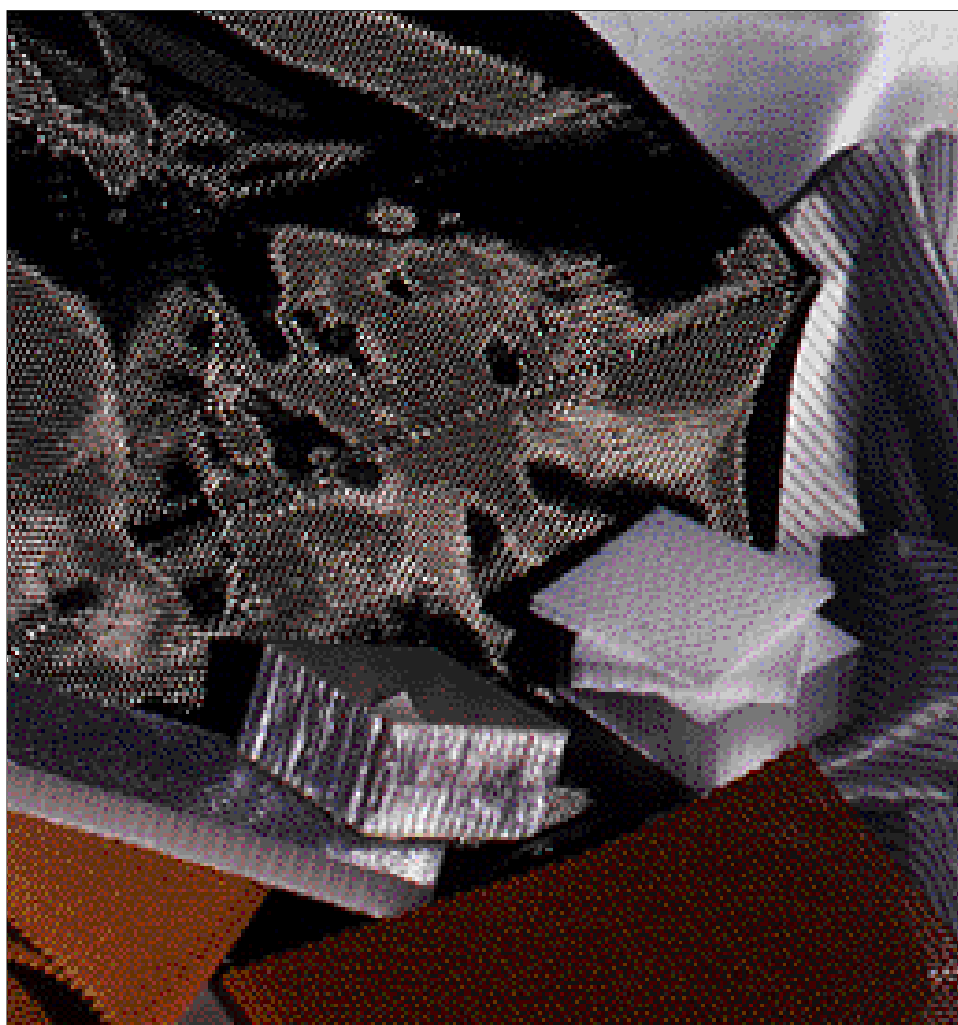


LES MATÉRIAUX COMPOSITES

La différence fondamentale, entre le plastique renforcé de fibres (PRF) et les autres matériaux de construction, est que le PRF n'est pas disponible en éléments prêts à l'emploi, tels que les plateaux de bois ou les tôles et profilés d'aluminium ou d'acier. Il est fabriqué dans le chantier à partir de composants divers qui ont des propriétés physiques, chimiques et mécaniques extrêmement variables et les méthodes de fabrication sont nombreuses. Le choix des matériaux, les conditions de mise en œuvre et les contrôles de qualité doivent respecter des règles précises afin obtenir un stratifié performant.



