

## CHAPITRE 6 : LES BATEAUX NEUFS

Nous avons fait le point de l'osmose des bateaux de 5 ans ou plus, c'est-à-dire, pratiquement de tous ceux qui font partie du marché de l'occasion.

Le but de ce chapitre important est de répondre à la question que se pose tout acheteur ou tout propriétaire, acheteur en puissance : si j'achète un bateau, est-ce que l'osmose telle qu'elle a été décrite est inéluctable, ou y a-t-il eu des progrès réalisés par les constructeurs ?

COMMENT PREVENIR L'OSMOSE SUR UN BATEAU NEUF ?

### 1°) TRAITEMENT PREVENTIF :

L'osmose est un phénomène bien connu pour lequel les premières études remontent à 1970 environ. Mais cela était limité à quelques initiés ou chercheurs et plutôt orienté à l'époque vers les pièces moulées (tuyauteries, réservoirs) pour l'industrie chimique où le facteur température est beaucoup plus important, et où donc l'osmose était déjà bien connue.

Pour les bateaux de plaisance, l'osmose a fait son apparition dans la profession en France autour des années 1985, où le cloquage a fait quelques ravages bien connus maintenant du public. A cette époque, les constructeurs se sont trouvés bien démunis face à ce problème qu'ils découvraient. Pour y parer tout de suite, en attendant de trouver mieux, certains chantiers ont décidé à cette époque d'appliquer un traitement préventif à l'époxy ressemblant comme un petit frère au traitement curatif que nous avons longuement décrit.

Le principe est simple, on va appliquer, à la construction, un "bouclier" imperméable. Ce bouclier imperméable est réalisé par une application de résine époxy, et non plus polyester comme le gelcoat traditionnel. Ce peut être une résine époxy fournie par INTERNATIONAL sous la marque GELSHIELD que nous connaissons bien maintenant pour l'avoir décrit précédemment.

Cette résine s'applique au rouleau en deux ou trois couches sur une carène préalablement dégraissée et débarrassée des agents de démoulage (cire) qui ont évité que la coque ne colle dans le moule, et un ponçage.

Ne pas croire que cette opération est facile. Il ne faut pas en fait étaler et transporter la cire d'un point à un autre, il faut l'enlever en chiffonnant avec, soit de l'alcool éthylique dénaturé à 95°, soit avec un produit approprié (SUPER CLEANER d'International par exemple) et surtout changer fréquemment pour prendre un chiffon neuf. L'emploi de solvants forts, acétone, trichloréthylène, acétate est proscrit.

L'application devra se faire avec de bonnes conditions de température (Température supérieure à 14°C), d'hygrométrie et en respectant les temps de sur-couchage : temps mini et maxi pour avoir un bon durcissement de chaque couche et une bonne adhésion entre les couches.

La différence de température entre l'air ambiant et la coque est très importante (revoir chapitre 2 paragraphe 3-1 page 24). Le traitement qui se fait à 8 H dans un atelier juste réchauffé mais sur une coque encore froide est mauvais.

Il ne faut pas faire le traitement trop tôt sur une coque dont le polyester n'a pas mûri (polymérisation incomplète). Il faut un délai de l'ordre de 2 mois après démoulage avant d'effectuer le traitement préventif.

Quand le traitement préventif au GELSHIELD est réussi, la pénétration de l'eau est suffisamment retardée (mais non évitée totalement) pour que la manifestation de l'osmose soit repoussée de plusieurs années.

Cela a permis à ces chantiers de donner alors une garantie contractuelle de trois, voire cinq ans.

Ce type de traitement préventif est encore en vigueur.

Le traitement préventif précédent, même s'il est efficace, s'inscrit mal dans une fabrication de série où les retours en arrière et les reprises sont toujours plus coûteux que les opérations qui s'enclenchent harmonieusement dans un processus de fabrication continu. Les chantiers se sont donc orientés vers une action qui modifie tel ou tel élément qui constitue déjà le stratifié lui-même.

\*\*\*\*\*

### 2°) LES PRINCIPAUX ELEMENTS D'UN STRATIFIE

Rappelons qu'une coque est moulée en déposant sur un moule en creux plusieurs couches de tissus de verre imprégnés de résine liquide. Cette résine va se solidifier et on obtient alors une peau résistante.

\*\*\*\*\*

Ici, nous allons devoir rentrer un peu plus dans le coeur de la matière, mais en essayant de rester simple et compréhensible. Pour cela, il nous faut d'abord rappeler quelques principes, notions ou termes qui seront utilisés par la suite.

#### 2-1°) LA RESINE POLYESTER

Dans le cas le plus courant, la résine polyester est le résultat d'une réaction chimique de polycondensation entre un polyacide et un polyalcool.



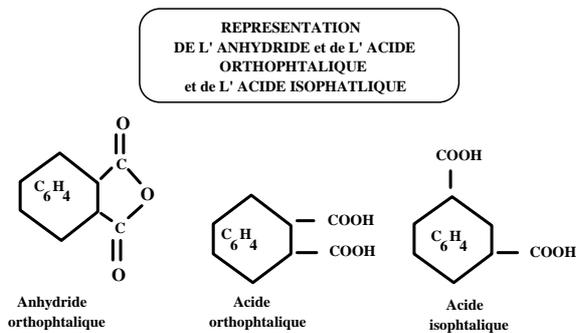
Le polyester obtenu est ensuite dissous dans un solvant pour obtenir la résine liquide prête à l'emploi :

(2)  
Polyester issu de (1) + solvant (styrène) = "résine polyester liquide prête à l'emploi"

Nota : dans la réaction (1) il faut que l'eau soit correctement éliminée. Selon les fabricants il en reste moins de 0,1%. Curieusement personne ne se soucie trop de ce problème, aucun rapport d'essai n'en parle.

Le polyacide de (1) peut être l'un ou plutôt la combinaison de :

- anhydride maléique : combiné aux suivants.
- anhydride phtalique ou orthophtalique : c'est le cas le plus fréquent.
- acide isophtalique : résines dures et ayant une meilleure résistance chimique.
- etc .....



Le polyalcool de (1) peut être :

- le propylène glycol : c'est le cas le plus fréquent.
- le diéthylène glycol : que l'on mélange quelquefois au propylène glycol pour augmenter la résistance à la compression.
- l'éthylène glycol.
- Le néopentyl glycol : qui donne une meilleure résistance chimique.
- le bisphénol.

Le solvant de (2) peut être :

- le styrène : c'est le cas le plus fréquent.
- le méthacrylate de méthyle : pour améliorer le comportement au vieillissement.
- le phtalate de diallyle : pour améliorer le comportement de la résine au stockage, la polymérisation n'aura lieu qu'à chaud.

Juste avant l'emploi, on ajoute le catalyseur (un accélérateur a déjà été ajouté avant par le fabricant pour démarrer le phénomène à la température ambiante) qui déclenche le processus de réticulation : c'est la polymérisation, la résine liquide se transforme en solide. Dans cette phase de durcissement, le styrène a une importance capitale, car c'est lui qui va être à l'origine de la réticulation, c'est lui qui va faire les "ponts" chimiques avec les polyesters et donner finalement ce réseau tridimensionnel qu'est la résine durcie.

Voilà, je n'ai écrit aucune formulation chimique, je ne vous parle pas de doubles liaisons, radicaux libres, etc .....

\*\*\*\*\*

Ce qui nous intéresse dans ce qui a été décrit précédemment, c'est que cela donne deux grandes familles de résines utilisées par les constructeurs :

- les résines dites "**ORTHO**" où l'acide aromatique est un orthophtalique. C'est le cas des résines couramment utilisées pour la construction des coques, jusqu'à aujourd'hui puisqu'un changement s'amorce actuellement.

- les résines dites "**ISO**" où l'acide aromatique est de type isophtalique.

Si en plus l'alcool est un néopentyl glycol, la résine sera une ISO-NPG utilisée surtout pour les gelcoats, nous le reverrons plus loin.

Certaines résines sont quelquefois des mélanges mi-ISO/mi-ORTHO par exemple. Oublions les pour l'instant.

Une troisième et quatrième familles sont à signaler car elles commencent à être utilisées, c'est la résine polyester bisphénol où le polyalcool est le bisphénol et les résines

vinylester qui sont un intermédiaire entre l'époxy et la polyester.

Nous en reparlerons plus loin.

## 2-2°) LE GELCOAT

C'est la couche extérieure de la coque qui a plusieurs fonctions :

- constituer une barrière étanche, même si c'est imparfait, et résistante à l'abrasion.
- donner l'aspect décoratif (le poli et le brillant) et colorer la coque.

C'est donc une résine polyester qui reçoit une addition de "charges" qui vont lui donner ces qualités particulières requises :

- pigments de coloration.
- un agent thixotrope, gel de silice par exemple, pour que le gelcoat ne coule pas facilement en parois verticales (c'est la thixotropie).
- l'accélérateur, comme pour toute résine qui sera utilisée à froid.
- des charges particulières - exemple : oxyde de titane pour obtenir un gelcoat blanc et opaque, ou d'autres pour améliorer la résistance à l'abrasion, diminuer le retrait ou encore charges anti-statiques ou anti-feu ....

## 2-3°) LE RENFORT : LA FIBRE DE VERRE

La fibre de verre commence par la production de filaments unitaires très minces (3 à 15 microns - c'est-à-dire millièmes de mm). Comme ces filaments unitaires ne peuvent être utilisés seuls, mais qu'ils doivent être assemblés, ils reçoivent à ce stade un ensimage pour les "coller" ensemble.

### L'ensimage

C'est un apprêt qui recouvre le filament unitaire qui sort de la filière.

Il permet le collage de ces brins unitaires entre eux. En outre, il lubrifie le brin de verre, ce qui facilite son tissage ultérieur et il contient aussi un agent de pontage (on dit aussi agent de couplage) qui permet l'adhérence de la résine polyester sur la surface lisse et inerte chimiquement de la fibre. Ce dernier point est important vis à vis de la dégradation du stratifié.

L'ensimage est à base de PVA (acétate de polyvinyle - 1% environ) et l'agent de couplage qu'il contient peut être :

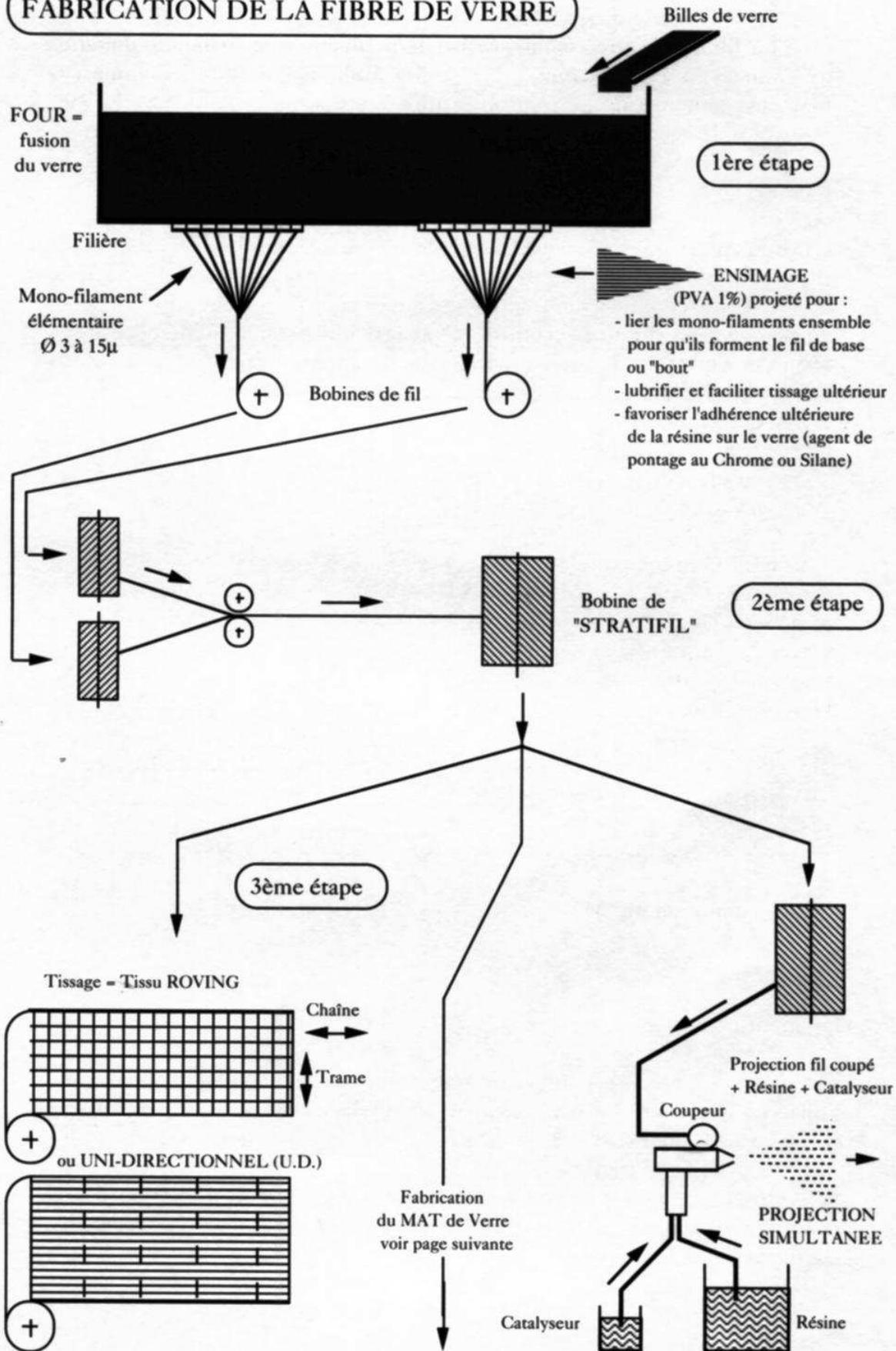
- un agent de pontage au chrome.
- un agent de pontage silane.

