

## CONSTRUCTION D'UNE FLOTTE DE BATEAUX DE TRANSPORT FLUVIAL EN P.R.V.

Philippe NINEUIL  
TECHNI CARENE(\*)  
Architecture &  
Ingénierie Navales

### 1. INTRODUCTION

Le présent article a pour objet de présenter un important projet de construction en série de bateaux de transport fluvial développé en République Démocratique de MADAGASCAR.

Compte-tenu des spécifications techniques et économiques du Cahier des Charges du projet, le choix de la technologie du Polyester Renforcé de Verre. P.R.V., s'est imposé.

TECHNI CARENE, bureau d'étude français intervenant en tant que consultant du Programme des Nations-Unies pour le Développement, P.N.U.D., a contracté en 1980 avec le Gouvernement Malgache pour assurer les études d'architecture et d'ingénierie des diverses unités de la flotte et des outillages de construction, ainsi que pour exécuter des missions périodiques d'assistance technique sur place.

La première phase de ce projet, concernant la définition du Cahier des Charges, les études techniques des bateaux, la réalisation des outillages et la construction de prototypes de barges et de pousseurs-remorqueur, s'est achevée en octobre 1984. Après une présentation sommaire du contexte général de développement de ce projet, de ses objectifs économiques et techniques, ses aspects strictement techniques seront abordés afin de tenter de mettre en évidence les divers avantages qui ont pu découler de l'exploitation de la technologie des P.R.V.

(\*) Route de Bû, Les Christophes  
F. 28520 Sorel Moussel  
Tél. : (37) 41.80.38



### 2. PRESENTATION GENERALE DU PROJET

L'organisme Maître d'Ouvrage, l'Institut Malgache d'Innovations, est une structure dépendant directement de la Présidence de la République. Sa vocation est d'étudier et de développer des projets de développement intégrés à l'économie malgache et valorisant les ressources potentielles nationales.

Au début des années 80, l'Institut Malgache d'Innovations, l'I.M.I., engagea un vaste projet de réhabilitation, d'extension et d'exploitation du Canal des Pangalanes, voie d'eau mi-naturelle, mi-artificielle, longeant la cote est de la Grande Ile sur plus de 500 kilomètres.

Ce programme visant, dans un premier temps, à mettre au gabarit le

canal par des travaux de draguage, et, dans un second temps, à réaliser sur place une flotte de bateaux de transport modernes et parfaitement adaptés au cahier des charges d'exploitation.

Les tonnages de fret ayant été évalués par les responsables de l'I.M.I., à environ 200.000 tonnes pour le flux sud-nord, et 80.000 tonnes pour le flux nord-sud, il fut donc envisagé de créer une flotte fluviale particulière.

Sans entrer dans les détails techniques relatifs à la définition architecturale des divers bateaux, qui n'entrent pas dans le cadre de cet article, il fut décidé de construire sur place, les unités suivantes :

— 17 pousseurs-remorqueurs de 400 CH à grande manœuvrabilité, équipés de deux hélice-gouvernails orientables.

- 28 barges de 16 à 22 mètres et d'environ 100 à 120 tonnes de port-en-lourd. Cette première tranche de construction devant être complétée à moyen terme, selon les besoins d'exploitation.

- 2 bacs de transports de 100 passagers et 4 véhicules, d'une longueur de 21 mètres.

- 2 vedettes rapides de 7,50 mètres de longueur, pour assurer la surveillance du canal et les interventions techniques.

- plusieurs « modules » de transport de 40 passagers, adaptables sur les cales des barges de transport de fret.

TECHNI CARENE intervint dès 1980 pour fournir à l'I.M.I. les prestations suivantes ;

- missions d'étude sur le terrain destinées à définir, en collaboration avec les services économiques de l'I.M.I., le cahier des charges général du projet.
- études d'ingénierie de l'organisa-

tion du chantier naval et des outillages de construction à réaliser.

- études d'architecture et d'ingénierie des divers bateaux prévus.

- et enfin, missions d'assistance technique sur place durant toutes les phases de développement du projet. La périodicité de ces missions étant d'environ 10 jours par trimestre.

### 3. CAHIER DES CHARGES GENERAL ET CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DE CONSTRUCTION

#### 3.1. Cahier des charges général.

Hormis les spécifications techniques d'architecture des bateaux, le cahier des charges du projet fixait les impératifs techniques et économiques suivants ;

- construction locale de toute la flotte avec une main d'œuvre peu spécialisée, d'où prévision d'un transfert de technologie et formation du personnel rapides et aisés.

