

43

L'EVOLUTION DES MATERIAUX COMPOSITES DANS LA CONSTRUCTION DES SOUS-MARINS

Y. LEMIERE *

Résumé - Depuis les années 60, les sous-marins ont été équipés d'éléments de structure en matériaux composites. Modeste au début, la part de ceux-ci ne cesse de croître, chaque nouveau type de sous-marin faisant appel plus largement aux matériaux composites. Aujourd'hui, plus de la moitié des structures en contact avec l'eau de mer des sous-marins de type "Le Triomphant" est réalisée en matériaux composites. Les qualités essentielles qui ont motivé ce développement sont le faible poids apparent dans l'eau, le bon comportement en milieu marin, les hautes caractéristiques mécaniques spécifiques, les propriétés dynamiques et de transparence acoustique. Les exigences fonctionnelles plus sévères ont introduit l'usage du demi-produit préimprégné. Les techniques de transformation, capables d'assurer la polymérisation en température et en pression, ont été adaptées aux grandes dimensions et aux fortes épaisseurs de ces structures. Les nouvelles perspectives d'utilisation des composites sur sous-marins concernent les structures, mais aussi les équipements internes tels que réservoirs, tuyaux et cloisons. Enfin, un débat passionnant s'ouvre aujourd'hui: le successeur de l'acier à haute limite d'élasticité pour la réalisation de la coque résistante sera-t-il le titane ou le composite?

mots clés: matériau composite, sous-marin, structure

LES MATERIAUX COMPOSITES EN CONSTRUCTION NAVALE MILITAIRE

C'est en 1955 qu'est créé à Cherbourg un atelier destiné à la mise en oeuvre de ce qui s'appelait alors "le complexe verre-résine - CVR". Cette création répondait à la volonté de la DCN de mieux cerner les possibilités des matériaux composites à matrice organique, matériaux a priori fort séduisants pour les applications navales. L'accent était alors porté sur leur légèreté et leur bon comportement en milieu marin. Les premières réalisations concerneront des vedettes en CVR polyester. Actuellement cette activité se poursuit à DCN Lorient.

* Ingénieur spécialiste composites
Direction des Constructions Navales, (DCN) Cherbourg

En 1962, la création d'un laboratoire spécialement chargé d'étudier ces matériaux prometteurs va permettre de décider leur emploi en tant que matériau structural à part entière. Ce laboratoire est maintenant partie intégrante du Centre d'Essais Techniques et d'Évaluations de Cherbourg - CETEC. A l'issue d'une campagne d'essais, il est décidé, en 1974, de réaliser les ponts extérieurs des sous-marins classiques en composite. Bientôt des pièces plus chargées comme les safrans de sous-marins sont conçues et fabriquées. A la même époque, DCN Cherbourg construit deux tronçons de chasseurs de mines en CVR. Après un transfert de technologie, la construction en série des chasseurs de mines tripartites peut débuter à DCN Lorient, en Belgique et aux Pays-Bas.

La compétence acquise dans le domaine des mousses syntactiques, ces matériaux de flottabilité remarquables pour leur tenue en pression hydrostatique, permet à DCN Cherbourg de mener à bien la confection des flotteurs principaux et de la tuyère de propulsion du SM 97. Ce sous-marin expérimental capable de plonger à 6000 m est aujourd'hui connu sous le nom de "Nautille". Il fut conçu et réalisé par la DCN pour le compte de l'Ifremer.

Au début des années 80, l'emploi des matériaux composites se généralise doublement, par le nombre de structures concernées et par l'étendue des contraintes satisfaites (gain de masse, transparence acoustique, amagnétisme, comportement statique sous charge...). La planche 1 illustre ces applications.

Les années 1984 - 1985 vont apporter la révolution. Deux nouvelles générations de sous-marins arrivent avec des cahiers des charges qui nécessiteront un nouveau saut technologique. Le composite, mis en oeuvre par la technique dite "voie humide" est supplanté par un matériau plus performant, élaboré à partir de demi-produits préimprégnés 120 °C.