Ces filaments unitaires ensimés sont "accrochés" ensemble pour constituer des mèches qui sont en fait un fil constitué de plusieurs filaments unitaires (200 à 800). Plusieurs fils assemblés constituent le stratifié ou le roving. Il se présente sous forme de bobine comme une bobine de fil de machine à coudre.

On a alors le produit de base qui va être utilisé de 3 façons :

- tissé pour donner le tissu de roving ou par simplification du langage commun, le "ROVING"
- projection simultanée
- fabrication du "MAT"

# FABRICATION DE LA FIBRE DE VERRE



### Le stratifil ou roving

C'est le fil sur sa bobine, tel que défini précédemment. Il peut être utilisé tel quel pour des renforcements locaux, par exemple, dans les angles du tableau AR pour renforcer cet angle.

On pourra aussi l'utiliser en projection simultanée. Là, le stratifil est coupé en morceaux par le pistolet hacheur et projeté avec la résine de stratification et le catalyseur.

Mais on l'utilise surtout sous les deux formes suivantes :

### les tissus de roving

Souvent appelés par simplification les "Rovings".

Le stratifil précédent est tissé par enchevêtrement perpendiculaire pour donner un tissu, comme un textile, avec chaîne et trame. Voir photo.

Suivant le mode de tissage, il prendra les noms de satin, sergé, taffetas .....

Il pourra être "équilibré", c'est-à-dire que chaîne et trame seront identiques, ce sont les tissus conventionnels. Ou une des directions pourra être plus forte que l'autre, on aura alors des résistances différentes dans le sens chaîne et trame. On pourra aussi avoir une direction préférentielle (la chaîne) par rapport à l'autre (la trame qui est alors un fil très fin qui ne sert qu'à maintenir les fils de chaîne) : ce sont les unidirectionnels (les "U.D.").

### les mats

On reprend le stratifil de base et on le recoupe en morceaux de 25 à 50 mm de long qui sont projetés, sans orientation particulière, sur un tapis roulant. Voir photo.

Du fait qu'il n'est pas tissé, c'est-à-dire constitué de "fils" entrecroisés, les fibres qui le composent ne devraient pas tenir "attachées les unes aux autres". Pour qu'elles le fassent, il faut les recouvrir d'un "liant" qui va accrocher les fibres les unes aux autres et permettre au feutre ainsi constitué de "se tenir" et non pas de partir en morceaux dès qu'on le manipule.

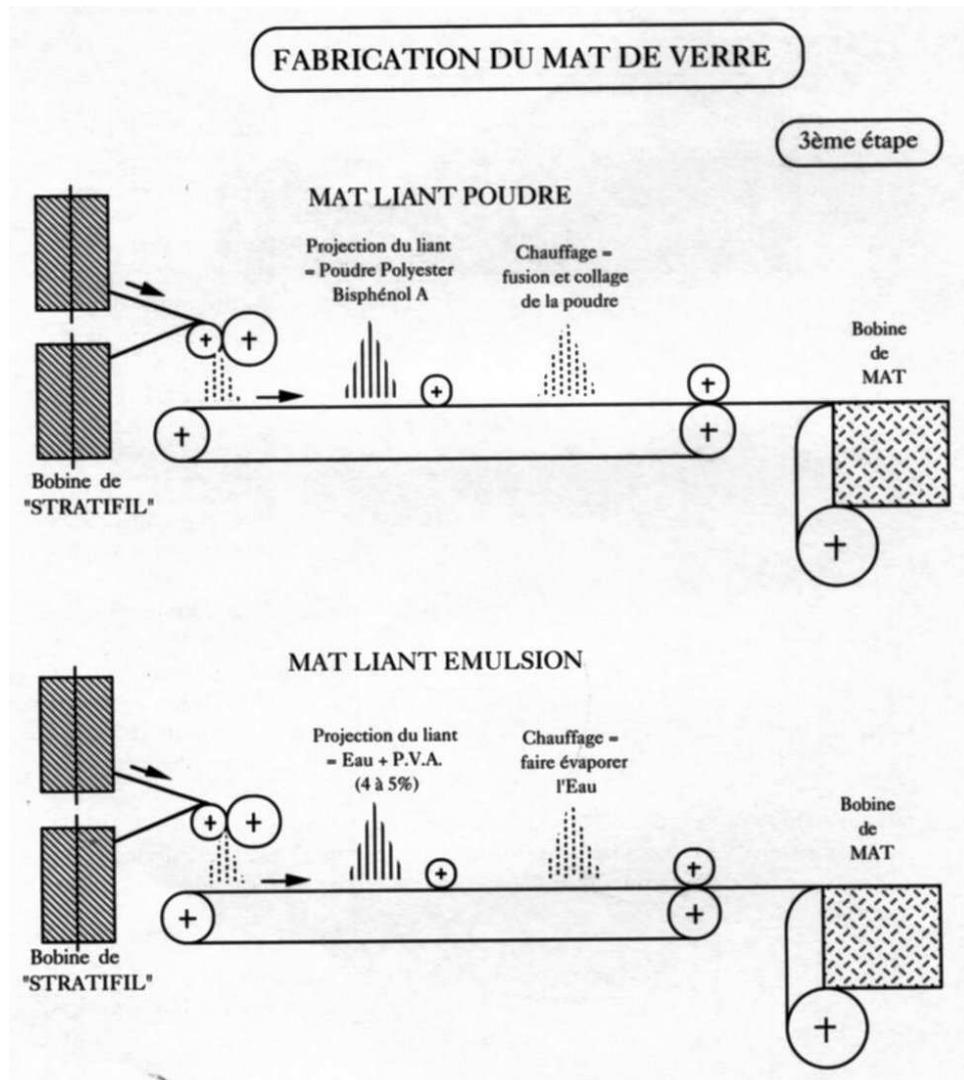
Le liant utilisé est soit un liant "poudre", soit un liant "émulsion".

- le liant "émulsion" : c'est une émulsion en phase aqueuse d'acétate de polyvinyle (PVA) - comme déjà utilisé pour l'ensimage - qui est projetée sur les fils désordonnés puis que l'on sèche pour faire évaporer l'eau de cette émulsion.

- le liant "poudre" : c'est de la poudre de polyester à base de Bisphénol A qui est fondue lors de la fabrication du mat. Elle sera dissoute par la résine lors de la stratification.

Nota - On peut éviter le liant précédent (poudre ou émulsion) en liant mécaniquement, par un fil, les fibres désordonnées du mat. C'est le cas de "l'aiguilleté" mais il est beaucoup moins souple et peu utilisé dans le cas de la construction des bateaux.

AUTRES TISSUS DE RENFORT : Il existe d'autres présentations usuelles telles que les "Rovimat" qui sont un tissu roving et un mat assemblés et formant un seul "tissu" de stratification, des tissages à 45° (bi-biais) par rapport à la bande de tissu, etc .... mais leur description n'apporte rien de plus à notre sujet. Laissons les donc de côté.



## 2-4°) LE SYSTEME CATALYTIQUE

### L'accélérateur

Sans lui, même en ajoutant le catalyseur à la résine, celle-ci ne durcirait pas à la température ambiante.

C'est généralement, de l'octoate de cobalt à 6 %. On utilise quelquefois le naphthénate de cobalt ou des amines.

La résine est généralement livrée "pré accélérée", c'est-à-dire que l'accélérateur y est déjà mélangé.

### Le catalyseur (ou "durcisseur")

C'est lui qui va permettre la réticulation, c'est-à-dire le durcissement de la résine.

- c'est souvent le PMEC qui est utilisé : solution de 50 % de peroxyde de méthyléthylcétone (d'où le vocable PMEC) et 50 % de phtalate de méthyle. On le dose de 1 % à 2 % environ suivant les conditions de température.

- ce peut être aussi le peroxyde de cyclohexanone ou le peroxyde de benzoyle.

\*\*\*\*\*

## 3°) LES ESSAIS DE RESISTANCE A L'OSMOSE

Le principe est de fabriquer des échantillons qui seront des plaques de stratifié qui seront exposées à l'action de l'eau. Pour pouvoir essayer plusieurs plaques à la fois, le matériel d'essai sera en fait un bac dont les parois comportent des trous de 10 à 12 cm de diamètre. Chacun de ces trous sera fermé par la plaque d'essai maintenue contre la paroi par un système simple de bridage et d'étanchéité. L'eau circule dans le bac. Elle est chauffée (nous verrons après pourquoi) et maintenue à une température constante grâce à un thermostat. Ce bac d'essai a reçu des noms évocateurs divers tels que "marmite", "bouilloire", "tortue", etc ..... Voir photo de la "bouilloire".

On se rend compte que dès que l'on veut échanger des informations, il faut parler un langage commun et que, par exemple, tel défaut dont on parle est de même taille ou de même importance. Le besoin de norme se fait sentir.

Les fabricants de peinture ont un essai normalisé (norme NFT 30 053-054) de cloquage des peintures utilisant un "Bac Ford" qui pourrait sans doute être utilisé pour les essais des gelcoats. Un autre essai de classement des défauts, norme ASTM D 2563, pourrait être utilisé.

Pendant l'essai, le système fonctionne 24 h sur 24 h et on peut ainsi atteindre des durées d'essai de l'ordre de 1000 heures, c'est-à-dire presque 1 mois. On peut, au cours de l'essai, démonter périodiquement les plaques pour les observer, les remplacer, etc .....

On observe visuellement le temps de changement d'apparence (apparition des cloques et mesure de leur taille), ou quantitativement en mesurant, par pesées par exemple, la quantité d'eau absorbée, ou en les soumettant à des essais destructifs ou non (excitation vibratoire) de traction-flexion ou cisaillement pour suivre leur résistance mécanique.

Les résultats peuvent donc prendre différentes formes :

- temps d'apparition des cloques.
- absorption d'eau en mg d'eau/m<sup>2</sup> de surface et par jour (par exemple).
- la variation de résistance mécanique en flexion ou en cisaillement.
- etc....., c'est-à-dire toute mesure qui permet de refléter la tenue du matériau vis à vis de la dégradation par l'eau.

Evidemment, on ne va pas attendre 25 ans pour savoir si la résine A est meilleure que la résine B. Il faut donc accélérer le phénomène pour obtenir plus rapidement des résultats comparatifs.

Pour ce faire, l'eau est chauffée à une certaine température, l'élévation de température activant très notablement le phénomène physico-chimique.

Ainsi, en augmentant la température de 20° à 100°C, le processus de dégradation est estimé être multiplié par 800 à 1000, selon Algra. Une immersion de 10 heures à 100°C est donc estimée représenter une année d'immersion à 20°C. Ceci si on s'intéresse à la résistance mécanique (cisaillement inter-couches) en fonction de la durée d'immersion.

Si on s'intéresse au temps d'apparition de cloques en fonction de la durée d'immersion, on peut dire que la vitesse double pour une élévation de température de 10°C, selon Amoco. Avec une température d'essai de 60°, on peut estimer qu'un essai d'une année représente 16 à 20 années d'immersion réelle en eau douce.

On verra que pour transposer en eau de mer il faudra encore multiplier par 2 à 3, soit un an d'essai en eau douce à 60°C = 40 à 50 ans réel en eau de mer.

