

20

LES ESSAIS MECANIQUES A LA DCN, DE L'EPROUVETTE AUX STRUCTURES

P-A. HOARAU*

Résumé - Afin de dimensionner correctement les coques de bâtiment de surface construites en matériaux composites à matrice organique, la DCN effectue un certain nombre d'essais mécaniques. Ces essais sont statiques ou dynamiques. Les dimensions varient en fonction des besoins. Petites pour le choix des matériaux, elles peuvent atteindre l'échelle 1 pour certains essais pour choisir un type d'assemblage pont-bordé. Une corrélation mesure-calcul doit être effectuée lorsque cela est possible afin d'affiner les outils numériques qui sont à notre disposition.

Mots clés - matériau composite, structure sandwich, essai mécanique, essai sur tronçon.

INTRODUCTION

La forte anisotropie des matériaux composites impose le recours à de multiples essais en statique, en dynamique lorsque cela est possible, sur des tronçons d'essais échelle 1/2 ou grandeur réelle, et des corrélations entre le calcul et les essais expérimentaux.

L'objet de cet exposé est de présenter la philosophie des essais effectués à la DCN pour le choix d'un concept de matériau et le dimensionnement pour une coque ou une superstructure de bâtiment de surface.

Nous abordons tout d'abord, le choix des matériaux par des essais en statique pour alimenter nos codes de calculs. Ces essais sont mécaniques ou physiques. Des essais de qualification sont réalisés sur des panneaux ; ces panneaux sont conçus à partir de solutions sélectionnées et permettent de valider des concepts. Des essais sur structures ont lieu ensuite à échelle 1 ou 1/2. Enfin, une corrélation est effectuée entre le calcul et les essais.

* Direction des Constructions Navales (DCN) Indret
LECM Matériaux Non Métalliques, 44620 La Montagne, France

LES MATERIAUX

Les matériaux les plus utilisés sont des matériaux de grande diffusion polymérisant à froid ou à une température maximum de 120°C. La quantité utilisée pour la construction d'une coque de chasseur de mines avoisine les 160 tonnes pour un chasseur de mines tripartite type BCMT et 250 tonnes pour un chasseur de mines type Bâtiment antimines océanique (BAMO). Le rapport coût/performance doit être cerné le mieux possible.

Les résines polymérisant à froid les plus utilisées sont les polyesters de type isophtalique, les vinylesters et les époxydes. Le type de renfort le plus utilisé est le verre E. Différentes géométries sont utilisées, sous forme de tissus équilibrés ou non, de mats, d'unidirectionnels cousus, etc. En ce qui concerne les préimprégnés, les époxydes offrent une large gamme de matériaux disponible sur le marché. Nous débutons des travaux actuellement sur une nouvelle génération de préimprégnés à base de vinylesters.

LES ESSAIS STATIQUES

Le choix de ces divers matériaux a été effectué soit par une qualification par l'usage pour les plus anciens, soit par un certain nombre d'essais. Nous avons besoin de caractéristiques mécaniques, de la tenue au vieillissement hydrolytique, de la tenue au feu du matériau.

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE SUR ÉPROUVETTE

Ces essais ont été décrits par F. Terrail [1]. Les éléments de la matrice de rigidité sont renseignés de la manière la plus complète possible. Les éléments nécessaires sont consignés dans le tab.1. Cela permet de connaître par différentes méthodes les paramètres suivants :

- les modules d'élasticité,
- les coefficient de poisson,
- les allongements à rupture,
- les modules de cisaillement,
- les contraintes à la rupture.

Ces valeurs expérimentales permettent d'obtenir, grâce aux calculs, par exemple, la prévision du module d'élasticité ou de cisaillement en fonction de la direction de sollicitation.

Les essais les plus pénalisants pour les éprouvettes sont les essais de cisaillement. Ils permettent d'observer le délaminage en

fonction du vieillissement de ces éprouvettes ou en fonction de la température d'essai (-40°C, 20°C et 70°C).

La caractérisation mécanique en condition statique permet d'effectuer un premier tri et de comparer divers matériaux. Ceci doit être complété par des essais de vieillissement accélérés et des essais de tenue au feu qui permettent d'éliminer les matériaux ne résistant pas à l'eau et ayant un mauvais comportement face aux incendies.