- limitation des investissements « lourds » en immobilisations (machines, gros outillages, etc...).
- valorisation de la part de main d'œuvre.

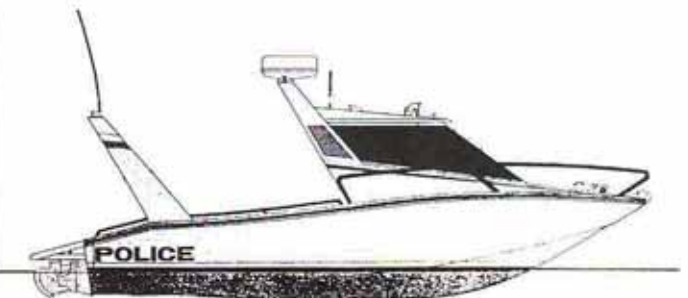
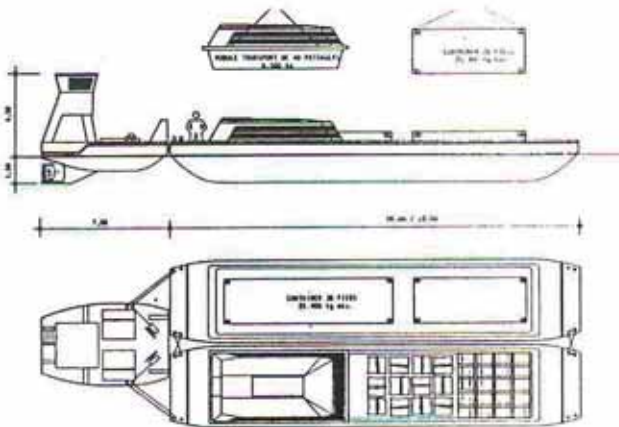
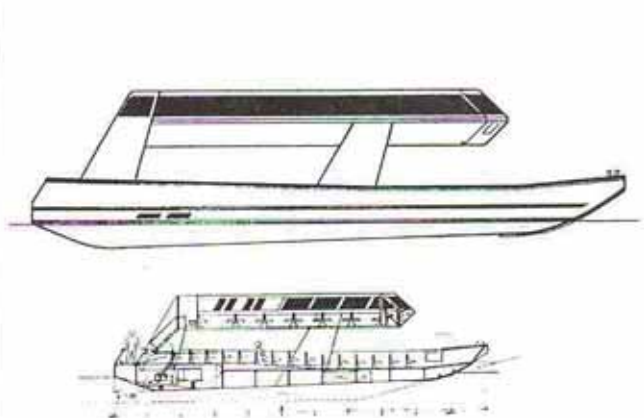
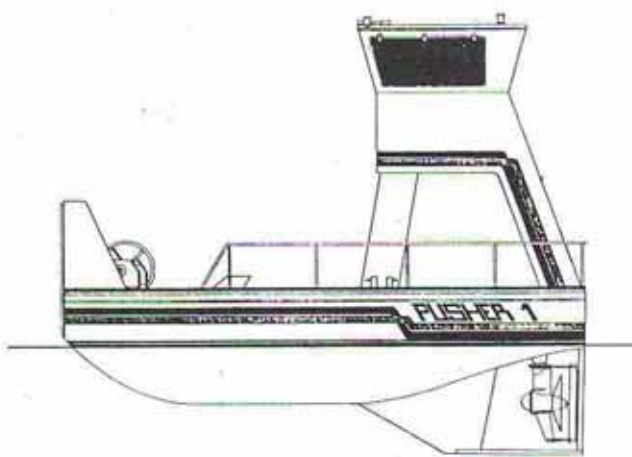
- exploitation maximum des ressources locales, en complément du matériau de base retenu.

- limitation maximum des coûts d'entretien et de réparation de la flotte.

- possibilités d'extension et de diversification de la technologie choisie, à divers autres domaines, tant dans la petite construction navale que dans ceux du bâtiment ou de l'agriculture, par exemple.

