs des bateaux rapides monocoques sont réalisés en construction sandwich.

Les bateaux de course Offshore sont comme les voitures de Formule 1, le champ d'investigation de nouveaux concepts d'hydrodynamisme et de dimensionnement de structures pour bateaux à moteurs. Le gain de poids est prépondérant et l'emporte sur l'aspect économique, ce qui a conduit les constructeurs à employer des renforts hybrides à base de KEVLAR* 49 et de fibre de verre. Tel est le cas pour Cougar Marine en Angleterre, l'un des tout premiers fabricants de bateaux très rapides et de vedettes de luxe, comme le US1-46.

Les renforts hybrides KEVLAR*/verre tel que le produit Aramat* 72K (Société A. CHOMARAT) sont utilisés depuis quelques années, pour la construction de vedettes rapides telles que celles des douanes françaises fabriqués par le Chantier G. COUACH (figure 1). Aujourd'hui, ce renfort hybride est adopté par de nombreux chantiers européens soit pour des projets nouveaux, soit pour diminuer le poids de bateaux conçus à l'origine en fibre de verre.

Tous ces exemples d'utilisation de composites avancés représentent cependant une faible partie seulement du marché total du PRV dans les applications marines. Les raisons pour lesquelles la majorité des architectes et constructeurs reste réticente à l'emploi de fibres à très hautes résistance et rigidité ainsi qu'à des procédés de mise en œuvre autre que le moulage au contact, sont sans aucun doute nombreuses et complexes. Quelques unes peuvent être retenues parmi lesquelles nous noterons le coût.



Figure 1 : Vedette d'intervention des Douanes Françaises (Chantier G. COUACH, France)

3. LES COMPOSITES VUS SOUS L'ANGLE ECONOMIQUE

Nous avons dresse un tableau comparatif (Tableau 1) des prix et des propriétés mecaniques des matériaux composites ainsi que ceux des matériaux métalliques les plus employés - acier et alliages d'aluminium. La comparaison des prix démontre évidemment que les renforts les plus résistants et les plus rigides sont plus coûteux que l'acier et demeurent plus chers que le système polyester/fibre de verre. Dependant, cette comparaison est entièrement faussée si l'on ne tient compte uniquement que du coût des matières premières.

En effet, il est préférable d'examiner le coût final du matériau, voire même mieux de considérer le coût dans le temps du matériau. La comparaison des coûts reste complexe dès l'instant où de nombreux paramètres interviennent comme le type de structure, la quantité, la qualité, le mode de fabrication, le cahier des charges, l'environement, etc...

En général, on constate que la structure en acier a le coût de fabrication le plus économique rapporté à la tonne, mais est de loin la plus lourde même avec des aciers les plus résistants. L'alliage d'aluminium reste aujourd'hui legèrement plus cher que le système polyester/fibre de verre E et lorsqu'il est assemblé par soudure ou rivettage, coûte plus cher que les composites, non compris l'amortissement de l'outillage. Dans le cas de structures conques pour un allègement maximum et sans contrainte majeure sur la rigidité, le composite est alors le matériau structural le plus lèger et économique. L'ependant, il faut tenir compte des coûts d'outillage dans le cas des composites ce qui nécessite la production de plusieurs unités pour un moule donné.

La comparaison des coûts menée récemment par MFD et Du Pont pour un navire de 36 mêtres fait apparaître une économie de 18 % avec une structure conventionelle en polyester renforcée fibre de verre E par rapport à une structure en alliage d'aluminium soudée (amortissement de l'outillage compris dans le cas du composite sur la réalisation de 4 bateaux) et un gain de poids de 5 % en faveur du composite. Il est également intéressant de noter qu'en utilisant du KEVLAR* 49 combiné à la fibre de verre E pour la réalisation des peaux stratifiées du sandwich on peut allèger la structure de 15 % supplémentaires par rapport à celle en polyester/verre E. Cependant, dans le cas de telles surfaces le coût de la main d'oeuvre représente jusqu'à six fois le coût des matériaux.

Matériaux	Résine	Fibre % Poids	Densité	Résis- tance Traction (N/mm2)	Module Traction (N/mm2)	Résistance Compres- sion (N/mm2)	Résis- tance Traction Spécif.	Module Traction Specif.	Coût Relatif Matière Première
Acier Corten "A"	-	-	7.75	480	207	340	62	27	1
Alliage Aluminium N8 (5083)	-	_	2.76	275	69	120	100	25	5.25
Alliage Aluminium H30 (6082)		-	2.76	295	69	255	107	25	6
Verre-E Mat fil coupé	Polyester	0.33	1.44	80-130	7.3-9.3	140-150	73	6	4
Verre-E Tissu	Polyester	0.50	1.63	210-300	12-21	150-270	156	10	4.5
Verre-S ou-R Tissu	Polyester	0.50	1.64	440	20	210	268	12	13.75
Fibre Aramide (Kevlar*49) Tissu	Polyester	0.44	1.31	430	26	115	328	20	42.7
Fibre de Carbone Tissu	Polyester	0.40	1.40	460	30		330	21	80

Table 1 - Propriétés des matériaux et leurs coûts

4. LES METHODES DE CALCUL

Un autre facteur qui freine le développement des composites dans les structures marines est l'absence de standards de calcul appropriés, un problème qui touche tous les utilisateurs de matériaux composites marins.

Pour le caicul des structures de bateaux et de navires on se réferre aux sociétes de classification = Lioyds Register of Shipping, Det Norske Veritas, Bureau Veritas, American Bureau of Shipping, etc... Ces institutions ont établi des lois pour les équarissages de structure de bateaux en acier, en alliage d'aluminium et en plastique renforcé de fibre de verre. Compte tenu de la faible technologie de l'industrie marine, ces lois doivent être maintenues pour éviter des problèmes au niveau du calcul des structures majeures. C'est également à cause de la vitesse ahurissante avec laquelle les fournisseurs de matériaux composites ont introduit de nouvelles fibres, matrices et procédés dans les dernières années, que les institutions ont le plus grand mai à mettre à jour les règles pour ces nouveaux matériaux.

En pratique, toutes les lois d'aujourd'hui sont établies pour des fibres de verre E et la résine polyester, et conduisent à une sélection empirique des équarissages de structures.

il faut avouer qu'un classement des structures composites (ou tout autre matériau répondant à ce critère) peut être obtenu à partir d'une première analyse de principe, par opposition au calcul empirique, mais que peu de fabricants de bateaux emploient cette approche comme un tout. Dans ces conditions, le progrès reste difficile car les constructeurs disposent de peu de moyens fiables de calculs pour une telle panoplie de fibres de renforts, de matrices et de procèdés.

5. LE PROGRES TECHNOLOGIQUE PAR LA RECHERCHE

Deux points importants apparaissent de la discussion précédentes :

- le cout réduit des composites par rapport aux métalliques utilisés dans un environnement marin.
- le role des fibres de renforcement à hautes résistance et rigidité qui contribuent à reduire le coût.

Par ailleurs, nous avons démontré que les composites peuvent rivaliser avec les aillages d'aluminium pour des structures de faible dimension; de plus l'aluminium est constamment critiqué par les constructeurs nautiques en raison de son faible comportement au feu, de sa faible tenue en fatigue sur pièce soudée et à la corrosion. En conséquence, la rigidité n'est plus le seul critère de sélection et il devient opportun pour les composites de se substituer aux structures alu réalisées dans l'industrie marine.

Afin d'illustrer le role effectif joué par les fibres à très hautes résistance et rigidité, Du Pont, dans le cadre de sa propre contribution à leur développement, a recemment entrepris un programme de recherche en vue d'optimiser l'emploi du KEVLAR* 49 dans des panneaux composites. Les constructions traditionnelles de panneaux en PRV, cas typique des coques de nombreux bateaux, emploient un mat de verre de surface riche en résine recouverte de couches successives de tissus de verre et de mat de verre. Malheureusement, la surface extérieure, riche en résine, empêche les couches de tissus d'apporter toute leur rigidité au panneau, puisque le mat de verre reste mécaniquement faible de part sa nature. Quelques constructeurs désinant d'allèger les structures tout en leur conferrant plus de résistance, ont remplace les tissus de verre par du KEVLAR* sans optimiser notablement le comportement mecanique final du stratifié.

Nous pensons que le moyen le plus efficace d'utiliser le KEVLAR*, est de l'insérer entre les couches de verre externes du stratifié, afin d'augmenter le module global du panneau et de minimiser l'allongement en compression du KEVLAR. Pour éviter l'emploi de couches externes riches en résine, il est fait appel à des systèmes de résines à haut allongement à la rupture ou superélastique par rapport aux résines d'imprégnation. Le stratifié final est présenté par le stratifié référence F (figure 2). Celle-ci illustre différents stratifiés testés en temps que panneaux soumis aux structures existantes avec des peaux en verre E et/ou en KEVLAR* 49.

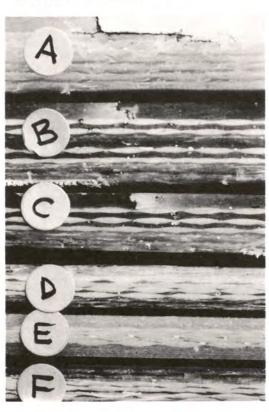
Tous ces stratifiés ont été sélectionnés pour leur isorésistance. Le stratifié A casse à 70 % de la charge fixée (la rupture apparait initialement dans la partie riche en résine) et le stratifié F supporte une contrainte deux fois supérieure à celle fixée sans rupture apparente.

De plus il est intéressant de comparer le coût de fabrication de ces constructions et de celles métalliques (voir tableau No 2). Ceci démontre clairement que l'emploi de ces composites dits avancés, peut être économiquement viable, pour peu que l'on prenne soin de concevoir les pièces en exploitant au maximum les propriétés intrinséques des composites et que l'on puisse amortir raisonnablement le coût des outillages.

A ce titre, Du Pont en collaboration avec le chantier COUGAR, et les sociétés SCOTT BADER et CHOMARAT étudient un bateau prototype à moteur, - Off-shore très rapide - une structure nécessitant aussi bien un gain de masse qu'une rigidité élevée. Egalement, Du Pont en collaboration avec le Lloyds Register of Shipping, conduisent des recherches plus poussées sur le comportement en fatique des matériaux conventionnels et d'avant garde.

Les procédés de mise en oeuvre sont souvent freinés par la nécessité de disposer d'un outillage adapté à la fabrication de structures en composite. Dans la majorité des cas, toutes les structures petites ou grandes de bateaux ont été réalisées sur des moules pleins males ou femeiles. Les contraintes sur l'outillage bloque alors la fabrication. Voici un domaine où l'industrie marine a probablement à apprendre de l'industrie aéronautique, en ce sens que toutes les pièces d'avions de grande dimension sont en géneral réalisées par assemblage de pièces élémentaires collées ou raccordées mécaniquement.

Figure 2 : Panneaux de tests. Soumis en mode de flexion et membrane. Panneaux représentatifs d'un bateau de 23 mètres / 38 noeuds.



Stratifie A: Construction (ypique suivant les Règles de Construction du LLOYD's Register. Surface riche en résine, suivie de couches alternées de tissu de verre et et de mat avec une résine Polyester ISO.

Stratifie B: Introduction de lissus en Kevlar* 49 substituant les tissus de verre en accord avec les règles de calculs du LLOYD's. Fissuration de la surface extérieure.

Stratifié C: Utilisation du Tissu Hybride Aramat 72K (verre et Kevlar* 50:50 en volume) et mat de verre. Fissuration de la surface extérieure.

Stratifie <u>D</u>: Methode optimum proposee pour l'utilisation du Kevlar* 49 (tissu) en sandwich entre les tissus de Verre E. Absence de surface riche en résine, et de mat de verre. Figsuration de la surface minime.

Stratifié E : Identique au stratifié D, mais résine époxyde au lieu de résine Polyester ISO. Surface extérieure en tissu de Verre E. Pas de fissuration, ni de casse observées.

<u>Stratifié</u> <u>F</u>: Identique à D, mais la surface extérieure est en tissu de Verre E et une résine flexible (Crestomer* de Scott Bader)

Tableau c

Stratifié	Poids (kg/m2)	Coût Materiei (£/m2)	Coût (1) Fabr. (£/m2)	Coût Total (£/m2)	Coût Relatif (2)	Poids Relation
А	50	30	200	230	1.00	1.67
В	18	113	180	293	1.26	1.50
С	16	88	160	248	1.07	1.33
D	12	107	120	227	0.98	1.00
E 12		166	120	286	1.23	1.00
F	12	112	120	232	1.00	1.00
PA	INNEAUX ME	TALLIQUES C	ONÇUS POUR F	PRESSION S	SIMILAIRE	•
ACIER SOUDE CORTEN A	53	21	530	551	2.37	4.42
ALUMINIUM SOUDE (N8)	31	66	341	400	1.75	2.58
ALUMINIUM RIVETE (H30)	24	54	360	414	1.78	2.00

Notes : (1) Coût de mise en oeuvre : Composite = £ 10.0/kg Acier soudé = £ 10.0/kg Aluminium soudé = £ 11.0/kg

Aluminium riveté = £ 15.0/kg

(2) Coût et poids relatif par rapport au stratifié F

CONCLUSION

Nous pouvons examiner l'avenir des composites dans l'industrie marine, mais ainsi structurée aujourd'hui peut elle répondre aux demandes exprimées par les ingénieurs et architectes à la recherche de performances accrues, de réduction de coût à long terme des structures ?

Peut-on disposer des bases de calculs au travers des Sociétés de classification actuelles pour pourvoir le large éventail de moyens, matériaux et procédés de mise en oeuvre ? Et avant tout, dispose-t-on des fonds de recherches pour exploiter pleinement les matériaux composites ? L'industrie accepte-t-elle de relever le défi ?

L'industrie aéronautique disposent du savoir-faire pour réaliser des pièces composites très techniques, mais il est impensable que, compte tenu de l'état d'avancement et des couts élevés, ces sociétés puissent travailler rentablement dans ces secteurs fortement compétitifs et demandeurs tels que le transport rapide sur l'eau.

Il est également improbable que les fabricants marins de plastiques renforcés de fibre de grande gamme puissent y répondre en raison du manque de capitaux et de capacité de calculs et de définition de pièces.

Les standards de calcul demandent à être approfondis voire même à être introduits dans certaines applications. L'approche du calcul suivant la classification des sociétés est nécessaire dans certains secteurs de l'industrie marine, mais doit être adapté pour les composites réalisés à partir de fibres à hautes résistance et rigidité.

Le marché potentiel pour les composites marins est énorme au niveau des vedettes à effet de surface, des plateformes offshore à poids réduit, pour le remplacement des structures en alliages d'aluminium sur tout type de bateau, pour les armes et bateaux militaires, pour les sous-marins, en fait pour toute structure où le coût sur la vie globale du matériau peut être réduit par l'emploi de composites dans l'un des environnements le plus aggressif du globe : la MER.

SYSTEME EXPANSIBLE EPOXY DE STRATIFICATION

SAGLIER D. (1)

But de la stratification : C'est d'incorporer dans un renfort textile généralement de type verre, carbone ou Aramide une matrice.

La stratification manuelle nécessite beaucoup de temps. Les risques de souillure, contacts avec la peau, les vêtements sont importants. Le système expansible époxy de stratification pallie ces inconvénients.

Description du système : Résine Araldite XLY 5054 Durcisseur XHY 5054 Agent de moulage XDY 5054

But du procédé : stratifier des renforts textiles sur des noyaux généralement Tégers ; mousse de polystyrène expansé ou extrudé, de PVC, de polymétacrylate de méthyle, nids d'abeille, laine de roche etc...

La matière de renforcement tissu ou mat est drapée sur le noyau, le mélange époxyde de stratification est ensuite réparti sur la surface à renforcer par pulvérisation à l'aide d'un pistolet d'une machine doseuse mélangeuse bicomposants.

L'ensemble est introduit dans un moule chauffé à $50\,$ - $70\,$ °C. Après fermeture du moule la mousse se met à gonfler accompagnée d'une légère surpression.

Cette surpression est fonction de la quantité d'agent de moussage et de la température du moule. L'imprégnation sous pression a une triple action :

- Imprégnation totale de la matière de renforcement

- Renforcement des zones marginales du noyau.

- Liaison mécanique du noyau et du renfort.

L'état de tension provoqué par la pression interne est pratiquement figé à la fin de la réaction de durcissement. Démoulage au bout de 20 à 40 mn. On obtient alors un élément stable précontraint.

Avantages : Capacité portante élevée pour un faible poids. Stabilité et résistance à la température (80°C) . Faible risque d'absorption d'eau en cas de dommage résultant du haut pourcentage de cellules fermées. Pas de gonflement postérieur même à la chaleur. Procédé simple et rapide.

⁽¹⁾ CIBA-GEIGY S.A. - Division MPA 2 rue Lionel Terray - 92506 RUEIL-MALMAISON

- Applications : Planches à voile, pièces pour automobile : bequets spoilers, antennes radio-TV ..., panneaux pour le bâtiment revêtus de contre-plaqué, bois déroulé, lamifié et renforcés de mats de verre, etc...
- NOTA Le système expansible de stratification fait l'objet du brevet européen N° 69076 (cas 3-7-134 68) déposé par la Sté CIBA-GEIGY à Bâle (SUISSE). Toute redevance découlant de ce brevet est acquitée par l'achat des produits de CIBA-GEIGY nécessaire à ce procédé.

LES PROFILES EN MATERIAU COMPOSITE ET LA CONSTRUCTION NAVALE

Michel SIDORE *

Les matériaux composites sont entrés en force dans la construction navale depuis pas mal de temps , mais beaucoup de choses sont encore à faire, probablement, dans ce domaine.

Pourquoi parler de profilés composites aujourd'hui ?

Parce qu'une technique dénommée PULTRUSION permet de mettre en oeuvre des pièces à section constante (PROFILS) à des prix relativements très compétitifs par rapport aux moyens classiques de mise en oeuvre : moulage, contact, contact sous vide, injection, presse à froid, enroulement filamentaire.

1 - QU'EST CE QU'UN PROFIL PULTRUDE ?

C'est un profil constitué d'une matrice thermodurcissable : principalement polyester, mais éventuellement Epoxy ou Phénolique.

Cette matrice est renforcée, principalement en Verre, éventuellement en carbone ou KEVLAR.

Ce profil est produit en continu au travers d'un outillage (FILIERE) sur une machine capable de tirer (TO PULL) le produit fini d'ou le nom du procédé : PULTRUSION.

2 - QU'EST CE QUI CARACTERISE UN PROFIL PULTRUDE ?

- Le choix de la résine

- . Polyester orthophtalique dans la grande majorité des cas, Isophtalique pour une tenue à l'eau plus performante.
- . Vinylester pour des cas de corrosion plus marqués.
- . Epoxy, pour des sollicitations mécaniques intenses ou à long terme.
- . Phénolique, pour une très bonne tenue au feu, et très peu d'émission de fumée en cas de calcination.

- Le choix du renfort

- . Uniquement longitudinal, le plus classique : barre ronde jusqu'à Ø 50.
- . Longitudinal et transverse par des renforts tissus ou éventuellement du guipage pour les corps ronds.
- . Uniquement transverse ? NON, car il faut toujours tirer et donc avoir une partie de fibres longitudinales.
- . Un tissu ou voile de surface pourra créer une couche riche en résine pour une meilleure tenue à la corrosion.

^{*} MAURIN COMPOSITE SA. 13, rue du Souvenir, 69009 LYON

- Les performances mécaniques

. Elles dépendront de la quantité et de l'orientation des renforts, ainsi que de leur nature, les combinaisons sont très vaste la distribution peut être variée dans une même section.

- Le poids

. Un profil à renfort verre très dense, de l'ordre de 80 % va avoir une densité de l'ordre de 2.

- La complexité de la section

 Du simple jonc aérodynamique en passant par des compositions les plus variées et compliquées.
 (Développables ou non)

- La taille de la section

. Du jonc de 1 mm au profil de gabarit 600 X 150 mm pour les machines européennes courantes.

- La longueur de profil à réaliser

 Elle devra s'exprimer en Km, compte tenu de la compléxité des outillages et de la mise en route.

- Le prix

. C'est un des procédés les moins onéreux en main d'oeuvre : de 25 à 45 F/Kg en verre polyester.

3 - OU ET COMMENT UTILISER UN PROFIL PULTRUDE EN CONSTRUCTION NAVALE ?

Comme élément de structure de bateau

- . Mat, baume, espar, éventuellement lattes de voile
- . Elément de superstructure,
- . Raidisseur de pont, de coque,

Mais aussi comme élément de structure dans des constructions annexes

- . Pontons flottants,
- . Casier pour pisciculture, matériel de pêche,
- . Eléments de structures sous-marines diverses.

Les cas évoqués ci-dessus utilisent le profil à l'état d'élément, mais on peut penser l'utiliser comme semi-produit :

- . Lattes intégrées dans la structure stratifiée d'une coque,
- . Plats flexibles capable de constituer des semelles de profils raidisseurs : couples ou lisses qui seront constitués définitivement par une stratification en place.

Ces quelques sujets de réflexion ne demandent qu'à en provoquer d'autres...

CONSTRUCTION NAVALE MILITAIRE EN COMPOSITE CONCEPTION DE BATIMENTS ANTIMINES

IPA BEAUGRAND (1)

RESUME - Les matériaux composites présentent beaucoup d'intérêt en construction navale militaire. La Direction des Constructions Navales a développé l'utilisation des composites depuis plusieurs années et à partir des architectures de bâtiments existants, a étudié une architecture plus économique. Les bâtiments antimines océaniques en cours d'étude possèderont cette architecture. Des développements, essais et investissements sont nécessaires pour mener à bien la réalisation de ces bâtiments pour la Marine Nationale.

mots clés : composite - construction navale - bâtiments antimines

ABSTRACT - Composite materials present much importance in military shipbuilding DCN has been developing the use of composite materials for many years. From the architectures of existing vessels, a more economical architecture was designed. The oceanic anti-mine vessels will be designed according to this architecture. Developments, trials and infrastructures are necessary to achieve the construction of these vessels intended for the French Navy.

key words : composite - shipbuilding - anti-mine vessels



(1) D.C.A.N. LORIENT

CONCEPTION DE BATIMENTS ANTIMINES

1. INTERET DES COMPOSITES EN CONSTRUCTION NAVALE MILITAIRE

Les matériaux composites utilisés en construction navale militaire sont composés en général de fibres de verre (roving ou mat) liées par une résine polyester ou époxy.

Ces matériaux présentent des caractéristiques très intéressantes en construction navale, qui les font préférer aux matériaux traditionnels dans bien des cas :

- caractéristiques mécaniques : matériau élastique jusqu'à la rupture, insensible à la fatique sous un certain seuil
- amagnétisme (application : bâtiments antimines)
- légèreté, densité <u>∼</u>1,6 (application : superstructures de bâtiments de surface ou de sous-marins)
- absence de corrosion, simplicité d'entretien (application : vedettes, embarcations)
- amortissement des bruits (application : dômes sonar)
- facilité de mise en oeuvre, en particulier pour les pièces de formes compliquées (application : poissons sonar remorqués)
- possibilité d'adjoindre à l'intérieur du composite, des matériaux conférant des propriétés particulières : amortissement, etc.

2. TECHNOLOGIES COMPOSITES

. Historique

La D.C.N. (Direction des Constructions Navales) étudie les matériaux composites depuis les années 60.

Les premières réalisations furent des embarcations et des vedettes.

La Direction des Constructions et Armes Navales (D.C.A.N.) de CHERBOURG a effectué une campagne d'essais visant à caractériser ces matériaux curieux qu'on appelait alors "plastiques armés".

Le début des années 70 voit la réalisation d'éléments de superstructure de sous-marins en C.V.R. à la D.C.A.N. de CHERBOURG, alors que l'établissement de CUERS (D.C.A.N. TOULON) se lance dans la confection de radômes en composite pour les besoins de l'aéronautique navale.

Enfin, à partir de 1975, le projet de chasseur de mines tripartite (C.M.I.) étudié par la France en coopération avec la Belgique et les Pays-Bas, voit le jour. La D.C.A.N. de LORIENT, à qui la construction des C.M.I. français est confiée, se spécialise alors dans la réalisation d'éléments de grande dimension en matériaux composites. (Photo 1)

L'ensemble du développement des matériaux composites est piloté par le groupe "Matériaux, Structures Navals" (MSN) du 5.T.C.A.N. (Service Technique des Constructions et Armes Navales).

Chacune des grandes applications : sous-marins, aéronautique, bâtiments de surface, mériterait un exposé particulier.

Nous nous intéresserons ici aux applications propres à la construction navale des bâtiments de surface.

3. ARCHITECTURES COMPOSITES EN CONSTRUCTION NAVALE

Les réalisations françaises et étrangères de bâtiments antimines en composite donnent un aperçu des divers types d'architecture.

· Monolithique raidi (Fig. 1)

exemples : C.M.T., chasseurs de mines GB type Hunt

La coque (bordé, ponts, cloisons) est constituée d'une peau mince en C.V.R., raidie par des renforts longitudinaux et transversaux en forme d'oméga en C.V.R.

Cette structure est légère et présente de bonnes qualités mécaniques mais est relativement couteuse (les renforts et leurs intersections sont très longs à réaliser).

Monolithique épais (Fig. 2)

exemples : chasseurs de mines italiens type Lerici

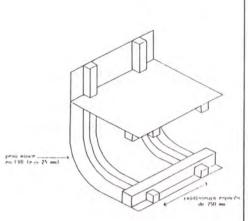
Le bordé de la coque est réalisé en C.V.R. très épais, ce qui permet de supprimer tous les raisisseurs transversaux (seules les cloisons jouent ce rôle).

Cette structure a d'excellentes qualités mécaniques mais est très lourde et l'économie de main d'oeuvre obtenue du fait de l'absence de raidisseurs est en partie perdue par le surcoût matière du C.V.R.

· Sandwich (Fig. 3)

exemples : chasseurs de mines suédois type Landsort

Le bordé de la coque, les ponts et cloisons sont réalisés entièrement en sandwich CVR mousse PVC. Les caractéristiques du sandwich permettent de supprimer un grand nombre de raidisseurs.



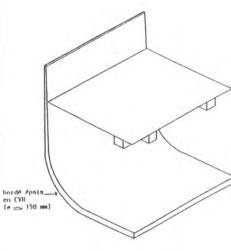


FIG.1 MONOLITHIQUE RAIDI

FIG.2 MONOLITIQUE ÉPAIS

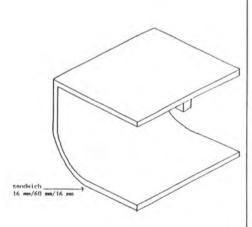


FIG.3 SANDWICH

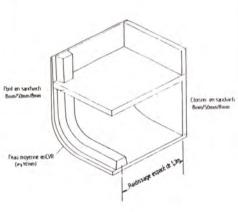


FIG.4 ARCHITECTURE OPTIMISÉE

Cette structure est économique mais sa tenue aux agressions (explosions sous-marines, chocs) reste à confirmer.

· Architecture Optimisée (fig. 4)

En profitant de ces expériences, la D.C.N. a étudié une structure en composite originale :

- bordé de coque en monolitique d'épaisseur moyenne (e ≤ 35 mm)
 les raidisseurs transversaux sont peu nombreux (espacement 1,3 m)
 - ponts et cloisons en sandwich
 presque tous les raidisseurs sont supprimés, et l'isolation thermique et phonique est déjà assurée.

4. PRESENTATION DU BATIMENT ANTIMINES OCEANIQUES (BAMO)

. Le B.A.M.O., tel qu'il est défini par le programme militaire, est un bâtiment destiné à surveiller les fonds du plateau continental. (Photo 2)

Les principales missions de ce bâtiment et les conséquences sur ses caractéristiques sont énumérées ci-après :

- Surveillance des fonds de 80 à 200 m au moyen de sonar remorqué

 bonne tenue à la mer
 plage arrière de large dimension pour permettre la mise à l'eau des engins remorqués
 - Déminage par intervention de poisson autopropulsé (PAP) télécommandé
 - nécessité pour le bâtiment d'être très manoeuvrant pour conserver une tenue de point fixe
 - Dragage
 - Force de traction élevée
 - Autoprotection
 - Bâtiment amagnétique, silencieux, capable de résister à d'éventuelles explosions sous-marines

Ces diverses données de base ont fait que le choix s'est porté vers une coque respectant l'architecture optimisée décrite au paragraphe 3 (coque composite monolitique avec peu de raidisseurs, pont et cloisons en sandwich) et de forme catamaran. Cette forme catamaran se justifie pour les raisons évoquées ci-dessous:

 elle présente de bonnes caractéristiques de tenue à la mer (un monocoque aurait dû posséder un système de stabilisation)

- la largeur du bâtiment permet d'aménager une plage arrière de grande dimension
- l'écartement des deux coques et donc des deux lignes propulsives permet au bâtiment de posséder une excellente manoeuvrabilité
- . Les caractéristiques principales du B.A.M.O. sont les suivantes : (Fig. 5)
 - Déplacement moyen d'essai : 830 T
 - Longueur hors tout : 52 m
 - Largeur maximale : 15 m
 - Propulsion : deux ensembles diesel (1000 KW) moteur électrique (200 KW) montés sur suspension élastique, entrainant des hélices à pales orientables
 - Energie électrique : 5 diesel alternateurs de 250 KW
 - Equipage : 50 personnes
 - Vitesse : 15 nds à PMP
 - Autonomie : 5000 M à 10 nds
- . Il est prévu de construire 10 B.A.M.O. 6 seront commandés d'ici 1991 (loi de programmation militaire de Mai 1987).

La coque du B.A.M.O. ainsi définie représentera la plus grosse structure en composite jamais construite au monde (250 T). La D.C.A.N. de LORIENT a été désignée comme port constructeur.

La présentation aux essais officiels du 1er B.A.M.O. est prévue pour 91, ce qui représente un délai de quatre ans entre la décision de construire de bâtiment qui innove et les essais à la mer du 1er bâtiment.

Ce délai est extrêmement court étant donné les validations techniques à obtenir, les moyens industriels à mettre en place pour la construction, les études et la fabrication.

D'autre part, les objectifs de coût sont extrêmement serrés. Des gains de 40 % par rapport à la série des C.M.T. sont demandés. Cet objectif économique ne peut être obtenu que par des choix bien orientés lors de la conception du bâtiment, une amélioration de la productivité liée à une modernisation des moyens de production (voir paragraphe suivant) et une gestion extrêmement rigoureuse des études et des travaux.