Il existe deux principales méthodes de fabrication. La première est utilisée pour la réalisation de coques, de ponts ou de pièces diverses à partir de moules femelles. Elle est utilisée par tous les chantiers de production de bateaux de plaisance en série. La deuxième permet de construire des navires à l'unité ou en quelques exemplaires sans avoir à investir dans la fabrication de moules difficiles à amortir sur seulement quelques pièces. Une description succincte de ces deux procédés de fabrication permettra de découvrir et de comparer les **fibres, renforts, résines et matériaux d'âme** utilisés pour le moulage des pièces construites en PRF ou en **composites**.

Dossier construction...

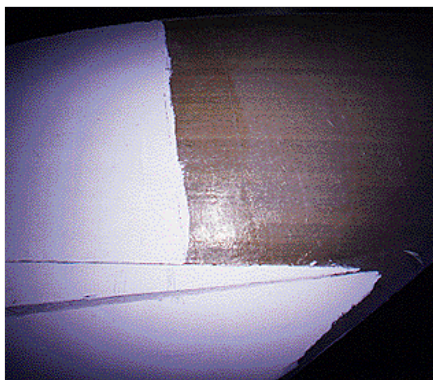
● Pour la construction en série, les moules utilisés sont du type femelle construits et renforcés pour résister aux opérations de moulage et de démoulage de plusieurs dizaines voir de centaines de pièces. Ces moules sont conçus pour supporter les élévations de températures que génèrent la **poly-mérisation** des résines. La fabrication d'une pièce en PRF commence par l'application d'un **gelcoat** au moyen d'un pistolet conçu pour limiter l'inclusion de microbulles d'air. Elle doit être réalisée par des opérateurs expérimentés, son épaisseur devant être aussi uniforme que possible (environ 0,4 à 0,5 mm). Le gelcoat assure la protection du stratifié contre les agressions extérieures et l'**hydrolyse**. Son choix et la qualité de son application ont donc un rôle prépondérant sur la résistance du stratifié au phénomène d'**osmose**. Les gelcoats les plus résistants sont fabriqués à partir d'une résine **polyester** du type **isophtalique** ou mieux encore du type **iso NPG**. Les résines du type **orthophtalique** sont à déconseiller pour le gelcoat et l'imprégnation des deux premiers plis du stratifié. Le premier renfort appliqué sur le gelcoat est un **voile** ou un **mat**, de **verre E** ou mieux encore de **verre C**, de faible grammage (généralement 225 g/m²) avec un **ensimage** à poudre. Les caractéristiques de ce renfort jouent un rôle important dans la barrière de protection du stratifié. Il est ensuite imprégné de résine isophta-

lique ou parfois **vinylester**. Son **rapport verre/résine** doit être faible (environ 1:3) pour assurer une bonne imprégnation des fibres et limiter les vides ou les zones de manque. Il doit être soigneusement **ébullé** afin d'éliminer les vides tout en évitant les micro perforations du gelcoat par les fibres. Ces perforations sont autant de "portes d'entrée" pour l'eau de mer qui viendra remplir les vides, créant ainsi la première étape du phénomène d'osmose. Un deuxième, voir un troisième mat de verre (généralement de 300 et/ou 450g/m²) est ensuite appliqué et imprégné de la même résine. Il est à noter que certains chantiers utilisent la méthode du **projeté** pour déposer une ou des couches de fibres de verre coupées. Cette méthode est plus rapide au niveau de la production, mais elle n'offre pas les mêmes garanties d'homogénéité ou de résistance que le stratifié.