#### 3.2. Argumentation du choix de la technologie des P.R.V.

En reprenant, point par point, les spécifications énumérées ci-dessus, une étude comparative fut exécutée entre les diverses technologies offertes. Le choix du P.R.V. fut décidé et se justifie par les commentaires suivants :



— le transfert de technologie au sein du chantier naval local, spécialement créé pour le projet, a été entrepris en prévoyant l'assistance technique permanente d'un spécialiste expatrié. L'expérience a montré que, sur cette période de trois ans, le personnel d'encadrement et de maîtrise a parfaitement acquis et les divers paramètres et les contraintes de production. Le personnel de production, recruté parmi des menuisiers et des peintres, a mis moins de six mois pour assimiler la technique de mise en œuvre qui reste très accessible de par son caractère artisanal.

— les immobilisations en machines et outillages se limitent aux moules de stratification qui, globalement, représentent un investissement très largement amortissable sur l'ensemble du programme (la valeur d'amortissement d'un moule de barge représentative de 3 à 5 % de son prix de revient).

Par ailleurs, la conception modulaire du système de moules permet de réaliser la quasi-totalité de la flotte, selon les diverses configurations de montage. Par exemple, les barges de diverses longueurs et les coques de bacs de passagers sont réalisées dans le même moule constitué de multiples « tronçons » démontables.

— malgré la taille « industrielle » des pièces moulées, la méthode de mise en œuvre est très artisanale et, de ce fait, génératrice d'emplois.

— l'exploitation des ressources locales a permis de valoriser des produits forestiers malgaches :

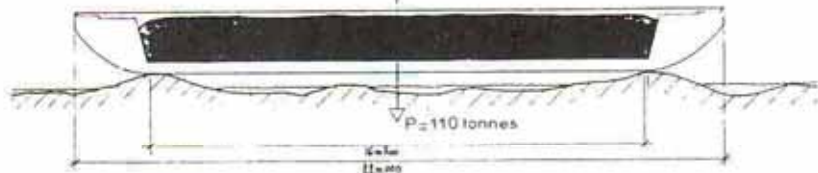
— une essence de bois locale de très faible densité (0,25-0,30) a été testée et adoptée pour la fabrication du stratifié « sandwich » qui représente près de 80 % de la surface de stratifié.

Après séchage et rabotage, des madriers de 10 x 10 cm de section sont assemblés en bottes et sciés en carreaux de 25 mm d'épaisseur.

— tous les éléments de structure primaire des bateaux sont réalisés en lamellé-collé à partir d'une essence locale de sapin, étuvée et séchée.

— les coûts d'entretien et de réparation sont, d'évidence, très optimisés de par l'emploi du stratifié polyester. Comparativement, l'utilisation de l'acier, surtout en ambiance tropicale, exige une maintenance de peinture très suivie si l'on veut éviter

CALCUL DU MOMENT FLECHISSANT MAXIMUM	
DEFINITION du cas de charge :	
- coque échouée en appui sur les extrémités de coque.	
- flottabilité hydrostatique nulle.	
- chargement maximal en cale, réparti normalement.	
MOMENT FLECHISSANT :	$\frac{P.L}{8} = 22.962.500,00 \text{ cm} \cdot \text{daN}$



l'immobilisation des bateaux pour réflexion totale de peinture. Concernant la réparation des petites avaries, une équipe spécialisée « volante », équipée de l'outillage et des matériaux de base, pourra intervenir au moyen d'une vedette rapide, sur n'importe quelle unité de la flotte tout au long du canal.

Les grosses réparations, révisions des moteurs et grosses avaries de coques, seront exécutées au chantier naval, situé sur le bord du canal, à mi-chemin de ses deux terminaux.

— les perspectives d'extension et de diversification d'activité sont nombreuses et variées. Le chantier naval étend déjà son activité à la construction de bateaux de plaisance pour le marché local.

La première de ces unités est actuellement en cours de finition et concerne un catamaran à voile de 11 mètres destiné à un club de plongée sous-marine. L'étude de ce bateau a été réalisée par TECHNI CARENE et une production en série est prévue par le chantier.

En matière de diversification, le chantier naval prévoit de réaliser les balises des voies navigables, des éléments de carrosserie automobile (pour un autre projet de construction de véhicules 4 x 4 développé par l'I.M.I.) et, selon la demande, des cuves et des silos agricoles.