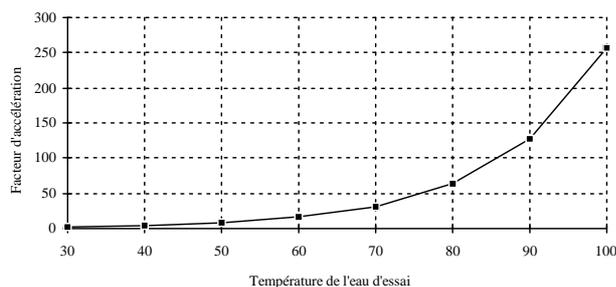
Pour des essais faits par Spra pour le temps d'apparition de cloques, passer de 40°C à 65°C, accélère la réaction de 15 fois environ.

Plus récemment, SCOTT BADER et le TNO (Labo indépendant à Delft - Hollande) estimaient que des essais osmose à 40°C accélèrent la réaction de 5 à 6 fois environ.

La courbe suivante illustre les chiffres Amoco :

Température INITIALE °C - Base	Augment. de la Températ. Δ T °C	Température d'eau d'essai °C	Accélération Facteur Multiplicateur	Accélération Facteur Multiplicateur	Accélération Facteur Multiplicateur	Accélération Facteur Multiplicateur
20°	10	30		2		
20°	20	40		4	<b>5 à 6 (eau de mer)</b>	
20°	25	45		6		
20°	30	50		8		
20°	40	60		<b>16</b>		<b>40 et diviser par 2 à 3 pour eau de mer</b>
20°	50	70		32		
20°	60	80		64		
20°	70	90		128		
20°	80	100	900	256		
			Sandvik Algra Cisaillement intercouches	AMOCO Apparition cloques Gelcoat	SCOTT BADER et TNO Apparition cloques Gelcoat	IFREMER Apparition cloques Gelcoat

FACTEUR D'ACCELERATION EN FONCTION DE LA  
TEMPERATURE D'EAU D'ESSAI - par rapport à l'eau à 20°C - Temps  
d'apparition des cloques



On voit d'après l'allure de la courbe que l'on aimerait bien faire les essais à 80-100°C.

Mais apparaît tout de suite un problème : si on est tenté d'augmenter fortement la température, jusqu'à 100°C par exemple, pour activer l'obtention de résultats, cette augmentation de température peut altérer le phénomène réel :

- on effectue par là une cuisson, en réalité une post-cuisson qui modifie le matériau, particulièrement dans le cas où du styrène résiduel y demeure, alors que le matériau du bateau n'est pas post-cuit.

- on s'approche, et même on dépasse, la température de tenue à chaud de la résine : c'est la température de fléchissement sous charge (HDT). En chauffant trop, on peut provoquer la fissuration de la résine, c'est le "Disc Cracking", et faire apparaître des phénomènes qui n'existent pas dans la réalité.

Pour ces raisons, la tendance actuelle est plutôt de diminuer la température d'essai et maintenant les essais se font plutôt à 40/60° maxi, bien que cela ralentisse l'obtention des résultats.

La qualité de l'eau servant à l'essai peut avoir une importance. On peut utiliser :

- de l'eau ordinaire du robinet, mais qui contiendra des sels de calcium, magnésium, chlore et des carbonates en proportions variables suivant la provenance de cette eau, et même, pour une même provenance, variables dans le temps compte tenu des traitements qui sont apportés pour la rendre potable.
- de l'eau distillée.
- de l'eau de mer.

Des essais ont montré des résultats différents suivant la nature de l'eau, en particulier, et on l'a déjà signalé, l'eau distillée (eau douce) est beaucoup plus "agressive" que l'eau de mer et accélère le phénomène d'osmose par 2 à 3 par rapport à l'eau de mer, pour une même température d'essai de 60°C selon l'IFREMER.

Alors laquelle choisir ?

- l'eau du robinet : c'est la plus simple à obtenir.
- l'eau distillée : elle a l'avantage d'être toujours la même et de ne pas faire de dépôt calcaire, donc les résultats comparatifs seront plus fiables.

Dans les laboratoires des sociétés chimiques où l'approvisionnement en eau distillée n'est pas un problème, on choisit généralement cette dernière. Dans les chantiers où l'influence des composants de l'eau du robinet n'a pas une influence suffisamment significative par rapport à ce que l'on cherche, on utilise de l'eau du robinet.

Certains renouvellent cette eau périodiquement pour qu'elle ne se charge pas progressivement en produits de décomposition qui pourraient inhiber telle ou telle réaction, car en fait ce que l'on cherche à savoir sera le résultat de multiples actions :

- pénétration de l'eau à travers le gelcoat

- hydrolyse de la résine qui sert de base au gelcoat ou de la résine de stratification, c'est-à-dire, celle qui est derrière le gelcoat et qui est "armée" de fibre de verre.
- hydrolyse des fibres de verre elles-mêmes
- hydrolyse de l'ensimage ou du liant des fibres de verre
- perte de liaison verre/résine
- etc....

La dégradation résulte d'une ou plusieurs de ces actions et il est probable que chacune de ces actions ayant une vitesse très différente, la dégradation visible à l'oeil ne sera causée que par une ou deux de ces actions, les autres n'ayant pas encore eu le temps de se manifester.

Il faut se méfier des résultats que l'on peut trouver dans la littérature technique car tous ne visent pas le même but :

- certains font des essais sur des stratifiés qui ont subi une cuisson au four car ils s'intéressent aux produits moulés avec post-cuisson.
- les échantillons d'essai sont quelquefois des stratifiés faits avec de l'U.D. et pas de mat ce qui modifie les taux de résine et les caractéristiques mécaniques.
- d'autres font des essais à haute température (100°C) parce que les pièces moulées auront à supporter une telle température (pièces pour l'industrie chimique par exemple).
- peu d'essais récents, spécifiques à la construction nautique, reflètent les conditions de fabrication des coques (pas de post-cuisson) et la température de l'eau qui entoure la coque, relativement faible.

Il faut faire remarquer aussi que fabriquer une éprouvette est plus facile que de stratifier une coque. Les éprouvettes d'essai seront donc de meilleure qualité que la coque elle-même. Il n'empêche que les renseignements qu'elles donnent, même s'ils sont relatifs, permettent une sélection des produits.

Les constructeurs de bateaux ont évidemment le même problème et trouver des renseignements intéressants et représentatifs de leur préoccupation dans le dédale des notes techniques, publications, comptes-rendus de colloques ..... n'est pas simple. Aussi, certains se sont attachés eux-mêmes à ce problème. Ils utilisent le dispositif d'essai précédemment décrit.

On peut comprendre qu'un petit chantier n'ait pas la possibilité d'entreprendre de tels essais. C'est alors aux fournisseurs de prendre le relais et de combler ce manque, ce qu'ils font pour la plupart. Dans ce cas, les résultats d'essais se manifestent sous forme de "recommandations" que fait le fournisseur au chantier.

Il n'existe pas de laboratoire d'essais propre à la profession, c'est-à-dire fonctionnant pour tous les chantiers regroupés au sein du Syndicat National des Constructeurs de bateaux. C'est peut-être dommage. Cela résulte aussi sans doute de l'individualisme des chantiers, du souci des grands chantiers de mettre en oeuvre des solutions particulières qui font partie de leur savoir-faire qu'ils ne veulent pas voir divulguer. Ce souci du "secret" est peut-être exagéré, car en présence des clients, il faut bien que le chantier donne des explications circonstanciées sur les méthodes qu'il utilise pour se prémunir de l'osmose et là, il n'y a plus de secret.

\*\*\*\*\*

**4°) LES RESULTATS DE CES ESSAIS ET LES RENSEIGNEMENTS QUE L'ON PEUT EN TIRER POUR LA CONSTRUCTION DES COQUES :**

**4-1°) PARAMETRE ANALYSE : LE TYPE DE RESINE POLYESTER**

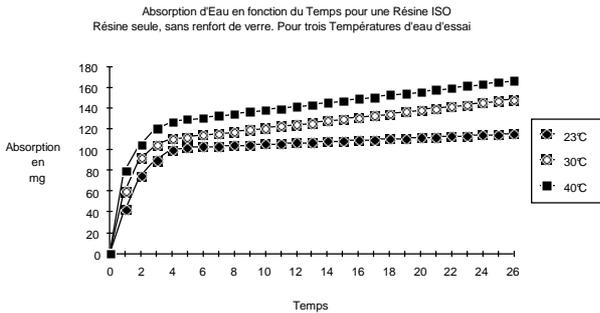
Rappelons que dans le phénomène de l'osmose il y a deux étapes :  
 - la pénétration à travers le gelcoat et l'absorption d'eau par la résine.  
 - puis cette eau hydrolyse la résine.

Attachons nous à la première étape, et dans cette première étape à l'absorption d'eau par la résine.

**ABSORPTION D'EAU**

L'absorption d'eau est évidemment graduelle, mais elle se stabilise à une valeur maxi, il y a saturation. On a d'ailleurs vu dans les études des cas pratiques du chapitre 3 que l'humidité maximum rencontrée, lue au Sovereign, est de 25% même pour de très vieux bateaux .

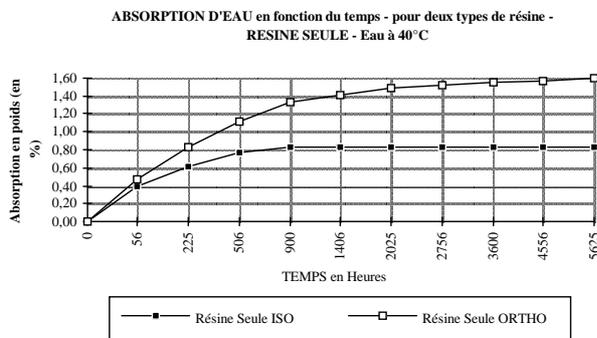
Le graphique suivant illustre ce fait. Il est relatif à une résine ISO. Il montre qu'à 23°C (température pas très éloignée de celle correspondant à l'utilisation du bateau), l'humidité se stabilise :



D'après document Scott Bader.

Des essais faits par l'IFREMER de Brest et le CETIM de Nantes et publiés en 1988 ont donné les résultats suivants :

- Comparaison de deux types de résines. Résine seule c'est-à-dire sans renfort de verre : on voit que la résine ISO absorbe environ deux fois moins d'eau que la résine ORTHO.

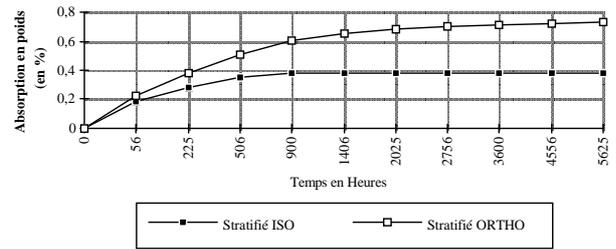


- Quand on passe au stratifié, on remplace une partie de la résine par de la fibre de verre qui elle n'absorbe pas : les valeurs vont donc baisser.

Comparaison de deux stratifiés (à prédominance d'U.D.) fabriqués avec deux types de résines. Le stratifié absorbe environ deux fois moins d'eau que la résine seule et le stratifié

ISO absorbe environ deux fois moins d'eau que le stratifié ORTHO.

ABSORPTION D'EAU en fonction du temps - STRATIFIE avec Résine ISO ou ORTHO - Eau à 40°C



On voit donc que l'absorption d'eau dépend beaucoup du type de résine utilisée, du simple au double.

Des essais plus récents (91-92) faits à l'IFREMER ont donné comme résultats, pour une immersion totale (deux faces exposées) :

Absorption d'eau maxi en % :

	Résine seule		Gelcoat seul		
	ORTHO	ISO	ISO/ORTHO	ISO	ISO NPG
- à 20°C :	1,02%	0,69%	0,92%	0,71%	0,71%
- à 40°C :	1,40%	0,77%	1,04%	0,72%	0,72%
- à 60°C :	1,56%	0,78%	1,38%	0,75%	0,75%
- à 80°C :	1,70%	0,82%	1,70%	0,88%	0,89%

Eau distillée

	Résine seule		Stratifié U.D* sans gelcoat et avec résine		Stratifié U.D* avec gelcoat ISO NPG et avec résine	
	ORTHO	ISO	ORTHO	ISO	ORTHO	ISO
	- à 20°C :	1,02%	0,69%			
- à 40°C :	1,40%	0,77%				
- à 60°C :	1,56%	0,78%	0,95%	0,46%	0,93%	0,49%
- à 80°C :	1,70%	0,82%				

Eau distillée

U.D\* : stratifié à base de tissu de verre unidirectionnel

Le détail de ces essais montre que :

- l'absorption d'eau maxi est nettement plus forte pour un gelcoat ISO/ORTHO (et vraisemblablement encore plus forte pour un gelcoat ORTHO) que pour un gelcoat ISO ou ISO NPG. Heureusement la majorité des constructeurs n'emploient plus de gelcoat ORTHO.
- il n'y a pas de différence entre un gelcoat ISO et un gelcoat ISO NPG.
- l'absorption d'eau maxi est similaire pour une résine ISO et un gelcoat ISO. Le gelcoat n'est pas plus étanche que sa résine correspondante.
- ces résultats confirment le rapport d'environ un à deux entre ISO et ORTHO, que ce soit pour résine, gelcoat ou stratifié.