A partir de ce stade, le choix des techniques et des renforts est vaste. Pour la construction des coques, le chantier peut s'orienter vers une **simple peau** ou un **sandwich**, technique également utilisée pour la quasi totalité des ponts. Le chantier peut également opter pour un moulage **au contact**, **sous vide** voir **par injection** ou **infusion** de résine. Ce choix va influencer la sélection des composants utilisés. A l'origine du PRF, les renforts utilisés étaient des fibres coupées et projetées, des mats ou des tissus



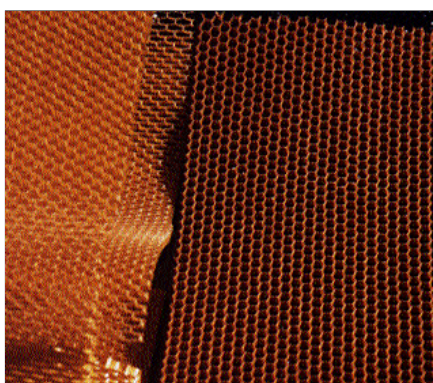
...les matériaux composites



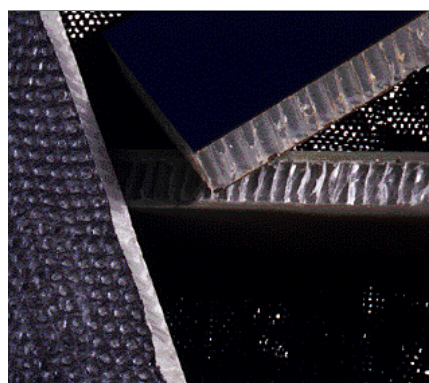
Sur les moules femelles, le gelcoat est appliqué en dernier.



L'utilisation de matériaux composites permet d'intégrer les réservoirs.



Le nid d'abeille permet de suivre les courbes les plus serrées.



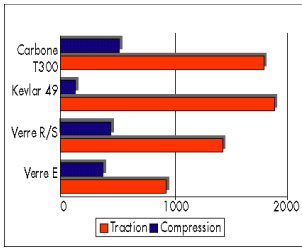
Le Tubulam est une âme alvéolaire à structure tubulaire. Son champs d'application est énorme.

de verre E. Puis sont apparues les fibres à hautes performances, les **verres R et S**, les **aramides**, les **carbones** aux propriétés mais également aux coûts plus élevés (voir graphique 1). Ces fibres sont tissées, cousues ou fixées entre elles par une résine de liaison et se présentent sous la forme de **complexes mat/tissu**, de **nappes unidirectionnelles** et de tissus **multiaxiaux** de différents **grammages**. Les constructeurs disposent d'une large gamme de renforts et de plusieurs systèmes de résine. Les trois principaux types utilisés en construction de yachts sont les polyesters, les vinylesters et les **epoxydes**, ces dernières étant surtout utilisées pour les constructions à l'unité. Les résines tout comme les fibres ont des allongements à la rupture différents, ils varient entre 1,4 et 5,5 % (voir graphique 3), il est important que les allongements des différents composants soient compatibles afin d'optimiser les performances du composites.

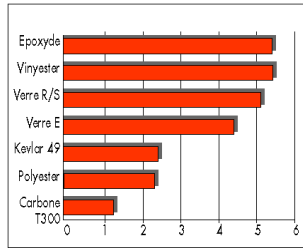
Si la structure est du type sandwich, la sélection de l'âme est importante car elle doit résister aux efforts de cisaillement et de compression. Le **balsa bois de**

bout est utilisé depuis de nombreuses années par la grande majorité des constructeurs de bateaux de série. Il possède des propriétés mécaniques élevées. Les **mousses de PVC** et les **nids d'abeille** sont utilisés pour des applications où le gain de poids est un élément critique, leurs propriétés mécaniques varient largement en fonction de leur densité (voir graphiques 4 et 5). Les nids d'abeille sont fabriqués en **Nomex**, et en aluminium, leur mise en œuvre et leur collage demandent un soin et un contrôle importants sous peine de délamination à l'usage. Ils sont réservés à la fabrication de prototypes à hautes performances où le gain de poids permet de justifier un surcoût conséquent.