Ce programme est dirigé par le S.I.C.A.N. qui s'appuie sur les différents groupes techniques du S.I.C.A.N., le GESMA (groupe d'études sous-marines de l'Atlantique) et la D.C.A.N. de LORIENT.

5. DEVELOPPEMENTS ET ESSAIS RELATIFS A LA COQUE EN COMPOSITE DES B.A.M.O.

La construction d'un bâtiment tel que le B.A.M.O. ne peut se faire qu'après une phase de développement, menée à la D.C.A.N. de LORIENT en concertation avec le S.T.C.A.N.

. Les premiers développements concernent les matériaux sandwich :

- Des essais mécaniques sur éprouvettes et sur plaques ont déjà eu lieu afin de caractériser le matériau et de valider les programmes de calcul.
 Des essais d'agression (tenue à la chaleur, au feu, au poinçonnement) ont permis d'orienter le choix des matériaux (sandwich C.V.R. balsa 8/50/8)
- Des essais mécaniques sur divers types d'assemblages sandwich-sandwich et sandwich-monolitique ont été lancés
- Enfin, plusieurs systèmes de fixation dans le sandwich (inserts, collages) feront également l'objet d'essais.

Afin de valider la structure du B.A.M.O., les assemblages, les fixations et bien sûr les méthodes de fabrication, un tronçon d'essai représentant la tranche milieu du navire (longueur 10 m, largeur 15 m) est en cours de construction à la D.C.A.N. de LORIENT. (Fig. 6)

Ce tronçon subira dès mi-88 une campagne d'essais de tenue aux explosions sous-marines.

Divers équipements seront ensuite montés et une nouvelle campagne d'essais permettra de valider la fixation et la tenue de ces équipements.

Des essais d'incendie sur le tronçon sont également programmés.

6. INVESTISSEMENTS

Les dimensions du B.A.M.O. (52 m x 15 m) ne permettaient pas de réaliser les coques dans l'actuel Atelier Matériaux Composite (largeur maxî : 11 m).

D'autre part, les constructions en composite, tant pour les hâtiments de surface que pour les sous-marins, étant en constante progression, la construction d'un nouveau chantier (chantier de construction composite) a été décidée.

Ce nouveau chantier sera construit dans l'Arsenal Principal de LORIENI, à proximité des infrastructures industrielles des constructions acier. Un ascenseur à bateau pourra servir à toute mise à l'eau ou mise au sec sur le terre plein.

Ce chantier, conçu pour permettre la réalisation complète du B.A.M.O., avec le minimum de manutentions et un souci constant d'améliorer les conditions de travail et de réduire les pertes de temps, est un outil adaptable qui pourra être allongé ultérieurement suivant les besoins.

Les dimensions intérieures sont telles (30 m de large, 135 m de long, 23 m de haut) qu'elles doivent permettre de construire les futurs bâtiments en composite en projet pour la Marine (Navire à effets de surface de 1 200 T par ex).

Ce nouveau chantier, dont la construction revient aux Travaux Maritimes de LORIENT, sera entièrement construit sur pieux, en raison de son implantation sur la rivière du Scorff. (Fig. 7)

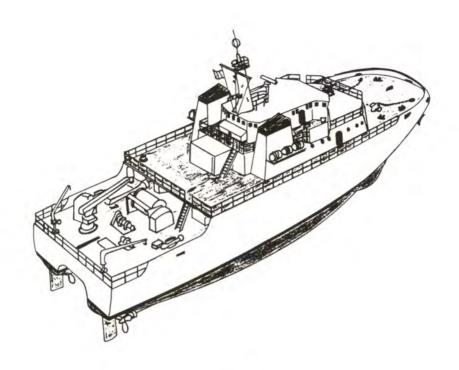


Figure 5

TRONCON D'ESSAIS

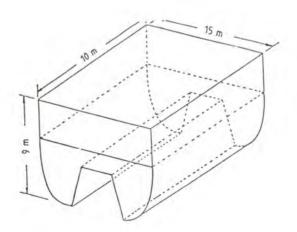


Figure 6

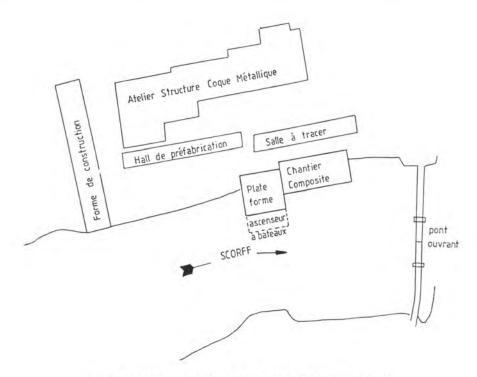
La coque duBAMO sera réalisée dans un moule démontable (8 parties) réalisé en acier à l'exception de la partie avant réalisée en sandwich composite car ce matériau se prête mieux aux formes complexes que l'acier.

Les déplacements de la coque du BAMO entre le nouveau chantier et la plateforme, où s'effectueront les travaux d'armement, puis vers l'ascenseur à bateaux, seront réalisés au moyen de coussins d'eau.

7. CONCLUSION

La D.C.N. est fermement décidée à s'engager toujours plus avant dans la voie d'avenir que représentent les composites en construction navale militaire.

La recherche constante de nouvelles technologies et de nouvelles applications, les aspects révolutionnaires du programme BAMO et les contraintes particulièrement exigeantes en matière de coûts, délais, qualité pour ce programme sont autant de défis que la D.C.A.N. de LORIENT se prépare à relever afin d'assurer son avenir.



IMPLANTATION DU CHANTIER DE CONSTRUCTION COMPOSITE

STRUCTURES ET MATERIAUX COMPOSITES HAUTES PERFORMANCES POUR APPLICATIONS SOUS-MARINES

NEDELEC Pascal *

RESUME :

Au sein de la Direction des Constructions Navales, la DCAN de CHERBOURG est chargée de concevoir les structures composites destinées à la construction des Sous-Marins Nucléaires Lanceurs d'Engins de Nouvelle Génération et des Sous-Marins Nucléaires d'Attaque. Ces structures, extérieures à la coque épaisse des sous-marins, sont caractérisées par leurs grandes dimensions et un cahier de charges sévère.

Des exemples variés montrent que les phases de conceptions nécessitent de disposer de compétences multiples (modélisations, calculs, essais, mises en oeuvre...). Ces compétences, parfois existantes au sein de l'entreprise, sont souvent à rechercher dans différents secteurs de l'industrie (aéronautique et spatial, sports de compétition,...). Une gestion rigoureuse des programmes et des connaissances ainsi acquises est alors nécessaire.

Depuis leurs premières applications en construction navale militaire dans les années cinquante, les matériaux composites voient leur champ d'application s'étendre de manière continuelle. La collaboration étroite des établissements de la DCN dans ce domaine n'y est sans doute pas étrangère.

MOTS CLES: sous-marin, matériaux composites, préimprégnés, structures, grandes dimensions, grande profondeur

ABSTRACT:

DCAN CHERBOURG is the leading French specialist in nuclear submarines construction. To develop, design and fabricate deep water composite structures DCAN CHERBOURG can rely on the motivation and unique experience of its personnel, its up-to-date facilities and the help of numerous cooperating companies.

KEY-WORDS: submarine, composite materials, prepregs, structures, large size, deep-water.

^{*} Ingénieur de l'Armement DIRECTION DES CONSTRUCTIONS ET ARMES NAVALES DE CHERBOURG BP 10 50115 CHERBOURG NAVAL

PRESENTATION GENERALE DE LA DCAN DE CHERBOURG

La DCAN de Cherbourg est un établissement de la Direction des Constructions Navales. Depuis près d'un siècle ses ateliers et chantiers ont construit de nombreuses générations de sous-marins. L'année 1967 est importante pour l'établissement. Avec le SNLE LE REDOUTABLE il lance son premier sous-marin nucléaire. La DCAN de Cherbourg est aujourd'hui l'industriel français spécialiste de la construction des sous-marins nucléaires.

Quatre vingt dixième sous-marin construit par la DCAN de Cherbourg, le sous-marin nucléaire d'attaque (SNA) Améthyste sera lancé cette année. Ses caractéristiques principales sont rappelées dans le tableau 1. Le lancement de cette merveille de la miniaturisation, c'est le plus petit sous-marin nucléaire au monde, sera suivi au début des années 90 par la mise à l'eau du sous-marin nucléaire lanceur d'engin de nouvelle génération (SNLE NG). Les principales caractéristiques de ce sous-marin sont présentées dans le tableau 2.

Non seulement par leur diversité et leur degré d'imbrication, les technologies employées sont aussi remarquables par leur complexité et les performances atteintes.

2 HISTORIQUE DE L'UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES A LA DCAN DE CHERBOURG

Les structures extérieures à la coque résistante des sous-marins répondent par leurs performances à un cahier des charges particulièrement sévère. Avant d'en traiter il paraît bon de faire un rappel succinct des réalisations passées de la DCAN de Cherbourg. Ce sont ces réalisations passées qui rendent en effet possibles celles d'aujourd'hui.

C'est en 1955 que la DCN crée à Cherbourg un atelier composite. Cette création répondait à la volonté de la DCN de mieux cerner les possibilités des matériaux composites à matrice organique, matériaux à priori forts séduisants pour des applications navales. L'accent était alors porté sur leur légéreté et leur absence de corrosion en milieu marin. De cet atelier sortiront dès 1958 les premières vedettes en composite fibre de verre résine polyester (CVR). A ce jour pas moins de 18 générations de vedettes ont été conçues par l'établissement, ce qui représente environ 250 unités construites.

En 1962 la création à Cherbourg d'un centre d'essais spécialement chargé d'étudier ces matériaux prometteurs est décidée. Jusqu'alors ils n'étaient que des matériaux de substitution. Les travaux de ce centre permettront de décider de leur emploi en tant que matériaux structuraux à part entière. La décision d'emploi d'un nouveau matériau, d'une nouvelle technologie passe par des résultats satisfaisants lors des phases d'essais. Ces essais peuvent être menés en laboratoire, sur bancs à terre ou sur structures en configuration réaliste d'emploi, c'est à dire dans le cas présent à la mer. Toutes ces phases sont importantes : d'elles sortiront une somme de connaissances et d'expériences. L'application des matériaux composites à des structures faiblement chargées, les vedettes, et des campagnes parallèles d'essais permettront de mieux connaître ces matériaux et leurs technologies de mise en oeuvre. Les années soixante dix verront ces efforts récompensés.

En 1974 il sera ainsi possible de décider de leur emploi sur des structures déjà un peu plus chargées : les ponts extérieurs de sous-marins classiques. A la même époque la DCAN de Cherbourg fabrique deux tronçons de chasseurs de mines en CVR. Un transfert de technologie et un an plus tard la construction en série des chasseurs de mines tripartites peut débuter à la DCAN de Lorient.

Tableau 1

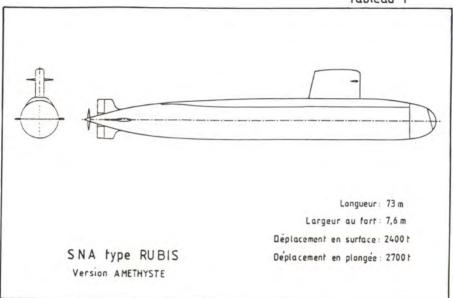
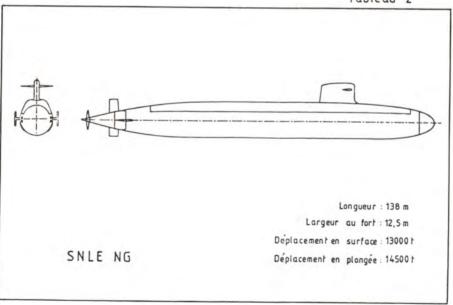


Tableau 2



Bientôt des pièces chargées comme les safrans de sous-marins sont conçues et fabriquées. Les outils de conception doivent s'affiner. Au travers de pièces comme les ponts extérieurs de sous-marins et les safrans, la DCAN de Cherbourg acquiert une expérience importante dans la mise en oeuvre de mousses syntactiques, matériaux composites remarquables par leur excellent comportement sous pressions élevées. En 1982 le Service Technique des Constructions et Armes Navales (STCAN) lui confie donc la fabrication des flotteurs principaux et de la tuyère de propulsion du SM 97. Ce sous-marin expérimental capable d'aller à 6000 m sous l'eau est aujourd'hui connu sous le nom de "Nautile". Il fut conçu et fabriqué par la DCN pour l'IFREMER.

Au début des années 80, l'emploi des matériaux composites se généralise doublement : d'une part, par le nombre de structures concernées, d'autre part, par l'étendue des contraintes satisfaites (masse, transparence, amagnétisme, comportement statique sous charge...)

Les années 1984-1985 vont apporter la révolution. Deux nouvelles générations de sousmarins arrivent avec des cahiers des charges qui vont imposer un nouveau saut technologique.

Afin que soient exploitées au mieux les compétences, les moyens matériels et humains mis en place, la DCN décide de confier désormais toutes les fabrications série de structures pour sous-marins à la DCAN de LORIENT, établissement fort de l'expérience acquise et des moyens mis en place lors de la réalisation du programme de Chasseurs de Mines Tripartites. De son côté la DCAN de Cherbourg possède un Bureau d'Etudes équipé de puissants outils informatiques, un Centre d'Essais doté de moyens parmi les plus modernes d'analyses physico chimiques et de caractérisations mécaniques statiques ou dynamiques, et un Atelier prototype capable de fabriquer les maquettes les plus délicates ou les structures premières de série. Elle se consacre donc, sur spécifications du STCAN, à la conception de nouvelles structures qui seront assemblées dans ses ateliers ou chantiers à bord des sousmarins en cours de construction. La collaboration entre établissements de la DCN était étroite. Elle l'est depuis encore plus.

3 LE PRESENT AU TRAVERS DE DEUX REALISATIONS : HELICES MARINES ET PONTS EXTERIEURS DE SOUS MARIN

Il serait déplacé de rappeler ici ce qu'est une hélice marine (voir le tableau 3) mais il paraît cependant bon de décrire le pont extérieur d'un sous-marin comme un ensemble de panneaux distincts assemblés entre eux afin de caréner un certain nombre d'appendices ou appareils extérieurs à la coque épaisse du sous-marin. Ces panneaux se présentent comme des structures de type coque à simple ou double courbure et à forte inertie. Cette forte inertie est obtenue par l'utilisation de raidisseurs ou d'un sandwich(voir le tableau 4).

3.1 : Le cahier des charges

Aux contraintes liées à la navigation en surface, comme la tenue aux paquets de mer, s'ajoutent les contraintes liées à la navigation en plongée. Des exigences sévères de très faibles reprises d'eau et variations de volumes sous pression hydrostatique élevée, plusieurs dizaines de bars, des exigences quant au comportement dynamique, discrétion acoustique du sous-marin oblige, ne sont pas parmi les moindres de ces contraintes. Dans des délais courts et pour des coûts aussi faibles que possible doivent donc être conçues, qualifiées, fabriquées et assemblées des structures aux performances élevées et qui doivent conserver ces performances sur une durée de vie supérieure à trente années.

Tableau 3

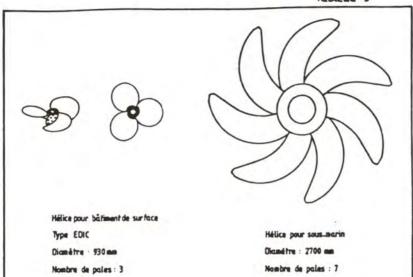
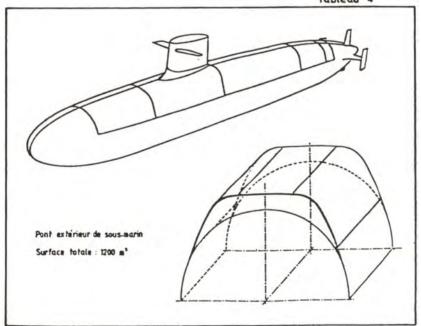


Tableau 4



3.2 : La conception

A ce cahier des charges exprimé sous forme de Spécification Technique de Besoin le concepteur va s'efforcer de répondre. Sa décision d'utilisation de matériaux composites n'ira pas toujours sans une certaine révolution dans les esprits et les moyens.

3.2.1 : Les moyens matériels et les hommes

Un exemple est fourni par la recherche d'une conception de pont extérieur qui réponde au besoin spécifié. Cette structure coque, constituée principalement de matériaux composites multicouches orthotropes à caractère viscoélastique ou non, est immergée en service dans un fluide dense et quasi-incompressible, l'eau de mer.

La détermination de son comportement dynamique n'est pas des plus aisées. Le cas particulier de la recherche de son comportement modal avec couplage fluide est, même en supposant en première approche le matériau "sympathique" (orthotrope élastique linéaire), déjà significatif des moyens humains et matériels nécessaires.

Ce comportement est déterminé après mise en oeuvre d'un certain nombre d'outils de calculs qui vont du formulaire et du logiciel simple d'homogénéisation du matériau au code de calcul par élément fini implanté sur gros ordinateur.

Cette mise en oeuvre ne consiste malheureusement pas toujours à exploiter quelques pages de guides ou formulaires ou à taper sans trop se poser de questions sur les touches d'un clavier d'ordinateur. D'une part ces outils doivent être validés, d'autre part ils doivent être appliqués à un modèle.

Tel logiciel de calcul par élément fini s'est révélé être validé sur des configurations courantes en aéronautique, comme des sandwichs à peaux minces et âme type nid d'abeille, mais ne l'était pas sur la configuration sandwich particulière qui nous intéressait en tant que concepteur naval. Une comparaison calculs-essais sur des cas tests plus ou moins simples a été une des manières de lever le doute. Avoir des liens privilégiés avec un centre d'essais compétent a facilité alors grandement les choses.

Des réflexions approfondies sont parfois nécessaires avant de retenir un modèle physique. L'appel à un sous traitant extérieur permet alors, si la synergie de ses compétences et des nôtres est bonne, d'aboutir à une modélisation adaptée. Ces compétences extérieures existent mais il importe avant de recevoir de savoir donner, de savoir donner afin de rendre ces compétences exploitables pour notre problème particulier. Tel spécialiste du couplage fluide structure, sous-traitant reconnu de l'Industrie nucléaire, ignorait presque tout des matériaux composites. L'association des compétences ne s'est faite correctement que parce qu'au sein de notre établissement, outre une compétence de dialogue, réussir à comprendre et à se faire comprendre dans le domaine concerné, avait été acceptée la contrepartie de faire progresser l'autre dans un premier temps, pour ensuite progresser ensemble.

La révolution est chez le concepteur....

Les tables à dessin sont progressivement remplacées par les écrans graphiques et les consoles d'ordinateurs. Les formulaires papiers, quand il sont encore utilisés, doivent composer avec les logiciels informatiques. Les fioles en verres et les bonnes vieilles machines de traction cohabitent avec des matériels au poids d'électronique impressionnant. Les compétences anciennes ne suffisent plus, les qualifications s'accroissent par un niveau de formation initial plus important ou la participation à des stages La révolution est en effet chez le concepteur, révolution non repliée sur elle-même mais ouverte sur l'extérieur.

3.2.2 : Les matériaux

Ces outils de conception doivent certes être validés avant de pouvoir être appliqués à un modèle adapté, encore faut-il déjà disposer de matériaux.

L'hélice composite d'un petit bâtiment de débarquement est principalement constituée de plis de préimprégné carbone époxy 180° de faible grammage, demi-produits d'usage fréquent en aéronautique. Dans ce cas il fut donc facile de disposer des matériaux nécessaires : il suffisait de choisir sur étagère.

Par contre la recherche de matériaux dont l'amortissement propre permette de satisfaire aux besoins spécifiés pour l'étude de certaines structures extérieures de sous-marin est nettement moins aisée. Travailler avec les industriels du transport, des sports de compétition et du spatial a permis de progresser et d'obtenir des résultats rapidement. Matériaux et technologies de mise en oeuvre ont alors nécessité des adaptations plus ou moins importantes voire des développements spécifiques assez complexes.

Cette recherche de matériaux et de technologies de mise en oeuvre est longue, d'autant plus longue que chaque évolution des matériaux ou technologies impose souvent de recommencer des essais de caractérisation, des essais de mise en oeuvre et de nouveaux calculs ..., sans parler des essais de vieillissements trés gourmands en temps. L'existence de trois pôles étroitement liés, Bureau d'Etudes, Centre d'Essais et Atelier Prototype, est un garant du bon déroulement de ces bouclages.

3.3 : La fabrication

Séparer aussi nettement les phases de conception des phases de fabrication peut paraître surprenant pour des structures composites. Le faire pour des structures nouvelles à objectifs de hautes performances l'est d'autant plus. Seule la clarté de l'exposé le justifie donc ici, tant il est vrai que la réalité est faite de bouclages incessants entre concepteur, Atelier Prototype et fabricants.

3.3.1 : Des structures de grandes dimensions

Des exigences de performances élevées ont conduit à retenir pour les ponts extérieurs des SNA version AMETHYSTE une technologie, dérivée de l'aéronautique, à base de demi-produits préimprégnés 120°C. La polymérisation de la résine époxyde qui sert de matrice est faite en température sous sac à vide. L'utilisation de cette technologie permet de réaliser des composites à taux de résine faible et parfaitement maîtrisé : les propriétés mécaniques obtenues sur éprouvette et pièces de dimensions réduites sont donc élevées et peu sujettes à variations.

Les grandes dimensions des structures qui nous concernent sont sources de difficultés souvent inconnues sur des pièces de dimensions plus modestes. Stratifier sur quelques mêtres carrés de surface et quelques dizièmes de millimètres d'épaisseur ou sur plusieurs centaines de mêtres carrés de surface et plusieurs dizaines de millimètres d'épaisseur ne sont pas deux mêmes exercices. Compacter correctement les demi-produits préimprégnés sur l'ensemble de la structure est une de ces difficultés. Une autre consiste à obtenir un bon débullage sur des épaisseurs importantes. Choix et disposition de matériaux ou apparaux adaptés sont des sujets qui ont alimenté bien des réflexions menées en interne ou avec la participation de préimprégnateurs. Les résultats d'expertises sur pièces d'essais, certaines de plus d'une tonne, furent là pour réorienter les réflexions et témoigner des progrès accomplis.

Maîtriser cette technologie nouvelle sur des pièces de cette taille fut source de grandes satisfactions. Un combat non moins ardu s'engageait alors : celui d'abaisser autant que faire ce peut les coûts des pièces. Sur des structures épaisses il est tentant de vouloir gagner en temps de dépose par l'utilisation de demi-produits de fort grammage. Nouveaux essais, nouvelles moissons de résultats avec, hélas jusqu'à aujourd'hui des déceptions pour les grammages d'environ 1000 g/m2 et plus. D'autres essais se poursuivent avec de nouveaux matériaux proposés par des préimprégnateurs. Ces travaux permettront sans doute des gains supplémentaires.

Abaisser les coûts concerne au moins autant le Bureau d'Etude que les Ateliers. Ainsi un projet récent de plan de découpe du pont extérieur d'un sous-marin privilégie-t-il des panneaux élancés de courbure totale faible. La quasi planéité des pièces élémentaires devrait permettre, dans un avenir proche, d'envisager une aide mécanique à la dépose des demi-produits.

3.3.2 : Des outillages adaptés.

L'exemple de l'hélice composite va nous permettre de soulever une des difficultés propres à la conception d'outillages pour structures réalisées à partir de demi-produits préimprégnés.

Sans préjuger de la composition interne d'une hélice composite il est tout à fait possible d'imaginer qu'une des phases de la fabrication des pales fasse intervenir un outillage à base d'un moule et d'un contre moule. Pendant le cycle de cuisson l'outillage et la pale subissent des dilatations et des retraits. Les caractéristiques géométriques finales de la pale ne sont donc pas celles (le l'outillage. Une des difficultés à traiter consiste donc à prévoir correctement ces dilatations différentielles et à ajuster la forme des moules et contre moules en conséquence.

Une autre consiste tout simplement à pouvoir garantir que les outillages conçus pourront supporter, sur une durée de vie de plus de vingt années, tous les cycles de mise en température-refroidissement nécessaires à la cuisson de pièces prévues.Les actions en ce domaine sont longues et difficiles. Un certain "craac" sur pièce d'essai n'a pu que nous conforter sur le bien fondé des actions déjà engagées !

Ces premières difficultés traitées sur des outillages destinés à des fabrications quasiunitaires, il convenait de s'attaquer à la conception d'outillages compatibles avec des fabrications série. A l'issue de réflexions communes avec le STCAN, la DCAN de LORIENT et des coopérants, un principe de chauffe fut retenu et les investissements nécessaires lancés, comme l'acquisition d'étuves de grandes dimensions. Des études ou essais ont déjà permis de baisser le coût unitaire des moules. Des études ou essais complémentaires devraient permettre de faire mieux. La révolution est dans l'atelier...

Modèle en bois ou en plâtre, plastique CVR contact ne sont plus panacées. Informatique et électronique pointent leur nez et les rouleaux de tissus cohabitent avec des micro-ordinateurs. Les compétences anciennes ne suffisent plus, elles sont renouvellées par la participation à des stages ou l'ouverture sur l'industrie ... La révolution est en effet dans l'atelier. Elle ne fait que commencer. Monsieur xxxxtisation arrive.

4 DES ETABLISSEMENTS TOURNES VERS DEMAIN

Construire les sous-marins de l'an 2000 exige pour la DCAN de CHERBOURG non seulement de posséder d'importantes compétences internes et de faire largement appel à l'industrie mais aussi de veiller que toutes les tâches qui concourent à cet objectif soient menées avec une parfaite maîtrise de la qualité. Cette recherche constante de la satisfaction du client n'est pas sans transparaître dans la motivation des personnels ou les méthodes de travail adoptées. Des sigles comme STB, DD, DJD, LOFC ou autre DQ n'appartiennent-ils pas aujourd'hui à la culture de l'entreprise ?

Les résultats obtenus par l'activité "Composites" de la DCAN de CHERBOURG n'ont pu l'être que par l'existence au sein de l'établissement d'un ensemble adapté aux objectifs fixés et qui regroupe un Bureau d'Etudes, un Centre d'Essais et un Atelier Prototype dotés de moyens modernes et dont les personnels allient compétence et motivation. Ce potentiel est complété par une grande ouverture vers l'extérieur.

Des liens particulièrement étroits existent entre les différents établissements de la DCN. Ils ont permis hier de progresser ensemble, de passer des vedettes CVR aux premières structures extérieures de sous-marins et de ces structures aux chasseurs de Mines Tripartites. Aujourd'hui la fabrication de structures extérieures hautes performances destinées à des sous-marins débute.

Quel demain prépare cet aujourd'hui ?

CARBONE R., REDURON B., RENOUF M., SIXOU A., 1985. Les matériaux composites en construction navale militaire.

Session ATMA 1985

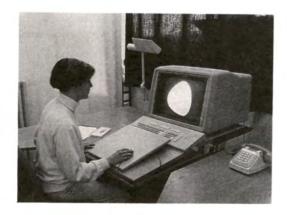
BOISRAYON G., 1985. Le sous-marin SM 97 (Nautile) Session ATMA 1985

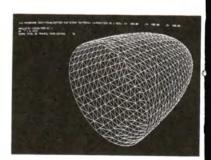
LES ETUDES

CONCEPTION DE STRUCTURES REPONDANT A UN CAHIER DES CHARGES SEVERE



Conception assistée par ordinateur





Calcul sur outils informatiques

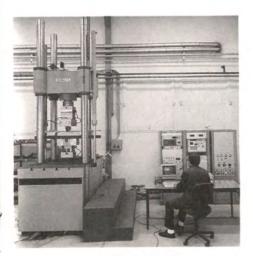
LES ESSAIS

CONNAISSANCE DES MATERIAUX

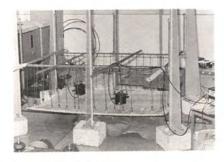




Caractérisations physico-chimiques



Essais mécaniques



Analyses dynamiques

LES PROTOTYPES

VALIDATION DE LA CONCEPTION REALISATION DE PIECES PROTOTYPES ET PREMIERES DE SERIE



Etuve de grandes dimensions pour la mise en oeuvre de préimprégnés 120°C



Elément de pont extérieur de sous-marin



Dôme sonar expérimental



Tuyère du sous-marin "Nautile"

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - nº 7 - 1988 - IFREMER, pages 305 à 320

VIEILLISSEMENT HYDROLYTIQUE DES POLYESTERS

B. MORTAIGNE - P.A. HOARAU

1 INTRODUCTION

A la demande de la Direction des Recherches et Etudes Techniques (DRET) et de la Direction des Constructions Navales (DCN), l'ETCA a entrepris depuis deux ans l'étude de l'interaction chimique eau-polymère sur des résines polyester de formulations identiques ou proche de celles utilisées par la DCN pour la fabrication du chasseur de mines tripartite.

Ce nouvel axe de recherche, concernant un matériau utilisé en construction navale, est surtout dirigé vers l'étude du comportement à long terme du matériau employé, au stade final, sous forme de composite.

Cette étude a été menée sur ce type de résine, afin de tenter d'expliquer au niveau de la molécule, les interactions chimiques eau-polymère,

- d'une part, sur le plan mécanistique avec l'étude tridimensionnelle du réseau formé,
- d'autre part, sur le plan cinétique avec l'étude de la résistance au vieillissement et la détermination d'une loi de dégradation.

2 DEFINITION DES RESINES ETUDIEES

Cinq résines ont été étudiées. Elles résultent de la polycondensation entre deux diacides et un glycol, la nature des glycols employés variant pour chacune des quatre premières nuances de résine de façon à pouvoir évaluer l'influence de la nature du diol sur le vieillissement hydrolytique, le paramètre variable dans la ciquième nuance étant le rapport des diacides.

Ces cinq résines sont définies comme suit :

- acide maléique / acide isophtalique / propylèneglycol 0,46/0,54/1
- acide maléique / acide isophtalique / dipropylèneglycol 0,46/0,54/1
- acide maléique / acide isophtalique / diéthylèneglycol 0,46/0,54/1
- acide maléique / acide isophtalique / néopentylglycol 0,46/0,54/1
- acide maléique / acide isophtalique / propylèneglycol 0,70/0,30/1

Elles sont élaborées à masse moléculaire constante et diluées à un taux fixe de 45% en masse de styrène. Leur polymérisation est effectuée par de l'octoate de cobalt comme catalyseur et par du peroxyde de méthyléthylcétone comme catalyseur.