\*\*\*\*\*

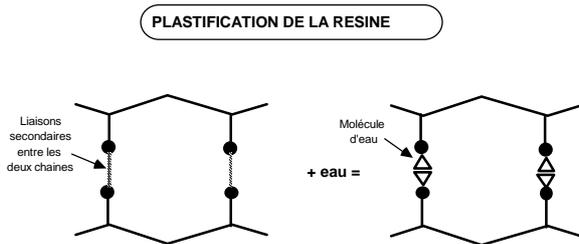
Par rapport à ces essais sur éprouvettes, qu'en est-il de la réalité de votre coque fabriquée avec une résine ORTHO ?

- A 20°C au lieu de 40° les valeurs sont à diminuer.
- le stratifié de votre coque n'est en contact avec l'eau que sur une seule face, ce n'est pas l'éprouvette complètement immergée dans l'eau. La quantité d'eau décroît en profondeur, de l'extérieur vers l'intérieur et les valeurs sont à diminuer par 2 environ.
- votre stratifié fabriqué et débullé manuellement contient plus de vides et de porosités qu'une éprouvette moulée sous presse, les valeurs sont donc à augmenter.
- votre stratifié fabriqué est à prédominance de mat qui absorbe plus de résine, les valeurs sont donc à augmenter.

La combinaison de ces différents éléments donne une variation significative et globalement on peut supposer que la quantité d'eau absorbée par votre coque se tient dans des valeurs voisines de 0,6 à 1% en masse, grand maximum. Cela souligne encore, comme on l'avait déjà signalé (chapitre 2 Parag. 2-6°) que les indications d'humidité données par un appareil de mesure sont à prendre en relatif et non en valeur absolue. On est loin des 25% lus sur l'appareil Sovereign.

\*\*\*\*\*

L'introduction d'eau dans la résine va d'abord donner une plastification et un gonflement différentiel. L'eau pénètre dans les molécules de la résine polyester polymérisée en s'intercalant dans les liaisons des chaînes polymérisées :



Il y a un simple gonflement et une diminution de la dureté : si on mesure la dureté BARCOL du gelcoat par exemple, elle passe de 45/50 - valeur classique pour une résine bien polymérisée - à 30 - la résine est plus "molle". Cette plastification est, théoriquement, un phénomène réversible c'est-à-dire que si on sèche le matériau, l'eau disparaît et la résine reprend son état d'origine sans avoir été endommagée.

Mais pendant toute la phase transitoire d'absorption d'eau, comme le taux et la vitesse d'absorption peuvent être différents d'un matériau à l'autre, le gonflement de l'un va être différent de celui de l'autre, il y a un gonflement différentiel. Si le taux et la vitesse d'absorption sont très différents entre gelcoat (ISO par exemple) et résine de stratification (ORTHO par exemple) il y a un risque de décohésion entre les deux couches. D'autre part la résine qui veut gonfler est empêchée par le brin de fibre de verre sur lequel elle est accrochée : risque de décohésion entre la fibre et la résine.

Ces décohésions facilitent le cheminement de l'eau dans le stratifié et favorisent donc l'osmose.

### HYDROLYSE DE LA RESINE

Après tout, que cette eau rentre ou non, ce n'est peut-être pas gênant ? Si, et à des degrés divers que nous allons voir.

Essais Silenka :

Par des essais d'éprouvettes de stratifié ayant :

- 1 couche avec résine ISO-NPG puis 3 couches avec résine ORTHO ) total
- 2 couches avec résine ISO-NPG puis 2 couches avec résine ORTHO ) 4
- 3 couches avec résine ISO-NPG puis 1 couche avec résine ORTHO ) couches

Il a été montré que l'amélioration est sensible lorsque deux couches, soit 2mm, étaient faites avec l'ISO-NPG.

Des essais plus récents (91-92) faits à l'IFREMER ont donné comme résultats, pour une immersion totale (deux faces exposées) :

Temps (en Heures) d'apparition des cloques sous gelcoat :

	Stratifié à résine ORTHO et Gelcoat			Stratifié à résine ISO et Gelcoat		
	ISO NPG	ISO	ISO/ORTHO	ISO NPG	ISO	ISO/ORTHO
- à 40°C :	540	900	130			600
- à 50°C :	285	380	85	680	540	250
- à 60°C :	100	140	40	250	230	85
- à 70°C :	65	85	20	95	90	35
- à 80°C :	25	30	5	55	50	10
Eau distillée.						

Ces essais "recopient" assez fidèlement les comparaisons qui ont déjà été faites concernant l'absorption d'eau.

Ils montrent que :

- quelque soit le type de la résine de stratification, le gelcoat ISO/ORTHO (c'est vraisemblablement encore plus vrai pour un gelcoat ORTHO) est nettement moins bon.
- pour une résine de stratification ISO, le gelcoat ISO NPG apporte une légère amélioration.
- pour une résine de stratification ORTHO, le gelcoat ISO NPG n'apporte pas d'amélioration par rapport à l'ISO simple, c'est même un peu moins bon. Il est inutile de choisir un gelcoat "amélioré" NPG pour un stratifié ORTHO.
- amélioration d'un facteur de un à deux entre résine ISO et ORTHO en ce qui concerne le temps d'apparition du cloquage.

Des essais non détaillés ici montrent que l'ajout d'un agent thixotrope, gel de silice ou micro-billes de verre par exemple, pour que la résine ne coule pas facilement en parois verticales augmente le taux d'absorption d'eau et diminue le temps d'apparition des cloques. Une ISO-THIXO se situera entre l'ISO et l'ORTHO du point de vue résistance à l'osmose.

\*\*\*\*\*

L'analyse des produits qui se trouvent dans le liquide osmotique des cloques a fait l'objet de nombreuses études.

Les principaux produits détectés et identifiés sont :

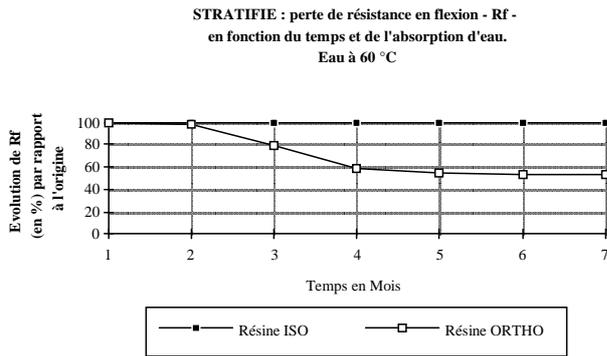
- Toute une famille dérivée du styrène :
  - benzaldéhyde par oxydation du styrène (styrène d'un pont entre chaînes moléculaires de la résine polymérisée ou styrène résiduel - polymérisation incomplète).
  - Acide benzoïque par oxydation du benzaldéhyde précédent.
- des résidus catalytiques.
- de l'acide orthophtalique et isophtalique, le premier étant en quantité importante dans les stratifiés à base de résine ORTHO évidemment. Or il est très soluble dans l'eau et participe énormément à la pression osmotique, ce qui n'est pas le cas du second. Ceci complète l'idée que la résine ORTHO est moins bonne que l'ISO.

\*\*\*\*\*

Reste la question fondamentale : à part le problème cosmétique dû aux cloques juste sous le gelcoat, qu'en est-il pour le stratifié lui-même c'est-à-dire plus en profondeur ? Y a-t-il une baisse de la robustesse de la coque ?

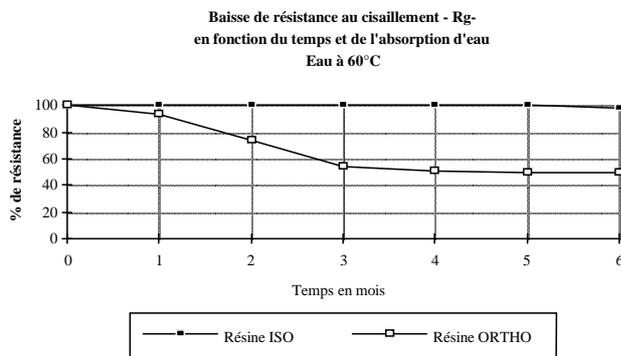
Des essais faits par l'IFREMER de Brest et le CETIM de Nantes et publiés en 1988 ont donné les résultats suivants :

En ce qui concerne la résistance à la flexion :



On voit le net avantage d'un stratifié ISO par rapport à l'ORTHO classique.

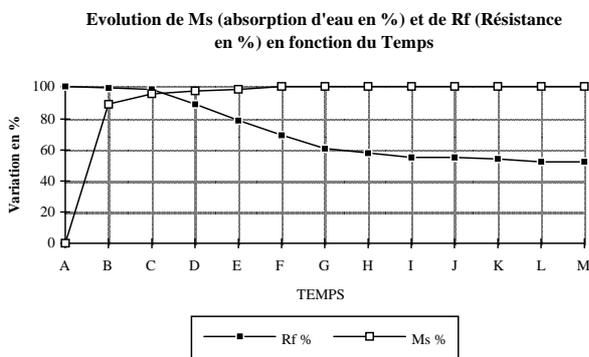
En ce qui concerne la résistance au cisaillement :



On voit encore le net avantage d'un stratifié ISO par rapport à l'ORTHO classique.

Pour la résine ORTHO classique, la baisse de résistance, que ce soit en flexion ou en cisaillement, est conséquente puisqu'elle diminue de moitié environ.

Si on trace sur le même graphique la courbe d'absorption d'eau et la courbe de la résistance à la flexion on voit que les deux phénomènes coïncident : la baisse de résistance en flexion commence dès que l'absorption a atteint son maximum :



Des essais plus récents (91-92) faits à l'IFREMER ont donné des résultats un peu différents et, quoique moins avantageux pour la résine ISO, celle-ci reste tout de même nettement meilleure :

Baisse en % des caractéristiques mécaniques :

Ex : module de flexion longitudinale (parallèlement aux fibres de l'U.D.)

Ey : module de flexion transversale (perpendiculairement aux fibres de l'U.D.) = caractérise la résine.

Gxy : module de cisaillement dans le plan du stratifié = caractérise l'interface.

	Ex Stratifié		Ey Stratifié		Gxy Stratifié	
	ORTHO	ISO	ORTHO	ISO	ORTHO	ISO
- après 2000H :	9%	0%	20%	6%	23%	11%
- après 5000H :	18%	6%	55%	30%	49%	16%

Eau distillée à 60°C

Baisse en % des caractéristiques mécaniques :

Rx : résistance de rupture en flexion longitudinale (parallèlement aux fibres de l'U.D.)

Ry : résistance de rupture en flexion transversale (perpendiculairement aux fibres de l'U.D.) = caractérise la résine.

Tx : résistance de rupture en cisaillement longitudinal (parallèlement aux fibres de l'U.D.)

Ty : résistance de rupture en cisaillement transversal (perpendiculairement aux fibres de l'U.D.) = caractérise l'interface.

	Rx Stratifié		Ry Stratifié	
	ORTHO	ISO	ORTHO	ISO
- après 2000H :	15%	8%	21%	9%
- après 5000H :	41%	25%	50%	25%

Eau distillée à 60°C

	Tx Stratifié		Ty Stratifié	
	ORTHO	ISO	ORTHO	ISO
- après 2000H :	34%	15%	37%	18%
- après 5000H :	65%	25%	55%	25%

Eau distillée à 60°C

La baisse se fait en plusieurs étapes :

- la première, de l'ordre de 5 à 10%, apparaît lors du début du cloquage du gelcoat. La plastification de la résine y contribue majoritairement.

- la deuxième quand le cloquage débute dans les premiers plis du stratifié. Les stratifiés ORTHO peuvent alors perdre 50-60% de leur résistance (et évidemment 100% en cisaillement dans le plan d'une cloque) alors que les stratifiés ISO ne perdent que 25-30%.

## CONCLUSION

Importance de la résine de stratification :

- la résine ORTHO n'est pas très bonne même si on la couvre par un gelcoat ISO ou ISO NPG. Sa résistance mécanique baisse de moitié environ.
- la résine ISO est bien meilleure, elle double pratiquement le temps d'apparition des cloques et la baisse de sa résistance est faible.

Le choix s'oriente donc vers une utilisation d'une résine de stratification ISO pour au moins la ou les deux premières couches de mat de la couche dure, la stratification continuant ensuite avec une résine ORTHO classique comme celle qui était utilisée normalement dans le passé.