#### 4. INGENIERIE DE CONSTRUCTION

##### 4.1. Infrastructure de production.

Compte-tenu du programme de construction de la flotte, l'I.M.I., entreprit la construction d'un bâtiment particulier, judicieusement situé sur le bord

du canal. Ce hangar de 1.500 mètres carrés est scindé en deux ateliers distincts, séparés par un rideau coulissant. Le premier hall de 750 m<sup>2</sup> est exclusivement réservé aux opérations de moulage et est en atmosphère conditionnée pour respecter les conditions optimum exigées pour la mise en œuvre des stratifiés et spécifiées par les sociétés de classification de navire. La température y est donc maintenue en permanence à 25°C et le taux d'hygrométrie à 65-70 %. Le stockage des renforts de verre et de la résine se font dans des locaux particuliers intégrés dans ce hall climatisé.

Le second hall est réservé aux travaux de montage et de finition (menuiserie, armement, motorisation, etc...).

La manutention des coques entre les zones est assurée par un pont roulant de 20 t.

##### 4.2. Outillages.

Tous les moules ont été réalisés sur place en stratifié polyester « sandwich » à partir de modèles en bois.

Excepté le moule de la vedette rapide, les autres outillages sont modulaires et peuvent permettre le moulage des diverses pièces de coques grâce à de multiples configurations de montage.

Après essais, l'utilisation de machines de projection de gel-coat et résine a été abandonnée. Hormis l'extrême soin à apporter à l'entretien et au réglage de ces machines, leurs qualités techniques ne sont pas à mettre

en cause. De par les dimensions importantes des pièces à mouler et du nombre de stratificateurs travaillant dans le même moule, l'utilisation d'un poste de projection n'apportait pas de réelle réduction des temps de moulage.

L'outillage de base reste donc, pour la stratification, le rouleau d'enduction, le pinceau et le rouleau éboueur.

#### 4.3. Les matériaux.

Le choix des matériaux s'est fait selon les critères d'appréciation suivants (le critère financier faisant l'objet d'étude de la part du Maître d'Ouvrage) :

- longévité du composite fini en atmosphère tropicale (température moyenne au soleil de près de 50° et hygrométrie saturée en permanence).

- facilité de mise en œuvre sur de grandes surfaces de moulage.

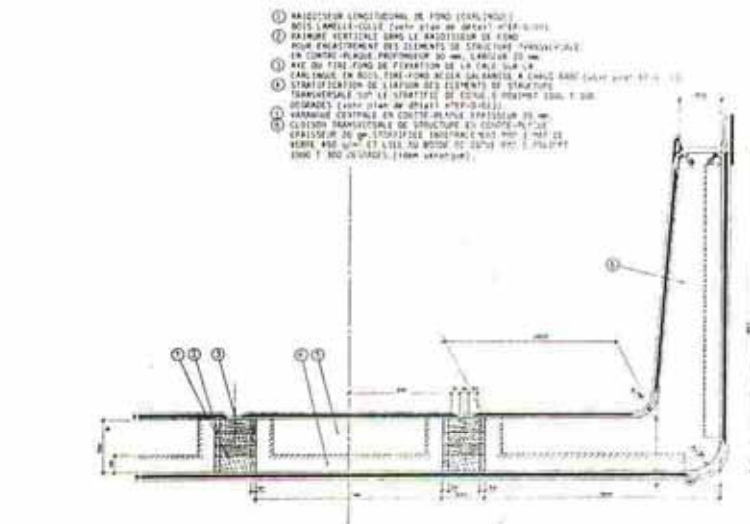
Le critère de longévité a conduit à choisir une résine polyester de type isophthalique pour l'intégralité du stratifié. Outre l'accroissement des propriétés mécaniques, ce type de résine présente de meilleures qualités de rétention d'humidité et de tenue au fluage sous charge et température élevée, par rapport à la qualité orthophthalique.

A titre d'exemple, une barge de 22 mètres, chargée de 120 tonnes de fret, peut rester exposée durant plusieurs semaines à température ambiante élevée et au rayonnement ultra-violet tout en subissant les chocs thermiques dus aux écarts de températures diurnes et nocturnes.

Nonobstant le surcoût d'environ 20-25 % des résines isophthaliques et compte tenu des contraintes particulières mentionnées, ce choix apparaît justifié.

A noter que sur certaines zones des coques, plus particulièrement soumises à des contraintes au choc ou de type alternées, le gel-coat et la résine de stratification ont été coupés avec une résine iso assouplissante afin de réduire les risques de fendillement.