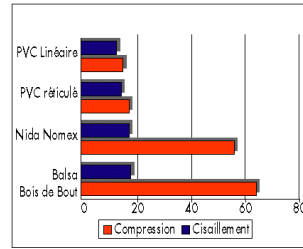
Pour en terminer avec la fabrication en série, il convient de passer en revue les principales techniques de fabrication. La première et la plus employée de toutes est le moulage au contact. Les renforts sont mis en place à la main et la résine est projetée au pistolet, l'imprégnation à la brosse étant réservée aux petites pièces. Les stratificateurs procèdent ensuite à l'ébullage avec des rouleaux spécialement



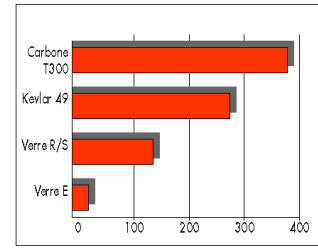
1 - Résistances spécifiques des fibres.



2 - Allongement avant la rupture (%).



3 - Propriétés mécaniques spécifiques des âmes.



4 - Prix approximatifs des renforts.

conçus. La qualité et l'homogénéité des stratifiés ainsi réalisés dépendent largement du tour de main et de l'expérience des applicateurs.

La deuxième technique est le moulage sous vide dont il existe plusieurs variantes. Certains chantiers américains utilisent une technique qui consiste à faire le vide entre le moule et une membrane souple puis à injecter ou infuser la résine dans les renforts déjà posés dans le moule. Cette méthode permet d'assurer une imprégnation et un compactage homogènes du stratifié et d'obtenir le rapport résine/verre spécifié par les concepteurs, elle est connue sous le nom de **VARTM** ou de **SCRIMP**.

● La construction à l'unité de yachts à moteur de toutes tailles, utilise les mêmes matériaux et techniques de fabrication, la différence principale se situant au niveau du moule. Afin de diminuer le coût de l'outillage, les coques sont généralement construites sur des **mannequins** ou moules mâles fabriqués en lattes de bois ou en contre-plaqué suivant la complexité des formes à réaliser. Les coques les plus performantes sont construites en sandwich avec des âmes, des renforts et des fibres à hautes

Le travail de finition ne peut se faire qu'à la main et avec les meilleurs ouvriers.



Le fond de coque est réalisé avec un moule mâle alors que les murailles sont montées sur mannequins femelles.



Le cloisonnement par sandwich avec âme mousse favorise l'isolation thermique et phonique.

performances. Certains chantiers utilisent des **pré imprégnés thermodurcissables** moulés sous vide avec une **post cuisson** pour en améliorer les performances. Ces méthodes de construction demandent un savoir-faire et des infrastructures coûteux et sont réservés à quelques chantiers peu nombreux et spécialisés.

En théorie, le développement des matériaux, des méthodes de dimensionnement et la puissance des moyens de calcul devraient permettre d'optimiser le choix et l'orientation des fibres, le type de résine et la nature des âmes en fonction des efforts réels. En réalité, les efforts auxquels sont soumis les yachts

sont mal connus et les propriétés mécaniques théoriques utilisées pour les calculs sont trop souvent surestimées car obtenues à partir d'essais en laboratoire ou dans l'environnement contrôlé de l'industrie aéronautique. Les propriétés des matériaux composites fabriqués dans l'industrie nautique sont souvent largement inférieures à celles publiées. Ces différences sont sans doute à l'origine de ruptures qui demeurent parfois sans explications réelle. Mais ce débat dépasse largement le cadre de cet article.

Texte : Eric A. Ogden
Photos : Renaud Jourdon

GLOSSAIRE...

Aramide : fibre de couleur jaune paille, mise au point par Du Pont de Nemours et plus connu sous l'appellation de Kevlar.

Balsa bois de bout : bois léger, la densité utilisée pour la fabrication des panneaux d'âme varie entre 100 et 150 k/m³.

Carbone : fibres noires et brillantes obtenues par oxydation et chauffage de filaments acryliques.

Complexes mat/tissu : tissu et mat cousus ou liés ensemble.

Composite : matériau composé de renforts fibreux noyés dans une matrice (la résine) qui transmet les sollicitations aux fibres.

Ebuller : opération manuelle qui consiste à compacter le stratifié à l'aide d'un rouleau. Cette opération est destinée à diminuer le taux de bulles.

Ensimage : apprêt d'un tissu pour assurer notamment un bon accrochage de la résine.