Afin que soient exploités au mieux les compétences, les moyens matériels et humains mis en place à la DCN, et les rôles respectifs des établissements sont affirmés. Le Service Technique à Paris établit les spécifications d'ensemble, réalise les calculs spécifiques (chocs, flambement...), valide certains choix techniques et coordonne l'ensemble des programmes. L'établissement de Lorient, fort de l'expérience acquise et des moyens implantés lors de la réalisation du programme de chasseurs de mines tripartites, est chargé de la fabrication de série des structures pour bâtiments de surface et sous-marins. L'établissement de Cherbourg qui possède sur un seul site:

- un bureau d'études équipé de puissants outils informatiques
- un centre d'essais doté de moyens parmi les plus modernes d'analyses physico-chimiques et de caractérisation mécano-acoustique

- un atelier prototype capable de fabriquer les maquettes et les pièces premières de série
se consacre à la conception, la qualification des nouvelles structures et la fabrication de pièces unitaires pour les sous-marins.

LES MATERIAUX COMPOSITES SUR SOUS-MARINS

La planche 2 montre, pour le sous-marin nucléaire lanceur d'engins de nouvelle génération "Le Triomphant", les diverses structures extérieures réalisées en matériaux composites: pont extérieur - dôme sonar - tuyère de propulsion - safrans - carénages. Cet ensemble représente 50 % de la surface "mouillée", c'est à dire en contact avec l'eau de mer. Il s'agit aujourd'hui de la plus brillante illustration de l'usage des composites sur sous-marins. En s'appuyant sur deux applications majeures: le pont extérieur et le dôme sonar, nous allons mettre en évidence les spécificités des matériaux composites sur sous-marins.

PONT EXTERIEUR

Le pont extérieur est constitué d'un ensemble de panneaux distincts assemblés entre eux qui sont destinés à 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. La surface totale est d'environ 1 200 m² (Photo 1).

Le cahier des charges est complexe. 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 doivent être satisfaites, telles qu'une très faible reprise d'eau et variation de volume sous pression hydrostatique de plusieurs dizaines de bars, un poids apparent dans l'eau aussi réduit que possible et un comportement dynamique spécifique.

Ces spécifications sont apparues incompatibles avec les performances du composite fibre de verre - résine polyester mis en oeuvre par voie humide jusqu'à lors utilisé. Il fut décidé d'évaluer l'intérêt et la faisabilité d'une structure à base de demi-produits préimprégnés 120 °C, comparables à ceux qui étaient employés dans le domaine aéronautique. Une campagne d'études et d'essais a été menée, dont les points marquants ont porté sur la prédiction du comportement modal d'une structure intégrant le couplage avec le fluide environnant, le vieillissement accéléré en eau de mer (8 000 h / 70 °C), la technique de mise en oeuvre optimale et la corrélation avec les tests en vraie grandeur sur sous-marin à la mer. La définition qui

s'imposa comme présentant le meilleur compromis coût-performances est une structure de type sandwich constituée de : deux peaux de matériau composite fibre de verre-résine époxy 120 °C mis en oeuvre par la méthode du sac à vide, d'une âme en mousse syntactique et de raidisseurs de type oméga. La polymérisation en température s'effectue dans une étuve de grande dimension.

DOMESONAR

Durant les dernières décennies, les performances des systèmes sonar passifs ont considérablement évolué parallèlement à l'amélioration de la discrétion acoustique des sous-marins. Le dôme qui carène les hydrophones de la sphère de détection fait partie intégrante du système sonar. Il doit présenter des caractéristiques spécifiques souvent antinomiques entre elles. Sa position à l'avant du sous-marin l'expose à tous les aléas de la navigation, il doit résister en particulier aux paquets de mer. Sa présence devant les hydrophones doit être aussi peu perturbatrice que possible, et présenter dans la mesure du possible une impédance acoustique proche de celle de l'eau de mer. D'autre part, l'écoulement hydrodynamique à la surface du dôme est une source potentielle d'excitation de la structure pouvant nuire à la qualité de l'écoute sonar.

Ces éléments constitutifs du cahier des charges ont conduit les études vers une structure de type coque - non raidie - possédant un amortissement intrinsèque. De même que pour le pont extérieur, le matériau composite utilisé est à base de demi-produits préimprégnés 120 °C.

Dans le programme de développement, comportant de "lourds" calculs numériques, une part importante fut consacrée à la mise au point du process de mise en oeuvre. En effet, la polymérisation en température d'une pièce de plusieurs mètres de diamètre et autant de hauteur n'était pas maîtrisée, hormis aux USA au moyen d'un autoclave. Le coût élevé et la rentabilité faible d'un tel investissement n'étant pas acceptables, même à l'échelon européen, la technique du sac à vide fut adoptée. L'épaisseur conséquente de la paroi du dôme qui résultait du nécessaire compromis transparence acoustique - tenue mécanique pouvait induire un taux de porosité rédhibitoire pour une fonction sonar. Avec le concours du fournisseur de préimprégné, la technique dite de "pompage intégré" fut imaginée. Elle consiste à intercaler dans les plis de préimprégnés des tissus destinés à favoriser l'extraction de l'air emprisonné lors du drapage. Pour ce qui concerne l'outillage, une solution originale a été spécialement développée. Elle consiste à utiliser le moule femelle destiné au drapage des plis de préimprégnés comme parois d'une étuve. Cette configuration est désignée "moule-étuve" (Photo 2).