Evidemment, toutes les résines et gel-coat étant importés d'Europe, ceux-ci ont été « tropicalisés ». Outre qu'il a été exigé que ces produits ne soient pas préaccéléérés en usine, un agent inhibiteur classique permet de garantir une durée de conservation d'une durée minimum de 6 mois.



Par ailleurs, les dates de fabrication sont exigées auprès des fabricants afin de ne recevoir que des résines « fraîches ». L'expédition sur Madagascar se fait par fûts conteneurisés et le délai maximum entre l'arrivée des fûts chez le transitaire en France et le débarquement au port de Tamatave à Madagascar est d'environ 3 mois. A notre avis, le risque le plus important de réticulation « prématurée » de la résine intervient lorsque les fûts sont dans les cales du navire ou stockés en plein soleil sur le quai de débarquement.

Une bonne planification d'approvisionnement est nécessaire pour limiter ces risques.

Concernant le renfort de verre, le critère de facilité de mise en œuvre a conduit à utiliser des renforts de type « complexe mat-tissu » de fort grammage.

Du point de vue mécanique, l'architecture des coques permet d'exploiter au mieux les qualités de résistance des tissus qui peuvent être imprégnés bien à plat et de manière quasi-rectiligne, voire légèrement tendus. Sans prétendre réaliser du stratifié « pré-contraint », il est certain que ce type de renfort, correctement mis en œuvre, permet effectivement de faire travailler la fibre tissée avant d'atteindre la limite élastique de la matrice-résine.

Du point de vue de la mise en œuvre, les renforts Rovimat fournis par la société Chomarat sont de type serge 1000 g/m<sup>2</sup> lié sur un mat 300 g/m<sup>2</sup>. Le fort pourcentage de tissu, associé à un ébullage soigneux, a permis d'atteindre un taux de verre mesuré d'environ 38 %.

Enfin, concernant le matériau d'âme en bois malgache débité sur place, dans l'attente de mettre au point une technique de liage ou de nappage des carrés de 10 x 10 x 2,5, chaque « pavé » est posé manuellement sur le stratifié humide, après trempage dans une solution de résine coupée avec 10 % de styrène et 0,5 % d'octoate de cobalt.

#### 4.5. Echantillonnage.

L'étude d'ingénierie de construction a surtout porté sur les barges qui présentent, au plan mécanique, des cas de charge à analyser soigneusement.

Pour ce faire, TECHNI CARENE dispose de divers programmes informatiques de calculs, élaborés et mis au point au sein du bureau d'étude sur un ordinateur Hewlett-Packard, et permettant d'exécuter des optimisations d'échantillonnages de composites pour la construction de petits navires.

Le cas de charge considéré pour le calcul des échantillonnages des barges est le cas critique tel que présenté sur le croquis n°5. Ce cas critique a une très faible probabilité de concrétisation et induit donc une surévaluation d'échantillonnage que nous avons considérée comme intervenant pour environ 50 % dans le coefficient de sécurité. Dans ce cas de charge critique, où la coque de barge est assimilée à une poutre travaillant en flexion, et sa flèche de déformation maximum, compte tenu du stratifié calculé, est de 32 mm, soit environ 1,5 % de la longueur de la poutre-coque.

En torsion, le vrillage de la coque est intégralement repris par une structure transversale constituée de cloisons en bois contre-plaqué de 20 mm, espacées de 1,65 mètre et stratifiées sur le bordé de coque. (Voir croquis n°6, présentant une vue en coupe transversale de coque).

Les efforts tranchants, dûs au chargement, sont repris, outre par les parois verticales de bordé de coque et de cale en stratifié, par deux poutres-carlingues continues en bois lamellé-collé, elles aussi stratifiées au bordé de coque.

Concernant la résistance au choc, divers cas sont à considérer dans les conditions réelles d'exploitation :