Etablissement Technique Central de l'Armement Service Comportement des Matériaux 16bis, avenue Prieur de la Cote d'Or - 94114 ARCUEIL Cedex

3 CARACTERISATION DES RESINES

L'étude du vieillissement hydrolytique, et de tout vieillissement en général, nécessite une caractérisation initiale des matériaux ainsi qu'une bonne connaissance des paramètres susceptibles d'intervenir sur leur structure.

L'étude a donc débuté par la caractérisation initiale des matériaux, tant au niveau de la caractérisation du prépolymère qu'au niveau de la caractérisation du polymère.

Cette caractérisation s'est effectuée :

- sur le prépolymère par différentes méthodes chimiques (dosages) et spectrochimiques infrarouge (IR), résonance magnétique nucléaire (RMN), spectrométrie de masse (MS), chromatographie de perméation sur gel (GPC),
- sur le polymère par les mêmes méthodes physico-chimiques complétées par d'autres analyses comme l'analyse enthalpique différencielle (AED), l'analyse thermogravimétrique (ATG), les essais mécaniques (traction et rhéomètre).

4 GONFLEMENT PAR LES SOLVANTS

La théorie de FLORY-REHNER permet, pour les élastomères, de déterminer la densité de réticulation à partir de leur taux de gonflement. Mais les hypothèses de départ qui sont d'ailleurs en partie les mêmes que pour l'élasticité caoutchoutique, ne s'appliquent pas aux réseaux denses. Cependant l'existence d'une relation quantitative entre densité de réticulation et taux d'absorption du solvant peut être envisagée.

L'échartillon de polyester étant placé dans une atmosphère de solvant, un gain de masse correspondant à l'insertion de molécules de solvant dans le réseau est constaté au cours du temps. Cette augmentation, dans la vapeur d'un solvant donné, est directement liée à la structure du polymère.

4.1 Sorption d'eau

Des essais sont effectués à une température de 50°C et à une humidité relative contrôlée de 100%. Des mesures de prise en solvant et de diffusivité de l'eau au sein du matériau sont effectuées.

Il ressort de ces essais que :

- l'équilibre est atteint au bout de 15 heures environ,
- les valeurs des taux de gonflement sont inférieures à 1% (0,77 maxi),
- le taux de gonflement à l'équilibre ne diminue pas avec la durée de réticulation,
- les échantillons ne présentent pas à court terme de dégradation (absence de fissuration),
- les mesures de diffusivité sont cohérentes avec la structure interne des matériaux, celles-ci augmentant avec la longueur des chaînes du polymère (moins il y a de noeuds, plus l'eau pénètre rapidement),

5 VIEILLISSEMENT

Les premières expositions dans des conditions dures (immersion 100°C) ainsi que les suivis de vieillissement hydrolytique en utilisant les mêmes méthodes de caractérisation que celles utilisées pour la caractérisation initiales, ont été effectuées sur ces cinq résines et ont permis de nous donner une idée de la cinétique de dégradation hydrolytique.

Les expositions des éprouvettes dans des conditions moins dures faisant varier la température et l'humidité relative (T = 70 et 20°C, HR = 100, 75, 50, 25 et 0%) sont en cours et doivent permettre une modélisation de la cinétique de vieillissement incluant et différenciant ces deux paramètres.

6 ANALYSE D'UN TRONCON DE COQUE DE BATEAU

L'analyse physico-chimique d'un tronçon de coque, fabriqué il y a une quinzaine d'années et vieilli en bassin à LORIENT, a été effectuée par les mêmes méthodes d'analyse que celles précédemment décrites.

Il ressort principalement de cette analyse que la réticulation du matériau est très faible malgrè les quinze années passées, et cette réticulation n'est pas homogène dans tout le matériau mais varie en fonction de son exposition à la chaleur (rayonnement solaire).

7 CONCLUSION

La caractérisation initiale du prépolymère et de la résine polymérisée avant vieillissement a permis de mieux connaître les matériaux à étudier. Elle a permis de mieux appréhender les modifications de stucture susceptibles de se produire dans le réseau tridimensionnel.

Bien que les travaux aient porté essentiellement sur la résine pure, pour laquelle l'influence de divers paramètres de composition a été étudiée, les résultats obtenus vont pouvoir être transposés aux polyesters employés en tant que composite en facilitant la compréhension des mécanismes de dégradation.

Les premiers résultats de vieillissement semblent indiquer que le polyester résistant le mieux à l'hydrolyse soit celui à base de néopentylglycol; ceci reste à vérifier dans le cas de composites.

STRUCTURES MULTICANAUX

R. CARBONE (1), G. MORIN (2)

RESUME: L'Association d'un tissu alvéolaire définissant des gaines parallèles, adjacentes et de profilés tubulaires de hautes caractéristiques mécaniques donne un demi-produit de manipulation aisée. L'articulation au niveau de la couture permet d'obtenir des courbures variables et complexes. Le drapage de tissu pour réaliser les peaux externes renforce le panneau dans la direction transverse. Il en résulte un panneau sandwich à structure nervurée formant une construction à raidisseur en I et des chambres vides avec un très haut rapport rigidité/poids.

Les applications peuvent être planes (cloisons ou ponts de navires, planchers divers (transport routier, ferroviraire et aérien ...), cloisons de conteneur (schelters ...) ou courbes (coques divers (navires, torpilles, cellule d'avions), mât à profil NACA, safran, aile).

Mots clés: matériau composite, structure sandwich, plaque, coques

ABSTRACT: The association of a cellular fabric defining a row of parallel adjacent ducts and pultruted tubulars of high mechanical caracteristics give an easy handing semi-finished product. The articulation of the level of the seam enables various or complex curves. He lay-up of fabric in order to obtain outer skins renforces the pannel in transverse direction. It results a sandwich pannel with a web structure forming an I beam construction and hollow chambers with a very high stiffness to weigh ratio.

Applications can be flat (bulkheads and decks in navy, floors (for aircrafs, trucks, railway-carriage), walls for containers (shelters ...) or curved (ships or torpedoes hulls, mast with streamline shape, wing).

Key words:: composite material, sandwich structure, plates, shells

DCAN TOULON - SD/AERONAUTIQUE - Division RADOMES ET COMPOSITES -Chargé de l'Etude des Matériaux

⁽²⁾ DCAN TOULON - SD/AERONAUTIQUE - Division RADOMES ET COMPOSITES Chargé des Calculs de Structures

1.- GENERALITES

La nécessité de mettre en oeuvre, pour des applications marines, des structures de faible masse volumique et de hautes caractéristiques (flexion et compression) a amené la Division Radômes et Composites de la DCAN de TOULON à associer :

- un tissu alvéolaire, obtenu par le croisement ou l'assemblage par couture de 2 nappes parallèles de tissu, de façon à former des gaines parallèles et adjacentes (Fig. 1.2 Photo 1).
- des profilés tubulaires ayant une excellente intégrité mécanique (Photo 2) qui, glissés dans chaque gaine(1) (Fig. 3) donnent un semi-produit dont l'articulation (Fig. 4) au niveau des coutures permet d'obtenir des rayons courbes variables (Photo 3).

La flexibilité dans le sens longitudinal autorise une certaine déformation à grand rayon de courbure dans le sens axial.

La structure constituée par les tubes insérés dans le tissu alvéolaire est revêtue de couches de tissu préimprégné ou imprégné au contact dont l'orientation judicieusement choisie apporte la résistance mécanique transverse ; la résistance longitudinale étant celle apportée par les profilés (Photo 5).

Le panneau (Fig. 5) est une structure raidie formée de nervure en (I) et de chambres vides (2) (Photo 6) avec un rapport raideur/masse très élevé.

Il est aisé de voir (Fig. 6) que toutes les possibilités, dans l'arrangement, la construction et les combinaisons des alvéoles, des tubes, des tissus de peaux peuvent être envisagées en fonction des caractéristiques de la pièce à obtenir.

Un brevet a été déposé en FRANCE, ITALIE, SUEDE, GRANDE-BRETAGNE, ALLEMAGNE, NORVEGE, ETATS-UNIS N° 85-13 452 du 11.9.85.

2.- REALISATION - APPLICATION

2,1.- Actuelle

Deux prototypes de bouée VFL ont été réalisées avec comme objectif un abaissement de poids par rapport à des structures composites classiques tout en conservant les caractéristiques de tenue à une pression externe supérieure à 50 bars.

Chaque tube est bouché puis testé à la pression externe. Les tubes sont ensuite glissés dans le tissu alvéolaire (Photo 7) le semi-produit ainsi obtenu en drapé sur 2 cadres de bois donnant le profil interne de la bouée (Photos 8 et 9).

Les tissus constituant le plan externe sont ensuite drapés judicieusement. Une fois les cadres démontés on obtient une structure manipulable (Photo 10) qui sera ensuite remplie avec les éléments actifs de la bouée et une mousse syntactique (Photo 11). Après assemblage de tous les éléments (Photo 12) et finition la bouée obtenue (Photo 13) permet un gain de flottabilité de 90 kg.

2,2.- Futurs

Parmi les études en cours citons un empennage de sous-marin qui permet un gain de masse de 2,5 T par rapport à une solution composite classique.

Les cloisons et ponts de navire dont le dimensionnement est en cours d'étude.

2,3.- Réalisations potentielles

Structure plane

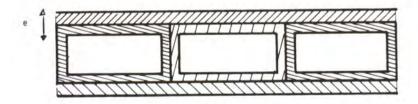
- cloisons ou ponts de navire
- planchers d'avions
- cloisons de conteneurs (shelters)
- panneau pour remorques ou camions
- wagon ferroviaire

Structure courbe

- coques diverses (bordés de navire)
- mât ailé à profil NACA
- safran

3.- TRAVAUX ACTUELS

3,1.- Certains pultrudés utilisés ont un agent de démoulage incorporés à la résine avec comme effet une mauvaise liaison entre la peau et les profilés, ce qui est tout à fait rédibitoire du fait que dans le calcul l'épaisseur de peaux du sandwich intègre à la fois les plis stratifiés et l'épaisseur des profils.



Des études sont en cours pour réaliser un traitement de surface approprié, soit pour obtenir des pultrudés sans agents de démoulage.

3,2.- Assemblage

Différents types d'assemblage ont été étudiés (Fig. 7) et sont en cours de caractérisation (Photos 14, 15).

3,3.- Optimisation mécanique

Les premiers essais mécanique ont été réalisés à partir d'éprouvettes de flexion trois points globalement conformes aux normes existantes.

Il est rapidement apparu que ce type d'essais était inadapté à la spécificité des structures multicanaux :

- la nécessité d'utiliser des éprouvettes suffisamment grandes par rapport à la taille unitaire du canal amenait les dimensions incompatibles avec les machines d'essais classiques.
- Le chargement ponctuel permettait mal la caractérisation du comportement de chaque partie de la structure, surtout dans le sens travers aux canaux.

La construction navale étant une application particulièrement visée et les chargements en pression uniforme étant couramment utilisés pour le dimensionnement des navires il a été décidé de lancer un programme d'essais correspondant à ce type de sollicitation.

Ces essais seront menés courant 88 sur un dispositif appartenant à la DCAN de LORIENT.

Les grandes dimensions des plaques utilisées (3,5 m x 3,5 m) et le chargement conforme à l'utilisation réelle de la structure devrait permettre de mieux apréhender le comportement réel de celle-ci.

Parallèlement une étude théorque a été menée pour le dimensionnement du fond de cuisson central d'un navire à effet de surface. Cette partie de navire a été choisie à cause du chargement sévère qu'elle subit. Cette étude a pour but d'optimiser les dimensions des canaux et de comparer la solution multicanaux à une solution sandwich classique à âme BALSA.

Les calculs ont été menés à l'aide du logiciel de calculs de structures par éléments finis MAGICS. La figure 8 montre le modèle utilisé et les déformations subies. La plaque de dimensions 1,10 m x 2,5 m était soumise à une pression uniforme de 0,74 bars. Il ressort de cette étude que, avec une épaisseur égale de 68 mm la plaque multicanaux est plus légère de 20 % (57 kg au lieu de 69 kg) pour une résistance égale.

4.- PLAN ECONOMIQUE

4,1.- Matériau

La pultrusion est un des procédés le plus économique et efficace pour la fabrication à grande échelle de composite structural.

Aux conditions écnomiques de Mars 1988 pour des profilés de section 200 x 60 x 2,5 mm il faut prévoir entre 30 et 35 F/m linéaire par 1000 ml.

Le tissu alvéolaire servant à réaliser le semi-produit manipulé est estimé à 200 F/m ce qui fait un prix matière de 1000F/m².

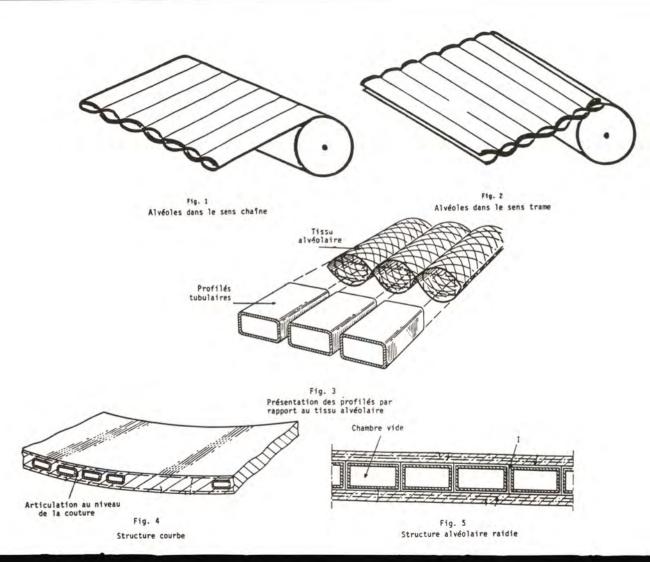
La main d'oeuvre est la matière pour réaliser les peaux de sandwich sont ensuite à prévoir.

4,2.- Procédé

Ce procédé supprime la confection de moules onéreux, difficile à amortir, même pour une série relativement importante, qui nécessitent un emplacement de stockage très encombrant. A l'inverse la réalisation des jeux de couples en bois donnant le profil désiré est facile à réaliser, bon marché et le stockage de ceux-ci après démontage est aisé.

CONCLUSION

Ce procédé permet d'associer des matériaux aéronautiques (tissus unidirectionnels) et plus classiques (pultrudés) qui judicieusement associés donnent un sandwich structural susceptible de supplanter les solutions utilisées actuellement en construction navale.



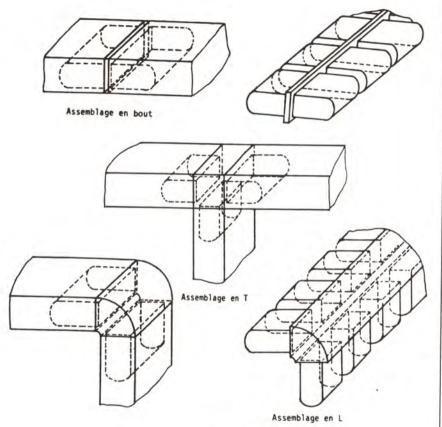


Fig. 7

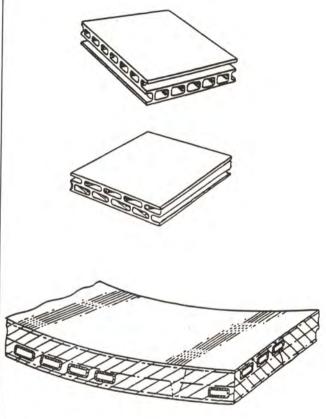
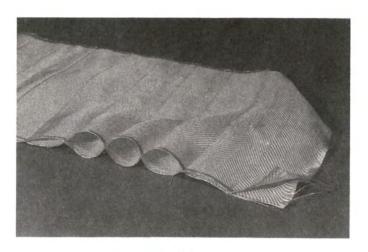
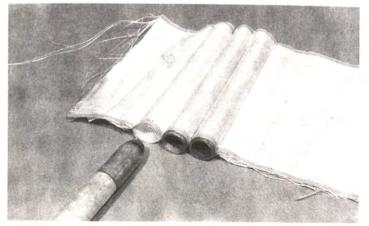


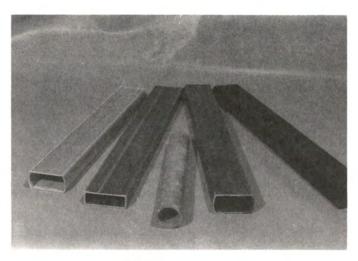
Fig. 6
Combinaisons variables



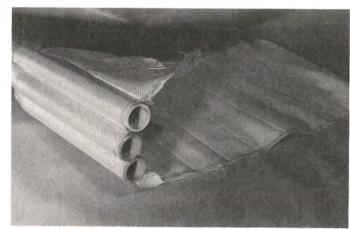
РНОТО 1



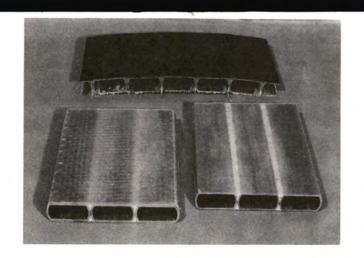
РНОТО 3



РНОТО 2



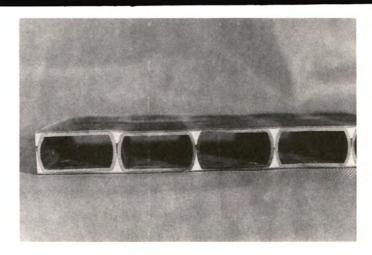
РНОТО 4



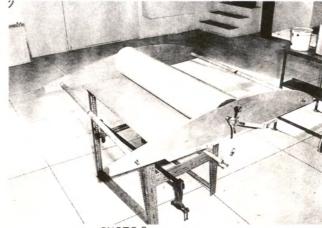




РНОТО 7

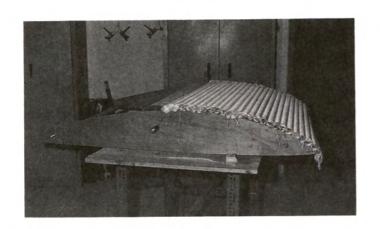


РНОТО 6



РНОТО 8





РНОТО 9

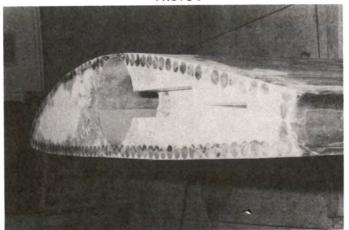


PHOTO 11

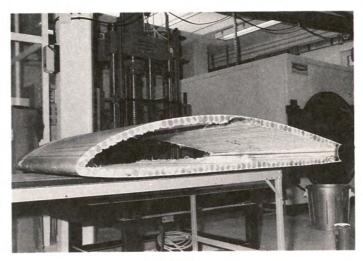


PHOTO 10

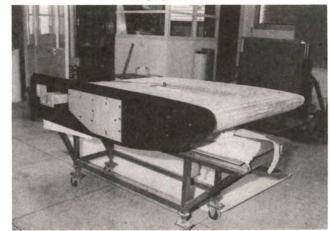


PHOTO 12



РНОТО 13



РНОТО 14



РНОТО 15

MATERIAUX COMPOSITES SANDWICHS POUR LA CONSTRUCTION NAVALE MILITAIRE.

GERALD J. (1) LE LAN J.Y. (2) OLIVIER V. (1)

RESUME - Dans le but de qualifier une technologie avancée du type "composite sandwich" applicable aux futurs navires militaires, et en particulier pour les coques, le Service Technique des Constructions et Armes Navales (STCAN) a lancé un développement exploratoire. Etalé sur environ trois ans, ce développement comprend d'abord la définition et la caractérisation d'une vingtaine de matériaux de base. Ensuite vient la sélection de plusieurs sandwichs qui, au fur et à mesure des essais, seront écartés, modifiés ou conservés. Parallèlement à cela, une étude particulière est menée sur les problèmes d'assemblage de ces sandwichs. Finalement, l'étude se terminera par la réalisation et la qualification d'un tronçon de navire à l'échelle 1. Cette communication expose la démarche suivie, reprend en détail les différentes phases de l'étude et présente les perspectives d'applications.

mots-clés: composite, sandwich, navire militaire, coque, développement.

ABSTRACT - The STCAN, "Service Technique des Constructions et Armes Navales" (the French Warship Engineering Office) is involved in a prospected developpement, which object is to evaluate sandwich materials structures of advanced technology, applicable for future warship hulls. During about three years this developpement should define and characterize about twenty basic materials, and several types of sandwiches will be chosen, modified or gived up, in accord with the test results. At the same time the question of sandwich joints is deeply studied. At last, the investigation programme will lead to the realisation and the evaluation of a real ship section. This contribution aims to describe the research process, it recapitulates in detail the different stages of investigation and concludes on the applying prospect.

key-words: composite, sandwich, military vessel, hull, developpement.

⁽¹⁾ Service Technique des Constructions et Armes Navales, Groupe MSN, Section Structures Navales, 8 boulevard Victor, 75 732 PARIS Cedex 15, France.

⁽²⁾ Direction des Constructions et Armes Navales de LORIENT, Sous-Direction Navires, Bureau d'Etudes Coques, BP 41, 56 998 LORIENT NAVAL, France.

1 - INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Le STCAN a lancé en 1986 un développement exploratoire dans le but de qualifier une technologie avancée du type "composite sandwich" et de l'appliquer à la construction de coques de navires militaires. Cette étude se situe dans la continuation de la voie ouverte avec la technologie C.V.R. du Chasseur de Mines Tripartite et dans le prolongement naturel de l'évolution engagée à l'occasion du programme de "Bâtiments Anti-Mines Océaniques" (BAMO).

Dans le cadre des projets de bâtiments de surface militaires actuellement à l'étude, il devient de plus en plus difficile de respecter les critères définis dans le cahier des charges (voir annexe 1). C'est une des raisons pour laquelle la solution sandwich est examinée. En effet, pour arriver à un coût matière et de mise en oeuvre le plus bas possible, à des caractéristiques mécaniques élevées, à une masse raisonnable et à une meilleure prise en compte des aspects vulnérabilité (chocs sous-marins, tenue au feu,...) et fonctionnalité (isolation, revêtement,...), il semble nécessaire de passer par la technologie sandwich.

2 - PARTICIPANTS

Cette étude, pilotée par le Groupe "Matériaux et Structures Navales" du STCAN nécessite la participation des DCAN de LORIENT, CHERBOURG et TOULON (Sous-Division Aéronautique de CUERS). Celles-ci apportent leurs compétences et leurs moyens respectifs à chaque phase de l'étude. C'est donc avec leur collaboration que les décisions importantes sont prises.

D'autre part, compte tenu des moyens propres du STCAN et des délais, il est nécessaire de sous-traiter une partie des études et essais. Pour cela, il a été fait appel à l'ETCA⁽¹⁾ ainsi qu'aux industriels suivants:

- . le GIS Ouest Composite (Groupement d'Intérêt Scientifique)
- . le BUREAU-VERITAS
- . la société HUREL-DUBOIS
- . la société BERTIN
- . la société RDM/ACX

→ composé du CETIM de Nantes de l'ENSM de Nantes de l'IFREMER de Brest

⁽¹⁾ Etablissement Technique Central de l'Armement, Centre Mécanique Chimie Matériaux, 16 bis avenue PRIEUR DE LA COTE D'OR, 94 114 ARCUEIL CEDEX, France.

3 - DEROULEMENT

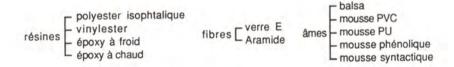
Dans ce développement exploratoire est prévue toute une série d'études, d'essais entrecoupés de choix, tant au niveau des matériaux de base (résines, fibres) que des peaux, des âmes, des sandwichs, des assemblages, du tronçon, ainsi que des méthodologies d'essais à employer. Un effort particulier est fait sur l'étude et la qualification des assemblages et fixations qui posent de nouveaux problèmes par rapport aux solutions monolythiques (composites ou métalliques).

Une liste détaillée des opérations est présentée en annexe 2.

4 - CHOIX DES MATERIAUX DE BASE

Les premières études réalisées ont mis en évidence un certain nombre de matériaux susceptibles d'être retenus pour la confection du sandwich final.

Les matériaux sont les suivants :



Certains matériaux ont été écartés, comme:

-La résine phénolique, pour ses faibles propriétés mécaniques et sa mise en œuvre délicate. L'aspect tenue au feu est maîtrisé par l'usage de peintures intumescentes.

-Les fibres de carbone, pour leur coût et leur faible tenue aux chocs.

-Les nids d'abeilles, pour des problèmes de collage peau-âme ainsi que pour le risque de remplissage des cellules en cas de voies d'eau.

5 - PERSPECTIVES D'APPLICATIONS

Les applications envisagées sont multiples, à savoir :

Les superstructures des futurs bâtiments de surface

Ceci pour plusieurs raisons:

- a) Le coût: Les locaux aménagés nécessitent des revêtements, isolations, qui majorent le coût des superstructures métalliques (acier, alliage léger). Les sandwichs intègrent ces fonctionnalités.
- b) La structure: Les superstructures métalliques (acier et même alliage léger) conduisent à des concentrations de contraintes sur la poutre navire, qui imposent une limitation de la longueur des blocs, une mise en place de joints glissants, etc... La solution composite libère totalement l'architecte de ces aspects.
- c) Le poids et la stabilité: Les systèmes d'armes modernes conduisent à des superstructures volumineuses et hautes (ex: hangar pour hélicoptère, etc...). En acier, elles conduisent à une réduction de stabilité qu'on ne peut rétablir qu'en élargissant la carène, d'où perte de performances. La solution alliage léger est coûteuse et vulnérable à l'incendie. Le sandwich, de poids comparable à l'alliage léger et de coût comparable à l'acier, est une solution.
- d) Autres raisons: la solution sandwich permet d'obtenir une plus grande rigidité et donc de limiter le raidissage. Cela entraîne une plus grande facilité pour l'aménagement, le passage des câbles et des gaines de ventilation.

Les ponts-passerelles des SNLE

Actuellement en CVR monolythiques raidis, les futurs pontspasserelles des SNLE pourraient être faits en sandwich, ceci pour augmenter la rigidité de la structure, diminuer la masse et réduire les phénomènes de résonance.

Des éléments extérieurs à la coque résistante du PAN

Les raisons sont, entre autres, le gain de poids, les coûts moindres et l'élimination du problème de corrosion.

Les futurs bâtiments de surface

Ces bâtiments, utilisant de nouveaux concepts de coques pour lesquels le poids est un critère important, associé à des contraintes de coût et de vulnérabilité réduites.

Exemples: - Des CATAMARANS classiques qui, après le BAMO, pourraient être envisagés pour d'autres missions.

- Des NES (Navires à Effets de Surface).

ANNEXE 1

CAHIER DES CHARGES POUR LA COQUE

- 0 COUT MATIERE ET MISE EN OEUVRE COMPATIBLE AVEC LES CONDITIONS DE CHANTIER ET LES TONNAGES UTILISES EN CONSTRUCTION NAVALE.
- 1 Aptitude à servir en milieu marin :
 - . conservation des propriétés physiques et mécaniques en milieu marin;
 - . vieillissement dû à l'air, à l'eau, ainsi qu'aux écarts de température garantissant une durée de vie de 30 ans minimum.
- 2 Performances mécaniques élevées :
 . rigidité, cisaillement, fatigue

 . perforation, dislocation

 . tenue en température

 . taux d'amortissement élevé

 Valeurs les plus élevées possible permettant de diminuer l'échantillonnage des structures.

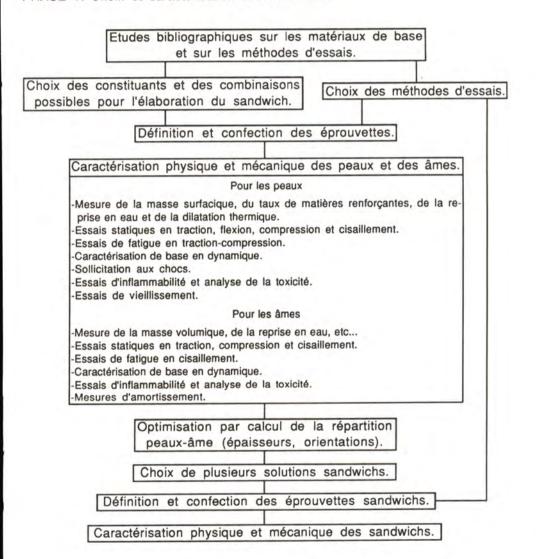
 Meilleure tenue possible aux agressions militaires et aux fortunes de mer.

 Conservation des caractéristiques mécaniques dans la plage -30° à +70°C.
 - . conservation des performances mécaniques sous sollicitations dynamiques.
- 3 Masse surfacique peu élevée, avec possibilité de variation suivant la localisation de l'élément de structure.
- 4 Tenue au feu et absence de toxicité en cas d'incendie :
 - dans un incendie, la structure doit conserver son intégrité et autant que possible ne pas dégager de fumée pouvant gêner la lutte contre l'incendie et intoxiquer l'équipage.
- 5 Prise en compte de certains aspects fonctionnels :
 - . isolation, revêtement, autres fonctions d'un caractère plus militaire.