ESSAIS DE QUALIFICATION SUR GRANDES ÉPROUVETTES OU PANNEAUX

Les paramètres déterminés sur éprouvettes ne sont pas suffisants pour dimensionner les structures. Il est nécessaire d'effectuer des essais sur des parties de panneaux ou des éprouvettes plus représentatives des structures. Un exemple sur grandes éprouvettes et panneaux nous est donné dans les essais relatifs à l'étude des assemblages en T de matériaux sandwich utilisés pour des bâtiments antimines ou des superstructures de frégate type "La Fayette" [2]. Cinq types d'assemblages ont été testés (fig. 1). Ces assemblages sont utilisés pour effectuer des liaisons pont-cloison ou pont-coque. Les éprouvettes sont tirées de grandes plaques car les épaisseurs testées nécessitent des éprouvettes de grandes dimensions. Des essais de traction, de compression et de flexion permettent de sélectionner un type d'assemblage. Des exemples de types d'éprouvettes sont donnés à la figure 2.

Pour parfaire nos résultats et optimiser les liaisons, une autre série d'essais est nécessaire afin de mieux connaître le comportement du type d'assemblage sélectionné en faisant varier divers paramètres. Dans cette deuxième phase, seuls les essais mécaniques en flexion sont retenus. Les sollicitations en flexion sont considérées comme les plus représentatives des sollicitations réelles.

Une approche par calcul est effectuée pour les assemblages prévus : pont/bordé ou pont/cloison par exemple. Les calculs permettent d'obtenir les contraintes à rupture. Les résultats expérimentaux et calculés sont comparés. Dans de nombreux cas, les calculs effectués donnent des résultats inférieurs aux ruptures réelles.

La troisième phase d'essais a lieu sur des panneaux où les divers assemblages sont réalisés dans un tronçon à échelle 1. Le tronçon est là pour simuler la coque du navire.

Dans la plupart des essais, les résultats permettent d'observer des différences de comportement entre des éprouvettes et des panneaux à plus grande échelle. Dans l'exemple cité, les ruptures des éprouvettes ont lieu par pelage de la cornière de liaison. Les essais sur panneaux montrent que les ruptures n'interviennent jamais au niveau de l'assemblage à un bordé par exemple, mais dans la structure même du panneau au niveau de l'âme du sandwich.

Un autre exemple d'essais sur grandes éprouvettes est donné par les travaux relatifs au choix d'âme de sandwich en forte épaisseur et à l'étude de la liaison peau/âme. La comparaison est effectuée entre une âme en Klégécell et une âme en Balsa. Deux types d'essais ont été entrepris : essai de flexion à charge uniformément répartie, essai de flexion avec une charge ponctuelle.

Nous ne parlons ici que de l'essai de flexion à charge uniformément répartie. Le dispositif d'essais est en acier (fig. 3). Il est en deux parties de 3,8m x 3,8m. La liaison mécanique est assurée par un boulonnage. Dans la partie basse, où se loge l'éprouvette, la pression hydrostatique exerce la charge uniforme. La partie haute assure le maintien de l'éprouvette. La flèche au centre du panneau est mesurée en fonction de la pression hydrostatique exercée (figure 4). Il y a un suivi par émission acoustique durant l'essai, les premiers bruits pouvant annoncer un délaminage. Une observation de la déformation de la surface est effectuée, ainsi que le décollement âme-peau de la face comprimée et de la face en extension. Enfin, pour tester le comportement de la peau, des éprouvettes de flexion sont prélevées dans la partie centrale de chaque panneau.

Les différents résultats obtenus montrent que les peaux résistent bien en général. L'âme est fortement endommagée lorsque c'est du Klégécell, et beaucoup moins avec du balsa.

ESSAIS SUR STRUCTURE CYLINDRIQUE EXPÉRIMENTALE

La structure cylindrique est construite à partir d'une section transversale du BAMO. Ce tronçon d'essai à échelle 1 est soumis à différentes sollicitations statiques connues [3]. Avant toute sollicitation, la structure est mise dans une position initiale de référence sur quatre appuis coplanaires mobiles transversalement. Les incidences des sollicitations sur l'ensemble de la structure sont de deux types (table 2):

- incidence sur l'ensemble de la structure : avec la mise en dépression, l'écartement des deux coques, le soulèvement d'un des quatre appuis.
- incidence de caractère restreint : chargement réparti, chargement localisé.