Qu'en est-il des résines "écologiques" à basse émission de styrène ?

Le styrène est un solvant, il va donc s'évaporer en partie lors de la mise en œuvre de la résine. C'est ce qui donne d'ailleurs l'odeur caractéristique que l'on sent dans un atelier de moulage ou que l'on sentait à l'intérieur d'un bateau en "plastique".

Ce styrène est nocif pour la santé et les conditions d'hygiène et sécurité dans le travail imposent une installation importante de ventilation de l'atelier de moulage. Les fabricants ont mis au point des résines spéciales qui relâchent très peu de styrène dans l'atmosphère. Les premières résines "LSE" (Low Styrene Emission) à basse émission de styrène de SCOTT BADER datent de 1979. L'utilisation de ces résines s'est généralisée dans les chantiers à partir de 85-87 car elles présentent un avantage indéniable sur ce point.

Du point de vue polymérisation complète ou non et styrène résiduel dans la résine du stratifié, on peut supposer que ça ne change rien car l'évaporation du styrène se fait de la même façon, elle est simplement "contenue" par le "couvercle" qu'on met dessus.

Certains pensent qu'en l'absence de post-cuisson ce styrène piégé finira par s'évaporer en transformant la résine en "gruyère", les vides laissés étant des sites d'osmose.

Les essais comparatifs dont on dispose sont moins nombreux. Ceux réalisés par SCOTT BADER ont montré que lorsque la température d'essai (eau à 40°C) est proche du HDT de la résine, alors le phénomène d'osmose est accéléré.

Les cas de figures et les résultats sont variés :

- dans le cas d'un stratifié (avec gelcoat ISO de HDT moyen), si on passe d'une résine de stratification ORTHO à la version ORTHO écologique, les temps d'apparition du cloquage (types 2 et 3 de la classification SCOTT BADER) ne sont pas diminués, ils sont au contraire améliorés : on passe de 12 semaines à 28 si le mat est à liant émulsion, ou de 12 semaines à plus de 52 si le mat est à liant poudre.

- dans le cas d'un stratifié (avec gelcoat ISO de HDT moyen), si on passe d'une résine de stratification ISO à la version ISO écologique, le temps d'apparition du cloquage passe de 54 semaines à 52 si le mat est à liant émulsion (le temps reste donc similaire) ou de plus de 100 semaines à plus de 52 si le mat est à liant poudre (on a donc une diminution notable dans ce cas tout en restant suffisamment résistant).

\*\*\*\*\*

## LES RESINES VINYLESTER

La résine vinylester est le résultat de la réaction du bisphénol-A époxy et de l'acide méthacrylique. Du point de vue chimique, elle se situe entre une polyester et une époxy.

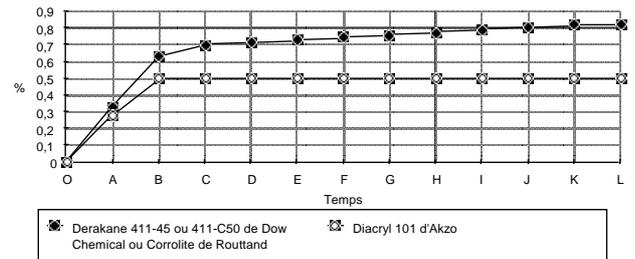
Ressemblance avec une polyester : le diluant de la résine est le même : le styrène.

Différences :

- du point de vue absorption d'eau : le taux d'absorption maxi d'une vinylester (résine seule) est de l'ordre de 0,5 à 0,8%, il est pratiquement indépendant de la température. Pour un stratifié à base de vinylester il sera de 0,2 à 0,4%. Ces valeurs sont de beaucoup inférieures (de moitié environ) à celles d'une résine ORTHO ou même ISO.

Du fait de cette faible absorption, le gonflement différentiel est réduit et le risque de décohésion résine/fibre de verre est quasiment nul.

Absorption d'eau des résines vinylester  
Résine seule



Nota : la Diacryl 101 d'Akzo est livrée sans styrène. Il faut l'ajouter au moment de l'emploi.

Du point de vue résistance à l'hydrolyse : la molécule polyester est longue, elle a des doubles liaisons et des liaisons ester tout au long de la molécule. Ces liaisons vont se marier avec le styrène au moment de la catalysation et créer la solidification de la résine.

La molécule vinylester est courte, les doubles liaisons et les liaisons ester n'existent qu'aux extrémités. De ce fait, la résine solidifiée aura de meilleures qualités de souplesse - elle a un taux d'allongement à la rupture, A %, de l'ordre de 5 % - et de résistance à l'élongation.

D'autre part, les liaisons ester se détruisent sous l'action des solvants, dont l'eau. Comme il y en a moins, la vinylester résistera mieux à la dégradation par l'eau.

Des essais faits par DOW CHEMICAL et publiés en 90 ont montré :

- avec un gelcoat ORTHO et une résine de stratification ORTHO, l'interposition en couche dure d'un mat 300 g/m<sup>2</sup> imprégné de résine vinylester DERAKANE 411-45 augmente la résistance au cloquage de 19 jours à 250 jours (essai en vapeur saturée à 55°C).

- avec un gelcoat ISO NPG et une résine de stratification ORTHO, l'interposition en couche dure d'un mat 450 g/m<sup>2</sup> imprégné de résine vinylester DERAKANE 411-45 augmente la résistance au cloquage de 40 jours à 1000 jours (essai en vapeur saturée à 55°C).

Des essais récents (91-92) faits à l'IFREMER ont montré qu'après 3000 H en eau à 60°C un stratifié ORTHO ou ISO protégé par deux couches de renfort (mat ou tissu roving) imprégnées avec une vinylester 411 DOW CHEMICAL - puis un gelcoat - n'a pas montré de cloquage.

Autres qualités de cette résine :

- moins de marquage : on ne "voit pas le tissu de verre se deviner" en lumière rasante. C'est d'ailleurs une qualité que l'on peut utiliser aussi pour faire les moules.

- liaison polyester/vinylester : les résines sont de même nature donc la liaison est bonne.

Les reprises polyester sur vinylester ne posent pas de problème (alors que c'est impossible de mettre du polyester sur de l'époxy). On peut donc avoir un gelcoat polyester puis la couche dure (2 premiers plis) en vinylester puis le reste du stratifié en résine polyester.

La fabrication s'enchaîne bien alors que dans le cas d'un traitement préventif à l'époxy, il fallait passer l'époxy en fin de fabrication ce qui constitue une reprise de fabrication toujours mal venue.

Du point de vue de la mise en œuvre à la fabrication :

- globalement, elle s'emploie comme une polyester. La résine vinylester est pré-accélérée et elle est à catalyser avec le PMEC classique. Mais le mélange catalyseur/ résine doit être précis et ne tolérera pas d'à-peu-près alors que la polyester est plus tolérante.

La température de la résine vinylester utilisée à l'atelier devient elle aussi plus importante. Il faut utiliser des ceintures chauffantes pour amener les fûts de résine à 18-21°C.

Il faut aussi utiliser un mélangeur ou un agitateur pour bien garder en suspension les agents thixotropes.

Cependant, malgré cette semblante facilité, les gens de l'atelier de moulage vont vous faire savoir que ce n'est pas aussi évident :

- on ne pourra pas utiliser exactement le même équipement pour passer de la résine polyester ou de la vinylester. Il y aura des changements de buse à faire, par exemple.

- la marge d'erreur du mélange résine/catalyseur est plus étroite. La vinylester est moins tolérante de ce point de vue et il va falloir travailler plus précisément.

En particulier, il faut se méfier des variations de température qui donnent des variations importantes de viscosité du catalyseur qui peuvent engendrer des mélanges incorrects, particulièrement dans les machines dont le mélange se fait automatiquement. Un réglage qui donne un débit de catalyseur correct vu au débitmètre à bille peut donner un débit différent si la viscosité varie.

- la vinylester mousse à l'addition du catalyseur. Il faut donc attendre qu'elle disparaisse avant de commencer à mouler et le débullage doit être accentué et soigné.

- on ne peut pas faire du stratifié épais, couche sur couche, car elle est plus exothermique (elle chauffe plus, pic à 130/150°C) et par sa polymérisation plus rapide la pièce peut se démouler d'elle-même en cours de moulage.

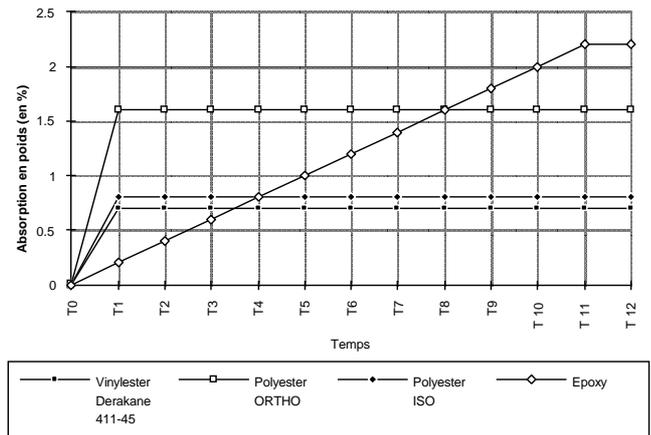
Du point de vue des prix : la vinylester coûte trois fois plus cher qu'une polyester ORTHO environ.

L'emploi de la résine vinylester dans l'industrie nautique est encore pratiquement nul pour la fabrication de grande série, même en restreignant son usage à la stratification de la seule couche dure.

\*\*\*\*\*

Pourrait-on faire un traitement préventif ou curatif avec une vinylester ? Oui certainement, ses qualités de faible absorption d'eau (donc d'étanchéité), de résistance à l'hydrolyse (donc d' "inertie" vis à vis de l'attaque par l'eau) et sa parfaite compatibilité avec une polyester permettent cette utilisation en toute sérénité sur le plan technique.

Profitions en pour remettre sur un même graphique les taux d'absorption d'eau (donc l'étanchéité) des différentes résines qui nous intéressent, la polyester ORTHO et ISO, la vinylester 411 de Dow Chemical et l'époxy :



La vinylester a une plus faible absorption que l'époxy. L'époxy a une absorption importante, heureusement elle se "rattrape" par le fait que cette absorption est plus lente.

#### 4-2°) PARAMETRE ANALYSE : LE GELCOAT

##### GELCOAT CLASSIQUE

Paramètres liés à la résine de base :

Le gelcoat peut être produit à partir, soit d'une résine ORTHO, soit d'une résine ISO. De même, l'alcool de base peut être un glycol classique ou un néopentyl glycol.

Acide Iso + glycol (PG) = résine ou gelcoat ISO (1)

Acide Iso + néopentyl glycol (NPG) = résine ou gelcoat ISO-NPG (2)

Acide Ortho + glycol (PG) = résine ou gelcoat ORTHO (3)

Acide Ortho+néopentyl glycol (NPG) = résine ou gelcoat ORTHO-NPG (4)

On peut avoir aussi des mélanges ISO/ORTHO.

On a déjà vu des comparaisons entre les différents types (pages 16 et 18).

Rappelons les succinctement :

##### en terme de taux d'absorption d'eau :

- l'absorption d'eau maxi est nettement plus forte pour un gelcoat ISO/ORTHO (et vraisemblablement encore plus forte pour un gelcoat ORTHO) que pour un gelcoat ISO ou ISO NPG. Heureusement la majorité des constructeurs n'emploient plus de gelcoat ORTHO.

- il n'y a pas de différence entre un gelcoat ISO et un gelcoat ISO NPG.

- un gelcoat ISO absorbe environ deux fois moins qu'un gelcoat ORTHO.

en terme de gonflement différentiel : le gonflement différentiel est très différent entre gelcoat ISO et résine de stratification ORTHO. Il y a risque de décohésion.

##### en terme de temps d'apparition des cloques :

- le gelcoat ISO/ORTHO (c'est vraisemblablement encore plus vrai pour un gelcoat ORTHO) est très nettement moins bon.

- pour une résine de stratification ISO, le gelcoat ISO NPG apporte une légère amélioration par rapport à l'ISO simple alors que pour une résine de stratification ORTHO, le gelcoat ISO NPG n'apporte pas d'amélioration, c'est même un peu moins bon. **Il est inutile de choisir un gelcoat "amélioré" NPG pour un stratifié ORTHO.**

Les gelcoats qui sont considérés comme les meilleurs sont faits à base de résine ISO ou d'ISO néopentyl glycol (ISO NPG).

\*\*\*\*\*

Autres paramètres :

#### Son épaisseur

Il ne doit pas être trop mince puisque l'effet de barrière étanche est proportionnel à son épaisseur (3 à 4/10èmes de mm sont un minimum - 6 à 7/10e c'est mieux, c'est ce que l'on trouve dans les bonnes fabrications).