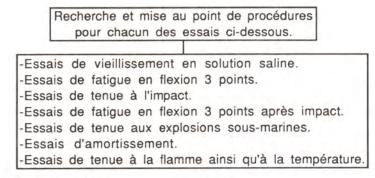
ANNEXE 2

LES DIFFERENTES PHASES DU DEVELOPPEMENT EXPLORATOIRE

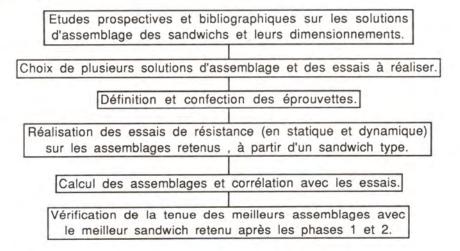
PHASE 1: Choix et caractérisation des matériaux



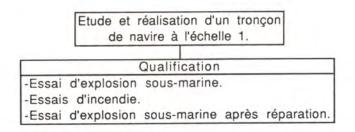
PHASE 2: Essais complémentaires sur sandwichs



PHASE 3: Les assemblages



PHASE 4: Le tronçon



SESSION V - CONSTRUCTION NAVALE PÊCHE ET PRODUITS

Présidence: M. BONZOM, Directeur général des ACMH.
M. CONAN, Directeur de l'INERN

Matériaux composites dans la construction navale pêche

M. BONZOM

Utilisation des tuyauteries GRP dans les circuits basse et moyenne pression des plates-formes offshore M. DUFOUR

Les composites obtenus par pultrusion dans la construction des plates-formes offshore

J.C. PARDINA, A. BENICHOU

Les mousses syntactiques

M. FRIER

Critères économiques pour l'emploi des matériaux composites en technologie navale dans l'activité pêche maritime M. REYNE

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 331 à 342

MATERIAUX COMPOSITES DANS LA CONSTRUCTION NAVALE PECHE

BONZOM Michel*

RESUME - Origine et évolution en France de la construction navale en composites pour les bateaux de pêche - Justification et choix des matériaux - Mise en oeuvre et rappel des technologies les plus courantes - Aspect règlementaire - Aspect économique - Perspectives de développement

mots-clés : composites, moulage, outillage

ABSTRACT - origin and evolution of french G.R.P. fishing boats ship building - Justification and choice of materials - Most encountered technologies - Rules of construction - Economical point of view - Developments

key-words : composits, molding, tooling

^{*}Ateliers et Chantiers Maritimes d'Honfleur, 14600 HONFLEUR, France

CHAPITRE 1

ORIGINE ET EVOLUTION

Les premiers bateaux en composites utilisés pour la pêche en France ont été des bateaux de plaisance de 5 à 8m spécialement aménagés pour des petits métiers de ligne, de filets ou de casiers.

Les premières constructions spécifiques pour la pêche ont vu le jour aux chantiers de Monsieur ALLEMAND au GRAU D'AGDE où deux sardiniers de 15m furent construits en 1972. Les lancements en 1977 du "JO FLORENCE II", chalutiers pêche AR de 15m par les chantiers ARCOR et du "CAP 2000", chalutier pêche AR à pont couvert de 18,50m, marquent une étape importante dans le développement de ce mode de constructions. Depuis cette époque, on assiste à une forte progression du nombre d'unités construites en composites par rapport aux matériaux concurents (bois, acier et plus récemment aluminium).

La flotille de pêche artisanale compte en 1987 14.415 unités dont 7.850 unités sont des bateaux de moins de 8m et 7.200 unités sont des bateaux en bois de plus de 15 ans.

L'évolution de la structure du parc entre 1982 et 1987 est la suivante :

	BOIS %	METAL %	COMPOSITES %
1982	82	5	13
1986	73	8	19
1987	70	9	21

Pour les 510 bateaux entrés en flotte durant l'année 1987 :

- 83% sont des bateaux de moins de 12m dont 51% sont en composites - 16% sont des bateaux de 12 à 27m dont 35% sont en composites

La progression de la construction en composites est particulièrement significative quand on connaît l'attachement aux traditions et la grande prudence face à la nouveauté des principaux protagonistes.

Parmi la population des bateaux de pêche en composites (2994 unités en 87) la distribution par taille est la suivante :

moins de 8m	8 à 12m	12 à 16m	16 à 27m
72%	22%	3%	2.3%

On voit que la progression de la construction en composites par rapport aux autres matériaux est en raison inverse de la taille des bateaux. Ceci est dû au fait que les difficultés techniques ainsi que les niveaux d'investissement requis pour les outillages croissent rapidement avec la taille du navire.

A noter cependant que dans le cadre d'une COREMODE récente (Commission Régionale de Modernisation), organisme paritaire décidant des aides au financement de ces bateaux, 43% des projets 1988 présentés pour des bateaux de 16 à 25m, sont des projets de construction en matériaux composites.

Sur 12 adhérents à l'Union des Chantiers Navals, association professionnelle regroupant les principaux chantiers concernés par la pêche artisanale, quatre constructeurs proposent des navires en composites soit 1/3 des entreprises.

CHAPITRE 2

JUSTIFICATION ET CHOIX DES MATERIAUX

Les arguments commerciaux les plus couramment développés pour justifier le choix des composites pour la construction navale pêche sont les suivants :

- Insensibilité des matériaux aux agressions physico-chimiques ou biologiques : pas de corrosion possible ni d'attaque par les micro-organismes
- Maintenance aisée et réduite par rapport à l'acier ou au bois
- Bon vieillissement
- Amélioration du confort de bord
- Bonne adaptation des matériaux pour des constructions en petites séries conduisant à des coûts concurrentiels par rapport aux autres matériaux

L'expérience acquise au cours des dernières années permet d'attester la validité de ces arguments en dépit du fait que certains points tels que le vieillissement soient difficiles à quantifier, ou ne font pas l'objet de suivis précis ni de la part des armateurs, ni de la part des chantiers.

Un autre faisceau d'arguments plus techniques est le suivant :

- Les matériaux composites se prêtent bien à la réalisation de formes complexes, ce qui permet une meilleure définition des carènes

- Les coefficients de transmissibilité thermique et acoustique des matériaux composites confèrent au bateau une meilleure isolation thermique naturelle en même temps qu'une signature sonore atténuée par rapport au bateau équivalent bois ou acier, ceci étant particulièrement intéressant pour le chalutage pélagique ou le chalutage dans les petits fonds.
- Le faible poids de construction (environ 20% de moins que l'acier), permet de répartir les masses et les lests de façon à améliorer la stabilité, étant entendu qu'à définition identique, un chalutier en acier ou un chalutier en composites doivent avoir un déplacement semblable à cause de l'inertie nécessasire pour tracter dans de bonnes conditions les mêmes apparaux de pêche
- Une meilleure glisse due aux formes et aux états de surface qui améliore le rendement de propulsion
- Une sécurité accrue en cas de chocs importants (abordage ou collision) du fait du comportement élastique des structures sous fortes contraintes

Pour le choix des matériaux. les critères suivants sont généralement retenus par les chantiers :

a) Propriétés mécaniques :

Le composite doit résister aux contraintes qui lui sont imposées.

- Recherche d'une association fibre et résine possédant des propriétés d'allongement voisines
- Recherche d'une bonne adhesion fibre-matrice
- Recherche du meilleur compromis entre flexion, traction et compression $% \left(1\right) =\left(1\right) +\left(1\right) +\left$

b) Endurance :

Le matériau choisi doit vivre et vieillir dans son milieu d'utilisation de la manière la plus lente possible. Ceci élimine les matrices et les renforts absorbant trop facilement l'eau. ainsi que les produits alliés qui pourraient présenter une sensibilité à l'eau (liants émulsion)

- Recherche également de résistance au U.V. et à la température
- c) Résistance chimique :

Cele-ci est généralement apportée par le gel coat, les matrices et renforts devant cependant être peu oxydables ou hydrolysabes

d) Mise en oeuvre

La facilité, la fiabilité de la mise en oeuvre ainsi que les prix de revient des matériaux utilisés, sont également des critères déterminants.

Dans la pratique, la prise en compte de ces critères élimine un certain nombre de matériaux en fonction de leur coût tels que le carbone ou les aramides ou des difficultés de mise en oeuvre liées aux dimensions des navires, telles les résines époxydiques nécessitant une cuisson post-opératoire.

Le meilleur compromis et le plus largement utilisé actuellement est :

- Matrices : résines polyester insaturées isophtaliques et orthophtaliques
- Renforts : verre E en mats et rovings

CHAPITRE 3

MISE EN OEUVRE ET RAPPEL DES TECHNOLOGIES LES PLUS COURANTES

1. MISE EN OEUVRE

Contrairement aux autres modes de construction où l'on trans forme des matières d'oeuvre bien connues telles que le bois ou l'acier, la construction en composites implique la fabrication des matériaux par le chantier.

Ceci entraîne un certain nombre de règles à respecter de manière impérative afin d'assurer le niveau de qualité requis pour le produit fini :

- Le stockage des résines et du verre doit être étudié afin d'éviter toute reprise d'humidité. Un contrôle d'entrée doit être exécuté
- Les locaux de moulage doivent obligatoirement être thermostatés et ventilés afin de maintenir une température constante jour et nuit entre 16° et 20°C avec une hygrométrie relative inférieure à 75%

- Le personnel d'exécution doit être entraîné au respect des spécifications de moulage et doit veiller à la qualité de l'élaboration du stratifié afin que le produit fini soit exempt de bulles ou de défauts pouvant conduire à terme à du cloquage ou du délaminage. Ce point est particulièrement important car les caractéristiques mécaniques du produit fini dépendent directement de la de la qualité de l'élaboration.

Une difficulté supplémentaire réside dans le fait que le con trôle non destructif de stratifiés de forte épaisseur (20 à 40mm) n'est pas aisé même en ayant recours à des méthodes ultrasoniques

2. TECHNOLOGIES LES PLUS COURANTES

Les technologies retenues par les chantiers peuvent varier sensiblement selon :

- la taille du navire
- le nombre d'unités à construire
- la capacité d'investissement en outillages

Dans tous les cas, le procédé d'élaboration est la stratification manuelle au contact avec projection de résine.

Les produits de base, le verre et la résine, à leur état d'emploi n'ayant pas de tenue mécanique suffisante, il est impératif de disposer de supports pour leur mise en oeuvre

Procédé sans moule ou semi-moulage (vue 1)

Ici, le support est constitué d'une ossature en bois, mâle ou femelle sur laquelle est tendue une feuille mince en composite ou un tissu de type C.FLEX

Une variante, utilisée pour les grandes dimensions, consiste à border l'ossature par un contre-plaqué (surfaces développables, navires à bouchains).

Ce procédé est utilisé pour des productions unitaires et conduisent à perdre tout ou partie des outillages créés. De plus, il nécessite des opérations de finition (enduits, ponçage) longues et onéreuses

Procédé sur moule femelle

C'est le plus répandu car sa mise en oeuvre est très rapide et ne nécessite aucune opération de finition Les principales qualités d'un moule sont :

- une bonne précision géométrique
- une grande rigidité dimensionnelle
- un très bon état de surface

Les moules sont généralement exécutés en :

- acier pour les éléments plans ou développables
- composite verre/résine pour les éléments en forme

Dans ce dernier cas, les moules sont des impreintes prise sur une forme mère (vue 2)

ORGANIGRAMME DE CONSTRUCTION (vue 3)

MOULAGE DE BORDE (vue 4)

Ce moulage, selon la taille du navire, peut s'exécuter en moule fermé ou en demi-moules ouverts

Après préparation du moule et application d'agents de démoulage (cire) :

- Application du gel coat : étanchéité et décorations
- Stratification continue des mats et rovings : Résistance mécanique
- Stratification des renforts locaux : Surépaisseurs durcies aux endroits particulièrement sollicités ou exposés à des chocs : étrave - flancs AR - tableau AR
- Mise en place des raidisseurs longitudinaux et transversaux : élongis - varangues - membrures

MOULAGE DES PONTS (vue 5)

Pour ces éléments plans, la solution sandwich est souvent re tenue afin d'obtenir une plus grande inertie sans augmenter la masse

Les âmes les plus utilisées sont : le contre-plaqué Marine le feutre verre - le balsa en bois debout

Il convient de prévoir au moulage les réserves ainsi que les inserts qui permettent d'exécuter ultérieurement les surbaux. les descentes ou les fixations d'apparaux.

La stratification en plafond étant délicate, il est opportun de profiter de la position en moule pour effectuer certaines opérations telles que l'isolation du plafond de cale à poisson

MOULAGE DES CLOISONS

Moulage à plat identique au moulage du pont La technique sandwich est également utilisée

MOULAGE DES SUPERSTRUCTURES

La réalisation des superstructures peut être faite :

- soit en moule en ayant recours à la technique du sandwich
- soit en contre-plaqué Marine recouvert de composite verre/résine

Ce dernier mode d'élaboration dispense de faire l'investissement d'un moule, mais conduit à des opérations de finition (enduits et peinture)

ASSEMBLAGE

Liaisons homogènes (vue 6)

Ce sont les liaisons entre éléments C.V.R. telles que :

- membrures élongis lisses varangues sur bordé
- liaisons pont/bordé cloison/bordé

Liaisons hétérogènes (vue 7)

Ce sont les assemblages entre composites et autres matériaux : châssis moteur - apparaux pêche - portique - épontilles étambot, etc.

Ces liaisons peuvent être directes ou indirectes par mise en place préalable d'inserts dans le C.V.R.

Ceci est un bref rappel des technologies les plus courantes utilisées par les chantiers. Il convient de noter que les opérations de stratification sont essentiellement manuelles. comparativement à d'autres procédés d'élaboration de pièces industrielles en composites, tels que l'injection basse pression. l'injection vide ou le pressage à froid ou à chaud. Il est évident que la raison de cet état de fait est la dimension des pièces à traiter qui entraînerait des investissements très importants dans des precessus opératoires impossibles à amortir du fait des petites séries de matériels à produire.

Les moules pour travail au contact représentent déjà des investissements lourds comparativement à la taille des entreprises concernées. A titre indicatif, les moules nécessaires à la réalisation de bateaux d'environ 20m ont un coût approximatif de 3.5 à 4 M.F.

Notre chantier confronté à ce problème a imaginé un système de construction modulaire.

APERCU SUR CONSTRUCTION MODULAIRE

En règle générale, en construction moulée, un moule est capable d'une pièce que l'on peut reproduire en d'autant plus d'exemplaires que le moule est de bonne qualité.

Lorsque les perspectives de séries sont limitées, les montants d'investissements en outillage peuvent paraître prohibitifs. Souhaitant réaliser des navires de 18,50m à 26m, nous avons conçu et réalisé des outillages capables non pas d'un navire, mais d'une gamme de navires.

Des éléments standardisés de moules sont composés entre eux pour constituer l'outillage spécifique nécessaire à la fabrication d'un bateau donné (vue 8).

Ce système, éprouvé sur une trentaine de constructions.trouve d'autant plus sa justification que l'introduction de la C.A.O. permet, par mémorisation des standards, de composer très rapidement avec le futur exploitant le navire le mieux adapté à ses spécifications.

CHAPITRE TV

ASPECT REGLEMENTAIRE

Les règlements applicables à la construction navale en composites sont les suivants :

- Tentative Rules for the Construction and Classification of Vessels of Glass Reinforced Plastics du DET NORSKE VERITAS (édition de 1978)
- Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels de AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (édition de 1978)
- Rules and Regulations for the Classification of Yacht an Small Crafts du LLOYD (édition de 1978)
 - Règlement pour la Construction et la Classification des Navires en Polyester renforcé au Verre Textile du BUREAU VERITAS (édition de 1979)

A noter que le règlement du BUREAU VERITAS, qui est le plus largement utilisé en France, fait l'objet d'une refonte et qu'une nouvelle édition paraîtra dans le courant de l'année.

Ces règlements qui sont comparables dans l'esprit aux règlements de construction existant pour les autres matériaux, fixent l'ensemble des règles à observer pour les constructions en composites. Ils comportent cependant, et notamment le Règlement du BUREAU VERITAS, des chapîtres particuliers concernant les installations, la main-d'oeuvre, le stockage des produits de base et leur mise en oeuvre, tous points importants dont dépend très directement la qualité des produits fabriqués.

CHAPITRE V

ASPECT ECONOMIQUE

COUT DE CONSTRUCTION

Malgré des prix de matières premières supérieurs à ceux de l'acier, le coût de construction d'un navire en composites n'est pas plus élevé que celui du même navire en bois ou en acier du fait d'une moindre consommation de main-d'oeuvre. Plus les bateaux sont petits et plus l'effet de série joue favorablement sur les coûts grâce à la bonne adaptabilité des composites à ce type de travail. A partir de 16m, le marché est malheureusement trop étroit pour que cet effet soit sensible.

EXPLOITATION

A notre connaissance, il n'existe pas en France d'étude particulière concernant les coûts d'exploitation comparés des navires en bois, acier et composites.

Selon des chiffres recueillis auprès d'un groupement de gestion exploitant un parc de navires où tous ces types de construction sont représentés, il apparaît que :

- le nombre de jours d'arrêt pour entretien de coque est divisé par 5 par rapport au bois ou à l'acier
- l'augmentation de productivité induite est de 3%
- le coût d'entretien coque en composites est de 55% du coût d'entretien d'une coque équivalente en acier et de 51% du coût d'entretien d'une coque équivalente en bois.

Il convient d'ajouter que le bon comportement au vieillissement des composites assure une meilleure conservation de l'investissement.

CHAPITRE VI

PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT

Il est à peu près certain que la progression des matériaux composites en construction navale pêche va continuer dans les années à venir et notamment dans la tranche des 16-25m.

A la suite de constructions à caractère quasi expérimental de catamarans de pêche (Chantiers BLAMENGIN notamment), il est assez probable que l'on assistera à un développement de navires de pêche non conventionnels en composites, grâce aux caractéristiques mécaniques des matériaux ainsi qu'à leur bonne adaptabilité pour la réalisation de formes complexes.

Ainsi que l'on peut le constater dans d'autres industries telles que l'aéronautique ou l'automobile. le fort développement des matériaux aura une répercussion dans la construction navale pêche où, les structures, les procédés d'élaboration et de mise en oeuvre connaîtront une évolution.

Cette évolution devra être accompagnée d'une adaptation simultanée des règlementations afin de ne freiner ni l'innovation ni les améliorations techniques que ces développements permettront de mettre au service de ce secteur de la construction navale. UTILISATION DES TUYAUTERIES GRP

DANS LES CIRCUITS BASSE ET MOYENNE PRESSION
DES PLATEFORMES OFFSHORE

DUFOUR X. (1)

RESUME - L'utilisation des tuyauteries GRP se justifie dans les domaines où la corrosion des tuyauteries acier nécessite un entretien onéreux.

Quel type de tuyauterie choisir, sur quelle base : les spécifications. Le problème de l'installation de ces tuyauteries, les contrôles. Exemples de réalisations.

 $\frac{\mathsf{ABSTRACT}}{\mathsf{rusting}}$ - The use of GRP piping is justified in those areas where the $\frac{\mathsf{rusting}}{\mathsf{rusting}}$ of steel piping necessitates burdensome upkeep.

What type of piping should you choose, on what basis : the specifications. The problem of installing this piping, the controls.

Some installation examples.

1. POURQUOI DES TUYAUTERIES EN EPOXY FIBRE DE VERRE ?

Depuis maintenant 13 ans, nous collaborons avec des sociétés pétrolières qui, avec beaucoup de prudence, ont testé ces tuyauteries sur les circuits de traitement d'eau de refroidissement, de ballast, d'incendie ... pour les plateformes et les bateaux.

- . Une fabrication industrialisée et de produits de qualité constante
- . Des techniques de mise en place et d'assemblage fiables
- . Sa compétitivité économique avec les autres matériaux en font maintenant un matériau qui mérite d'être pris en considération.

2. QUEL TYPE DE FABRICATION DE CES TUYAUTERIES CHOISIR ?

a) Spécifications

De nombreux essais de résistance mécaniques, et notamment aux chocs, et tests au feu, ont permis de s'orienter vers des choix de technologie. Des spécifications ont été établies, tenant compte à partir des techniques de fabrication existantes, des conditions particulières de service en milieu marin.

⁽¹⁾ Société Bourguignonne de Plomberie Industrielle 89220 ROGNY-LES-7-ECLUSES, France.

Ces spécifications concernent aussi bien la qualité des matières premières que les contrôles en cours de fabrication, les tests de réception en usine des tubes et accessoires. Elles font de plus en plus référence aux normes AFNOR ou ASTM pour les matériaux composites et jonctions.

b) Epaisseur des tubes

Le plastique renforcé fibre de verre est un matériau composite par opposition aux matériaux homogènes (acier, fonte, thermoplastique). A même épaisseur, des variations concernant la teneur en verre, l'orientation des fibres, la nature de la matrice en résine thermodurcissable, etc., peuvent conduire à des propriétés physiques et chimiques différentes.

Il n'y a pas de relation stricte entre l'épaisseur de la paroi d'un tube GRP et ses performances mécaniques. Les spécifications des tubes pour les divers usages feront donc appel non à la notion d'épaisseur mais à celle d'obligation de résultats sur éléments finis (tubes + accessoires + jonctions).

c) Vieillissement à long terme

Le choix du matériau époxy fibre de verre est essentiellement basé sur sa résistance à long terme à la corrosion sous contrainte. On a établi une base de calcul de la durée de vie de ces matériaux sur une durée de 50 ans. La procédure utilisée dans ce cas est décrite dans la norme ASTM 2992. Cette norme est valable que si les conditions de service sont prises en compte.

Il y a 2 méthodes : a) test en pression cyclique (25 cycles/mn) b) pression statique

Les conditions de service (température, pression, nature fluide), de même que les types de jonction, ont une incidence sur les caractéristiques finales de l'installation. Il est donc nécessaire de connaître la résistance à long terme des jonctions et celles des accessoires.

Vous trouverez ci-joint à titre d'exemple une courbe de régression à long terme sur un type de tube prélévé chez le fabricant (valeur ramenée à la contrainte circonférentielle).

Si notre tuyauterie travaille en pression cyclique et que vous souhaitez un coefficient de sécurité de 1,5 par rapport à la contrainte de service, vous prendrez comme valeur de contrainte : 35/1,5 = 23 N/mm2.

Dans la cas de pression statique, vous avez comme valeur à 50 ans 80 N/mm2. Vous pouvez envisager d'avoir un coef. de sécurité de 2, vous prendrez 40 N/mm2 (fig. 1).

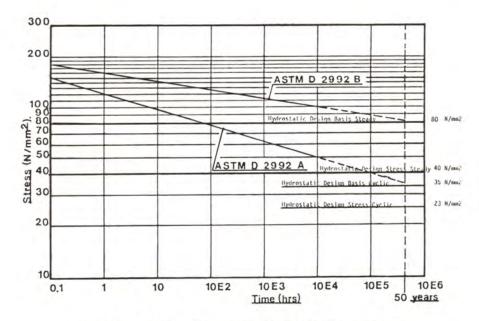


FIGURE 1 : STATIC - CYCLIC STRESS REGRESSION - ASTM 2992

d) Tenue au feu

Comme pour la tenue mécanique à long terme des tuyauteries, la tenue au feu varie avec les procédés de fabrication, le choix des résines, etc.

De nombreux essais ont été réalisés sur ces tuyauteries, les premiers à l'initiative de l'IFP datent de 1970. Depuis les compagnies pétrolières en ont fait d'autres confirmant les résultats de l'IFP et comparant les différents produits existant sur le marché. Cela a abouti à remplacer sur les plateformes les réseaux en cupro-nickel par des tuyauteries en époxy fibre de verre.

3. INSTALLATION

Un bon choix des tubes et accessoires n'est pas suffisant pour assurer une installation durable : la technique de mise en oeuvre nécessitant un personnel qualifié et agréé, nous avons élaboré des spécifications précises de pose, de supportage, et établi une procédure d'homologation des tuyauteurs et de contrôle qualité en cours de montage et à la réception.

La fonction du supportage est très particulière à ce type de matériau. La tuyauterie GRP est par nature 5 fois plus élastique que la tuyauterie acier, et 4 fois plus légère. D'où la nécessité de la délester des charges annexes telles que des vannes.

4. REALISATIONS

Actuellement, nous avons installé plus de 20.000 mètres de tubes et 15.000 accessoires du diamètre 25 à 500 mm sur des plateformes offshore. Si la lère plateforme avec un réseau incendie en GRP date de 1976, c'est maintenant un nombre important d'autres plateformes qui ont leurs réseaux avec ce type de tuyauterie.

Nous considérons que ce type d'installation doit être encore confié à une seule Entreprise, et nous sommes organisés pour répondre à ce type d'exigence. Cette Entreprise doit prendre en charge les études, le choix des matériaux (en accord avec le client), les contrôles de qualité et conformité aux normes jusqu'à la mise en place sur site. C'est cette formule de responsabilité globale qui, à notre avis, donne la meilleure garantie de sérieux et d'efficacité à nos clients.

On peut résumer ainsi les différents éléments pour l'utilisation des tuyauteries GRP :

- . Définition des conditions de service
- . Nécessité d'un bon choix de produit par établissement de spécifications
- . Appel d'offre auprès de spécialistes de l'installation de ce matériau
- . Respect des règles de montage spécifiques à ce matériel

Tous ces paramètres sont surmontables, en sont pour preuve les nombreuses installations qui fonctionnent à la satisfaction des exploitants.

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - nº 7 - 1988 - IFREMER, pages 347 à 356

LES COMPOSITES OBTENUS PAR PULTRUSION DANS LA CONSTRUCTION DES PLATES-FORMES OFFSHORE

J.C. PARDINA et A. BENICHOU

RESUME - La pultrusion c'est le procédé pour la fabrication de profilés composites.

L'utilisation des structures à base de profilés en fibres de verre représente un gain de poids par rapport aux structures en acier, offre une résistance supérieure à la corrosion, élimine les coûts d'entretien inhérents à la corrosion, et permet de résoudre les difficultés d'installation en pleine mer sans arrêt de production ; ce qui explique la réalisation d'une plate-forme offshore en 1986 pour Shell.

mots-clés : offshore, pultrusion, légèreté, corrosion, entretien, manipulation.

ABSTRACT - Pultrusion is a process in order to make composite shapes.

The use of fiberglass structures show weight gain compared with steel structures, offer superior corrosion resistance, eliminate maintenance costs due to corrosion and allow to resolve some installations difficulties in the open sea without shutting down well production. This explain why a Shell offshore platform was installed in 1986, using pultruded profiles.

key-words : offshore, pultrusion, lightness, corrosion, maintenance, handling.

<u>LA PULTRUSION</u> - Chaque année, les matériaux thermodurcissables armés de fibres de verre témoignent de leur progression élevée. Le procédé de pultrusion est un exemple de cette remarquable croissance puisqu'aux Etats-Unis, celle-ci se situe entre 15 et 20 %. La pultrusion c'est l'un des rares procédés industriels qui permet de fabriquer des composites en continu avec une fiabilité industrielle supérieure à celle des autres procédés de transformation des matériaux renforcés. La pultrusion, chaque jour, montre de nouvelles et remarquables applications ; parmi celles-ci, l'utilisation de profilés pultrudés dans la réalisation de plates-formes "offshore".

PERMALI COMPOSITES 8, rue André Fruchard 54320 MAXEVILLE

CHAPITRE 1

LA PULTRUSION

A1. DEFINITION DES MATERIAUX COMPOSITES ET DU PROCEDE DE PULTRUSION

Les matériaux composites se définissent comme un assemblage intime d'au moins deux corps non miscibles, à structure différente dont les qualités individuelles se combinent et se complètent en donnant un matériau hétérogène dont les performances globales sont améliorées.

Dans le domaine courant, le terme de "matériau composite" est utilisé pour les matériaux comprenant des fibres de renforcement liées par une résine.

Le procédé de PULTRUSION (to pull = tirer) est une technique connue industriellement depuis les années 50 pour la fabrication continue de profilés rectilignes, à section constante (ouverte ou fermée), hautement renforcés dans le sens longitudinal et dont les caractéristiques mécaniques peuvent, avec un choix cohérent des composants résines et fibres, rivaliser avec certains métaux.

Ce procédé consiste à imprégner des fibres de verre par une résine thermodurcissable ou thermoplastique et à les tirer, après conformation au travers d'une filière chauffante parfois précédée par un préchauffage hautes fréquences ou ultra hautes fréquences.

A2. LE PROCEDE DE PULTRUSION

1. Description d'une ligne

Une ligne comprend les équipements suivants :

- Le cantre : ce dispositif supporte les bobines et évite de tordre les mèches par un bon dévidage de la fibre.
- L'imprégnation : bac dans lequel la matière imprègne les renforts.
- Dispositifs de conformation : ceux-ci sont constitués par des plaques munies de lumière dont l'agencement permet un alignement correct des renforts avec l'axe du profilé et évite des tensions latérales.
- La filière : elle est généralement en acier d'outillage (110 kg/mm²). Un chromage prolonge sa durée de vie. La longueur des filières se situe entre 0,50 et 1,2 M ; elle dépend de la forme, de la section et de la vitesse de défilement souhaitée du profilé.
- Mécanisme de traction : à chenille ou plateaux alternatifs. Force de traction : 1 à 12 tonnes.
- Système de coupe : une scie circulaire à base de carbure de silicium ou de diamant permet la découpe automatique des profilés.

2. Les composants utilisés

- a) Renforts
- Ceux qui constituent une barrière chimique
 - . voile inorganique = verre C
 - . voile synthétique = polyester
- Ceux qui apportent l'ossature mécanique
 - . les fibres de verre ; celles-ci peuvent se présenter sous la forme : de fils ou mèches ; exemples : rovings, spun rovings et bulky rovings tissus (unidirectionnels et bidirectionnels), mats

Le taux de verre est variable en pultrusion, il se situe entre 40 et 80 % cela permettant une grande souplesse dans les variations des caractéristiques mécaniques.

- . les fibres d'aramide ; exemple "Kevlar"
- . les fibres de carbone

Il est à noter l'existence des composites hybrides ; ceux-ci sont constitués de deux ou plusieurs types de fibres de renforcement qui conviennent à l'application parce qu'elles sont complémentaires et judicieusement choisies. En général, c'est une association de carbone ou d'aramide avec le verre.

Exemple : Verre avec une addition de carbone ; cela améliore les résistances en traction et en flexion ainsi que les modules en traction et en flexion.

Verre avec une addition d'aramide ; cela augmente les modules en traction et en flexion ; ainsi que la résistance à la traction.

- b) Matrices. Les matrices peuvent être de différentes natures :
- Résines thermodurcissables : polyesters, vinylesters, méthyl, méthacrylate, phénoliques et époxydes.
- Résines thermoplastiques
- Auxquelles on ajoute des additifs : charges minérales, agents anti-retraits, pigments, démoulants internes, catalyseurs...
- 3. Les dimensions des profilés
- Longueur : illimitée
- Largeur : celle-ci dépend du type et de la capacité de la machine
- Epaisseur des parois : généralement de 4,50 à 6,50 mm épaisseur minimale : 2,20 mm épaisseur maximale : environ 25 mm

4. L'aspect des profilés : couleur

Les profilés peuvent être colorés dans la masse avec une variété de couleurs. Toutes les faces sont lisses ; une finition ultérieure n'est pas nécessaire.

5. Les cadences de fabrication

Selon les dimensions de 0,30 à 1,20 mètre/minute ou plus dans les évolutions les plus récentes.

6. La main-d'oeuvre

Celle-ci est peu importante mais qualifiée.

7. La régulation informatisée du procédé

Au moyen d'analyseurs thermiques, on optimise les paramètres de température et de vitesse afin d'obtenir le meilleur compromis : qualité et coût.