C'est par la mesure des déformations et des déplacements que l'incidence des sollicitations sur la structure est déterminée. Ces mesures sont relatives. Elles sont déduites de la comparaison de deux états. Les déformations sont mesurées au moyen de jauges extensométriques à fil résistant disposées sur la structure ; les déplacements sont mesurés au moyen de capteurs potentiométriques à fils tendus qui donnent la variation de la distance entre deux éléments de structure. Des logiciels ont été mis au point pour la capture des données, le traitement et l'expression des résultats. Une corrélation

mesures-calculs est effectuée pour chaque type de sollicitation. Les principales constatations montrent que les corrélations entre mesures et calculs sont satisfaisantes dans les types de sollicitations précitées, à partir d'hypothèses précises. Cette méthode apporte des informations exactes et intéressantes sur le comportement de la structure et permet d'optimiser les géométries.

ESSAIS DYNAMIQUES

Ces essais ont lieu sur des tronçons à échelle 1 ou 1/2 ou sur des panneaux. Ils sont essentiellement comparatifs et permettent grâce aux données des essais précédents effectués à la DCN de choisir des solutions.

Les essais effectués sont de plusieurs types.

- La tenue à la pression des cloisons ; le but de cet essai est de connaître le comportement des cloisons à une pression hydrostatique (0,22 bars et 0,44 bars) due à l'envahissement par l'eau d'un compartiment.

- La résistance aux explosions sous-marines ; le tronçon subit des mesures de vitesse, d'accélération et de pression. Ce sont ces essais qui dimensionnent les structures et permettent d'observer le délaminage sur les stratifiés et les sandwichs. Les explosions sont effectuées à : $K = 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9$.

- La tenue au choc localisé ; cet essai simule un accostage brutal. Cela consiste à laisser tomber une masse de 1150 Kg environ sur le bordé des tronçons couchés en faisant varier la hauteur de chute.

- Le comportement au feu interne ; le feu est déclenché par une inflammation d'un mélange gazole-essence à l'intérieur du tronçon. On procède à l'observation du phénomène de combustion (flamme, fumées,...), à l'analyse des gaz de combustion, et à une expertise minutieuse du tronçon après l'essai.

Ces essais empiriques permettent de valider des solutions. Mais des travaux ont lieu pour effectuer des simulations à partir de données sur des éprouvettes de moins grandes dimensions.

[1] F. TERRAIL - Caractérisation mécanique statique d'un matériau composite monolithique pour coque de bâtiment de surface. ATMA 1990.

[2] J.Y LE LAN, P. LIVORY, P. PARNEIX - Assemblage acier/composite. Application à la liaison de superstructures composites sur une coque métallique. 6ème Journée d'automne de l'INERN (sept 1991).

[3] J. GERALD, E. RAGOUT - A program for design of sandwich material connection in ship building. International Conference Montreal (July 1990)

| | Module d'élasticité E (MPa) | Coefficient de Poisson ν | Allongement à la rupture ε (%) | Module de cisaillement G (MPa) | Contrainte à la rupture σ (MPa) |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|--------------------------------|--|
| Traction direction Chaîne 0° | E_{11} | ν_{12} | ε_{12} | | σ_{11} |
| Traction direction trame 90° | E_{22} | ν_{21} | ε_{21} | | σ_{22} |
| Traction à 45° | E_{45° | ν_{45° | ε_{45° | | σ_{45° |
| Flexion 0° | E_{F1} | | | | σ_{F1} |
| Flexion 90° | E_{F2} | | | | σ_{F2} |
| Cisaillement guidé 2 rails | | | | G_{12} | T_{12} |
| Cisaillement guidé 3 rails | | | | G_{12} | T_{12} |
| Délaminage en flexion | | | | | T_{13} |
| Compression | E_c | | | | σ_c |

Tableau 1. Eléments pour la matrice de rigidité.

Les valeurs sont des moyennes obtenues pour 5 éprouvettes par essai ; 10 éprouvettes sont utilisées dans le cas des essais de délaminage.