Des essais faits par Silenka ont montré que des éprouvettes de 1,5/10èmes étaient détériorées en trois heures alors qu'avec 3 à 5/10èmes elles ne montraient aucun signe de détérioration après 22 heures.

Des essais récents (91-92) faits à l'IFREMER ont donné comme résultats :

- Pour une résine de stratification ORTHO : passer d'une épaisseur de gelcoat ISO/ORTHO de 0,3 mm à 0,6 mm fait passer le temps de cloquage de 260 H à 640 H (eau d'essai à 50°C).

- Pour une résine de stratification ISO : passer d'une épaisseur de gelcoat ISO de 0,3 mm à 0,6 mm fait passer le temps de cloquage de 350 H à 1600 H (eau d'essai à 50°C).

L'épaisseur du gelcoat a une influence importante et d'autant plus importante que le gelcoat et la résine de stratification sont à base d'une "bonne" résine (ISO).

Comme le gelcoat est utilisé pur, c'est-à-dire qu'il n'est pas chargé par de la fibre de verre, son retrait va être relativement important. A cause de ce retrait, il ne peut pas être passé en couche trop épaisse (7 à 8/10èmes de mm maximum), sinon ce retrait occasionne un fendillement lors de son durcissement. Si on veut en mettre plus épais afin d'augmenter l'épaisseur de la barrière étanche, il faut alors le passer en plusieurs couches.

La deuxième couche doit être projetée au bon moment : pas trop tard sinon on a un mauvais accrochage avec la couche précédente, et pas trop tôt sinon on détrempe la première couche c'est-à-dire qu'on la dilue par le solvant (le styrène) de cette deuxième couche.

#### Sa souplesse

Une autre qualité essentielle pour un gelcoat est sa souplesse pour éviter les fissurations au moindre choc ou sous la plus petite déformation de flexion. Par ces fissurations l'eau pourrait pénétrer facilement dans le stratifié. Il faut donc que la résine de base soit souple.

La valeur de A %, c'est-à-dire l'allongement maxi que peut supporter le gelcoat avant rupture, est généralement de 2 à 5%. L'éventail est donc large.

Pour cette même raison, il ne faut pas que l'épaisseur du gelcoat soit trop forte, particulièrement dans les parties soumises à des efforts de flexion, aileron de safran par exemple, qui fléchit sous la poussée du safran qui y est accroché. Or ces parties sont des parois verticales, creuses et

étroites (dans le cas de moule femelle en une seule partie) où généralement on trouve fréquemment des excès de gelcoat.

Malheureusement aussi, ce A %, donc la souplesse, va baisser avec la durée d'immersion dans l'eau.

#### Pigments et charges

- pigments de coloration : les gelcoats colorés résistent moins bien (en particulier les bleus), les blancs ou même les non colorés résistent mieux.

Des essais (SCOTT BADER) ont montré qu'il est préférable d'utiliser un gelcoat de couleur blanche ou claire (non coloré, non pigmenté). Tout pigment peut créer des canaux capillaires interfaciaux par lesquels l'eau pourrait s'introduire plus facilement.

D'où la recommandation d'utiliser, sous la flottaison, un gelcoat sans aucun pigment. Mais cela obligerait à gelcoater le moule en deux fois, avec un masquage entre deux, ce qui n'est pas simple ni bon marché.

- agent thixotrope, gel de silice par exemple, pour que le gelcoat ne coule pas facilement en parois verticales : le taux d'absorption d'eau augmente et le temps d'apparition des cloques diminue

\*\*\*\*\*

#### GELCOAT AVEC ECALLES DE VERRE

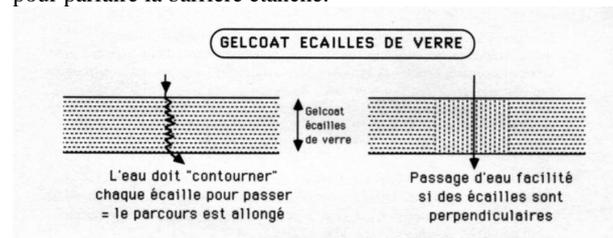
Il s'agit de gelcoat dans lequel on ajoute des écailles ou paillettes de verre qui sont orientées par des additifs spéciaux. Une fois polymérisé on obtient un film protecteur à structure lamellaire, les lamelles étant à plat.

On crée ainsi un labyrinthe qui "allonge" le circuit à parcourir par l'eau pour traverser le gelcoat à l'image des lauzes sur un toit de maison.

Ces écailles sont réalisées par broyage puis tamisage de bulles de verre non ensimées, de verre C en général, le verre C étant beaucoup plus inerte vis à vis de l'eau comme nous le verrons au paragraphe 4-5 suivant. Les paillettes font 3 à 5 microns (millièmes de mm) d'épaisseur.

L'inconvénient est que le produit se projette difficilement au pistolet, il passe mal dans la buse et les écailles de verre très abrasives détruisent rapidement cette buse, même si elle est en tungstène. On le passe généralement au rouleau.

L'autre inconvénient est que le gelcoat obtenu est difficilement ponçable (on ponce du verre) et les finitions des raccords de gelcoat sont pratiquement impossibles. Pour éviter ce problème certains constructeurs utilisent en première couche un gelcoat classique qui sera ponçable et permettra les finitions puis un gelcoat écailles de verre en deuxième couche pour parfaire la barrière étanche.



Un autre inconvénient cité est que les paillettes ne se mettent pas toujours bien à plat, elles peuvent au contraire se mettre perpendiculairement au film, pointer à la surface et constituer

alors des canaux préférentiels facilitant le passage d'eau. Pour éviter il faudrait passer plusieurs couches minces.

Leur efficacité est donc controversée.

\*\*\*\*\*

#### 4-3°) PARAMETRE ANALYSE : LE LIANT DES MATS DE VERRE

Sachant qu'il y a deux liants possibles, le liant "émulsion" et le liant "poudre", lequel choisir ?

- le liant poudre paraît séduisant chimiquement puisque c'est du polyester à base de Bisphénol A qui est simplement dissous dans la résine du même nom.

- le liant émulsion contient beaucoup de PVA (acétate de polyvinyle - déjà utilisé en petite quantité dans l'ensimage) qui est un produit très hydrolysable (donnant l'acide acétique à l'odeur de vinaigre que l'on sent bien dans le liquide des cloques) qui est un facteur important du développement et de l'entretien de l'osmose.

#### 1°) Du point de vue de la formation de cloques

Beaucoup d'essais ont été faits sur ce point (SILENKA - SCOTT BADER) et ils montrent que le liant poudre résiste mieux à l'hydrolyse que le liant émulsion bien que les comparaisons ne soient pas toutes concordantes.

Des essais comparatifs avec eau à 50° C ont été faits par Silenka.

Ils montrent que les mats liant émulsion n'ont qu'une durée de résistance de 70 à 150 heures, alors que les mats liant poudre résistent entre 250 à 280 heures. Le gain est tout à fait significatif de l'ordre de 3 sur 1 au mieux et encore de 2 sur 1 au pire.

Des comparaisons faites par SCOTT BADER on peut résumer :

Résine de stratification ORTHO Marine de HDT moyen, gelcoat ISO ou ISO NPG : passer du mat émulsion au mat liant poudre ne change pratiquement pas le temps d'apparition des cloques. Autrement dit ce n'est pas la peine de passer au liant poudre si on reste en stratifié ORTHO.

Résine de stratification ISO, gelcoat ISO ou ISO NPG : passer du mat émulsion au mat liant poudre améliore très fortement le temps d'apparition des cloques.

NOTA : même si ce mat est mieux, il faut savoir qu'il est tout de même encore mieux de ne pas en avoir du tout. C'est le cas si on n'utilise que des tissus rovings. L'IFREMER a montré ainsi que le fait d'ajouter deux mats liant poudre en couche dure (juste derrière le gelcoat, comme c'est habituel) diminue de moitié environ la tenue à l'osmose.

Il faut maintenant vérifier si cette amélioration de la tenue à l'osmose ne se fait pas au détriment de la résistance mécanique.

#### 2°) Du point de vue de la résistance mécanique

Bien que faits avec une eau à 100°C (donc post-cuisson qui modifie le matériau et dépassement de la température de tenue à chaud de la résine - HDT) des essais comparatifs ont

été faits par Sandvik et H.P Pedersen et ont montré que le mat liant poudre avait d'aussi bonnes caractéristiques de résistance mécanique que le mat émulsion.

D'autres essais ont été faits par SCOTT BADER avec une température d'eau plus basse. Ils ont montré les résultats suivants :

<u>LIANT POUDRE</u>	Unités				
Durée d'immersion :	mois	0	4	12	26
Résistance à la traction :	kg/mm <sup>2</sup>	10,3	7,3	7,5	7,6
Module de rigidité en flexion :	kg/mm <sup>2</sup>	620	580	600	530

<u>LIANT EMULSION</u>	Unités				
Durée d'immersion :	mois	0	4	12	26
Résistance à la traction :	kg/mm <sup>2</sup>	9,2	8	7,6	7,9
Module de rigidité en flexion :	kg/mm <sup>2</sup>	560	510	540	530

Eau à 40°C.

Polymérisation des échantillons : 28 jours à 20°C, ce qui est représentatif de la fabrication réelle d'une coque.

Eprouvettes sans gelcoat avec 4 mats 450 g/m<sup>2</sup> et résine ISO Crystic 489 PA - 33% de résine.

Beaucoup d'autres paramètres de résistance mécanique ont été mesurés et ne sont pas retranscrits ci-dessus. Tous montrent que la résistance mécanique de l'un ou de l'autre est très voisine après les 26 mois d'immersion.

Les faibles différences notées dans le tableau ci-dessus ne sont pas à mettre dans la balance. Tout au plus, et c'est tant mieux, le mat liant poudre n'est pas moins résistant que le mat émulsion.

#### 3°) Conclusion

- le mat liant poudre a une meilleure résistance à la formation des cloques pour un stratifié ISO. Pour un stratifié ORTHO l'amélioration ne semble pas notable.

- cela ne se fait pas au détriment des caractéristiques mécaniques.

- par contre, le mat liant poudre est plus raide, il est plus difficile à manipuler, il a plus de difficulté à épouser les formes creuses, des angles de tableaux AR ..... Pour cela, il a longtemps été boudé par les constructeurs. Les stratifieurs lui reprochent en outre, mais est-ce réel (?), d'occasionner des allergies de la peau, des démangeaisons, ....

Mais c'est peut-être et sans doute une mauvaise excuse pour continuer à utiliser le mat liant émulsion qui se travaille si bien, si facilement .....

- l'importance de l'osmose conduit donc les constructeurs vers le mat liant poudre, même s'il est plus pénible à travailler, et au moins pour un ou mieux deux mats de la couche dure.

Nota 1 : la projection simultanée permet d'éviter le liant, elle pourrait sembler séduisante. Mais en première couche, dans le moule femelle (celle donc qui sera exposée en première ligne à l'hydrolyse), il faut éviter absolument tout vide.

On y arrive mieux avec un mat de verre bien ébullé qu'avec une projection simultanée, les fibres n'étant pas toutes "à plat", et l'ébullage, même bien fait, risquant de laisser des vides importants derrière le gelcoat.

D'autre part le principal inconvénient du mat projeté reste que l'épaisseur de la couche dépend de l'habileté du projeteur, que ce n'est pas facile et on constate souvent des défauts d'épaisseur, en trop ou en moins.

Nota 2 : dans certains mats liant poudre "spéciaux", l'ensimage (on a vu qu'il est lui aussi à base de PVA) est alors

remplacé par un ensimage à base de Bisphénol A. comme pour le liant.

On élimine alors toute présence de PVA qui est un produit très hydrolysable (donnant l'acide acétique à odeur de vinaigre que l'on sent bien dans le liquide des cloques). Ce mat liant poudre "spécial" a alors une très bonne résistance à l'osmose mais il est peu compatible avec le moulage de grandes pièces comme sont les coques de bateaux et il n'est pas utilisé pour les constructions nautiques.

Nota 3 : le voile de surface en verre "C" (et non pas le "E" habituel - voir paragraphe 4-5 ci-après), de très faible grammage, placé juste derrière le gelcoat, formera une couche riche en résine (rapport résine/verre : 20/1) et fera office en quelque sorte de deuxième gelcoat "armé". Il augmentera très notablement la résistance à l'osmose. L'inconvénient est qu'il ne se manipule pas facilement et il n'est pratiquement pas utilisé pour les constructions nautiques.