A3. AVANTAGES ET LIMITES D'UTILISATION DU PROCEDE DE PULTRUSION

AVANTAGES	LIMITES
PROCEDE CONTINU	Section droite et constante
REPRODUCTIBILITE DES DIMENSIONS	Tolérances moins serrées que dans d'autres process
PERFORMANCES MECANIQUES ELEVEES DANS L'AXE DU PROFILE	Les propriétés transversales sont moins élevées ; mais avec les systèmes en déve- loppement, on pourra nettement les amé- liorer : ex. adjonction de dispositif d'enroulement filamentaire
COUT DES FILIERES RELATIVEMENT BAS	Séries > 1000 mètres
DES SECTIONS RELATIVEMENT GRANDES SONT POSSIBLES	Dans l'état actuel : . largeur = 1000 mm . hauteur = 200 mm
DES SECTIONS RELATIVEMENT PETITES SONT POSSIBLES	Dans l'état actuel : . 1,50 x 1,50 mm
REALISATION DE FORMES VARIEES ET COMPLEXES	Variations d'épaisseurs possibles mais non recommandées

REMARQUES

- Procédé continu : on peut fabriquer n'importe quelle longueur, à condition qu'elle soit compatible aux conditions de transport.
- Des performances dans l'axe du produit sont aisément obtenues ; dans le cas des fibres de verre/R.polyester :

Module d'élasticité

1000 < en flexion < 4000
daN/mm²

Résistance maximale

17 < en flexion < 70
daN/mm²

A4. CARACTERISTIQUES DES PULTRUDES

Les excellentes caractéristiques des profilés pultrudés expliquent leur succès. Ce sont :

- LEGERETE
- RESISTANCE MECANIQUE ELEVEE
- RAPPORT FAVORABLE : RESISTANCE MECANIQUE/POIDS
- RIGIDITE D = E x I MOYENNE = VERRE/POLYESTER
 ELEVEE = CARBONE/EPOXYDE
- RESISTANCE AUX CHOCS
- TRES BONNE RESISTANCE A LA CORROSION ET A L'HUMIDITE
- STABILITE DIMENSIONNELLE
- RESISTANCE A LA TEMPERATURE ELEVEE
- RESISTANCE A LA FLAMME
- PIGMENTABILITE
- ABSENCE D'ENTRETIEN
- BONNE ISOLATION ELECTRIQUE
- BONNE ISOLATION THERMIOUE
- TRANSPARENCE ELECTROMAGNETIQUE
- REMARQUABLE FLEXIBILITE

REMARQUES

Les profilés à base de fibres de verre représentent 65 à 70 % du poids des mêmes profilés en aluminium. Pour la même déformation en flexion, le gain de poids par rapport à l'acier est de 30 %.

Le rapport résistance/poids est très favorable pour les pultrudés ; parmi les applications : aérospatiale, aviation, marine, transports terrestres...

Il est intéressant de faire une comparaison entre un matériau traditionnel, l'acier et un profilé pultrudé.

On obtient le tableau suivant :

	ACIER	PULTRUDE Nº1	PULTRUDE Nº2
	TUBE CARRE 50 x 50 mm ép. 3 mm	TUBE CARRE 50 x 50 mm ép. <u>6,25</u> mm	TUBE CARRE 50 x 50 mm ép.10,5 mm
. CONTRAINTE MAXIMALE EN FLEXION (MPa)	350	600	450
. MODULE D'ELASTICITE EN FLEXION (MPa)	210 000	30 000	17 000
. RIGIDITE (Kg x mm ²) D = E x I	4,4 x 109	1,07 x 109	0,80 x 10 ⁹
. MASSE VOLUMIQUE (g/cc)	7,8	1,92	1,8
. CONTRAINTE SPECIFIQUE EN FLEXION	45	312,5	250
. MODULE SPECIFIQUE EN FLEXION	27 000	15 625	9 400
. RIGIDITE SPECIFIQUE	0,56 x 109	0,56 x 109	0,44 x 109
. POIDS/METRE (kg/m)	4,400	2,100	3,000

- Les résistances aux chocs sont très bonnes pour les pultrudés à base de fibres de verre, parmi les applications : fléaux ou batteurs de vigne, pare-chocs...
- La résistance à la corrosion est très bonne, les pultrudés à base de fibres de verre peuvent être élaborés pour être soumis à des environnements spécifiques de corrosion ; parmi les applications :
 - . garde-corps
 - . passerelles
 - . caillebotis
 - . échelles
 - . profilés au bord de mer tels que : bancs, lampadaires...
- La résistance à la température : il est à noter que le coefficient de dilatation thermique est approximativement le tiers de celui de l'aluminium.
 - La résistance à la flamme : celle-ci est bonne quand la matrice est adaptée à cette propriété, surtout dans les pultrudés qui possèdent une teneur élevée en verre.
- Pigmentabilité : celle-ci permet une coloration dans la masse des pultrudés à base de fibres de verre.
- L'isolation électrique est bonne pour les profilés à base de fibres de verre et mauvaise pour ceux à base de fibres de carbone ; parmi les applications : profilés ayant une endurance thermique eu égard à l'activité électrique, échelles isolantes...
- L'isolation thermique est bonne pour les pultrudés à base de fibres de verre grâce à un faible coefficient de conductibilité thermique.
- Exemple: Les profilés à base de fibres de verre entrent avec succès dans les véhicules isothermes, en particulier parce qu'ils diminuent fortement les "ponts thermiques".
- La bonne transparence électromagnétique permet aux pultrudés à base de fibres de verre des applications militaires (marine, aviation et terrestre) grâce à l'invisibilité ou à l'indétectabilité aux radars.
- Les pultrudés à base de fibres de verre sont susceptibles d'être fléchis ou soumis à un choc; puis retrouvent leur forme initiale dès la cessation de la contrainte ou de l'impact; parmi les applications : batteurs de vigne, lattes pour les sommiers, lames de ressort...

CHAPITRE 2

LES PULTRUDES A BASE DE FIBRES DE VERRE DANS LES PLATES-FORMES OFFSHORE

B1. LES PROBLEMES POSES ET LES SOLUTIONS APPORTEES

Dans les plates-formes de forage et de production offshore, les métaux habituels tels que l'acier et l'aluminium résistent difficilement au contact permanent avec de nombreux produits corrosifs, tels que : l'eau salée, le chlore et d'autres composants caustiques ainsi qu'à une variété de produits chimiques inhérents aux opérations de forage.

Les pièces métalliques sont, le plus souvent, protégées par des peintures qui nécessitent un entretien peu pratique sur une plate-forme en mer. D'autre part, il est fréquent que l'eau qui a pénétré sous la peinture y soit retenue et provoque le phénomène de "blistering". Enfin, les métaux créent entre eux des courants galvaniques qui les dégradent.

Les pultrudés à base de fibres de verre ont été essayés et éprouvés dans les rudes conditions de l'offshore, ils offrent :

- une excellente résistance à la corrosion
- une résistance mécanique élevée
- une légèreté ; ce qui est fort intéressant dans les transports des installations et au cours des manipulations sur la plate-forme. Les structures en fibres de verre sont égales à environ 30 % du poids des structures en acier
- une absence de production d'étincelles au cours des opérations d'installations, ce qui permet d'éviter la fermeture du puits pour toute installation
- une bonne résistance au feu ; bien qu'ils ne supportent pas la combustion
 - une bonne isolation électrique
- une meilleure durabilité ; en particulier, les pultrudés sont protégés de la pénétration et de la dégradation des ultra-violets par l'incorporation au cours du process d'un voile protecteur
 - une absence d'entretien.

Compte tenu des caractéristiques des pultrudés, on comprend que les concepteurs, les fabricants et les installateurs de plates-formes offshore soient intéressés par leur utilisation; l'utilisation des structures à base de fibres de verre est en pleine expansion dans ce domaine aux Etats-Unis.

Le poids a été pendant longtemps un problème : dans le levage des produits, dans le poids mort des installations de forage océanique et dans les matériaux de structure eu égard aux transports et aux opérations de remontage. Les composants individuels à base de fibres de verre sont assez légers pour être manipulés manuellement ; un avantage non négligeable spécialement dans les lieux embouteillés tels que les têtes de puits.

Une plate-forme de puits avec les traverses fabriquées au moyen d'éléments structuraux en fibres de verre est préassemblée en usine puis l'installation est faite en offshore. Une telle installation est terminée avec la MOITIE du TEMPS et à UN COUT PLUS BAS que pour les plates-formes similaires en acier.

Au cours des opérations d'installation et de modifications, on a constaté 2 avantages supplémentaires :

- __> Elimination du découpage au chalumeau et/ou des soudures ; cela permet d'économiser le coût des fermetures de puits
- —> Les matériaux à base de fibres de verre peuvent être découpés ou percés sans utilisation d'outillages puissants.
- B2. LES APPLICATIONS des pultrudés dans les plates-formes
- <u>Des plates-formes ou escabeaux</u>, équipés de roulettes, légers et résistants à la corrosion, qui permettent de nombreux travaux sur la plate-forme ; en particulier, le travail au niveau d'un "arbre de vannes".
- Les mains-courantes et les caillebotis des différents ponts. Elles résistent à des forces de vague dont la hauteur est supérieure à 21 mètres.
- Plate-forme de puits avec traverses.
- Les chemins de cables électriques.
- Les caisses pour batterie.
- Signalisation sur la plate-forme.
- Signalisation sous-marine.
- Echelles.
- Escaliers.
- Fosses septiques.
- Coffrets et panneaux électriques.
- Héliport muni d'une surface non glissante.

B3. REALISATION

La plate-forme "SOUTHPASS 62" de SHELL installée en 1986 dans le Golfe du Mexique comprend toutes les applications présentées ci-dessus. Grâce aux pultrudés, des économies considérables ont été obtenues au montage. L'état de la plate-forme aujourd'hui témoigne de sa remarquable résistance à la corrosion.

Ces applications ont été réalisées par Glass Steel, filiale de MORRISSON MOLDED FIBER GLASS dont PERMALI COMPOSITES est le licencié.

LES MOUSSES SYNTACTIQUES.

M. FRIER*

1. INTRODUCTION

Le développement des activités liées à l'océanotechnologie a suscité le besoin en nombreux matériaux. Aussi dès les années 60 la marine américaine énonce un besoin en matériaux de flottabilité. Dans ce cadre, les recherches effectuées ont permis de formuler des matériaux composites appelés mousses syntactiques.

Du grec "suntaktikos" est issu le terme syntactique désignant un arrangement ordonné de cavités au sein du matériau. (taktikos = ordre, sun = avec). En effet les mousses syntactiques sont obtenues par incorporation de cellules préformées au sein d'une matrice organique. L'association matrice organique-charge minérales confère à ces matériaux des propriétés originales : faible densité, résistance en compression élevée, faisabilité aisée. L'ensemble de ces caractéristiques a permis leur utilisation dans différents domaines : exploration sous-marine, allègement des trains de tige de forage "off-shore", engins ramasseurs de nodules polymétalliques.

Le gain de flottabilité apporté par les mousses syntactiques devra être le plus grand possible. Aussi on s'attachera à diminuer la densité du composite en utilisant une charge adaptée.

L'objet de l'étude a consisté à développer une formulation répondant aux contraintes précedemment énoncées pour les mousses syntactiques grande profondeur. Pour cela nous avons étudié une matrice à base de résine époxyde et une charge de type microsphères de verre.

^{*} Euroshore, Paris.

II. ETUDE DES MATRICES

2.1. PRESENTATION

Les principaux critères techniques auxquels doivent satisfaire les mousses syntactiques sont liés aux performances spécifiques des constituants et aux paramètres de mise en oeuvre. Dans cette optique les résines époxydes présentent le meilleur compromis. On peut ainsi mentionner leurs faibles viscosités permettant un excellent mouillage de la charge, leurs bonnes propriétés mécaniques ainsi que l'absence de volatils en cours de polymérisation. L'ensemble de ces caractéristiques, permet la formulation de matrices présentant d'excellentes propriétés pour la réalisation de matériaux composites[1] [2].

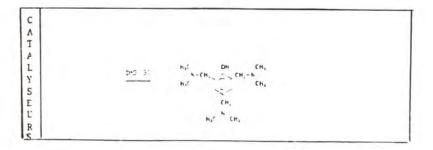
Tableau 1 : Résines époxydes utilisées

2.2. Polymérisation des résines époxydes

La réticulation des résines époxydes peut être effectuée par des nombreux agents chimiques en faisant intervenir chaque fonction époxyde de la résine. On peut ainsi décrire pour la polymérisation deux modes principaux.

2.2.1. Durcissement avec des allongeurs de chaîne (tableau 2)

2.2.2. Durcissement par homopolymérisation (tableau 3)



2.3. Etude des énergies de polymérisation

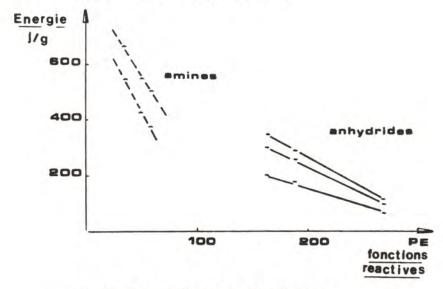
La nature exothermique de la réaction de polymérisation nécessite de quantifier l'énergie associée à la transformation.

Nous avons mentionné l'ensemble des valeurs d'énergies mesurées par DSC (tableau 4). La mesure de l'exotherme de polymérisation nous donne une énergie qui est ramenée à l'unité de masse (Joules/gramme). Nous avons représenté à partir de ces valeurs, sur le tableau 5, l'évolution des énergies en fonction des poids équivalents de fonctions réactives des durcisseurs. On peut ainsi comparer de façon précise les réactivités relatives aux groupes chimiques étudiés.

Tableau 4 : Energies de polymérisation par DSC (Joules/gramme)

RESINES	DGEBA	DGA	CA
DURCISSEURS			
TPSA	80	120	95
MNA	175	280	250
MTHPA	208	340	300
MX	540	650	600
DDM	420	540	230
DDM + Diéthyl DDM	370	500	250
DMP 30	220	560	76

Tableau 5 : Energie de polymérisation en relation avec les poids équivalents des fonctions réactives.



2.4. Etude des cinétiques de polymérisation

2.4.1. Présentation

Si l'énergie libérée au cours de la polymérisation est un facteur déterminant, il faut également mesurer la vitesse à laquelle s'effectue cette réaction. Ainsi une libération brutale de cette énergie, pourra s'accompagner localement de fissurations ou même de décompositions thermiques d'un des constituants par une élévation considérable de la température [3], [4], [5].

L'objectif étant de comparer qualitativement les réactivités propres à chaque système, nous nous sommes intéressés aux temps de réaction pour chaque température. Ainsi pour un degré de conversion égal à l'unité, soit pour une polymérisation proche de 100%, à chaque température le traitement du signal associe un temps t. Nous avons représenté l'ensemble des résultats sous la forme de groupes d'ARRHENIUS [$\ln(t) = f(1/T)$] afin de comparer l'ensemble des compositions (tableaux 6,7,8,9).

Tableau 6 : Cinétique de polymérisation avec durcisseur anhydride TPSA

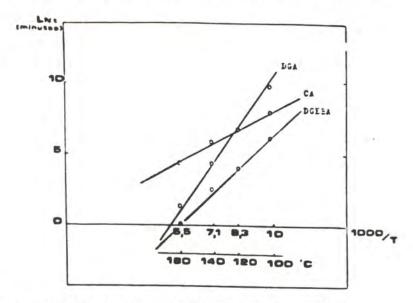


Tableau 7 : Cinétique de polymérisation avec durcisseur aminé Mx

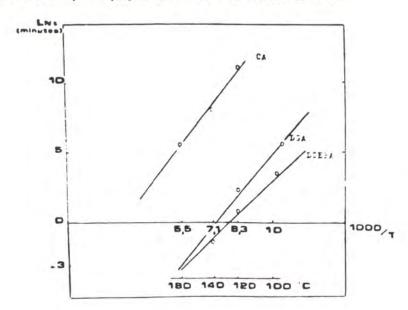


Tableau 8 : Cinétique de polymérisation avec durcisseur aminé DDM

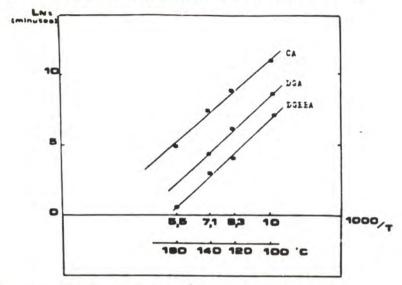
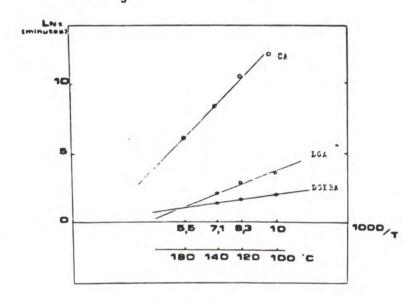


Tableau 9 : Cinétique de polymérisaiton avec durcisseur amine tertiaire R_3N .



2.4.2. Conclusion

Les contraintes induites par la polymérisation imposent le choix de couples résines-durcisseurs optimisés. Ainsi nous rappelons que les critères déterminants pour la formulation de la matrice sont : une énergie de polymérisation modérée (< 600 J/g) associée à une cinétique lente permettant une vie de pot longue aux basses températures ($< 60^{\circ}\text{C}$).

Nous avons montré que la modification des sites époxydes glycidiques par des époxydes cycloaliphatiques associées à des amines modifiées de type MX, présente un grand intérêt. Dans ce cas, nous possédons un système faiblement réactif aux basses températures permettant la formulation de matrice pour matériaux composites. Nousa vons ainsi un système original de part sa constitution chimique, qui diffère des formulations traditionnellement utilisées à base de résine époxyde DGEBA et de durcisseurs anhydrides.

2.5. Propriétés des matrices thermodurcies

Le comportement de la matrice est régi par un ensemble de paramètres aussi divers que la température ou la nature des chaînes macromoléculaires [6], [7]. L'utilisation des matrices pour une application haute performance nous a conduit à définir des critères de choix : le comportement mécanique, les propriétés thermiques associées au poids spécifique.

Tableau 10 : Contraintes en compression uniaxiale pour les matrices (valeurs en Moa)

RESINES DURCISSEURS	DGEBA f = 5,3	DGA f=8	CA f=7,1
TPSA f=3,75	70,0	78,0	82,5
MNA 5,3	138	166	170
MTHPA 6,0	130	163	163
DDM 19,6	126	190	190
MDX 29,6	116	187	190
DMP 30	130	-	_

f = fonctionnalité massique.

Tableau 11 : Températures de transitions vitreuses des matrices époxydes (valeurs en °C)

RESINES DURCISSEURS	DGEBA (5,3)	DGA (8)	(7,1)
TPSA(3,75)	60	56	86
MNA (5,3)	107	97	140
MTHPA(6,0)	102	105	128
DDM (19,6)	145	123	-
MX (29,6)	110	74	170
DMP 30	70	60	-

Tableau 12 : Masse volumique des matrices thermodurcies (valeurs en g/cm³)

RESINES	DGEBA	DGA	CA	
DURCISSEURS			-	
TPSA	1,10	1,09	1,09	
MNA	1,25	1,26	1,26	
MTHPA	1,24	1,24	1,23	
DDM	1,19	1,21	-	
MX	1,21	1,22	1,21	
DMP 30	1,21	1,20	-	

2.6. Conclusion : Optimisation du choix de la matrice

Afin d'obtenir une matrice aux caractéristiques optimisées nous utilisons deux paramètres de choix : le coefficient de performance et la température de transition vitreuse.

<u>Coefficient de performance</u>: le calcul de ce coefficient permet de relier la tenue mécanique à la densité du matériau. Il est défini par :

C = Contrainte en compression Densité

Tableau 13 : Détermination des coefficients de performance

RESINES	DGEBA	DGA	CA
DURCISSEURS		-	+
TPSA	6,36	7,1	7,6
MNA	11,0	13,2	13,5
MTHPA	10,5	13,1	13,2
DDM	10,6	15,7	-
MX	9,6	15,3	15,7
DMP 30	10,7	-	-

Une valeur élevée de ce coefficient traduit pour la matrice un excellent rapport performance-poids. Nous avons consigné les valeurs de ces coefficients au tableau 13.

Températures de transitions vitreuses : la détermination des valeurs de Tg permet de connaître le domaine d'utilisation de la matrice. Une valeur de Tg élevée sera déterminante car elle assure au matériau une plus grande inertie thermique (tableau 11).

La synthèse de ces résultats, nous autorise à choisir la matrice possédant un excellent rapport performance-poids et des propriétés thermiques élevées. La matrice présentant le meilleur choix concerne, la résine cycloaliphatique (CA) polymérisée avec le durcisseur (Mx). Ainsi si nous rappelons les bonnes caractéristiques de mise en oeuvre de ce système, nous possédons une matrice satisfaisant aux contraintes de formulation et de performances.

III. ETUDE DES CHARGES

3.1. Présentation

La constitution d'un matériau composite fait intervenir deux composants majoritaires qui sont la matrice et la charge. La réunion de ces deux éléments doit donner au matériau final, le comportement et les caractéristiques souhaitées.

Dans notre cas, l'obtention de matériaux de faibles densités suggère en toute logique la créaction de "vides" au sein de la matrice. L'originalité des mousses syntactiques, réside dans le fait que l'on détermine et contrôle la part et la nature de ces vides en utilisant des charges dénommées microsphères.

Ainsi les microsphères sont assimilables à des particules d'air préformées possédant une enveloppe aux caractéristiques variables. Comme leur nom l'indique il s'agit de sphères de faible diamètre. (50 à $100~\mu$).

La nature du verre utilisé pour la fabrication des microsphères est mentionnée dans le tableau 14.

Tableau 14 : Constitution des principaux verres industriels

NATURES	MICROSPHERES	VERRE (E)	PYREX	VERRE BOUTEILLE
SiO ₂	77,6	54	81	73,3
A1203	1,15	15	2	1,5
B203	1,15	8	11,4	-
As203	-	-	0,3	-
Fe 203	-	-	0,15	0,04
so ₃	0,70	-	-	0,40
TiO ₂	-	(+)	0,05	0,02
MgO	0,25	5	0,20	0,10
CaO	6,25	17	0,30	9,80
Na ₂ O	9,65		4,5	14,20
ZnO	2,55	1-1	-	-
K,0	1		0,10	0,60

Dans notre cas nous observons (tableau 14) pour le verre des microsphères un pourcentage important d'oxydes basiques (Na₂O/CaO). Le verre décrit est très différent d'un verre E utilisé pour la fabrication des fibres et se rapproche d'une constitution de base (verre bouteille).

3.2. Caractéristiques des microsphères

Tableau 15 : Densité

QUALITES	(1)	(2)	(3)
Densités réelles	0,16	0,20	0,32
Densités apparentes	0,10	0,12	0,20

Tableau 16 : Contrainte en compression hydrostatique (PH)

Verre	Formulation identique		ntique
P _H (MPa)	3,5	7,0	31,5
Densité réelle	0,16	0,20	0,32
QUALITES	(1)	(2)	(3)

La forme sphérique de la charge impose une caractérisation sous contrainte isotrope, pour cela nous utilisons une pression hydrostatique. La tenue spécifique déterminée est définie comme la pression correspondant à une destruction maximum de 50% des microsphères.

Nous observons à travers ces résultats que les caractéristiques mécaniques évoluent avec la densité. En effet les trois qualités présentent une granulométrie identique (centrée à 50-60 µ) mais différent par l'épaisseur de la paroi.

La formulation chimique du verre influe de façon directe sur

les propriétés thermiques (températures de fusion, transitions vitreuses). Les verres industriels riches en silice possèdent des températures de fusion élevées (supérieures à 1000°C).

Tableau 17 : Propriétés thermiques

Coefficient de dilatation	90 x 10 ⁻⁷ m/°0	
Température de transition vitreuse	750°C	
Conductivité thermique	0,04 W/°C.m	

IV. CARACTERISATION DES MOUSSES SYNTACTIQUES

4.1. Présentation du composite

La synthèse de l'ensemble des résultats obtenus nous amêne à définir une formulation répondant aux objectifs visés. Pour atteindre les niveaux de performances requis le composite devra être formulé comme indiqué tableau 18.

Nous obtenons ainsi une mousse syntactique présentant une masse spécifique inférieure à 0,60, la contrainte admissible en compression uniaxiale étant supérieure à 77 Mpa.

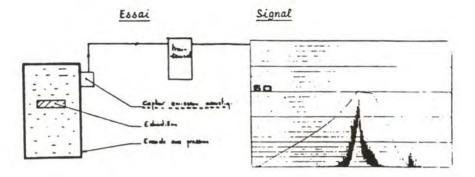
Tableau 18: Constituants du composite optimisé

RESINE CA	0€ CH,-0-€ 00
DURCISSEUR MX	Cay-san,
MICROSPHERES DE VERRE	Densité 0,29 Tenue: en pression hydrostatique 26MPa
	Diamètre médian 56,

4.2. Comportement en pression

4.2.1. Technique utilisée

Afin de reproduire les contraintes d'utilisation pour le composite, nous avons caractérisé le comportement du matériau sous pression hydrostatique. L'instrumentation de l'essai est effectué dans une enceinte sous pression et un système d'émission accoustique permet le suivi de l'endommagement [8] à [16].

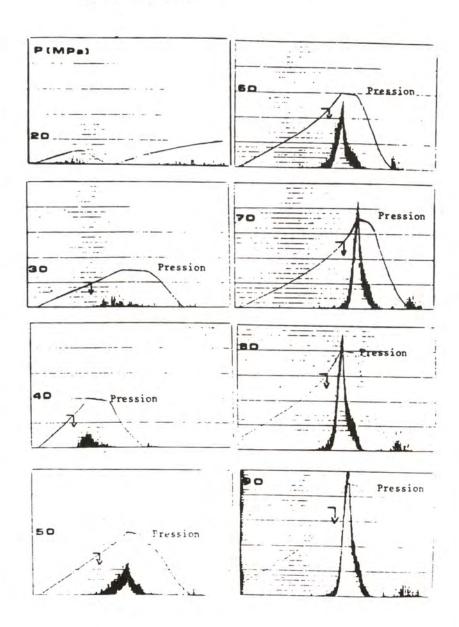


4.2.2. Résultats

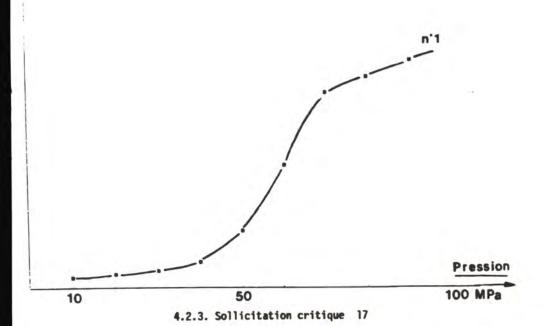
L'essai consiste à soumettre l'éprouvette à une montée en pression par palier de 10 MPa et ce jusqu'à 100 Mpa. Entre chaque échelon on effectue un retour à une pression nulle.

La représentation de l'évolution du maximum d'énergie en fonction de la pression, montre une évolution significative. La forme de la courbe en S, permet de distinguer trois zones sensibles (figures 19,20).

Figure 19 : Emission accoustique sur l'échantillon sain au cours du cyclage en pression



Energie



Le suivi du rapport felicity (k) permet de déterminer la pression jugée critique pour le matériau sans aller jusqu'à l'endommagement (figure 21).

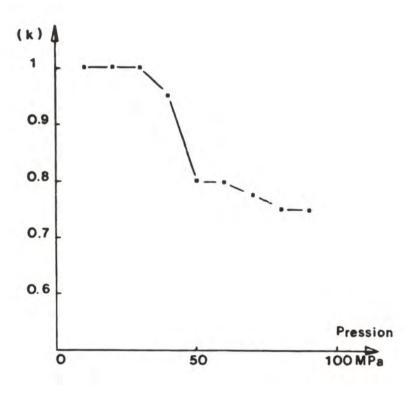
rapport felicity = k= Pression correspondant au début de l'émission Pression atteinte au cycle précédent

la pression critique P s'écrit

$$P = \frac{Po}{\alpha}$$
 Po pression pour k = 0,9

avec
$$\alpha$$
= 0,55 ceci nour donne P = 80 MPa

Figure 21 : Rapport felicity



L'ensemble de cette étude a été consacrée à la formulation et à la caractérisation de matériaux composites appelés mousses syntactiques, pour les applications sous marines. Le contexte industriel de notre travail nous a amené à réaliser un matériau satisfaisant à des contraintes de mise en oeuvre et de performances.

Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé une résine type époxyde comme polymère pour formuler la matrice. L'étude accomplie sur les différents couples résine-durcisseurs nous a permis de sélectionner un liant original. Ainsi nous avons montré que l'utilisation d'une résine époxyde cycloaliphatique associée à un durcisseur aminé présente un grand intérêt.

En effet, la cinétique de polymérisation modérée de ce système permet son utilisation sur des volumes importants. De plus les caractérisations effectuées sur la matrice thermodurcie indiquent un gain apprécialbe sur les propriétés mécaniques et thermiques, en, comparaison avec les systèmes à base de DGEBA.

La charge utilisée dans les mousses syntactiques doit permettre d'abaisser la densité du matériau tout en assurant au composite une bonne tenue mécanique. Dans ce cas nous avons vu que les microsphères de verre présentaient un excellent compromis.

Les caractéristiques mesurées sur le matériau nous ont montré le gain apporté par la matrice sur les propriétés mécaniques.

Le composite formulé a pu être caractérisé de façon complète afin de satisfaire aux contraintes d'utilisation.

La synthèse de ces travaux nous a permis de formuler un nouveau matériau satisfaisant aux contraintes d'élaboration industrielle. Son utilisation en tant qu'élément de flottabilité est envisagée par l'IFREMER qui a participé avec la SNPE à la prise d'un brevet sur cette formulation.