Table 1. Elements of the stiffness matrix.

Values are means from 5 specimens per test, except for delamination tests for which 10 specimens are tested.

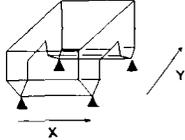
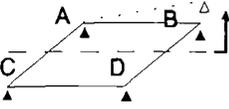
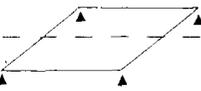
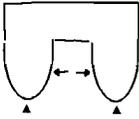
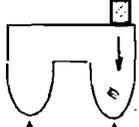
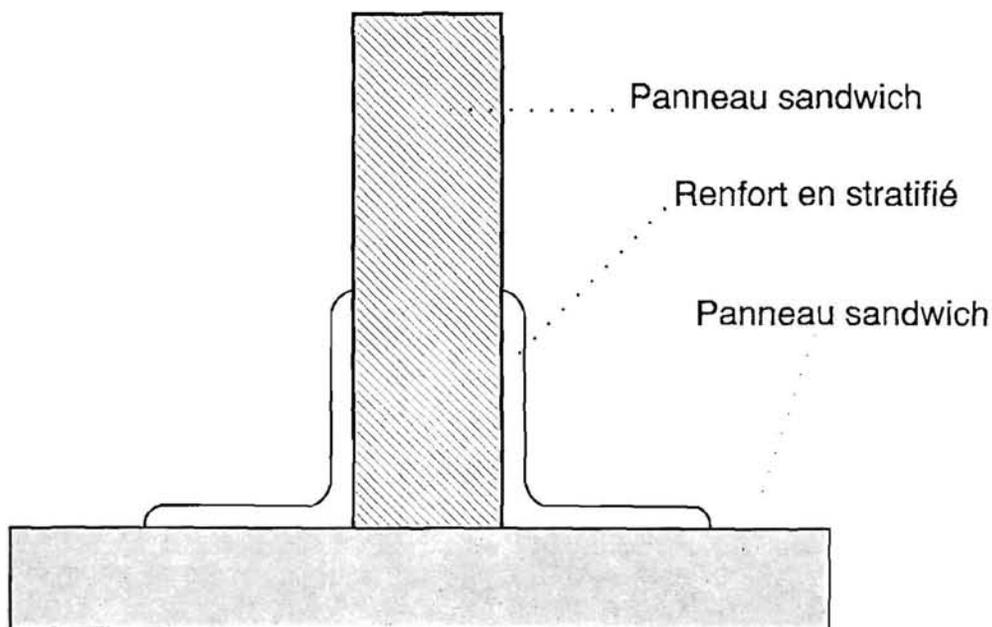
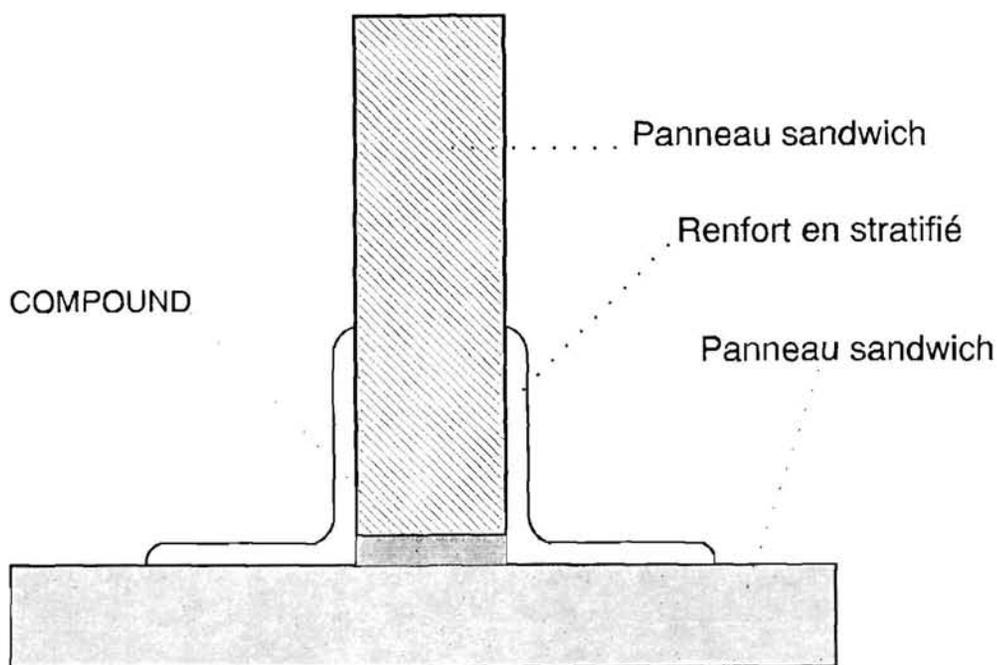
| | | | |
|-----------------|---|-------------------------------|---|
| CH ₀ |  | 4 points d'appuis horizontaux | Poids propre |
| CH ₁ |  | 4 points d'appuis | Relevement du point B Poids propre |
| CH ₃ |  | 4 points d'appuis horizontaux | Mise en dépression Dp = -50 mb |
| CH ₄ |  | 4 points d'appuis | Ecartement horizontal à l'aide d'un vérin |
| CH ₅ |  | 4 points d'appuis | Masse locale |