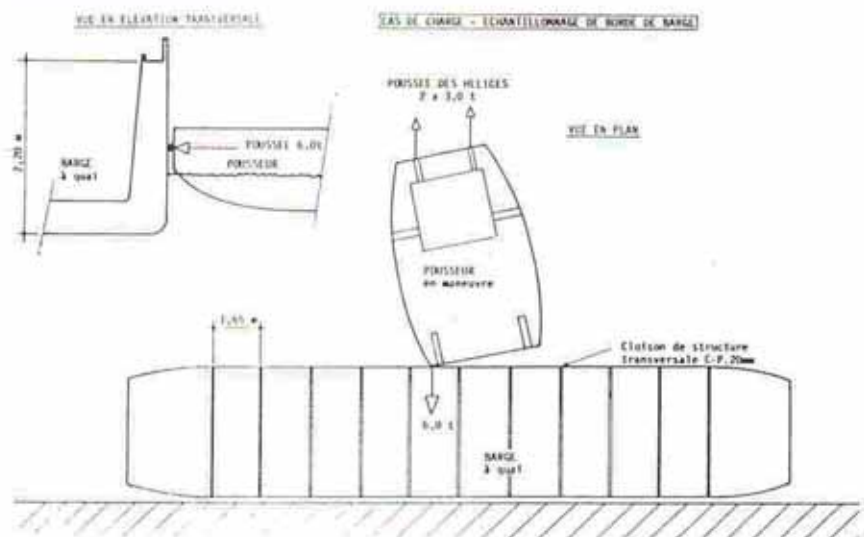
— chute d'une palette ou d'un chargement « dur » dans le fond de cale.

Ces contraintes sont difficilement estimables (poids de la charge, hauteur de chute, etc...) et notre souci a surtout été d'interposer une surface de protection du stratifié, un plancher en bois massif en l'occurrence, apte à répartir cette charge concentrée et à en diminuer, par résilience, son intensité.

— chocs sur les bordés extérieurs des coques.

Le cas le plus courant étant celui du pousseur percutant le bordé latéral de coque d'une barge lors de manœuvres. Compte tenu de l'énergie cinétique emmagasinée par le pousseur à sa vitesse de manœuvre, nous avons évalué l'intensité du choc à environ 10 tonnes. Les possibilités de choc « stratifié-sur-stratifié » ont tout d'abord été réduites au maximum en ceinturant tous les bateaux, et le pousseur-remorqueur en particulier, au moyen de défenses en profilés caoutchouc destinés à absorber l'intensité « dynamique » de la charge. La poussée « statique » du pousseur en manœuvre étant d'environ 6 tonnes, nous avons admis le cas de charge présenté sur le croquis n°7. D'après ce cas de charge, l'étude des contraintes maximum et des déformations a été exécutée en considérant le panneau de bordé en appui entre deux éléments de structure.

La fiche de calcul indique, pour le cas de charge précis et en faisant varier l'épaisseur des peaux du sandwich, les contraintes maximum et les flèches du panneau (compte tenu de la continuité du bordé, on considère les bords du panneau encastres).



On constate donc, que pour une épaisseur de peaux comprise entre 12 et 14 mm, les conditions de résistance et de déformation sont admissibles, la contrainte maximum étant environ 15 % de la charge de rupture.

Parallèlement, les contraintes de cisaillement à l'interface âme-peaux ont été évaluées afin de rester, pour les déformations maximales, en deçà des contraintes de rupture par délaminage, soit environ 0,3 kg/mm<sup>2</sup> pour le bois local utilisé comme matériau d'âme.

## 5. CONCLUSION

Compte tenu des multiples contraintes techniques propres au développement de ce type de projet dans des pays en voie de développement, ce programme de construction s'est parfaitement déroulé et ce, dans un délai relativement bref. Le mérite en revient essentiellement à l'organisme Maître d'Ouvrage, l'Institut Malgache d'Innovations, qui a su parfaitement apprécier et mettre en valeur les aspects positifs qui peuvent découler de la technologie des P.R.V.

En guise de conclusion, les chapitres précédents mettent en évidence les divers points suivants :

— la technologie des P.R.V. est aisément « transférable », les problèmes techniques relevant plus de l'organisation et de la préparation du travail que de la mise en œuvre proprement dite.

C'est sur ce point, que la nécessité de dossiers d'ingénierie très détaillés devient indiscutable et qu'une assistance technique suivie et efficace devient indispensable.

— du fait de l'éloignement des sources d'approvisionnements, des conditions climatiques et du caractère périssable des produits, la planification des opérations d'approvisionnement doit être irréprochable.

— les conditions de mise en œuvre en pays tropicaux ne posent pas plus de problèmes techniques que pour un chantier naval français soucieux de respecter les impératifs, souvent réglementaires, de mise en œuvre du matériau.