#### 4-4°) PARAMETRE ANALYSE : LA NATURE DE L'AGENT DE COUPLAGE

Rappelons que l'ensimage peut contenir deux types d'agent de pontage :

- un agent de pontage (ou couplage) au chrome.
- un agent de pontage silane.

L'agent de pontage au chrome est plus sensible à l'hydrolyse. Document Silenka :

Des éprouvettes essayées à 50°C ont montré que le finish (on l'appelle aussi comme cela) silane tenait 250 heures alors que, dans les mêmes conditions, le finish chrome ne tenait que 100 à 150 heures.

#### 4-5°) PARAMETRE ANALYSE : LA NATURE DU VERRE DE LA FIBRE

Le verre est un mélange de plusieurs composants :

- la silice, Si O<sub>2</sub> principalement
- des oxydes de fer et d'aluminium, de bore
- des oxydes de calcium et de magnésium
- des oxydes de potasse et de soude (K<sub>2</sub> O et Na<sub>2</sub>O)

tous ces composants sont à des teneurs diverses suivant les types de verre.

- le verre couramment utilisé est le verre "E" appelé aussi verre électrique avec très peu de potasse et soude (< 1 %)

- un autre verre, le verre "S" ne contient pas de potasse ni de soude. Or ces deux produits sont très facilement hydrolysables.

Pour cette raison, le verre "S" serait meilleur du point de vue de l'osmose (additionnellement, il a une meilleure résistance mécanique), mais il est plus cher, et pas du tout employé en construction nautique.

- un troisième verre, le verre "C" est utilisé uniquement pour l'industrie chimique (tuyaux, réservoirs, tours de réaction ..... ) où une résistance exceptionnelle aux agents chimiques est recherchée. Dans ce cas, on utilise 2 à 3 premières couches en verre C puis le reste du stratifié en verre E commun.

#### 4-6°) PARAMETRE : LE SYSTEME CATALYTIQUE, ACCELERATEUR + CATALYSEUR

Ils ont une influence sous différents aspects :

- d'abord et avant tout sur le durcissement complet et total de la résine, ce qui donne un stratifié moins perméable à l'eau, et donc moins facilement hydrolysable. Le facteur le plus important est le dosage de ces produits.

Des essais ont été faits par SILENKA en faisant varier le pourcentage de PVEC de 0,5 à 8%. Il a été constaté que la meilleure résistance à la formation des cloques s'obtient avec des pourcentages compris entre 1 et 2% qui sont ceux utilisés habituellement, compte tenu des conditions de température de l'atelier de moulage, de la réactivité de la résine et du temps de gel souhaité.

- le PVEC traditionnel a été comparé au peroxyde de benzoyle-diméthylaniline. Dans la majorité des cas, le PVEC a une résistance à la formation des cloques 1,5 à 2 fois supérieure.

- ensuite, parce qu'eux-mêmes ou leur diluant (le phtalate de méthyle pour le PVEC par exemple) ne disparaissent jamais complètement lors de la réaction, et on peut les retrouver sous forme de solutions qui peuvent avoir un rôle osmotique. Cependant il ne faut pas exagérer cette importance, la plupart de ces solvants sont peu solubles dans l'eau froide et ils ont donc finalement un rôle réduit pour la résistance à l'osmose.

Cela n'a pas été le cas pour le problème très particulier du diéthylène glycol qui, lui, a fait des ravages relatés par les médias et qui a propulsé l'osmose sur le devant de la scène. C'est donc l'exception qui confirme la règle.

Alors gardons le PVEC, il convient très bien.

#### 4-7°) PARAMETRE : CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE

Nous le citons en dernier, non pas parce qu'il est moins important que les autres, bien au contraire, mais parce qu'il est supposé être parfaitement connu et qu'il suffit d'avoir la volonté de l'appliquer, ce qui n'est pas toujours le cas et ce qui a pour conséquence de mettre, de fait, ce paramètre au premier rang.

Rappelons les principes à suivre et les défauts à éviter :

- une température de l'atelier de moulage et des produits trop basse, c'est-à-dire inférieure à 15 - 18° C va accroître la viscosité du gelcoat qui va être plus difficile à projeter, qui va donc empêcher les bulles d'air de s'éliminer (l'air reste prisonnier de sa bulle trop visqueuse) et qui donne des épaisseurs inégales.

La réaction du stratifieur va alors être toujours la même : ajouter du solvant, de l'acétone, qui lui crée d'autres problèmes :

- il peut en rester des traces dans le gelcoat durci : l'acétone est dissous par l'eau donc avide d'eau.

- comme tout solvant, lorsqu'il s'évapore, il crée des "trous d'aiguilles", des microbulles qui rendent donc le gelcoat plus poreux. Enfin l'excès d'acétone est à l'origine d'autres défauts bien connus tels que les coulures, d'où épaisseurs inégales.

La solution est de travailler à bonne température, sur un moule à bonne température, et généralement on met les pots de gelcoat au bain-marie depuis la veille pour les porter doucement à température convenable avant emploi.

- gelcoat passé à la brosse ou au rouleau : c'est meilleur mais il ne faut pas que ce soit un gelcoat "pistolet". Un gelcoat "pistolet" est additionné d'acétone pour qu'il pulvérise bien, qu'il passe facilement dans la buse et que l'air qui lui est mélangé se sépare facilement. Si on le brosse après pistoletage, on "referme" des cavités où l'acétone se trouve

piégé. Il restera dans le gelcoat et étant facilement hydro-soluble, il constituera des sites d'osmose rapide.

- il faut éviter les temps d'arrêt importants au cours de la stratification comme un délai d'attente entre couche dure (2 premiers mats) et le reste du stratifié. En particulier "la coque du vendredi soir" qui est reprise en stratification le lundi ou plus tard si c'est un week-end prolongé ou le moule qui est "protégé" pendant la période des congés par un gelcoat et 2 mats et qu'on reprend en stratification tel quel à la rentrée.

- hygrométrie de l'atelier trop forte : on risque des condensations sur les points froids, le moule et les matériaux. C'est pourquoi, il faut aussi travailler sur un moule qui est à la température de l'atelier et non un moule froid que l'on vient de rentrer de l'extérieur, ou sur un moule qui n'est pas encore réchauffé alors que l'atelier l'est.

Exemple : arrêt du chauffage pendant la nuit. Remise en route le matin, juste avant gelcoatage : l'air de l'atelier est suffisamment chaud mais le moule est plus froid que cet air : effet de paroi froide et condensation.

- si on doit chauffer toute la nuit on peut en profiter pour faire le moulage en continu par des équipes en 3x8 heures. C'est certainement une très bonne solution dont le surcoût est à comparer aux économies faites en S.A.V.

- des thermomètres et hygromètres sont très utiles pour contrôler tout cela :

- thermomètres et hygromètres (enregistreurs par exemple) pour contrôler la température ambiante de l'atelier de moulage, pour réagir aux ouvertures de portes trop longues qui amènent le froid et l'humidité à tomber sur un moule prêt à être gelcoaté. Idem pour le magasin de stockage des tissus de verre, mats et rovings. L'idéal est d'avoir en plus un sas pour la sortie des coques et l'entrée des matières (tissus de verre), ce qui évite les fluctuations de température et d'humidité par ouvertures des portes de l'atelier de moulage.

- un thermomètre à contact qui permet de mesurer la température de paroi du moule que l'on va gelcoat.

- un thermomètre à liquide qui permet de mesurer la température du gelcoat que l'on va projeter.

- gélification trop tardive : elle est généralement due soit à un défaut de catalysation (mauvais % de catalyseur - catalyseur éventé, etc .....), soit à une température trop faible (inférieure à 15 - 18° C), soit à une humidité trop forte, les deux allant généralement de pair, soit à trop de diluant. Tant que la gélification n'est pas faite, le styrène (le diluant de la résine polyester) s'évapore. Or, dans le processus du durcissement, le styrène a une importance capitale pour avoir un durcissement complet. Donc, une mauvaise catalysation est en elle-même un défaut qui s'aggrave par la perte de styrène qui l'accompagne.

- application du premier mat dans un intervalle de temps correct :

- pas trop tôt, sinon la fibre de verre va pénétrer dans le gelcoat encore mou et va "pointer" à la surface (revoir chapitre 1, parag. 2-24°).

- pas trop tard, sinon la liaison chimique avec un gelcoat trop durci ne sera pas bonne.

- il faut un dosage précis et fiable du catalyseur pour obtenir un bon durcissement de la résine. Il faut un mélange complet du catalyseur en évitant une agitation trop énergique qui inclurait de l'air dans la résine. Un mélange à la main ne se fait pas en tournant le bâton le long de la paroi duseau (par centrifugation, le catalyseur restera sur le pourtour), mais en

faisant des mouvements en 8. Les équipements professionnels avec projection simultanée de résine et de durcisseur assurent une meilleure garantie de ce point de vue.

- le cycle de polymérisation : le styrène (le diluant de la résine polyester) s'évapore en grande partie dès le début du moulage. Or, dans le processus du durcissement, le styrène a une importance capitale. Donc la réticulation, c'est-à-dire le durcissement sera incomplet. D'autre part on retrouve dans le stratifié polymérisé des traces de styrène qui n'a pas réagi avec le polyester (styrène résiduel) et qui favorise le développement de l'osmose. Pour l'éviter il faudrait améliorer la polymérisation pour qu'elle soit plus complète.

De nombreux essais ont montré qu'un stratifié post-cuit (2 heures à 100°C par exemple) double la résistance au cloquage.

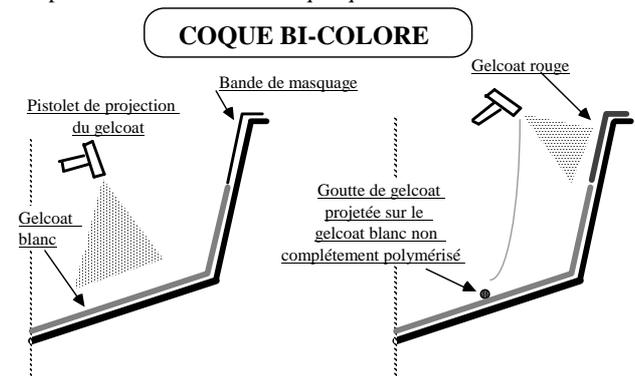
Ceci étant dû à une polymérisation plus complète, à une augmentation de la température de transition vitreuse (Tg) du gelcoat et de la résine et surtout à une diminution de l'écart entre Tg gelcoat et Tg résine : il y aura moins de gonflement différentiel et meilleure compatibilité entre la couche de gelcoat et le stratifié.

Mais ne rêvons pas, aucun chantier de production de masse ne dépensera un sou pour s'équiper d'un four de grandes dimensions pour faire une post-cuisson à 100°C. Contentons nous d'un atelier correctement chauffé pour que la polymérisation soit acceptable quoiqu' imparfaite.

- coques bi-coulores : prenons le cas d'une coque blanche avec une partie supérieure rouge :

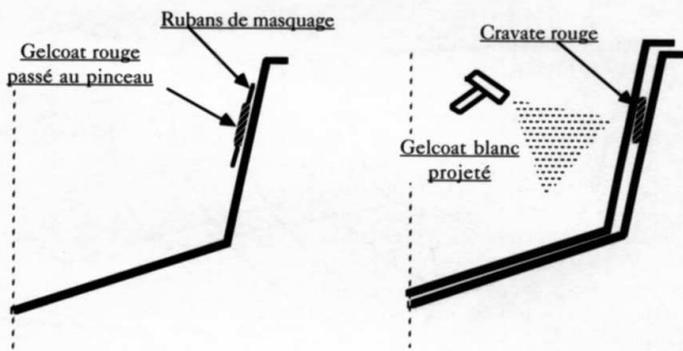
- 1ère solution (rencontrée principalement sur les petits bateaux à moteurs) : une bande de papier de masquage est disposée sur le haut du franc-bord et le gelcoat "général", le blanc, est projeté au pistolet. Puis, la bande de masquage est enlevée et le 2ème gelcoat rouge est projeté au pistolet. Si cela est fait trop tôt, le gelcoat rouge dissout (par le styrène qu'il contient) et "détrempe" le blanc qui devient plus poreux. A cela s'ajoute un autre risque : pour nettoyer le pistolet, on le rince à l'acétone avant de passer le gelcoat rouge. Les premiers instants de projection du gelcoat rouge seront sans doute faits avec un pistolet qui pulvérisera encore de l'acétone qui se trouvera projeté sur le gelcoat blanc qu'il dissout.

On peut avoir une osmose en quelques mois.