Tableau 2. Mesures de déformations sur tronçon.

Table 2. Strain measurements on the large-scale section.

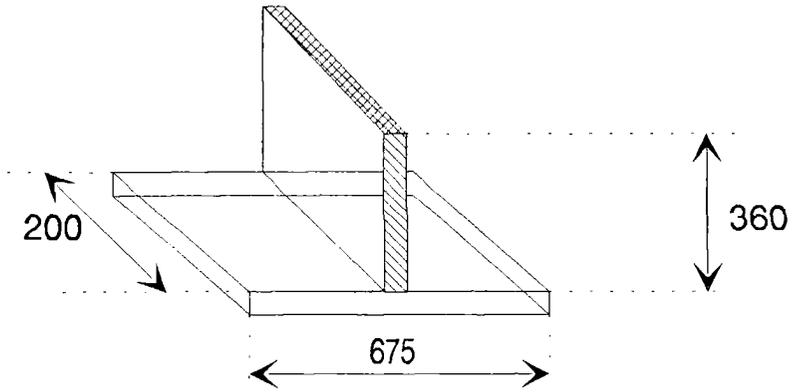


Assemblage en T Composite-Composite

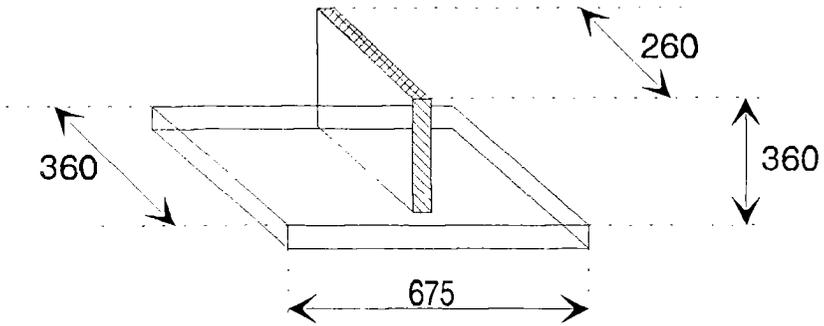


Assemblage Composite-Composite avec renfort d'appui en compound

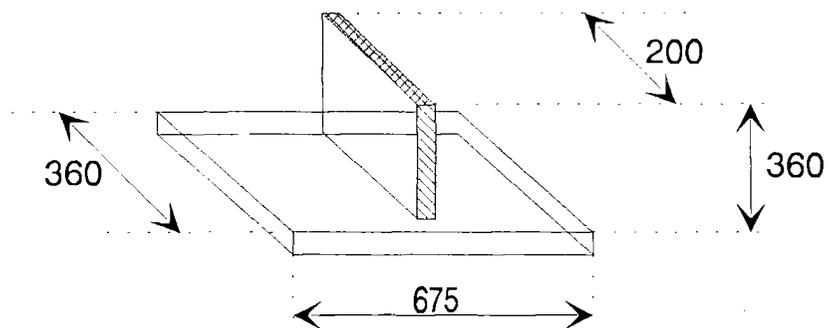
Figure 1. Deux assemblages en T
Two T-assemblies