L'ensemble de la conception et de la technique de fabrication a été validé par la réalisation de plusieurs dômes testés à la mer sur le sous-marin "Le Dauphin", transformé pour la circonstance en plateforme d'expérimentation.

SPECIFICITES DES MATERIAUX COMPOSITES SUR SOUS-MARINS

Les deux exemples d'application précités mettent en évidence l'évolution considérable introduite dans l'usage de matériaux composites structuraux sur sous-marins. Cet essor des composites a été rendu possible par l'accroissement des performances des matériaux de base, la puissance des moyens de calcul par éléments finis, la meilleure connaissance des propriétés intrinsèques des matériaux et leur comportement. Ces acquis sont, pour une part importante, le fruit des recherches entreprises pour satisfaire les hautes performances requises pour les applications aéronautiques et spatiales. Cependant, les structures destinées aux sous-marins présentent des spécificités comme les grandes dimensions, les fortes épaisseurs et l'environnement marin, qui rendent inopérantes nombre de données. Les développements importants menés à partir de 1984 ont permis de parfaire la connaissance et la maîtrise technique de ces matériaux pour les applications sous-marines.

Tant pour le pont extérieur que pour le dôme sonar, le premier ensemble fabriqué est en cours de montage sur "Le Triomphant", tandis que débute la fabrication destinée au deuxième bâtiment de la série, "Le Téméraire".

PERSPECTIVES

Nous remarquons que les applications composites sur sous-marins concernent essentiellement les structures extérieures, c'est à dire en contact avec le milieu environnant. Les raisons pour lesquelles le composite a été préféré à une solution métallique sont, selon le cas : une meilleure tenue à la corrosion, un gain de poids apparent (maîtrise du devis de poids et des paramètres de stabilité) ou une qualité spécifique (transparence acoustique). Certaines réticences font obstacle à l'avènement d'applications composites; les sous-marins n'échappent pas à cet état de fait. Cependant, de considérables potentialités d'application des matériaux composites existent à bord des sous-marins modernes.

La planche 3 figure les domaines concernés : charpente AV et AR - ligne d'arbre - hélice - berceaux/chassis/carlingages - réservoirs d'air

HP/caisses - tuyauteries/vannes - parquets/cloisons et... la coque résistante.

DES COMPOSITES, POUR QUOI FAIRE ?

Il ne serait pas réaliste d'orienter des axes de développement technique sans jamais intégrer dans l'analyse les aspects coûts. La notion de coût recouvre plusieurs acceptions : le coût d'acquisition, le coût d'entretien (sur une période qui peut atteindre 30 ans) et le coût de possession qui est globalement la somme des deux précédents. Compte tenu des faibles séries qui caractérisent la construction navale militaire et l'importance des outillages nécessaires à la mise en oeuvre des composites, la compétitivité financière de ces matériaux en phase d'acquisition n'est pas systématique. La prise en compte des frais réduits d'entretien de la solution composite permet de rétablir une parité en ce domaine. Les exemples présentés se déclinent en terme de rapport coût-performance.

DU REVE A LA REALITE

Il peut paraître futuriste de penser qu'un sous-marin opérationnel puisse un jour être entièrement réalisé en matériaux composites. Avant d'atteindre cette échéance, examinons objectivement les éléments d'appréciation.

Le gain de poids est une recherche constante à bord de tout véhicule. Sans préjuger des options militaires, un gain de poids structural peut être mis à profit pour accroître la profondeur d'immersion ou, en vertu du principe d'Archimède, augmenter la charge utile en conservant une profondeur d'immersion identique. D'autre part, la discrétion acoustique, c'est à dire la capacité à se fondre dans le bruit ambiant de la mer, est un objectif qui préside à la plupart des choix techniques. Cela implique la capacité à exploiter industriellement certaines propriétés.

Les matériaux composites, par leurs caractéristiques mécaniques spécifiques (rapportées à la masse volumique), la variété des combinaisons et la possibilité d'accroître leurs propriétés d'amortissement apportent des éléments de réponse au cahier des charges du sous-marin du XXI^e siècle.