- 1. CHENARD J.Y., Enjeux N°25, Mai 1982
- JOHNSON R.W., MONTGOMERY P.N., O'brien D.L., Plastic Design, April 1973
- MIJOVIC J., JINHWAN K., SLABY J., J.Of Applied Polymer Science, Vol.29, 1449-1462(1984)
- 4. PAUL S., RAUBY B., J.Col.Chem.Assoc., 1979,62, 153-156
- 5. GRAHAM, JAMES, O'CONNOR, SAMPE Tech.Conf. (1977)
- 6. JOUSSET J. Matières Plastiques, Dunod (1955)
- 7. BOST J., Matières Plastiques, Dunod (1980)
- 8. DE LACY, SAMPE Journal, Sept. Oct. 1982
- 9. HAMSTAD M., NBT International, Dec. 1982
- 10. HAMSTAD M. Journal of accoustic emission. Vol. 1 N°3, p. 151-164
- 11. ADAMS C.H., Journal of accoustic emission, Vol.1 n°3, p. 165-172
- 12. MEKKERJEE, Master Lawrence Livermore laboratory, Dec. 1981
- 13. POUJOT B., VALENTIN D., Comptes Rendus JNC 4, Sept. 1984
- 14. BAIADA C. DALRE V. , Comptes Rendus JNC 4, Sept. 1984
- 15. TESTAND B., AOUBY D., Comptes Rendus JNC 4, Sept. 1984
- 16. ECHALLIER B., Comptes Rendus JNC 4, Sept. 1984
- 17. BESSON J.M. , Comptes Rendu étude, SNPE Mars 1985.

- JM BESSON, P. DE CHARENTENAY, G. FONBLANC, Matériaux syntactiques et émission acoustique, Annales des composites 1986/2-3
- G. FONBLANC, C. FILLIATRE, R. DAVIAUD, Mise au point et caractérisations de mousses syntactiques, 16ème colloque national du GFP à Pau Novembre 86
- 20. H. FRIER, Les flotteurs de mousses syntactiques du tube prolongateur de forage 1800 m, Symposium "Forage français en Méditerranée profonde" CCIM/GEP Octobre 82
- 21. H. FRIER, New applications for subsea vehicles, Pétrole Informations nº 1601 du 12 Juillet 84.

CRITERES ECONOMIQUES POUR L'EMPLOI DE MATERIAUX COMPOSITES EN TECHNOLOGIE NAVALE DANS L'ACTIVITE PECHE MARITIME

REYNE M.(1)

RESUME

Les matériaux composites (particulièrement verre-polyester) mais aussi certains thermoplastiques (polyvinyle, polyéthylène haute densité), peuvent prendre une part plus forte dans la réalisation des bateaux de pêche et de leurs équipements. Les composites classiques s'imposent sous le double aspect prix-performances lorsqu'on doit réaliser de grandes structures : (Oeuvres vives : monolithiques, surfaces planes : sandwiches).

Les composites de haute performance peuvent être utiles localement (fortes contraintes).

Les plastiques sont également rentables dès qu'il existe un effet de série.

L'étude complète a fait l'objet d'un rapport réalisé pour IFREMER.

Mots-clés: composites, plastiques, chalutier, pêche.

ABSTRACT

Composites materials (such as glass-polyester) but also thermoplastics (PVC, PEhd) can play important role in construction of fishing boats and their equipements.

Traditionals composites are for efficiency reasons (performance/price) remain a good choice in construction of large structures.

High performances composites demonstrate their quality in specific applications (when contraints are high). Plastics are equally profitable when there is repetitive use.

The comple study was the subject of a report carried for IFREMER.

Key-words: composites, plastics, trawler, commercial fishing.

⁽¹⁾ Directeur des études technico-économiques à la CEGOS

La présente communication se propose d'analyser les substitutions possibles des matériaux de synthèse aux matériaux traditionnels dans l'activité pêche maritime et, d'étudier les développements possibles ou les transferts envisageables. Ceci, dans une optique technico-économique.

Elle est basée sur les données fournies par la visite d'un échantillon de chantiers et d'armateurs préparée par IFREMER, et les informations de la CEGOS, en prenant comme exemple type un chalutier qui représente parfaitement les bateaux utilisés dans cette activité.

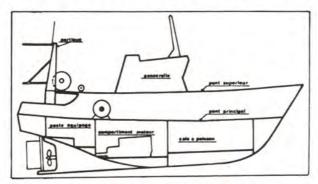


Fig. 1 - Dispositions rencontrées sur les navires étudiés

1 - INTERET ET LIMITE DES MATERIAUX DE SYNTHESE

Les thermoplastiques (faciles à mouler, légers et insensibles à l'eau de mer) sont déjà très utilisés pour des éléments répétitifs soumis seulement à des contraintes statiques, tels que :

Produits	Polymères	
Bac & poissons	PEhd	
Caisse marée (isotherme)	PSE	
Manne ostréicole	PEhd	
Flotteur, bouée	PSE, PU	
Boule de chalut	PEhd	
Chalut, filet	PE, PA, PET	
Cordage	PP, PA	
Ciré	PVC	

Tab. 1 - Produits courants en plastique utilisés pour la pêche

Les composites ont fait leur apparition pour la réalisation d'éléments de structure (contraintes dynamiques) dans les années 60-65 pour la navigation de plaisance et les canots de sauvetage, pour déboucher, plus récemment, sur la réalisation des coques et superstructures de navire de pêche, vedettes de transport de passagers, avec des longueurs inférieures à 25 m et, des chasseurs de mines avec des dimensions allant jusqu'à 50 m pour des masses de structures de 100 à 300 t.

Ces composites apportent alors les avantages suivants :

Facteurs fonctionnels

- Souplesse de conception et d'intégration de fonctions donnant des surfaces profilées et lisses.
- Robustesse, tenue à la fatigue et à la propagation des fissures : en cas d'avarie le composite se fendille et ne s'ouvre pas sous l'effet d'un choc comme pour l'acier ou le bois.
- Légèreté associée à une bonne rigidité permettant une manipulation aisée où une sécurité de navigation grâce à des superstructures peu pondéreuses.
- Isolation électrique.
- Etanchéité meilleure que celle du bois.
- Bon comportement au vieillissement.
- Tenue chimique vis-à-vis des principaux agents agressifs et en particulier de l'eau salée, des solvants ou hydrocarbures (l'acier rouille, l'aluminium se corrode et le bois pourrit).
- amagnétisme et transparence aux ondes électromagnétiques.
- Confort amélioré: l'absence de condensation donne un habitacle sec, agréable à vivre. De plus, l'isolation phonique reste supérieure à celle de l'acier (mais pas du bois).

Facteurs économiques

- Durée de vie accrue grâce à une imputrescibilité (vis-à-vis du bois) et une absence de corrosion (vis-à-vis de l'acier).
- Facilité d'entretien : la structure ne nécessite pas de traitement de surfaces (la peinture n'a alors qu'une fonction esthétique).
- Gain de vitesse (légèreté, profilage) d'où, consommation réduite.

Ainsi les composites conviennent bien aux navires rapides (> 40 noeuds), à effet de surface, ou militaires.

Toutefois il existe aussi des freins à l'emploi :

- Nécessité d'une construction sous abri (le métal peut être oeuvré à l'extérieur) et sous conditions de température et d'hygrométrie pour la prise des résines.
- Coût des moules à prévoir et encombrement du chantier par ceux-ci (en fait il faudrait penser série pour bien les amortir).
- Contrainte d'association à des éléments métalliques dans la construction, d'où des éléments de raccords à prévoir et, manque de boulonnerie adaptée (on utilise celle du bois faute de mieux).
- Nécessité de protection IEM pour les appareils de mesures (shoppage de la structure concernée à prévoir).
- Sensibilité à l'abrasion du polyester (mais pas de l'epoxy).

- Réglementation drastique (VERITAS) car les matériaux nouveaux font peur : feu, toxicité. A noter que l'on pourrait utiliser des résines autoextinguibles (phénoliques, epoxydes).
- Psychologique: le plastique est encore dédaigné par les pêcheurs car il garde une connotation de plaisance.
- Prix limité: le surcoût étant difficile à passer dans une activité où l'on se base surtout sur le prix à l'achat sans disposer d'un bilan réaliste des coûts d'exploitation.

En résumé :

- La substitution des métaux par des composites n'a d'intérêt que dans l'une des deux alternatives suivantes :
 - On peut exploiter une de leur propriété fondamentale supérieure à celle des métaux : c'est le cas pour l'anticorrosion par l'eau de mer vis-à-vis des métaux.
 - On peut réduire le nombre de pièces dans l'élément à réaliser : c'est encore une condition assurée pour la réalisation des coques mais pas pour toutes les structures qui souvent relèvent de techniques d'assemblage simples (soudure acier ou alu).
- Par contre, si l'on pense composites dès le stade de la conception, on peut créer une structure ad hoc. En effet, la tôle métallique présente des propriétés isotropes qui sont a priori favorables pour le calcul en bureaux d'études mais la structure composite (hétérogène) permet d'adapter la résistance du matériau de façon la plus rationnelle en fonction du niveau de sollicitation. On aboutit donc théoriquement à un meilleur équilibre du niveau coût/performances.

Ainsi la caractéristique spécifique des matériaux composites (qui n'existe nulle part ailleurs) est que l'on élabore le matériau et le produit dans une même opération. Ce n'est que lorsque ce concept sera bien rentrer dans les moeurs que l'on saura construire de façon optima les structures en composites.

Les composites plastiques à fibres longues comportent essentiellement <u>2 grandes familles</u> qui se distinguent par leurs caractéristiques fonctionnelles et économiques :

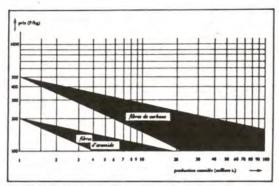
Les composites dits de grande diffusion (GD) appelés parfois CVR (Composites Verre-Résine) dans la marine, sont essentiellement ceux provenant du couple résine polyester/fibre de verre E avec des taux de renfort voisins de 30 %. Ils représentent actuellement les plus gros volumes d'utilisation avec un bon compromis performances/coût, voisin de celui de l'acier.

Les composites dits <u>hautes performances</u> (HP), encore peu développés, concernent surtout les associations de résines époxydes avec des fibres longues autres que le verre E (verre R, aramide, carbone, bore ...) pour des taux de renfort de 50 % ou plus.

Leurs propriétés mécaniques (en particulier la résistance spécifique ou le module spécifique) sont nettement supérieures à celles des métaux conventionnels, aux dépens, toutefois, d'un coût très élevé.

L'emploi de composites HP permet de retenir des coefficients de sécurité relativement faibles (de l'ordre, par exemple, de 1,5 et moins pour certaines structures aéronautiques ou militaires), alors que ceux utilisés pour les composites GD (par exemple, cuve bobinée polyester-verre, utilisée dans l'industrie chimique) sont beaucoup plus importants (6 et plus).

Il est difficile d'espérer des baisses drastiques du coût des fibres nobles à court tern. En effet, même en se basant sur l'effet d'expérience (baisse du prix de 15 à 25 % lorsque doublent les quantités cumulées) il faudrait atteindre des consommations se chiffrant en plusieurs dizaines de milliers de tonnes pour approcher un prix voisin de 100 F/Kg.



Tab. 2 - Zones de prix possibles des fibres nobles en fonction de la consommation possible

De plus, il existe une butée pour le coût de la fibre de carbone issue du PAN, le précurseur valant déjà 50 F/Kg et devant subir une pyrolyse vers 3000°C pour passer à l'état de fibre de carbone.

Les composites HP sont utilisés pour la réalisation des bateaux de compétition (fortement sponsorisés) mais, pour la pêche, léur emploi ne peut relever que de cas d'espèce.

Il importe de rester réaliste et de se défier de l'action médiatique qui a donné une image trop idéale de ces matériaux HP alors qu'ils ne représentent encore que 4 0/00 en volume de l'ensemble des composites.

Bien sûr dans l'aéronautique ou le militaire, ceux-ci ont bien pénétré. En effet, les taux d'échange pour gagner 1 Kg sont respectivement de :

1 500 F pour un hélicoptère,

2 000 F pour un avion de ligne,

3 000 F pour un chasseur,

4 000 F pour un satellite.

Il n'est est pas de même pour la pêche dans laquelle les matériaux concurrents restent à des prix matières inférieurs à 20 F/Kg.

De même, les procédés de transformation ne pourront (sauf exception de pièces répétitives) qu'exploiter des techniques manuelles (artisanales).

	Procédés	Formes
Artisanaux	Contact Projection Drapage	moulée trimendisionnelle
Semi industriel	Table à vide Sandwich Pressage BP] plane
Industrielle	Compression BMC ou SMC Estampage TRE Injection transfert Moulage par réaction R-RIM Stratification en continu Pultrusion Centrifugation Enroulement	moulée tridimensionnelle> plane> profilée de révolution

Tab. 3 - Principaux procédés de transformation des composites

Ces composites concurrencent les matériaux traditionnels (acier, aluminium, bois) pour la réalisation des structures marines. On se trouve alors devant le choix des matériaux suivants :

	Densité	Prix moyen du matériau (F/Kg)
Acier	7,8	3)
Aluminium (AG)	2,8	20 tole
Bois (chêne ou iroco)	0,6-0,7	(3800 à 4500 F/m3)
Committee GD	1,7	18) Renfort
Composites	1,5	500 résine

Tab. 4 - Principaux matériaux en concurrence pour le chantier

Compte tenu des impératifs de la pêche maritime :

- bateau de pêche construit sur mesure,
- influence fondamentale du coût,

on ne pourra exploiter de façon courante que les composites GD

2 - STRUCTURES EN COMPOSITES ET POSSIBILITES DE DEVELOPPEMENT

A priori deux grands concepts coexistent pour la réalisation des structures de bateaux de pêche : monolithique ou sandwich

 Structures monolithiques : elles se subdivisent elles-mêmes en deux types : minces ou épaisses

			٠				
1	٧	1	1	n	C	е	5

. Peau : épaisseur réduite

mais

. Raidissement important par section en forme d'oméga

---> coût : élevé

Epaisses

. Masse plus forte

---> coût matière élevé

 mais raidissement réduit car on optimise les épaisseurs en fonction des efforts prévus

---> cycle de fabrication plus court

- Structures sandwichs

association d'éléments autoportants épais standardisables (modules)

--> productivité de réalisation

- bonne tenue à la pression hydrostatique et au flambement (fonction du carré de l'épaisseur)
- . isolation thermique et flottaison intégrées

mais

--> danger de délaminage par multiplication des interfaces

La réalisation de la coque en sandwich pourrait être intéressante pour les grands bateaux (> 25 m) puisqu'elle éviterait la sujétion de moules importants (amortissement + stockage) et permettrait, peut être, d'accroître la productivité (nous ne disposons pas de données économiques précises à ce sujet les seules coques ainsi réalisées l'ont été en Australie et Suède).

Il semble néanmoins que (malgré quelques exemples) la coque monolithique soit préférée dans la fabrication des bateaux de pêche qui sont soumis à des chocs nombreux pouvant induire un délaminage (la quasi totalité des coques de chalutiers et dragueurs de mines en composites sont réalisés ainsi).

Toutefois on apprécie la conception sandwich pour la passerelle, les ponts, le poste d'équipage, pour ses parois lisses (facile à nettoyer) et son isolation thermique (voire phonique).

Matières premières

Pour l'essentiel on utilise le couple le plus économique

renfort : fibre de verre E (taux 40 à 45 %) coût moyen matière : résine polyester orthophtalique (*) % 18 F/Kg

et, pour les sandwiches des mousses PU, voire des nida en PP.

Toutefois CMN emploie un préimprégné verre-epoxy (méthode sèche) et des mousses PVC qui constituent des matériaux nettement plus onéreux.

Renfort			Prix (F/Kg)	Résine	Prix (F/Kg)	Demi - produ (F/Kg)	
verre	{	met tiesu	17-18 20-25	polyester gel cost	10-11 ~ 25	prélaprégné 50- verre/epoxy coreant 200	
tissu	1	eremide "kevlar" carbone	400-500 700-900	epoxyde (atd)	40	mousse PU 60	0 - 600 F/m ³ 0 - 1000 (fonction 0 - 2000 densité)
						nide pp	160 F/m ² e = 20 300 F/m ² 200 e = 10

Tab. 5 - Prix des matières de bases pour composites

Transformation

Les structures monolithiques sont réalisées par moulage au contact (voire projection pour partie) seuls procédés compatibles avec les dimensions et les séries réalisées.

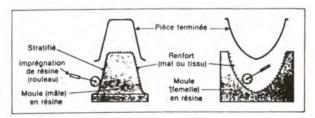


Fig. 2 - Principe du moulage au contact

^{(*) -} La résine polyester isophtalique résiste mieux à l'hydrolyse mais elle est plus onéreuse.

Le prix moyen de 18 F/Kg pour le matériau de base tient compte des pertes (15 à 20 %).

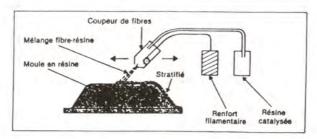


Fig. 3 - Principe du moulage par projection

On dépose ainsi de 4 à 5 Kg/h suivant complexité (bordée 7 à 8 mais raidisseur 2) par couches successives (6 à 8 de base + 2 à 3 de renforcement pour petit chalutier, jusqu'à 12 "rovimaf" pour un gros).

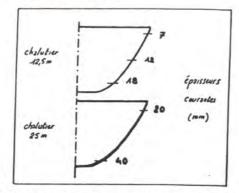


Fig. 4 - Epaisseurs moyennes de composites sur les chalutiers

Le prix de revient oeuvré est voisin de 45 à 50 F/Kg mais il faut tenir compte de l'incidence des moules qui peut majorer ce prix de 45 à 50 % si l'on ne réalise qu'une seule unité (sous cette réserve le coût du composite s'avère compétitif vis-à-vis de l'aluminium).

Pour pallier cet effet on utilise parfois un faux moule ou <u>mannequin</u> constitué par une structure légère en bois avec profils et membrures donnant l'allure générale de la coque.

Sur celle-ci on viendra alors déposer des peaux stratifiées de faible épaisseur (1 gel coat + 2 mâts) gardant une souplesse permettant un positionnement sur le mannequin en les pointant. Leur association consituera alors la peau sur laquelle on viendra déposer les différentes couches jusqu'à atteindre l'épaisseur de coque désirée.

Le coût complet d'un chalutier à coque en verre-polyester se détaille ainsi :

La construction complète dure de 6 à 9 mois (suivant taille).

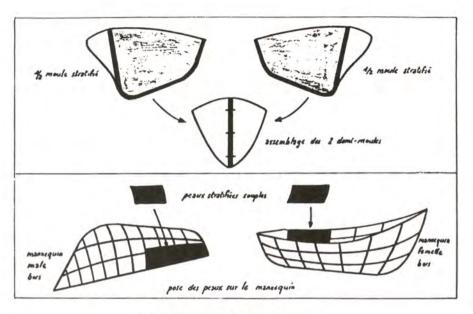


Fig. 5 - Moulage par moule ou par mannequin

En fait, comme tenue du meilleur degré de finition on estime qu'un moule est rentable à partir d'une série d'environ 15 unités.

En pratique il serait possible de réaliser un moule polyvalent si l'on accepte de tricher un peu sur la forme de la coque et donc d'accepter de réaliser des navires de longueur et largeur différentes sur un même moule

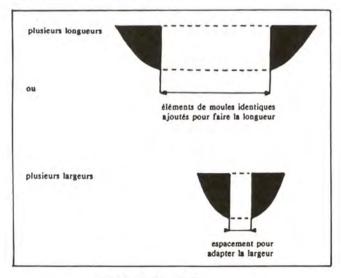
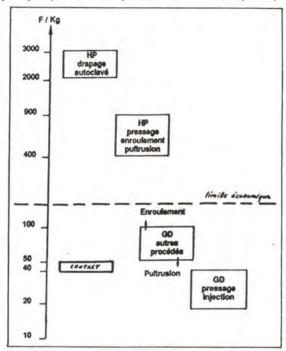


Fig. 6 - Moules modulaires

Il existe une technique spécifique (transposée de l'aéronautique) avec laquelle on réalise un produit à partir d'un préimprégné verre-epoxy polymérisé sur un moule femelle chauffant avec pour autre moule un film plastique avec mise au vide entre les 2.

Ce procédé, dont le coût matière est plus élevé que celui du polyester verre classique est encore trop peu industrialisé pour assurer une rentabilité mais il apporte incontestablement des caractéristiques meilleures.

Une passerelle de chalutier a été réalisée par cette technique et donne de bons résultats pratiques (bateau visité après un an de mer : état parfait).



Tab. 6 - Coût des composites en fonction de leur typologie et du mode de transformation

Les <u>structures sandwiches</u> sont généralement produitent par le chantier qui insère dans celles-ci, lors de la fabrication, les éléments (bois ou métal) devant permettre une fixation ultérieure.

Il existe plusieurs procédés de fabrication du sandwich qui, avec les variantes de composition peau/âme conduisent à des caractéristiques et prix très différents :

Constitution	Procédés	
peau : stratifié	moulage au contact table à vide projection simultanée en	(tissu)

Tab. 7 - Procédés de réalisation pour sandwich

Il existe 2 voies économiques d'utilisation de structure sandwich

Sandwich isotherme du commerce (sur catalogue)

Pour les besoins de l'isolation thermique des camions isothermes on fabrique des sandwiches (verre-polyester/mousse PU) en continu

Sandwich à base de nida PP (sur mesures)

L'ame en nida PP est actuellement plus économique que les balsa au-delà d'une épaisseur de 10 mm.

Amélioration possible du coût des coques en composites

Il existe une différence fondamentale de construction entre les coques en verre-polyester et celle en bois ou en métal.

En effet, ces dernières sont réalisées à partir de semi-produits (tôles ou planches) qui ont besoin d'un appui sur des couples-raidisseurs pour donner la forme de la coque.

Les structures en polyester au contraire sont réalisées sur un moule et les raidisseurs sont ensuite surajoutés (rapportés après coup).

Le squelette pour le bois ou le métal est constitué par les membrures (externes) alors que pour les composites il est inclus dans as atructure (interne) par le jeu des fibres renfort

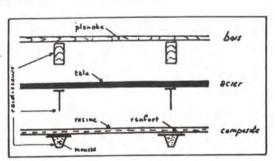


Fig. 7 - Différentes structures utilisées sur les navires.

Or c'est la fabrication de ces raidisseurs qui demande le plus de temps lors de la réalisation des coques en composites (~ 50 %) et ceux-ci sont imposés par la réglementation VERITAS alors que rien ne prouve leur utilité.

Car, on l'a vu précédemment, un composite se construit à la demande en faisant dans un même temps le matériau et le produit.

On peut donc créer le renforcement là où on le désire, sans faire appel à un raidisseur. L'hétérogénéité devient alors un avantage puisque on peut mettre le prix au seul endroit où il faut le tenir et non partout comme on le fait avec un matériau isotrope. La conception avec raidisseur pour un composite et donc a priori une négation, ou une incompréhension, de sa fonction.

On notera de plus que le comportement d'un composite est dans une certaine mesure élastique ce qui n'est pas le cas de l'acier et que la fonction amortissement est alors mieux remplie lors d'un choc. En d'autres termes le calcul de la flèche entre 2 éléments raidisseurs n'a pas le même sens pour les 2 matériaux.

L'aire des rectangles respectifs qui représentent l'amortisaement du metérieu montre la supériorité du composite vis-à-vis de ce critère.

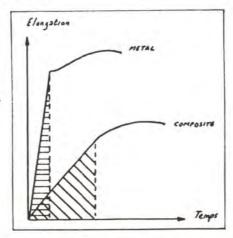


Fig. 8 - Allongement comparé des métaux et des composites.

Il serait donc souhaitable de vérifier la faisabilité de cette hypothèse. On pourrait par exemple faire des relevés de contraintes sur un bateau en composite existant de façon à pouvoir modéliser son comportement et déterminer par éléments finis la structure ad hoc.

Celle-ci devrait permettre de réduire fortement le prix de revient des coques en composites (moins de matière*, productivité accrue) d'où favoriser leur développement.

3 - AUTRES APPLICATIONS POSSIBLES DES MATERIAUX DE SYNTHESE

3 matériaux plastiques peuvent trouver des applications privilégiées dans l'activité pêche, ce sont les :

. composites verre/polyester (CVP)

. polyéthylènes haute densité (PEhd)

. polyvinyles (PVC)

Le tableau qui suit résumant celles-ci :

^(*) On peut toujours alourdir économiquement la structure, si besoin est, par une coulée de béton.

	Existant et développable	Possible problèmes économiques	Difficite problèmes techniques et économiques	Polymòres utilisables
Coque	•	10000		V/P
Bande de protection		•		PEhd
Echelle	100	•		V/P pultrusion
Calle à poissons	•	2.0		V/P
Porte de calle	•	•		V/P
Plancher, caillebotis	•			V/P
Epontille		•		V/P pultrusion
Brèze	17	•		V/P pultrusion
Table de travail		•		PEhd
Cuve mezout Passerelle	1	•		PEhd, V/P
Passerelle Porte étanche	•			V/P sandwich
				V/P
Poste d'équipage Hublot	•			V/P sandwich
Sanitaire				V/P-SHC V/P-SHC
Alimentation eau	•			PVC entoilé
Ventilation				V/P ou PVC
Circuit refroidis-		*		W/P OU PVC
sement moteur				V/E boofné
Axe moteur				C + V/E bobiné
Pale d'hélice				C + V/E BOOTING
Tuyère			•	V/P OU V/E
Safran				V/P OU V/E
Portique				C + V/E
Enrouleur de chalut				C + V/E
reuil				C + V/E
Mt				V/P
Antenne				V/E
Ramberde				V/P
Cable				PE, PET, PP
Diabolo, manille				PA
Chalut, fflet				PE, PET, PP
Boule de chalut				PEhd, PA
Panneau de chalut				V/P ou V/E ou PEhd
Accessoires de bord				The second sec.
Tire bord				PA ou PON
Attache de cable				PA ou POM
Poignée	1 1/47	•		PA ou PON
Volant	1			PA ou PON
Robinet				PVC, POM
Caisse à poissons				PEhd

Tableau 8 - Synthèse des applications des plastiques et composites pour la pêche maritime

La grande masse concerne les composites qui s'imposent grâce à un double avantage :

- technique : leurs caractéristiques positives et en particulier l'anticorrosion
- économique : le faible coût du volume oeuvré (comparable à l'acier)

	F/Kg oeuvré	Densité Kg/dm ³	F/dm ³ oeuvré
Acier	10 à 12	7,8	78 à 94
Aluminium	70 à 80	2,7	190 à 216
Composites verre polyester	45 à 50	1,7	77 à 85

Tableau 9 - Coût oeuvré des métaux et des composites

4 - CONCLUSION

Ainsi, malgré la surépaisseur de structure nécessaire aux composites par rapport aux métaux et à la mise en oeuvre qui reste encore artisanale (dans cette activité), ceux-ci restent compétititfs sous le double aspect prix-qualité chaque fois que l'on a à réaliser des grandes surfaces (structures), en général :

oeuvres vives : monolithique surfaces planes : sandwich

Dans un premier temps ils s'imposeront donc par la fabrication d'éléments à caractère statique (structures de base) avec le couple verre-polyester (CVP). Ultérieurement, et en particulier si les matériaux de base baissent, on pourra penser à réaliser des éléments travaillant dans des conditions dynamiques (pièces très sollicitées ou tournantes) avec des composites de hautes performances : verre ou aramide/epoxy

ABREVIATION UTILISEE	PA	polyamide
	PAN	polyacrylonitrile
	PEhd	polyéthylène haute densité
	PET	polyterephtalate d'éthylène (= polyester thermoplastique
	PP	polypropylène
	POM	polyacétal
	PPO	polyoxyde de phénylène
	PSE	polystyrėne expansė
	PVC	polyvinyle
	PU	polyuréthane
	SMC	préimprégné verre/polyester
	V/E	verre/epoxy
	V/P	verre/polyester
	C/E	carbone/epoxy
	SMC	"sheet molding compound" (pressage de préimprégné verre-polyester)
	G.D	grande diffusion composites
	H.P	hautes performances

SESSION VI - CONTRÔLE ET FABRICATION

Présidence: M. de LOOF, Directeur technique à IFREMER.

M. BOURDILLAT, Sous-direction des chantiers navals - Ministère de l'Industrie.

Développements de moyens informatiques d'aide à la conception de coques de bateaux réalisées par ployage de plaques C. BALEY

De l'utilité du contrôle matière pour la construction navale en composites

J.P. CAVROT, F. FESQUET, A. JOUANDEAU

La construction navale en composite : la microanalyse appliquée au contrôle qualité et aux analyses de défaillances

P. LAMBERT, B. DUBOSCQ,
P. FRANGVILLE

DEVELOPPEMENTS DE MOYENS INFORMATIQUES D'AIDE A LA CONCEPTION DE COQUES DE BATEAUX REALISEES PAR PLOYAGE DE PLAQUES

Christophe BALEY*

La fabrication de coques de bateaux par ployage de plaques est ancienne, Les Indiens d'Amérique du Nord fabriquaient leur canoë en cousant et pliant des écorces de bouleaux. Cette technique est utilisée pour la fabrication des coques du catamaran olympique Tornado.

Cette étude de coques était en général effectuée à l'aide de maquettes. L'INGRN a développé des moyens d'aide à la conception de ce type de coques, permettant d'étudier les formes, le développement du bordé, les efforts nécessaires pour ployer les plaques, les contraintes dans chaque zone des panneaux ployés.

Mots clés : plagues ployées - multi-coque - conception

Introduction

Cet article présente une étude décrivant et analysant une technique de conception de coques de bateaux par ployage de plaques.

Cette méthode, déjà ancienne car exploitée par les indiens d'Amérique du Nord (fabrication de canoé en pliant et cousant des écorces de bouleaux), est utilisée depuis les années 60 pour la construction de bateaux : Tornado, Unicorn, Moth entre autres.

Principe de fabrication :

- Découpe des bordés dans des plaques de contre-plaqué ou de matériaux composites.
- Assemblage des deux panneaux par couture le long de la quille et de l'étrave,
- Ouverture de la coque aux différents angles de quille,
- Réalisation d'une stratification intérieure le long de la quille,
- Ployage des plaques et maintient en position dans un gabarit de pont ayant pour ouverture celle du livet,
- Pose des barrots de pont, aménagement des coques, puis de la dérive, mise en place du pont, stratification intérieure ou extérieure...

^{*}I.N.E.R.N rue Didier Bestin 56100 LORIENT

Avantages

- Technique ne demandant qu'un gabarit d'ouverture du livet de pont et des gabarits d'angle de quille
- Pas d'utilisation de manneguin.
- Le lissage de la coque se fait seul automatiquement au cours du ployage pas de ponçage.
- Réduction considérable du temps de réalisation des coques

Inconvénients

- La precontrainte du bordé créée par le ployage s'oppose aux efforts de pression s'exerçant sur la coque au cours de la navigation. Il est important de maîtriser cette precontrainte pour éviter toute rupture ou déformation indésirable.
- Toutes les formes de coques ne sont pas realisables.
- Le rapport entre la longueur et la largeur doit être important (s'applique bien aux coques de multicoque notamment).
- Les tailles maxima de coques réalisables sont liées aux difficultés de ployage de plaques de très grandes dimensions (coques de 12 m au moins).
- Eviter lors du ployage d'augmenter les contraintes induites dans chaque pli nécessité de disposer de moyens d'analyse-calcul
- Les matériaux utilisables doivent avoir un comportement élastique : matériaux composites, contre-plaqué

Expériences de L'I.N.E.R.N.