Eprouvette pour essais de compression



Eprouvette pour essais de traction



Eprouvette pour essais de flexion

Figure 2. Types d'éprouvettes
Specimen types for compression, tension and bending (from top)

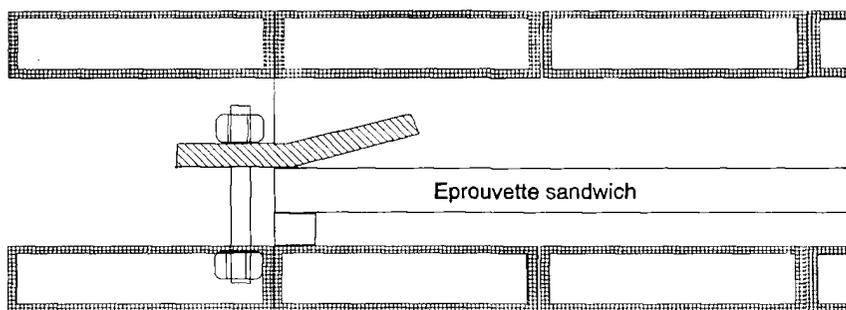


Figure 3. Coupe du dispositif d'essai
Section through test set-up.

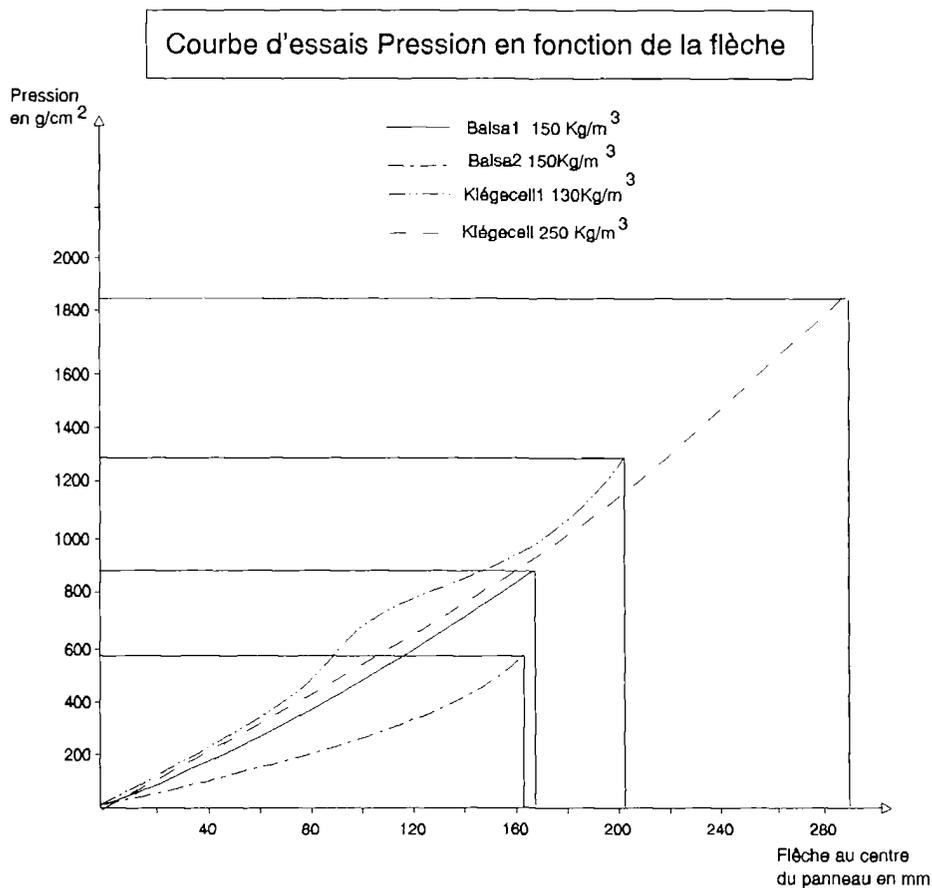


Figure 4. Courbes d'essais Pression en fonction de la flèche.
Test curves of pressure v central deflection.