— pour un pays en voie de développement, la technologie des P.R.V. peut constituer un outil de production très polyvalent, générateur d'emplois, et dont les possibilités de

diversifications répondent de manière quasi-immédiate à de nombreuses demandes concernant des matériels et équipements. Par ailleurs, les qualités d'entretien et de durabilité propres aux P.R.V. correspondent parfaitement à ce qui constitue l'un des principaux impératifs techniques.

Enfin, dans le cadre plus général de la construction de petits navires de services (jusqu'à environ 20 mètres de longueur), les P.R.V. apportent à l'architecte naval des solutions techniques et architecturales extrêmement intéressantes qui pourraient, à elles seules, faire l'objet de nombreux articles.

Cependant, plutôt que d'envisager de simples transpositions, en substituant le P.R.V. aux autres matériaux traditionnels, il est indispensable de concevoir ces projets de navires avec le souci constant d'exploiter tous les avantages des composites. Les considérations de coût de mise en œuvre ne constituent pas le seul avantage de cette technologie en construction navale et la clef de son succès, déjà croissant, réside certainement dans la valorisation de ses propriétés techniques qui sont sans cesse plus attrayantes pour le concepteur.

Philippe NINEUIL

PROG-INERTI-TEDINI CARENE-CALCUL MOMENT QUADRAT. SANDWICH-MAT. ECR

CARACTERISTIQUES DU SANDWICH A PEaux ASSYMETRIQUES

- EPAISSEUR D'AME = 25
- EPAISSEUR DE PEAU 1 = 12,9
- EPAISSEUR DE PEAU 2 = 13,9
- EPAISSEUR TOTALE = 51,9
- LARGEUR DE SECTION = 2000

EPAISSEUR (mm) = 13,9  
PLAN NEUTRE  
EPAISSEUR (mm) = 25  
EPAISSEUR (mm) = 12,9

CARACTERISTIQUES MECANQUES

- SECTION DE PEAU 1 = 30300
- SECTION DE PEAU 2 = 29100
- SECTION TOTALE DE PEAU = 59500
- DISTANCE DU PLAN NEUTRE / X-X' = 26,269024812
- MOMENT QUADRATIQUE DE LA SECTION = 22298561,3344

FIN-PROG

PROG - SAND 4 - TEDINI CARENE - CALCUL DE PANNEAUX PRV-SANDWICH

- PANNEAU RECTANGULAIRE
- PEaux SYMETRIQUES
- 2 APPUIS ENCASTRES
- CHARGE CONCENTREE SUR L'AXE MEDIANE
- EPAISSEUR D'AME = 25
- DISTANCE ENTRE APPUIS = 1950
- LARGEUR DE PANNEAU = 2000
- ELOIGNEMENT DE PANNEAU = 0,75
- CHARGE TOTALE = 1000
- CHARGE ALTERNATIVE
- MOMENT FLECHISSANT = 1850000
- MODULE D'YOUNG DES PEaux = 1100

UNITEs

mm  
mm  
mm  
daN OU Kg  
daN/m OU Kg/m  
mm. daN OU mm. Kg  
daN/mm2 OU Kg/cm2

Ep. PEAU	Ep. TOT.	ML INERTIE	CONT. max	FL. max	L/FL	RIG. specifi
2,00	29,00	1608733,33	14,89	105,90	15,98	1,0
4,00	33,00	3729866,67	7,31	45,69	36,11	2,4
6,00	37,00	6421800,00	4,75	26,50	62,27	4,2
8,00	41,00	9770933,33	3,48	17,41	94,75	6,3
10,00	45,00	13841666,67	2,88	12,29	134,22	9,0
12,00	49,00	18704400,00	2,18	9,10	181,38	12,1
14,00	53,00	24429533,33	1,79	6,67	236,69	15,9
16,00	57,00	31087466,67	1,51	5,47	301,45	20,1
18,00	61,00	38748600,00	1,30	4,39	375,74	25,1
20,00	65,00	47483333,33	1,13	3,58	460,44	30,7

CONDITIONS DE RESISTANCE

- CONTRAINTE max. POUR UN PRV-MAT = 10 Kg/cm2
- CONTRAINTE max. POUR UN PRV-MIXTE MAT-TISSU ALTERNES = 15 Kg/cm2
- CONTRAINTE max. POUR UN PRV-TISSU = 20 Kg/cm2
- L/FL. = 200 OU FLECHE max. = 0,5% D. SOIT FL. max. = 8,25