LA MATIERE GRISE : MATIERE PREMIERE DES MATERIAUX COMPOSITES

Ce serait faire preuve de sectarisme que de n'envisager l'avenir qu'au travers d'une seule technologie. Il est plausible que la solution optimale soit l'intersection des ensembles de qualités de plusieurs

domaines. Le successeur de l'acier de coque à haute limite d'élasticité "100 HLES" actuellement utilisé en France, est potentiellement le titane. Cependant, il semble que les difficultés d'élaboration et de transformation du titane hypothèquent son emploi à grande échelle. Par contre, l'exploitation des propriétés du titane et des composites avancés au sein d'un même projet laisse augurer des performances intéressantes.

Quel matériau nouveau issu de son intelligence permettra à l'homme de maintenir sa maîtrise et poursuivre son exploration des immensités abyssales ?

COMPOSITE MATERIALS FOR SUBMARINE APPLICATIONS. P. NEDELEC. 1990. Undersea Defence Technology.
DESIGN OF MARINE STRUCTURES IN COMPOSITE MATERIALS. C.S. SMITH p 362.
SUBMARINE TECHNOLOGY FOR THE 21st CENTURY. Stan ZIMMERMAN. p 89.

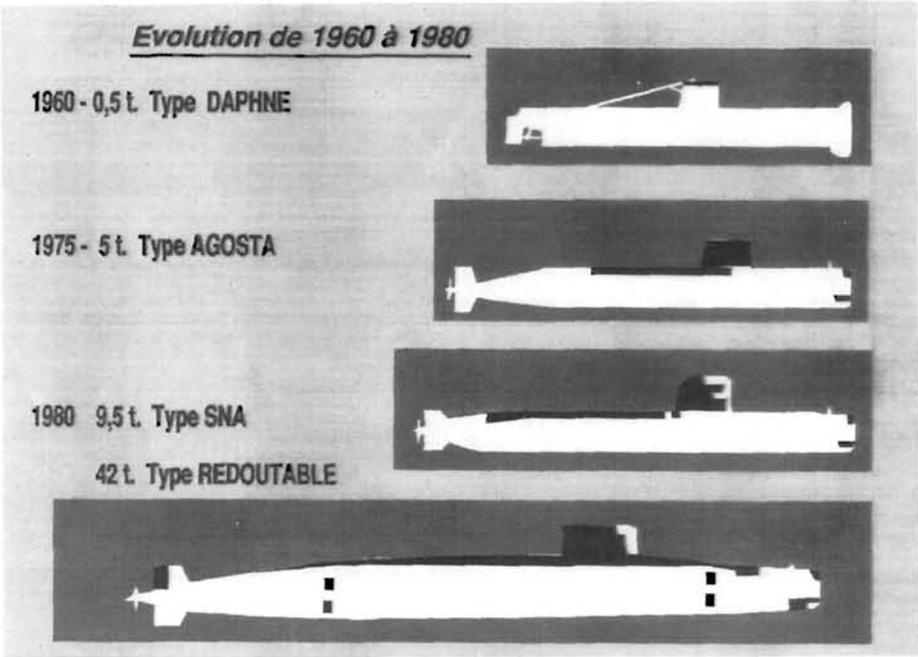


Planche 1
 Évolution des applications composites.
Evolution of the mass and location of the composite structures.