Nous avons developpé à l'I.N.E.R.N. un outil d'aide à la conception de ce type de coque sans pour autant réécrire un programme de lissage de carene, il en existe déjà d'assez performants. Circé, Macsurf, etc...

Cette nouvelle methode permet d'éviter les écueils liés d'une façon générale à la réalisation des coques par les techniques actuelles de ployage



- Coques ebauchées sur des plans, realisées sous forme de maquettes et testées (mesure du déplacement et de la position du centre de caréne avec plus ou moins de précision).
- Modifications pouvant être apportees sur le développement du borde et sur la valeur des angles de quille en réalisant une deuxième maquette, puis une troisième ... jusqu'au résultat convenable.

Après avoir étudié en 1983, une méthode manuelle de dessin, et réalisé un catamaran de classe A (longueur 4,8 m en contre-plaque de 4 mm, chaque flotteur pesant 26 kg entièrement terminé voir plan ci-joint), nous avons développé un logiciel destiné à calcu-ler et dessiner la forme d'un flotteur obtenu par ployage.

Le programme permet.

- De déterminer les formes de coque et les formes développées des bordés,
- D'échantillonner les plaques pour qu'elles soient ployables,
- De calculer la position du centre de carène,
- De déterminer le déplacement de la coque ainsi qu'un certain nombre de données utiles.

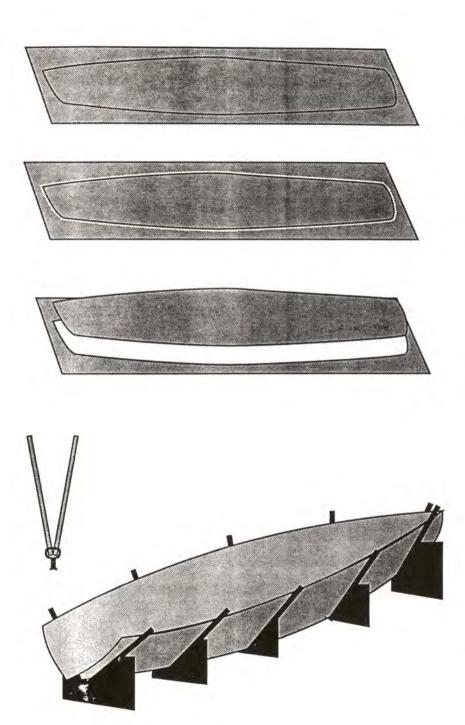
Les paramètres de forme sont l'angle de quille, la longueur développee des couples, la nature de l'assemblage entre les deux panneaux, les déplacements du bord du panneau venant par la suite constituer le livet de pont.

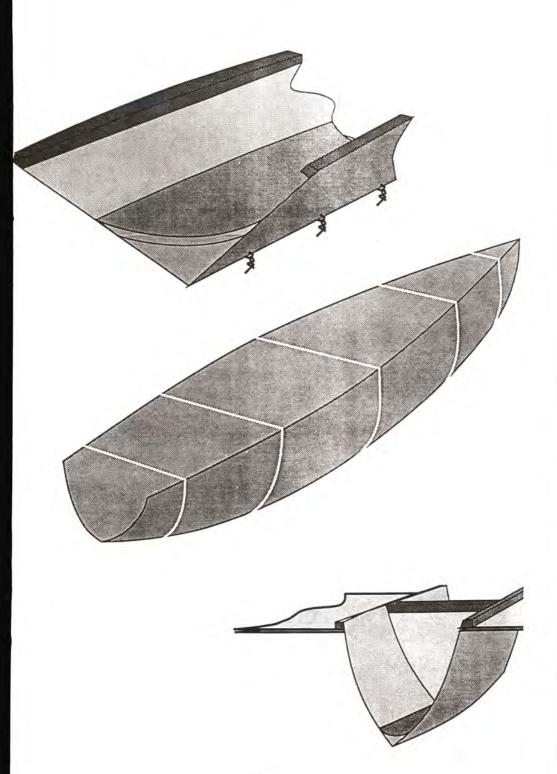
Utilisation du logiciel

Pour concevoir une carène, il faut fixer au départ l'allure génerale de la carène livet de pont, fond de quille, déplacement du flotteur et répartition des volumes.

Paramètres d'entrée de chaque couple .

- Position du livet et de la quille dans le repere general de la carene
- Angle de quille par rapport à la verticale





Le programme détermine la longueur développée du couple, si elle existe, trace les formes à l'écran, calcule les intersections du couple avec différents plans horizontaux, calcule la surface immergée du couple ainsi que la surface mouillée.

Il calcule ensuite les caractéristiques mécaniques des plaques qui vont être ployées afin de savoir si elles acceptent ou non des rayons de courbure aussi faibles. Le programme donne alors des indications sur les efforts à exercer sur chaque tronçon pour réaliser le ployage des coques (détails particulièrement utiles pour la réalisation ultérieure de la coque).

Un module de lissage des horizontales et diagonales permet d'étudier la cohérence des couples et d'analyser les rayons de courbure de l'ensemble de la coque

Connaissant les moments de flexion dans les directions principales de chaque partie de la coque, il est possible, à l'aide d'un logiciel d'analyse des contraintes dans un empilement en contraintes planes, de connaître les efforts exercés dans chaque pli du bordé (matériaux composites ou contre-plaqué).

Dans la pratique, on étudie principalement les contraintes dans la zone la plus sollicitée. On peut aussi après avoir déterminé les formes de la carène rechercher l'échantillon-nage des plaques à ployer.

Une fois les formes de carène définies, les formes des panneaux développés avant ployage doivent être calculées. Un module de développement de forme permet de connaître tous les éléments nécessaires au traçage des plaques avant découpe.

La connaissance de la forme du bordé permet de définir sa surface et donc la masse de la coque de manière précise.

Etudier la stabilité longitudinale d'une coque de multicoque permet .

- d'obtenir une grande raideur, ce qui évite tout risque d'enfournement,
- de connaître sa période de tangage.

Il est donc prévu de développer ce type de module.

A l'heure actuelle, le programme de conception de coque en plaque ployée est transcrit sous forme de modules dans un langage non compilé. Pour facilité son utilisation, il est prévu de réunir l'ensemble dans un progamme unique beaucoup plus rapide, bien que le temps de conception actuel d'une carène totale soit déjà fort court moins d'une demie journée pour l'étude de plusieurs options et le développement du bordé.

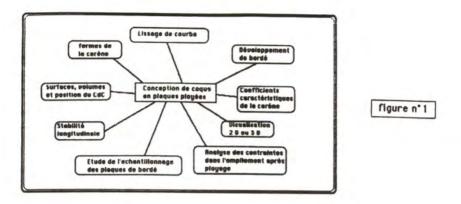
Différents modules développes . Cf fig 1.

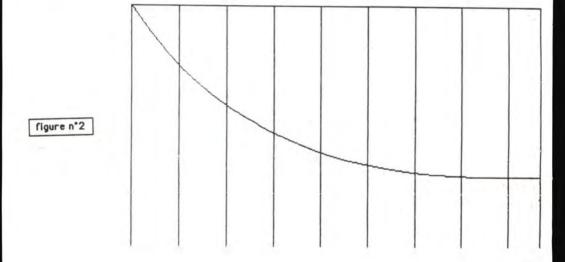
Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques

L'exemple joint (fig 2) permet de valider le modèle mathématique du comportement des plaques lors du ployage. Les différences constatées proviennent de l'assemblage imparfait des deux plaques, le joint congé n'étant pas parfaitement symétrique par rapport à l'axe du couple.

Conditions d'assemblage des plaques :

- 2 bandes de Mat imprégnées de résine polyester de 8 cm de largeur et de 2 mm d'épaisseur.
- Un angle de quille de 51° par rapport à la verticale (fig. 3).
- Un joint congé en mousse syntactique recouvert d'une bande de tissu de verre





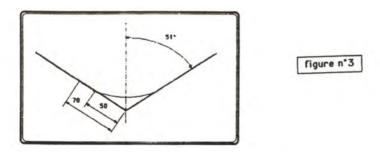


Tableau des cotes de la coque réalisée

Hauteurs par rapport au fond de quille	1/2 ouvertures moyennes mesurées	1/2 ouverture calculées	
50 mm	55 mm	56 mm	
100 mm	95,5 mm	94 mm	
150 mm	121 mm	120 mm	
200 mm	138 mm	138 mm	
250 mm	149 mm	150 mm	
300 mm	155 mm	156 mm	
350 mm	159,5 mm	159,5 mm	
400 mm	161 mm	161 mm	
435 mm	161,5 mm	161 mm	

Exemple: plan d'un catamaran de classe A (fig 4)

Il s'agit d'une présentation générale de la coque et du vertical. Le dessin du vertical a été imprimé par copie d'écran ce qui explique le manque de détails. Les sorties peuvent être effectuées sur table traçante.

Voir figures résumant la fabrication

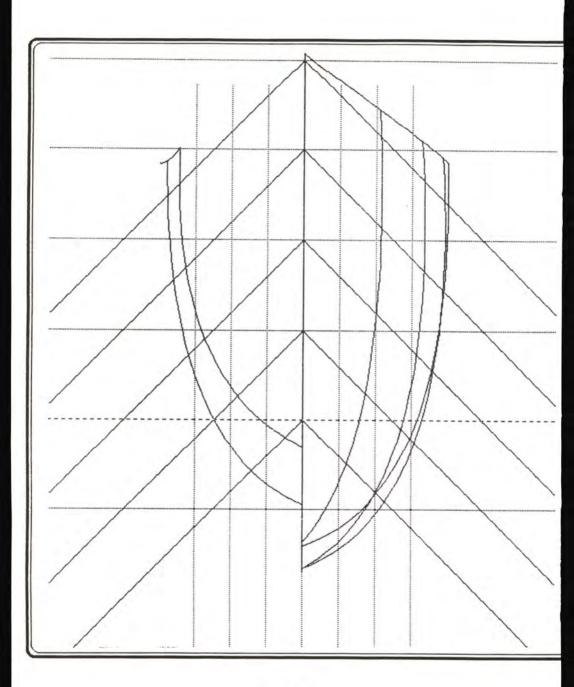
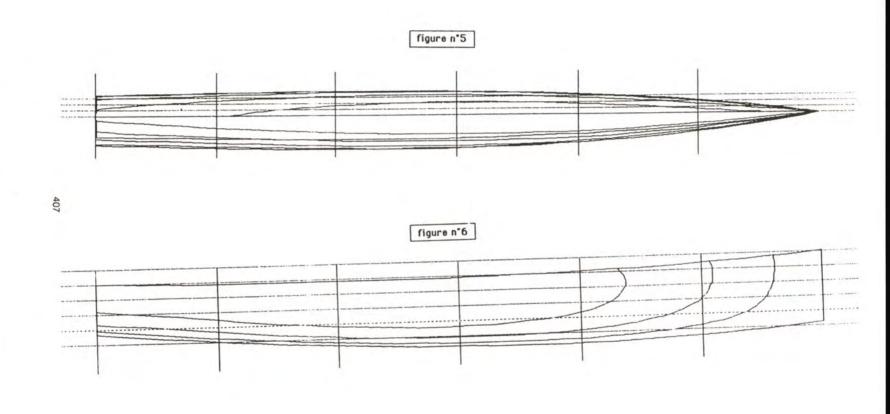


figure n°4



DE L'UTILITE DU CONTROLE MATIERE POUR LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITES.

JOUANDEAU A. (1), LENNE J.F. (2), BINSE P.(3), FIRECKA S., CAVROT J.P. (4).

Résumé: La description du processus de contrôle tel qu'il peutêtre définit dans un chantier naval utilisant les matériaux composites, et son imbrication dans le processus de fabrication, permet de situer les points sensibles à contrôler en priorité. L'un d'entre-eux porte sur la résine puisque, même si le fournisseur est irréprochable, les conditions de stockage ont une influence considérable sur la "processabilité" du composite. Un exemple précis est donné à partir de mesures réalisées sur une résine très répandue dans la construction navale. Il montre l'utilité du KINEMAT en tant qu'outil principal de contrôle des résines et composites finis.

Mots clés : composites, contrôle, cuisson, transition vitreuse.

Abstract: After a brief description of controls and their position in the process of a shipyard, an axample is choosen with a typical resin, which is widely used in the boat construction. It is shown that the storage conditions in the yard have a big influence on processability of polyester, whatever could be the reliability of the supplier. For this demonstration, the curing simulator KINEMAT shows it capacity as a versatile control apparatus for naval industry.

⁽¹⁾ PRODEMAT. 69100 VILLEURBANNE.

⁽²⁾ CHANTIERS WAUQUIEZ. 59420 MOUVAUX.

⁽³⁾ MAURIN COMPOSITES. 69009 LYON.

⁽⁴⁾ ECOLE UNIVERSITAIRE D'INGENIEURS DE LILLE. 59650 VILLENEUVE D'ASCQ.

Comme dans beaucoup de processus industriels, plusieurs objectifs peuvent être assignés au contrôle qualité dans la construction navale en composites :

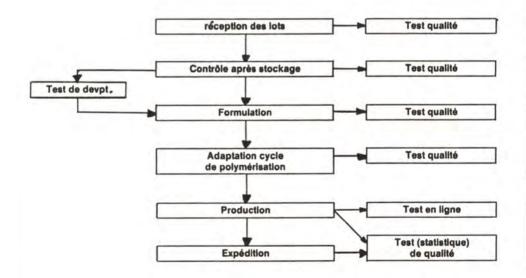
- 1) Amélioration globale de la productivité du chantier.
- 2) Diminution des rebuts finaux et des réclamations clients.

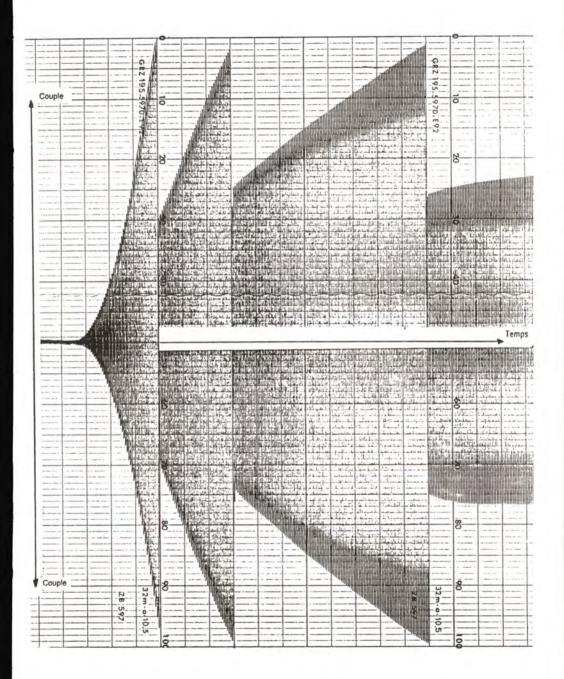
Ces deux objectifs passent par la mise en place de procédures de contrôle rigoureuses tout au long du processus de fabrication. Cela commence au niveau des matières premières qu'il faut pouvoir être en mesure de sélectionner de façon optimale eu égard à un cahier des charges. De vérifier que leurs caractéristiques ne varient pas en dehors des fourchettes définies lors de la précèdente phase. Enfin, chaque phase du processus de production jusqu'au produit final fait l'objet de contrôles appropriés. Une telle procédure a pu être étudiée en très grande partie au sein des chantiers WAUOUIEZ.

Néanmoins , le contrôle qualité ne se résume pas simplement à la mise en place de procédures ou de laboratoires plus ou moins sophistiqués, mais procède du concept de qualité totale ou chaque acteur est concerné. Ce préalable étant admis, l'objectif zéro défaut sur le produit final impose des produits de base de qualité adaptée et constante, ainsi qu'un process parfaitement respecté et controlé.

Ce principe requiert la mise au point de fourchettes de caractéristiques précises à chaque étape de la transformation. Le cycle de contrôle peut donc être défini tel que ci-dessous (fig 1).

Fig 1 : Processus de contrôle des composites.





Pour être exhaustif, chaque élément jusqu'à la moindre manille entrant dans la fabrication du bateau devrait faire l'objet d'un contrôle (plus ou moins complet en fonction du degré de confiance accordé au fournisseur).

Dans ce cadre les matières premières entrant dans la fabrication de la coque (renfort résines, gel coat) tiennent une place particulièrement importante puisque les conditions de stockage au sein même du chantier ont une importance capitale sur leurs propriètés. Il apparait donc que, même si le fournisseur est irréprochable, il est quasiment indispensable de les contrôler avant leur mise en oeuvre.

Dans l'exposé qui suit, nous nous attacherons à décrire une méthode de contrôle des matières premières et des produits finis qui permet de compléter, voire de remplacer, un certain nombre de tests courants tels que temps de gel, viscosité, rigidité.

Ces tests, basés sur l'utilisation d'un nouvel instrument : le KINEMAT permettent pour un coût minimum de maîtriser correctement la qualité des matériaux fabriqués et mis en oeuvre par un chantier naval.

-I- Le simulateur de polymérisation : KINEMAT.

Produit par PRODEMAT et conçue par le Laboratoire des Matériaux Macromoléculaires de l'INSA de LYON dans le cadre du CRITT* composite, cette machine a été mise au point pour déterminer le temps de gel de préimprégnés ou de résines thermodurcissables.

Principe: un échantillon est soumis à une torsion alternée d'angle imposé, avec la possibilité de faire varier la durée de sollicitation (signal carré), soit de suivre la relaxation de l'éprouvette aux temps courts.. Le couple transmis est suivi en fonction du temps, ce qui permet:

- La détermination du temps de durcissement d'un préimprégné,

- La détermination du temps de gel d'une résine.



Fig. 2

^{*} CRITT : Centre Régional d'Innovation et de Transfert de la Technologie.

Remarque: A ce niveau, il apparait nécessaire de définir le temps de gel. Chaque laboratoire d'essai ou de contrôle possédant peu ou prou sa propre définition, nous en donnons une, assez largement utilisée: c'est le début de la formation d'un réseau tridimensionnel; il peut correspondre, soit à une augmentation de la viscosité, soit à une apparition significative d'élasticité.

KINEMAT, permet l'évaluation de ce temps caractéristique, soit par observation de l'accroissement du couple (viscosité), soit par calcul de la vitesse de formation des enchevêtrements. Le dispositif expérimental est complété par un thermocouple placé au coeur de l'échantillon. L'ensemble des données (couple, température du four; lorsqu'elle est utilisée, température à coeur de l'échantillon) sont enregistrées en fonction du temps.

Son utilisation dans un chantier naval peut être proposée à plusieurs niveaux.

- Contrôle réception des matières premières.
- Contrôle vieillissement des résines.
- Contrôle post-fabrication.

Les tests sensibles aux variations de propriétés sont :

- Détermination du temps de gel.
- Détermination de la zône de transition vitreuse.
- Détermination du module apparent de torsion.
- Vérification du degré de réticulation.
- -II- Les matières premières utilisées par la construction navale :

-II-1) Les renforts

Ils sont de deux types, discontinu anisotrope (type mat) et continu unidirectionnel ou tissé. Constitués essentiellement de verre E, ils peuvent pour certaines applications spécifiques être en carbone (compétition par exemple).

La bonne adhésion fibre/matrice conditionne la résistance mécanique finale de la structure. Elle est conditionnée par un traitement de surface spécifique pour chaque résine. La qualité, le type de traitement ont une influence marquée sur le temps de gel aussi bien que la zône de transition vitreuse.

-II-2) Les résines

Elles doivent être suffisamment fluides (viscosité comprise entre 2 et 5 poises) pour se prêter à l'imprégnation et accepter les taux de charge pratiqués (environ 30 à 50% en masse). Elles doivent en outre présenter des durées de vie en pot longues et des vitesses de réticulation assez lentes afin de permettre une mise en oeuvre manuelle la plupart du temps.

Les résines les plus couramment utilisées font partie de deux grandes familles :

- Polyester pour des raisons de coût, Vinylester.
- Epoxydes pour des applications spécifiques (compétition principalement).

-III- Contrôle réception et après stockage des lots de résine.

Une phase précèdente (bureau d'études, test de développement) a permis de sélectionner et adapter une résine pour l'application définie par le cahier des charges. L'objet du contrôle à ce niveau, est donc de s'assurer que les variations de caractéristiques d'un lot à l'autre restent comprises dans une fourchette déterminée d'un commun accord entre transformateur et fournisseur.

Ceci, néanmoins, représente un cas idéal où le transformateur est bien équipé pour assumer un tel dialogue. La résine la plus utilisée étant le polyester, c'est cette dernière qui servira de base à notre exposé.

Remarque: l'accord entre fournisseur et transformateur s'établit d'autant plus facilement qu'il y a :

- Confiance et confidentialité entre les deux parties.
- Langage commun entre les équipes de recherche/développement.
- Accessibilité aux matériels et aux résultats des deux parties (avec possibilité de comparaison).
- Possibilité chez le transformateur d'apdapter son process aux dérives inévitables.
- Changement de mentalité du fournisseur aussi bien que du transformateur qui n'est plus spectateur.
- -III-.1 paramètres nécessaires et indispensables pour le transformateur.

Le suivi des paramètres ci-dessous doit permettre la qualification des lots de résines et éventuellement d'ajuster la formulation afin de corriger les légères dérives par rapport au zèro à l'intérieur de la fourchette acceptée.

- Type de résine : orthophtalique isophatlique ou isonéopentylglycol.

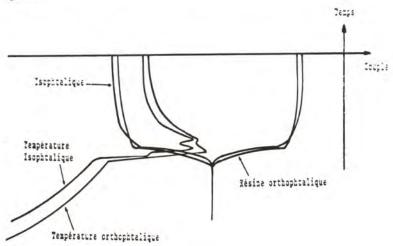


Fig.3 : Signature comparés de résine ortho et isophtaliques de mêmo caractéristique après cuisson.

Lorque l'on soumet un échantillon de résine à un essai sur le Simulateur de cuisson (KINEMAT), on obtient une courbe signature typique de chacune d'entre elles (fig.3)

Cette approche est fiable dans la majeure partie des cas.

- Taux de paraffine. Taux d'isophtalique.

- Rapport d'insaturation : lié au taux d'isophtalique.

Ces deux derniers paramètres conditionnent la vitesse de formation des noeuds (rigidité). Leur mesure nécessite des moyens lourds et sophistiques hors de portee du transfomateur (spectrometrie I.R ou R.M.N) .

- Viscosité : un grand nombre d'instruments, (de la coupe FORD jusqu'au viscosimètre sophistique) permettent de la mesurer.
- Cinétique de formation des enchevêtrements : sa mesure est effectuée au cours d'un suivi de polymérisation sur un simulateur de cuisson (Fig.4).

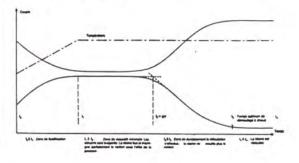


Fig.4 : suivi de polymesation d'un thermodurcissable.

3.2. Paramètres donnés par le fournisseur

- Type de résine,
- Viscosité (Brookfield le plus souvent) suivant des protédures normalisées (ASTM, AFNOR, DIN etc ...)
- Indice d'acide,
- Temps gel-pic, suivant norme : bien qu'interessant il n'est pas représentatif du process(*),
- · Pic d'exothermie : sa valeur est toujours différente de celle obtenue lors du process mais donne une indication sur la réactivité(*),
- Pourcentage de Styrène,
- HDT; Heat distorsion température ou température de fléchissement sous charge (norme) : effectuée sur la résine pure, il ne prend pas en compte les interactions fibre-matrice, cette mesure présente des différences notoires avec la Ty qui est de loin plus interessante. La plupart de ces essais, bien qu'ils soient normalisés (ou à cause de ce fait) sont relativement imprécis, car ils ne concernent qu'une mesure ponctuelle, dépendant la plupart du temps de l'instrument utilisé pour les obtenir.

En effet un point n'est pas totalement représentatif d'un système. L'évaluation nécessaire de la dynamique d'une réaction impose l'utilisation d'instruments différents de ceux préconisés pour les mesures normalisées. Toutes ces valeurs ne donnent qu'une information fractionnaire sur le comportement de la résine au cours du process et sont génératrices d'ambiguités dans certains cas. (*) Néanmoins, à conditions d'essai égales, les 2 indications sont bien reproductibles.

3.3 Mesures réalisées sur le KINEMAT

3.3.1) Mode operatoire

Par souci d'homogénéîté, les mesures ont toutes été éffectuées à 40°C, les échantillons étaient constitués de lames de mat de 450g/m² dont les dimensions sont les suivantes : 50 mm de hauteur et 15 mm de largeur. Chaque extrèmité est revêtue d'un clinquant d'aluminium (voir fig 5) afin de répartir les contraintes à l'encastrement et réduire le fluage dans les pinces.



Fig.5 : Echantillon pour KINEMAT.

L'éprouvette est ensuite imprégnée avec la résine formulée puis installée sur le simulateur de polymérisation.

Nota : on a pris soin de mesurer le temps à partir duquel la résine a été mélangée avec le catalyseur. C'est l'origine des temps qui servira de base pour la mesure des temps de gel.

Le temps de gel a été considéré comme le moment ou le couple croissait de façon significative et continue, certains auteurs appellent cet instant le début de gel.

L'enregistrement potentiomètrique se présente tel que sur la fig.6; il correspond au suivi des couples instantané C_1 et relaxé C_r , au cours de la gélification.

L'exploitation de la cinétique complète peut donner lieu à une évaluation de la réactivité (vitesse de formation des enchevêtrements).

Enfin les mesures par chauffage à vitesse constante, sur stratifiés totalement polymérisés portent essentiellement sur le contrôle de la transition vitreuse.

Dans ce cas, les échantillons sont découpés dans une plaque témoin de stratifiés ou directement sur un bateau (lèvre de coque par ex.), et ont les dimensions suivantes : longueur 50mm, largeur 5mm, épaisseur 2 mm. Les extrémités sont également revêtues de clinquant afin d'éviter que les dilatations ne perturbent la mesure.

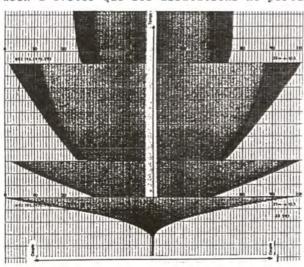


Fig. 6 : En registrement potentiomètrique d'une cinétique, résine pour construction navale.

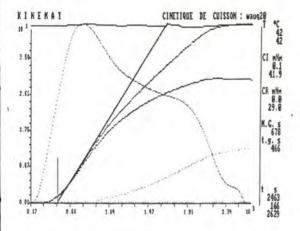


Fig. 7 : Cinétique Fig 6 exploitée sur le système d'acquisition et d'exploitation numérique.

3.3.2) Influence du taux d'initiateur sur le temps de gel La résine utilisée est une résine polyester standard, l'initiateur du Péroxyde de Méthylethyleétone et l'accélérateur de l'octoate de cobalt à 6% de métal actif. Il apparait en première approche que le temps de gel est

proportionnel au taux d'initiateur (Cf. Fig.8).

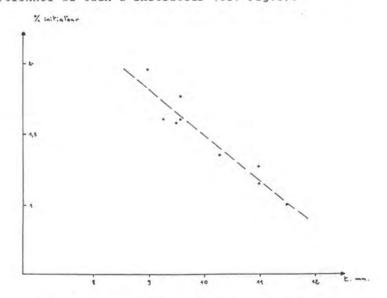


FIGURE 8: relation entre le temps de gel et le pourcentage d'initiateur .

3.3.3) Influence du vieillissement de la résine sur la réactivité.

Afin d'obtenir des mesures comparatives, la réactivité de la résine a été définie par le temps au bout duquel le couple instantané atteint une valeur égale à un nombre entier de fois le couple mesuré au temps de gel.

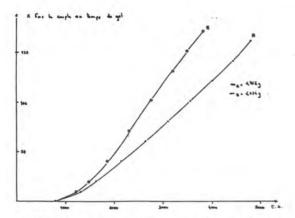


FIGURE 9: réactivité ,mesurée par le nombre de fois le couple au temps de gel en fonction du temps, pour deux masses de résine catalysées à 1,62 .

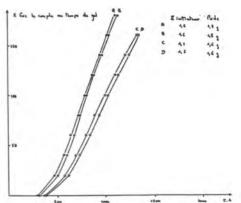


FIGURE 10: réactivité de résines de masses proches catalysées à pourcentages différents .

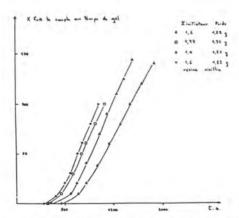


FIGURE 11: réactivité à pourcentages d'initiateur différents, la résine la plus réactive a été stockée à température élevèe .

Pour un taux constant d'initiateur (1,6%) on constate (Fig. 9) que la réactivité à 20°C dépend fortement de la masse de résine utilisée, donc de la reproductibilité des conditions d'imprégnation des mats. Ceci pourrait être lié à un échauffement à coeur de la résine, dépendant des possibilités plus ou moins grandes d'échange thermique avec l'air ambiant.

En revanche, on notera la bonne reproductibilité obtenue à 40°C à masses identiques pour les échantillons A-B et C-D de la Fig. 10.

Afin d'appliquer la méthode au contrôle-qualité des matières premières, nous avons testé à 40°C, la réactivité d'une résine préalablemnt stockée dans de mauvaises conditions (température élevée). Ce cycle de vieillissement, dont nous avons vérifié qu'il n'induisait pas de perte en styrène, provoque un accroissement de la réactivité et une diminution du temps de gel, liés à la diminution des liaisons styrèniques disponibles après stockage (Fig. 11).

3.3.4) Contrôle du matériau après gélification

Cette partie est celle qui fait la plus appel aux derniers acquis en matière de connaissance rhéologique des matériaux.

En effet les propriétés thermomécaniques et particulièrement l'évaluation de la zône de transition vitreuse peuvent donner des renseignements précieux sur la fabrication du stratifié :

- Degré de polymérisation.
- Qualitè des interphases ou interfaces.

3.3.4.1) Détermination des effets de post-cuisson.