Epoxyde : résine obtenue par réaction d'un polyalcool sur un glycol. Elle a de bonnes propriétés mécaniques et d'adhérence, une excellente résistance à la corrosion chimique et un faible retrait.

Gelcoat : fabriqué à partir d'un mélange de résine, de pigments de coloration et d'autres additifs, il donne à la pièce son aspect de surface.

Grammage : masse surfacique d'un renfort exprimé en g/m².

Hydrolise : Attaque chimique par l'eau des composants du stratifié, les produits de ces réactions sont des liquides (glycol, acide acétique, etc.).

Injection ou infusion : procédé de moulage par application du vide et injection de la résine entre un film transparent et le moule sur lequel sont appliqués les renforts.

Isophthalique : résine polyester fabriquée à base d'acide isophthalique. Cette résine a une meilleure résistance à l'hydrolyse.

Iso NPG : résine polyester fabriquée à base de glycol isophthalique-néopentyle. Cette résine a la meilleure résistance à l'hydrolyse.

Mat : renfort constitué de fibres coupées et liées entre elles.

Moulage au contact : moulage par application, imprégnation et ébullage manuels des renforts et de la résine.

Moulage sous vide : procédé de moulage par application du vide entre un film transparent et le moule sur lequel sont appliqués les renforts imprégnés.

Mousse de PVC : mousse plastique à cellules fermées fabriquée à base de PVC, ils existent plusieurs types et densités selon les efforts.

Nid d'abeille : matériau d'âme dont les mailles hexagonales rappellent les alvéoles des nids d'abeille.

Nomex : papier aramide développé par Du Pont de Nemours

servant à la fabrication de différents types d'âmes ou de renforts.

Orthophtalique : résine polyester fabriquée à base d'acide orthophtalique. C'est la plus couramment utilisée, elle possède une mauvaise résistance à l'hydrolyse.

Osmose : phénomène de dégradation des stratifiés à l'origine du cloquage osmotique.

Polyester : résine obtenue par la réaction de diacides et de glycols. La polymérisation est assurée par monomère non saturé. C'est la résine la plus utilisée.

Polymérisation : durcissement de la résine déclenché par le système catalytique et/ou par une élévation de la température.

Pré imprégné : renfort constitué de l'association d'une armature textile et d'un système complet de résine dont le durcissement est déclenché par un apport de chaleur.

Projeté : les fibres de verre sont coupées et projetées automatiquement avec la résine par un pistolet. Technique valable pour les petites pièces sans contraintes excessives.

Rapport verre/résine : ce rapport définit la proportion de fibres et de résine contenu dans un stratifié, il peut être exprimé en poids ou en volume.

Sandwich : assemblage par collage de deux peaux sur une âme plus légère. Il permet d'accroître la rigidité d'un panneau sans augmentation importante du poids.

SCRIMP : Seaman Composites Resin Infusion Molding Process, procédé de moulage de composites par infusion développé par l'américain Bill Seaman.

Simple peau : également appelé monolithique, stratifié composé uniquement de renforts fibreux, sans matériau d'âme.

Tissu multiaxial : renfort dont les nappes de fibres sont orientées dans deux, trois ou quatre directions préétablies.

Unidirectionnel : renfort dont les fibres sont orientées en quasi totalité dans une seule direction.

VARTM : Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, moulage par transfert de résine sous vide.

Verre E : verre le plus couramment utilisé pour la fabrication des fibres utilisées pour la fabrication des renforts courants. Il a de bonnes propriétés diélectriques (E pour électrique).

Verre C : il a une bonne résistance aux acides et est utilisé dans l'industrie chimique (C pour chimique).

Verre R : verre aux propriétés supérieures à celles du verre E.

Verre S : version américaine du verre R, possède sensiblement les mêmes propriétés.

Vinylester : résine obtenue par la réaction d'une résine époxyde et d'un acide organique insaturé. Ce type de résine offre de bonnes propriétés mécaniques et une excellente résistance à la corrosion chimique.