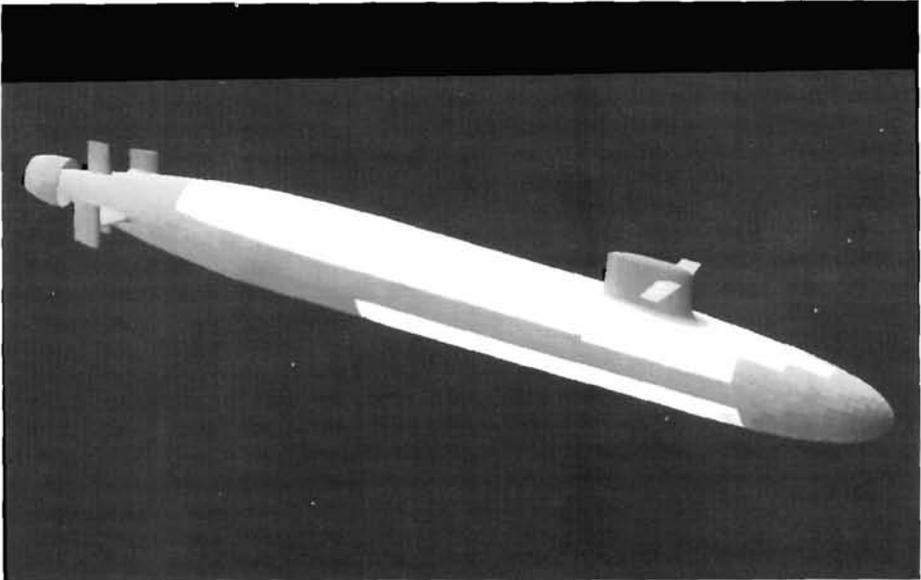


Planche 2
 SNLE Le Triomphant - Structures composites.
 SSBN Le Triomphant - Composite structures.

PERSPECTIVES D'APPLICATIONS DES COMPOSITES SUR SOUS-MARINS
COMPOSITE APPLICATIONS FOR FUTURE SUBMARINES

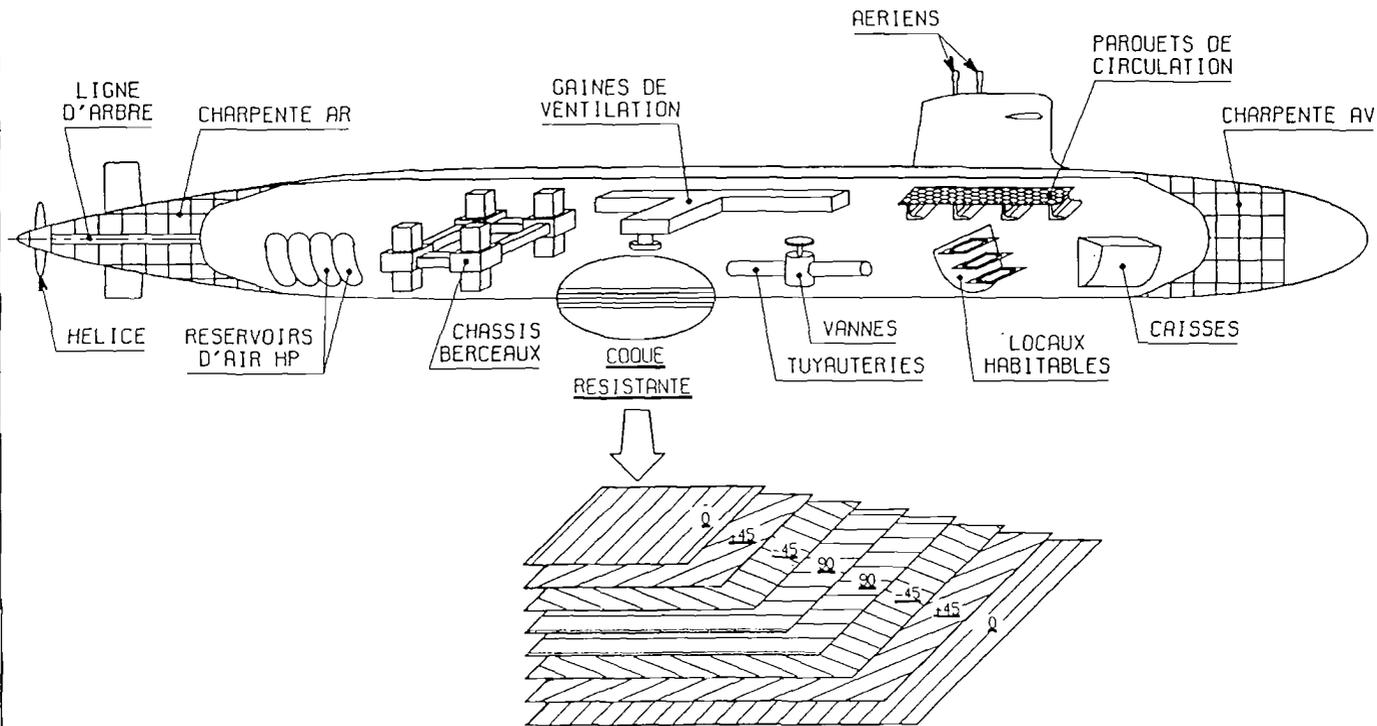




Photo 1. Pont extérieur - Moule et étuve.
Casing - Mould and stove.



Photo 2. Dome sonar - Moule.
Sonar bow dome - Mould.