L'échantillon étant placé à température de post-cuisson (80°C), on observe l'évolution du couple et l'on pourrait obtenir un enregistrement du type de celui décrit fig.12.

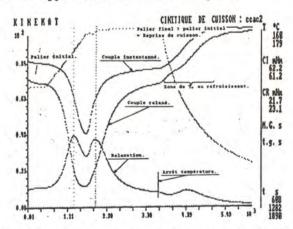


Fig 12.: Reprise de cuisson d'un composite.

La méthode retenue lors de cette étude réalise l'étuvage dans une enceinte extérieure au KINEMAT. Les mesures sont bien entendu effectuées à température ambiante, avant et après étuvage.

ma	hI	Pall	 Γ

t après dé-		1h	*	48h	*	Après post cuisson
but de gel	*		*		*	80°C pendant 1h.
Cı	*	16,3	×	145,2	*	142,2
mNm.	*		*		*	
Cr	*	15,1	*	133,3	*	142,2
mNm	*		*		*	
				Tableau -	II-	
Taux de PME		2,3%	Tem	pėrature	de me	sure : Ambiante
t après dé-	*	1h	*	48h	*	Après post-cuisson
but de gel	*		*		*	80°C pendant 1h.
Cı	*	48,3	*	133,3	*	148,1
mNm	*		*		*	
Cr	*	37,6	*	115,5	*	136,2
mNm	*		*		*	

Une évolution de la rigidité à l'ambiante traduit une réaction incomplète, succeptible de se réamorcer à la température de post-cuisson (voir Tableau -II-). Au contraire une valeur de couple constante montrerait que l'on a atteint un taux de réticulation maximum (au moins vis à vis de la sensibilité de paramètres macroscopiques, tels que la rigidité, à la structure du réseau formé) (Voir Tableau -I-).

Comme nous l'avions constaté par la réactivité, le couple varie d'autant plus rapidement que le taux d'initiateur est élevé. En revanche, nous avons constaté que pour des taux d'initiateur élevés, il est nécessaire d'imposer une post-cuisson pour atteindre la rigidité maximale, donc le taux de réticulation maximum. Ceci pourrait être lié à une augmentation trop rapide de la viscosité du milieu en présence d'une forte concentration d''initiateur, limitant ainsi les possibilités de diffusion des unités réactives, et conduisant à une réticulation incomplète.

Remarque : Quel que soit le taux d'initiateur, la relaxation est atténuée après post-cuisson. En fait, la post-cuisson à 80° C déplace la T_{σ} vers une température plus élevée, et permet une nouvelle configuration du réseau. Après retour à température ambiante on retrouve un réseau plus rigide, et donc une relaxation moins importante.

3.3.5 Contrôle de la zône de transition vitreuse.

La zône de transition vitreuse correspond à un changement de morphologie de la résine, par voie de conséquence du composite fini.

On peut voir Fig.13 que ce phénomène se traduit pour le matériau par une perte de module, donc de rigidité pour la structure.



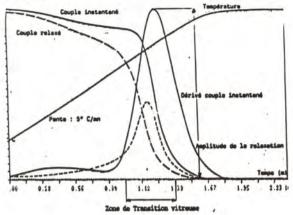
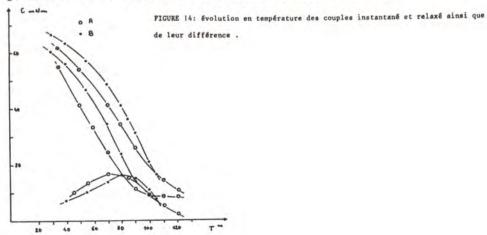


Fig. 13: Evaluation de la zone de transition vitreuse d'uncomposite.

Le facteur d'influence prépondérant est la température, il n'est pas rare que pour certaines résines, la perte de rigidité atteigne un facteur 5 voire 10. La valeur de la température de ramollissement est bien entendu un paramètre important, en particulier dans le cas d'une utilisation en zônes chaudes!

Parallèlement à cette brusque variation de module, la relaxation (écart entre couple instantanné et couple relaxé) passe par un maximum.Les courbes de la Fig. 13, sont, au moins qualitativement, identiques à celles obtenues par d'autres méthodes de mesures dynamiques, nécessitant un appareillage beaucoup plus important.

La Fig 14, représente la variation de rigidité en fonction de la température, par deux éprouvettes réticulées dans les mêmes conditions, dont l'une (B) a subi, après durcissement, un chauffage supplémentaire jusqu'à 100°C. L'effet de cette post-cuisson se traduit par une augmentation de la rigidité à l'ambiante et par un déplacement de la température de transition vitreuse (Tg), pour le maximum de relaxation à 85°C contre 77°C pour l'échantillon A. On notera que la forme de la courbe de relaxation (différence entre couples intantané et relaxé) est affectée par les conditions de gélification et reflète la structure du réseau obtenu.



Conclusion

Le bureau des méthodes a défini au cours du développement, le type de résine et les adjuvants les mieux adaptés au cahier des charges et au type ou à la saison de fabrication.

Afin d'éviter tout rebut à forte valeur ajoutée ou retour clientèle intempestif, il est indispensable d'effectuer des contrôles tout au long du processus.

- Contrôle du temps de gel et de la réactivité des résines à réception et après stockage.

- Contrôle de la transition vitreuse des stratifiés.

Ce type de mesures était jusqu'à ces dernières années l'apanage d'instruments lourds et sophistiqués necessitant des spécialistes pour interpréter les mesures.

L'arrivée sur le marché du simulateur de cuisson , à des coût abordables permet aux chantiers navals de constituer des procédures de contrôle plus précises et plus rigoureuses que celles en cours actuellement.

Elles ne peuvent que renforcer l'image mondiale que nos chantiers on su erriger au fil des ans; mais il y a urgence à mettre en place de telles procèdures car la compétition internationale a su également évoluer rapidement vers des niveaux de qualités élevés.

La mise en place d'un système de contrôle qualité ne requiert pas de moyens hors de portée des chantiers navals, ni en homme, ni en matériel.

Elle nécessite, en revanche, que chaque acteur impliqué dans le processus soit conscient que son action, aussi minime soit-elle, revêt une grande importance quant à la qualité du produit final.

"C'est de la qualité d'aujourd'hui que dépend l'emploi de demain.

⁽¹⁾ F. FRANCOIS, F. CARRE, A. LACOMBE : Dictionnaire Encyclopédique des matériaux composites WEKA Industrie.

⁽²⁾ PRODEMAT : Lettre d'information nº6.

⁽³⁾ P. BINSE, F. FESQUET, A. JOUANDEAU: Adaptation d'une formule polyester à la pultrusion. Composites Mars/Avril 1987.

⁽⁴⁾ PRODEMAT : Documentations.

⁽⁵⁾ ACFIO : Affiche Nº 20.

⁽⁶⁾ C. PILLOT, O. MALACHER : Application des mesures de torsion au contrôle et à la qualité des matériaux composites. JEC PARIS 1987.

⁽⁷⁾ P.BINSE, F. FESQUET, A. JOUANDEAU: Contrôle d'une formulation adaptée à la pultrusion Bordeaux, Mai 1987.

⁽⁸⁾ G. MERLE, C. PILLOT: Principe et comparaison des différents appareils rhéomètriques. Annales des composites p.41, Paris, Dècembre 1986.

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE – Nantes, 16-18 mars 1988, Actes de Colloques - n° 7 - 1988 - IFREMER, pages 423 à 432

LA CONSTRUCTION NAVALE EN COMPOSITE LA MICROANALYSE APPLIQUEE AU CONTROLE QUALITE ET AUX ANALYSES DE DEFAILLANCE

B. DUBOSCQ (1) : P. FRANGVILLE (1) ; P. LAMBERT (2)

RESUME - Les techniques de caractérisation par microscopie optique, électronique et microanalyse, éventuellement associées à des analyses chimiques plus globales (spectrométries d'émissions et d'absorption, chromatographie...) permettent d'apporter une contribution déterminante à l'étude des matériaux composites en général et notamment à ceux utilisés dans les industries de la construction navale. Les domaines d'intervention de ces techniques sont le contrôle de qualité et l'analyse de défaillance, qui peuvent être appliqués à différents stades de la fabrication : matière première, procédés, produits. Les études portent sur des critères morphologiques (états de surface, dimensions et répartition des constituants, identification et localisation des défauts) et de composition avec certaines limitations inhérentes aux techniques. Nous avons ainsi été amenés à intervenir plus particulièrement pour résoudre certains problèmes ponctuels de fabrication, ainsi que dans l'étude des phénomènes de vieillissement, dont quelques exemples nous permettront d'illustrer les possibilités de la microanalyse dans le domaine de la construction navale.

mots-clés : contrôle qualité/microscopie/microanalyse/analyse de defaillance.

ABSTRACT - Scanning electron microscopy (SEM) and X ray fluorescence microana lysis techniques of characterization may induce important developments in the study of composite materials and specially of materials used in boats manufacture industry.

These techniques can be applied in quality assesment and failure analysis. They can be used at several steps of the fabrication's process:raw materials, methods final products.

The studies lead to :

morphological characterization (surface analysis, dimensional study and distribution evaluation of the composents, failure identification and localization)

- chemical (qualitative and quantitative) analysis.

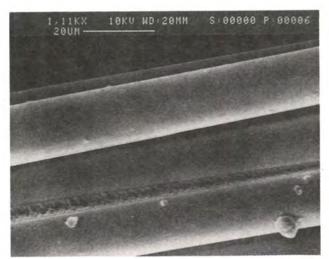
Our activities mainly consisted in studying ponctual technological problems and ageing phenomenons.

Some examples will illustrate the microanalysis possibilities in the field of composite boat manufacturing.

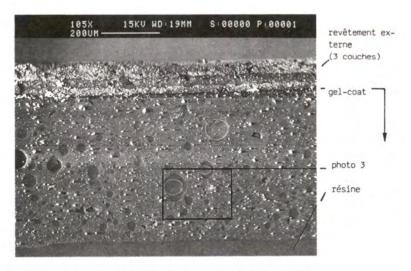
key-words : quality control/microscopy/microanalyses/failure analysis.

⁽¹⁾ C.A.R.M.E. Zone Industrielle avenue G. Eiffel 33260 LA TESTE

⁽²⁾ Sciences et Application, Le Lafayette, avenue Kennedy 33700 BORDEAUX MERIGNAC



 $\underline{\text{PHOTO 1}}$: Vue au MEB de fibres de verre présentant un excès d'ensimage - grandissement 1110.



 $\underline{\text{PHOTO 2}}$: Vue au MEB d'une section de coque de bateau - grandissement 105.

Le C.A.R.M.E. est un laboratoire privé mettant au service des industriels les techniques de microscopie et de microanalyse permettant des études très diversifiées, en particulier dans le domaine des matériaux.

Les techniques de caractérisation par microscopie optique, électronique et microanalyse X, éventuellement associées à des analyses chimiques plus globales (spectrométries d'émissions et d'absorption, chromatographie ionique...) permettent d'apporter une contribution déterminante à l'étude des matériaux composites en général, et notamment ceux utilisés dans les industries de la construction navale.

Les champs d'intervention de ces techniques sont essentiellement le contrôle de qualité et l'analyse de défaillance, qui peuvent être appliqués à différents stades de la fabrication : matière première, procédés, produits.

Les moyens utilisés, généralement non destructifs, nécessitent cependant dans la plupart des cas la réalisation de prélèvements, notamment pour l'étude des coques de bateaux (carotage).

Cette étape est une phase importante de l'analyse : il s'agit en effet d'obtenir un échantillon représentatif du phénomène à étudier, en veillant à ne pas introduire de modifications physiques ou chimiques lors du prélèvement et de sa préparation. Dans ce but, les échantillons généralement préparés par microsection après enrobage dans une résine, sont polis selon des techniques dérivant de la métallographie.

Les études que nous effectuons dans le domaine de la construction navale portent sur des critères morphologiques (états de surface, dimension et répartition des constituants, identification et localisation de défauts) et de composition avec certaines limitations qualitatives et quantitatives inhérentes aux moyens techniques d'analyse chimique.

I- CONTROLE QUALITE

Ce contrôle peut être effectué à tous les stades de la fabrication :

 Contrôle de la matière première : caractérisation morphologique et chimique des charges, renforts et inserts.

PHOTO 1: Observation d'un excès d'ensimage sur des fibres de verre, pouvant entrainer des problèmes à l'interface fibre/matrice.

- Analyse du procédé de fabrication : qualification de surface des moules contrôle des épaisseurs, de la répartition des renforts...

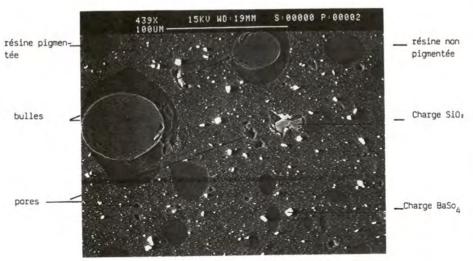
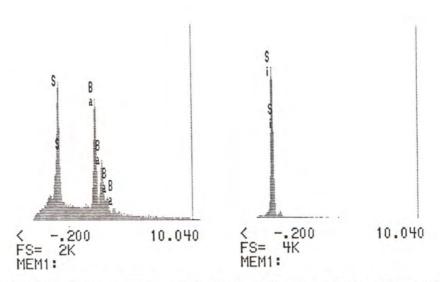


PHOTO 3 : Vue de détail au MEB du gel-coat - grandissement 439.



Spectre d'analyse X de charge de sulfate $\,$ Spectre d'analyse X des charges de silice : Si02 de baryum BaSo $_4$ \cdot

- Contrôle des produits finis : détermination du taux de fibres qualification des interfaces et états de surface, de la porosité....

PHOTOS 2 et 3 : Vue en coupe d'un échantillon de coque de bateau montrant :

- les couches superficielles ;

- la nature et la répartition des charges ;

- la porosité.

Au dessus du gel-coat de 500 µm d'épaisseur (photo 2) apparaissent trois couches successives de revêtement externe chargées en particules de cuivre (peinture antifouling). La mise en place de ces couches a été faite de façon soignée comme l'indique la régularité des interfaces.

Le gel-coat est constitué (photo 3) par une résine pigmentée (dioxyde de títane) chargée en silice et sulfate de baryum.

On observe des hétérogénéités de la repartition des charges et des pigments pouvant coincider avec l'existence d'une porosité de grande dimension, de forme arrondie. Une microporosité de forme irrégulière associée à la résine chargée, apparait particulièrement développée dans la partie inférieure du gel-coat.

II- ANALYSE DE DEFAILLANCE

L'étendue de l'échelle d'observation permet de suivre aussi bien les défauts liés à la fabrication que ceux consécutifs au vieillissement des matériaux en présence :

- Matière première : étude des défauts des renforts et inserts.

PHOTO 4 : Observation en coupe de fibres de verre fracturées. La présence de résine à l'intérieur des fractures indique que ces dernières sont antérieures à l'imprégnation par la matrice.

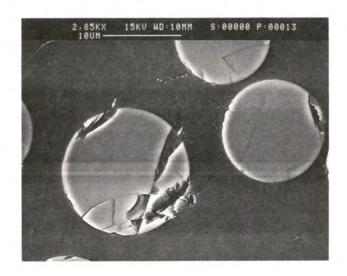
- Procédés: Les principaux défauts liés à la fabrication sont les suivants: usure ou défauts de surface des moules, absence d'agents démoulants, mauvaise imprégnation des renforts, absence d'ébullage, défauts de polymérisation de la résine, faible épaisseur du gel-coat, mauvaise répartition des charges...

PHOTO 5 : Observation en coupe d'un contact anormal entre un moule et une couche de gel-coat, en raison de l'absence locale d'agent de démoulage.

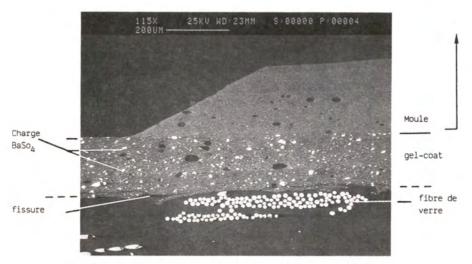
Le moule est constitué par des couches de résine polyester dont les plus externes sont pigmentées au dioxyde de titane.

Le gel-coat se différencie nettement par la présence de charges de sulfate de baryum.

Noter la fissuration à l'interface gel-coat/stratifié apparue lors des tentatives de démoulage.



 $\underline{\text{PHOTO 4}}$: Vue en coupe au MEB de fibres de verre fracturées dans un composite - grandissement 2850.



 $\underline{{\sf PHOTO}\ 5}$: Vue au MEB d'une microsection d'un fragment de coque adhérente à une partie de moule - grandissement 115.

- Produits finis: Les observations concernent plus spécifiquement le viellissement des matériaux: altération de la résine (décomposition, retrait fissuration) délaminage, décollement, enfoncement (pouvant aboutir à la formation d'une cloque), perforation, et les réparations et traitements subis par la coque.

> PHOTOS 6 et 7 : Section de composite fibres de verre/ résine montrant l'altération de la matrice en périphérie des fibres de verre, qui se traduit par une décohésion aux interfaces fibres/ résine, pouvant être à l'origine de délaminage.

> PHOTOS'8 et 9 : Section de coque de bateau montrant une cloque développée dans les couches de revêtement antifouling. Ce désordre s'est développé postérieurement à la réparation d'une perforation du gel-coat par une résine chargée.

Noter la décohésion à l'interface fibres de verre/résine immédiatement sous le gel-coat, et l'amorce de fissuration de la matrice.

III- EVALUATION DE PRODUITS ET PROCEDES - OPTIMISATION DE PRODUCTION

Les techniques de caractérisation précédemment décrites peuvent aussi s'appliquer pour analyser des produits ou des procédés nouveaux, et par une étude des comportements, effectuée en relation avec les procédés de mise en oeuvre, permettre une optimisation de la production.

CONCLUSION

Le microscope électronique à balayage et la microanalyse X couplée permettent, grâce à l'étendue de leur échelle d'observation, de caractériser aussi bien des défauts macroscopiques que microscopiques, tant du point de vue morphologique que chimique.

Ces techniques, qui permettent d'accéder, comme nous avons pu l'illustrer, aux différents stades de la fabrication des matériaux composites sont à même d'intéresser les industriels de la construction navale, mais aussi les utilisateurs, dans le cadre d'expertise après avarie, et les concepteurs, pour la mise au point de nouveaux produits et procédés.

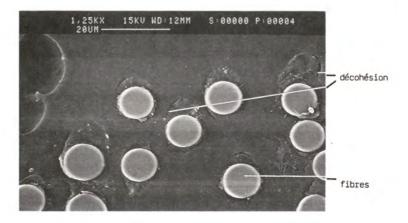
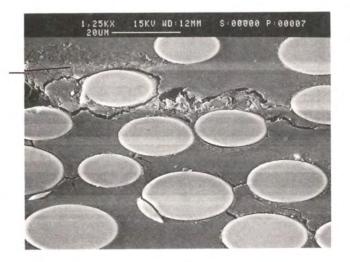


PHOTO 6 : Vue au MEB d'une section de composite fibre de verre/ résine : altération de la résine en périphérie des fibres de verre - grandissement 1250.



résine altérée

PHOTO 7 : Vue au MEB d'une section de composite fibres de verre/ résine - altération et fissuration de la matrice grandissement 1250.



 $\frac{\text{PHOTO 8}}{\text{tant une cloque au niveau des couches de revêtement}}: \text{Vue au MEB d'une microsection de coque de bateau présentant une cloque au niveau des couches de revêtement} \\ \text{externe (peinture anti-fouling) - grandissement 18,9.}$

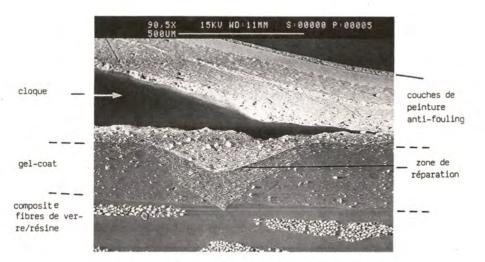


PHOTO 9 : Vue de détail au MEB de la zone de réparation du gel-coat.



Intervention de Mr BOURDILLAT représentant de Mr ALAIN MADELIN, ministre de l'Industrie, des P.T.T. et du Tourisme.

Mesdames, Messieurs,

Comme vous le savez, Alain Madelin, Ministre de l'Industrie, porte une grande attention au secteur de la construction navale et, tout particulièrement, au domaine de la petite construction navale et à celui du nautisme. Il m'a fait le redoutable honneur de le représenter à votre colloque auquel il a apporté son parrainage.

J'ai en charge, à la sous-direction des chantiers navals, la Division "Recherche-Développement-Innovation" et, à ce titre, j'ai suivi avec beaucoup d'intérêt les travaux de ce colloque sur la construction navale en composites.

Les domaines marins de la haute compétition, du nautisme, de la pêche, des bateaux de service, des navires militaires et des navires civils à grande vitesse ont tous été abordés, ce qui montre la pénétration des matériaux composites dans tous ces domaines.

Les échanges, parfois vifs mais certainement fructueux, entre les scientifiques sur les modélisations mathématiques sont la preuve que les matériaux composites ne s'obtiennent pas par des recettes de "bonne femme" et que leur mise en œuvre fait intervenir le savoir de l'architecte naval.

On a largement débattu également des matériaux, de leurs modes de mise en œuvre ainsi que de la production de semi-produits appelés à de grands développements.

Au travers des divers exposés, il apparaît que ce secteur industriel rassemble aussi bien les grandes entreprises, dont les arsenaux de la Défense, que les artisans et j'entends par ce terme "les hommes de l'art". Il faut d'ailleurs noter le développement de l'informatique dans les chantiers artisanaux.

Je n'exprimerai qu'un regret : c'est l'absence à ce colloque d'une représentation des associations professionnelles des armateurs. Leurs points de vue et leurs remarques seraient des apports positifs.

Je voudrais souligner trois points qui me paraissent d'une grande importance pour le développement du secteur des composites en construction navale.

Premier point, la qualité du produit. La réglementation, dont on nous a présenté différents aspects au cours du colloque, est importante pour la qualité du produit industriel. Cette qualité doit être affirmée et reconnue. Il faut donc s'attacher à développer des normes de qualité et des normes de sécurité qui s'imposent dans le Marché Commun et qui soient un vecteur du développement industriel.

Deuxième point, le dynamisme commercial. Il doit être à la fois technique et commercial. L'industrie de la plaisance - dans laquelle l'emploi des composites est largement majoritaire - exporte la moitié de sa production sur les marchés extérieurs et ceci est certes remarquable, mais il convient d'affermir et de développer cette position dans tous les secteurs. La confrontation avec les autres producteurs s'avèrera de plus en plus vive avec le grand marché européen de 1992. Il faut donc que l'industrie française des composites affirme une position volontariste.

Enfin, c'est avec un effort constant de Recherche et d'Innovation que votre secteur se placera au premier plan. Ainsi que le Ministre de l'Industrie l'a affirmé récemment au Salon de la Plaisance, les services de son ministère sont prêts à accompagner les études et les développements par des crédits de recherche. Certaines opérations sont d'ores et déjà en cours avec la Fédération des Industries Nautiques, l'Institut National d'Essais et de Recherches Nautiques, le Bureau Véritas et l'IFREMER.

Au nom du Ministre de l'Industrie je remercie très vivement les organisateurs et les conférenciers de ce colloque sur la construction navale en composite.

Mesdames et Messieurs, je vous remercie d'avoir bien voulu me consacrer quelques instants de votre attention.

J. BOURDILLAT

Direction générale de l'Industrie Service des industries de base et des biens intermédiaires Sous-direction des chantiers navals

CONCLUSION DE LA TABLE RONDE

Après ces trois journées de conférences et les nombreuses questions qui sont venues les enrichir, il nous reste à tenter de conclure.

Avant tout je tiens à remercier le **Ministère de l'Industrie** qui a accepté le parrainage du colloque ainsi que la région PAYS DE LOIRE. Mes remerciements vont aussi naturellement auprès des organismes coorganisateurs :

le BUREAU VÉRITAS (BV)

le CENTRE TECHNIQUE des INDUSTRIES MÉCANIQUES de NANTES (CETIM)

l'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE MÉCANIQUE DE NANTES (ENSM)

la FÉDÉRATION des INDUSTRIES NAUTIQUES (FIN)

le GIS OUEST MATÉRIAUX COMPOSITES (GIS OMC)

l'INSTITUT NATIONAL d'ESSAIS et de RECHERCHES NAUTIQUES (INERN)

l'INSTITUT de RECHERCHES de la CONSTRUCTION NAVALE (IRCN)

le SERVICE TECHNIQUE des CONSTRUCTIONS et ARMES NAVALES (STCAN)

l'UNION de CHANTIERS NAVALS (UCN)

qui ont permis de sensibiliser leurs adhérents et assurer une bonne participation à ce colloque.

Je tiens également à remercier M. LEMOINE et le service matériaux de l'IFREMER BREST qui ont pris à leur charge l'organisation de ces journées.

Les Actes des colloques n'ont pu être prêts à temps mais des efforts seront faits pour qu'ils soient disponibles dans les meilleurs délais.

Plutôt qu'une tentative de conclusion personnelle, nous avons prévu de réunir les représentants des organismes dont les compétences complémentaires couvrent l'ensemble de nos préoccupations et de constituer une table ronde réunissant les personnalités qui ont participé à l'organisation du programme scientifique du colloque.

Ce colloque particulièrement riche rend difficile une analyse rapide sans une réflexion plus approfondie sur l'ensemble des sujets abordés.

Toutefois il convient de noter l'intervention de Mr GÉRALD (STCAN) concernant le dimensionnement des structures :

L'absence de base de données sérieuse (sauf pour quelques matériels particuliers) et la grande dispersion des propriétés mécaniques des composants (en particulier les résines marine sont raides) obligent à des approximations grossières pour caractériser le matériau composite soit par l'expérimentation, soit par des lois mathématiques.

Les codes existants amènent dans les calculs des approximations nouvelles. Mais la simplicité des structures étudiées et la dispersion des propriétés font que des modèles rustiques seront encore suffisants pendant longtemps, sous réserve d'une validation globale du résultat.

D'autre part, on sait prédire la tenue d'une structure, mais son optimisation n'est pas encore automatique.

On n'ignore pas les modèles plus raffinés mais ils sont inutiles pour les applications navales. Il faut pour le moment se contenter d'une erreur inférieure à 25 ou 30 pour cent.

Retenons aussi les conclusions de Mr BABINET (BUREAU VÉRITAS):

L'impression générale qui se dégage du colloque "La construction navale en composite" du printemps 1988 est celle d'un progrès assez généralisé. Les matériaux composites ne sont plus des nouveautés, ils sont connus et convenablement mis en œuvre par de nombreux constructeurs.

Dans son ensemble, l'industrie de la construction navale en composite développe un grand mouvement de rationalisation dans les domaines aussi différents que :

- les méthodes de mise en œuvre.
- la connaissance des produits,
- la mise au point des projets.
- les essais de matériaux ou d'ensembles,
- les calculs.

Dans chacun de ces domaines, le Bureau Véritas peut rendre de nombreux services à ses clients à condition que son rôle soit correctement compris. Dans un passé récent, les sociétés de classification ont été considérées comme des organismes rigides qui imposaient des règles arbitraires donnant des navires excessivement renforcés.

Cette image négative, basée sur une méconnaissance complète de notre activité, se dissipe heureusement.

Les progrès indispensables, imposés par une concurrence toujours plus sévère, notamment dans la perspective du marché européen de 1992, mettent maintenant en pleine lumière les multiples services que le Bureau Véritas peut rendre aux constructeurs à chaque étape de leur progression tant dans le domaine des constructions à l'unité que dans celui de la série.

Dans le domaine du calcul, le Bureau Véritas dispose de moyens informatiques très puissants mais surtout, d'un ensemble de spécialistes de résistance des matériaux qui peuvent les utiliser à bon escient et éviter leur abus.

Il est, en effet, flagrant de constater que les moyens de calculs ont fait de gigantesques progrès ces dernières années et permettent une précision fantastique dans des problèmes dont les données sont très imprécises tant en ce qui concerne le matériau (dispersion dans la mise en œuvre et les performances) qu'en ce qui concerne les chargements.

Des économies très substantielles peuvent être obtenues par une analyse très élémentaire des plans, et grâce à une connaissance approfondie du mode de travail des structures, ce qui est précisément une des spécialités du Bureau Véritas.

Dans le domaine des mesures, notamment des mesures d'accélération et d'extensométrie, le Bureau Véritas a une très longue expérience et un personnel spécialisé qui a mis au point de nombreux logiciels d'exploitation statistique des variables mesurées.

Dans le domaine de la connaissance des produits, le Bureau Véritas dispose d'un laboratoire et de spécialistes compétents aussi bien en résistance des matériaux qu'en chimie.

Enfin, dans les méthodes de mise en œuvre, le contrôle de qualité et l'assurance de qualité sont des spécialités du Bureau Véritas qui lui permettent d'aider ses clients à améliorer leurs méthodes par une plus grande rigueur et de jouer le rôle d'un témoin indépendant.

Il est un autre domaine où des progrès sont à réaliser, c'est celui de l'harmonisation des réglementations concernant les composites notamment en ce qui concerne la protection contre l'incendie.

Ces réglementations, contrairement à une opinion assez répandue, ne sont pas édictées par les Sociétés de Classification mais par les autorités nationales qui, en général, mettent en application des règles décidées par des conventions internationales par l'intermédiaire de l'OMI (Organisation Maritime Internationale). C'est donc les autorités nationales qui peuvent promouvoir la mise à jour de la réglementation pour qu'un matériel acceptable sur un avion puisse l'être plus facilement sur un navire.

Avec ces conclusions nous arrivons au terme de ces journées et nous avons déjà évoqué l'opportunité d'en tenir d'autres en 1992, l'idée d'un colloque européen, à PARIS est en gestation; ce qui est certain, c'est que l'IFREMER organisera dans quatre ans un colloque consacré aux matériaux composites en construction navale.

JEAN-PIERRE DE LOOF Directeur de l'Ingénierie et de la Technologie Ifremer Reproduit par INSTAPRINT S.A.

1-2-3, Levée de la Loire - LA RICHE - B.P. 5927 - 37059 TOURS Cedex
Tél. 47.38.16.04

Service de la Documentation et des Publications (SDP)

IFREMER - Centre de Brest B.P. 70 - 29263 PLOUZANÉ Tél. 98.22.40.13 - Télex 940 627 F





ISSN: 0761-3962