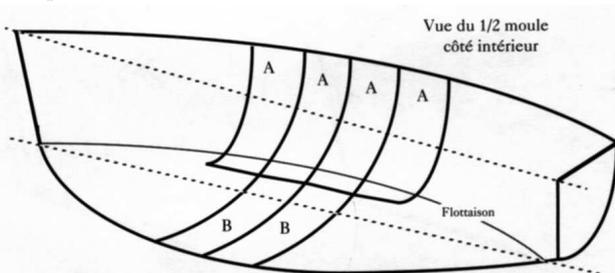
- 2ème solution : la bande de couleur (appelée quelquefois "cravate") est appliquée au pinceau, puis lorsqu'elle est suffisamment durcie, le gelcoat blanc est projeté au pistolet partout. Même si ce gelcoat projeté détrempe le 1er gelcoat de la cravate, comme celle-ci est au-dessus de la flottaison, il n'y a pas de problème.

## CRAVATE COLOREE

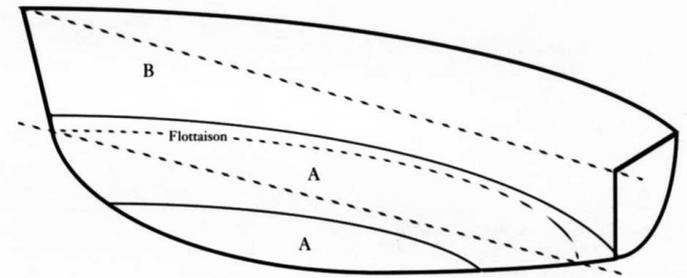
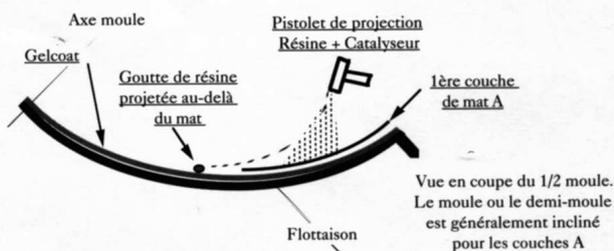


\*\*\*\*\*

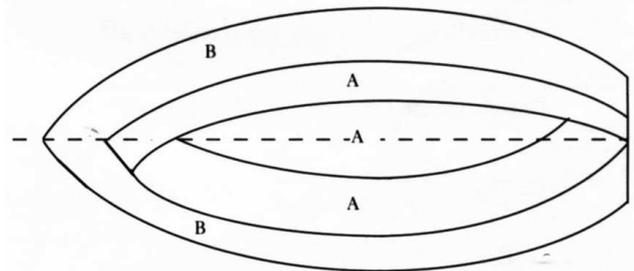
- processus du moulage : certains chantiers commencent le moulage par des bandes verticales, de la flottaison au liston. Le but étant de privilégier l'aspect de la coque pour la partie qui en sera visible : les francs-bords.



MOULAGE DES FRANCS-BORDS PAR BANDES VERTICALES A PUIS MOULAGE DES FONDS PAR BANDES B



MOULAGE DES FONDS PAR BANDES LONGITUDINALES A PUIS MOULAGE DES FRANCS-BORDS B



### - l'Agent de démoulage

Pour permettre le démoulage, un agent de démoulage est passé dans le moule avant projection de gelcoat. Les cires sont meilleures du point de vue de l'osmose que les solutions aqueuses d'alcool polyvinylique, de polyéthylèneglycol.

\*\*\*\*\*

### 4-8°) CONCLUSION : PRODUITS QUI COMMENCENT A ETRE DE PLUS EN PLUS EMPLOYES PAR LES CHANTIERS, POUR LES CONSTRUCTIONS NEUVES :

Selon les chantiers on rencontre, par ordre sensiblement croissant de degré de protection :

- Gelcoat ISO-NPG, mais n'est pas efficace si on reste avec une résine de stratification ORTHO.

- Gelcoat ISO-NPG, puis premier mat (ou les deux premiers mats) à liant poudre avec résine de stratification ISO (puis résine ORTHO classique pour le reste du stratifié).

- Gelcoat ISO-NPG, puis stratification avec résine ISO pour toute l'épaisseur du stratifié.

- Deux couches de gelcoat ISO puis stratification avec résine ISO pour le 1er ou les deux premiers mats qui sont à liant poudre, puis résine ORTHO classique pour le reste de l'épaisseur du stratifié dont les mats sont à liant émulsion classique.

- Une couche de gelcoat et une deuxième protection à base de résine polyester bisphénol, puis stratification classique.

Et cela en manipulant des petites bandes faciles à mettre correctement en place.

Par contre cela permet de déposer déjà des éclaboussures de résine sur la partie sous la flottaison, sur le gelcoat qui risque d'être dissous par le styrène de cette résine s'il n'est pas encore bien durci et d'autre part ces gouttes de résine auront le temps de perdre leur styrène : elles polymériseront mal et seront des sites de points osmostiques.

Il vaut mieux commencer le moulage par les parties basses et par de longues bandes longitudinales qui se décroisent naturellement avec la forme en creux du moule. Les gouttes de résine projetées à côté de la bande qui est posée se trouvent couvertes tout de suite par la bande A suivante. Les gouttes de résine projetées sur les francs-bords perdent leur qualité comme expliqué ci-avant mais comme on est au-dessus de la flottaison, cela n'a pas d'effet néfaste en ce qui concerne l'osmose.

- Une couche de gelcoat ISO-NPG et une deuxième de gelcoat écailles de verre, puis stratification avec résine ISO pour les deux premiers mats qui sont à liant poudre, puis résine ORTHO classique pour le reste de l'épaisseur du stratifié dont les mats sont à liant émulsion classique.

- Résine de stratification Vinylester (ou Vinylester modifiée) pour les deux premiers mats liant poudre, puis résine ORTHO classique pour le reste de l'épaisseur du stratifié : rarement employée pour la production de masse de bateaux de série.

etc... sachant que ces produits sont plus chers que ceux employés auparavant. A titre d'exemple on peut citer :

- gelcoat écailles de verre : 2,8 fois plus cher que le gelcoat ISO - NPG qui est déjà plus cher que l'ISO classique.
- résine polyester ISO : 20% plus chère que l'ORTHO.
- résine vinylester : 3 fois plus chère que l'ORTHO.

\*\*\*\*\*

On peut résumer en disant que l'amélioration de la résistance à l'osmose se situe à deux niveaux :

- en améliorant la barrière d'étanchéité : c'est le but visé avec l'époxy ou la vinylester en préventif ou en curatif, et des gelcoats améliorés.

- en choisissant des matériaux de stratification (résine ISO, résine vinylester, mat liant poudre) qui sont inertes vis à vis de l'eau et qui ne seront pas ou peu hydrolysés quand l'eau les atteindra après avoir franchi le gelcoat. L'amélioration à ce niveau là est la plus efficace.

\*\*\*\*\*

## EN GUISE DE CONCLUSION

1 - L'osmose affecte tous les bateaux en "plastique" (polyester renforcé de verre). Cela veut dire que dans leur vie ils n'échapperont pas au problème, surtout pour les bateaux faits avec une résine ORTHO, ce qui est le cas de la presque totalité des bateaux anciens et de 95% des bateaux encore fabriqués actuellement.

La qualité de fabrication et la qualité des matériaux utilisés ont une influence :

- sur le temps d'apparition de l'osmose.
- sur la gravité des dégâts résultant de l'osmose.
- sur la quantité d'eau absorbée et donc sur le temps de séchage du stratifié mis à nu au cours de la réparation. A ce propos, une mesure d'humidité du matériau est à faire pour toute expertise concernant l'osmose.

2 - Il faut se méfier de l'osmose des vieux bateaux (15 à 20 ans d'âge ou plus) qui ne se voit pas extérieurement. L'eau a fait son travail d'hydrolyse, donc de dégradation. Lorsque l'empilement de plusieurs couches de mats jouera le rôle de paroi semi-perméable, les cloques se verront alors. Mais elles seront profondément dans le stratifié.

Les bulles visibles sur l'extérieur de la coque sont en fait une bonne chose car c'est un moyen avertisseur simple.

3 - Les solutions possibles pour les nouvelles fabrications :

- traitement préventif par l'application d'un "bouclier" époxy ou vinylester.

- choix de meilleures matières du point de vue de l'osmose :  
- le gelcoat ISO/ORTHO et à fortiori le gelcoat ORTHO sont à abandonner.

Une amélioration notable est apportée par :

- gelcoat ISO ou ISO NPG (néopentyl glycol) si la résine de stratification est une ISO. Pour une résine de stratification ORTHO, le gelcoat ISO NPG est inutile, le gelcoat ISO est suffisant.

- gelcoat "ISO NPG avec écailles de verre qui "allongent" le circuit à parcourir par l'eau pour traverser le gelcoat à l'image des lauzes sur un toit de maison. Ce point est controversé, nous l'avons signalé.

- premières couches en mat de verre à liant "poudre" au lieu du liant "émulsion" traditionnel. C'est en fait un salutaire retour en arrière : au tout début de la construction de coques en polyester, c'est bien ce mat liant poudre qui était exclusivement utilisé, il n'y avait que celui-là.

Le mat liant émulsion est apparu peu après et a été un succès commercial fulgurant, tout le monde en voulait tellement il était confortable à utiliser : très bonne manipulabilité, très bonne souplesse et drapabilité. Ce mat venu d'Angleterre a été salué comme un réel progrès à l'époque ! L'histoire est aussi faite de pas en avant et de pas en arrière.

- résine de stratification polyester ISO au lieu de résine ORTHO traditionnelle. La nature de la résine que l'eau rencontre après avoir traversé le gelcoat, même si celui-ci est bon, est primordiale.

Ou encore mieux : résine vinylester ou "hybride" (vinylester modifiée - on commence à faire des "alliages" de polymères comme pour les alliages métalliques) au lieu de polyester.

4 - La grande majorité des anciens et très anciens bateaux en polyester n'a jamais été traitée contre l'osmose et ils naviguent encore. Pourtant il est clair qu'ils sont osmosés eux aussi. Le début de la fabrication polyester pour des bateaux de grande diffusion se situant aux environs de 1962 - 1967, on peut dire qu'un bateau polyester, même osmosé, peut durer 25/30 ans environ sans réparation. Mais il sera peut être trop tard quand on s'en apercevra et un traitement fait dès que l'osmose se révèle franchement est une sage précaution si on veut éviter ce risque.

Des études menées à l'IFREMER - Laboratoire Matériaux Marins - qui a étudié ces problèmes d'osmose, il ressort que, **ramené en eau douce à 15°C :**

En ce qui concerne le **cloquage du gelcoat :**

- Stratifié **ORTHO** : même avec un "bon" gelcoat ISO mais de faible épaisseur (0,3 mm), le cloquage peut se produire en moins d'un an.

Les cloques pourraient atteindre 2 cm après 4 ans.

- Stratifié **ISO** : le cloquage se produirait en 6 ans.

Les cloques n'atteindraient que 0,1 cm après 15 ans

En transposant en **eau de mer à 15°C**, les évaluations deviendraient :

- Stratifié **ORTHO** : le cloquage peut se produire en 2 à 3 ans. Ce qui me semble un peu sévère, ne l'ayant constaté sur le terrain qu'avec l'addition d'incidents de fabrication.

Les cloques pourraient atteindre 2 cm après 8 à 12 ans.

- Stratifié **ISO** : le cloquage se produirait en 12 à 18 ans.

En ce qui concerne le **cloquage entre deux plis du renfort :**

- Stratifié **ORTHO** : peut se produire entre 10/20 ans.

- Stratifié **ISO** : peut se produire entre 25/35 ans.

De mes constatations sur le terrain :

- il est "classique" et "typique" que l'osmose commence à se révéler au bout de 8 à 15 ans et que le cloquage passe sous les premiers plis du stratifié à 15/20 ans pour des bateaux construits correctement avec les matériaux de l'époque. C'est

un temps "typique" pour que l'eau ait réussi à passer à travers le gelcoat et à provoquer des dégâts qui sont visibles à l'extérieur et qui révèlent l'osmose.

- par contre, il est clair que si l'osmose est suffisamment rapide au point de se révéler extérieurement (par des cloques) après un an ou deux de séjour dans l'eau, cela révèle un défaut de mise en oeuvre ou un incident au cours de la fabrication.

#### 5 - Le contexte "coût de fabrication"

Bien que les plaisanciers pensent souvent le contraire, les coûts de fabrication des bateaux de plaisance sont très "tirés". Ce marché est un marché très concurrentiel où il est difficile de gagner de l'argent, c'est-à-dire de dégager des bénéfices et de survivre.

L'abaissement des coûts de fabrication est donc une recherche permanente que font tous les chantiers. Le coût des matières mises en oeuvre est donc important, avec des gradations différentes selon les matières et selon les quantités utilisées pour fabriquer le bateau. Diviser par deux le prix d'une matière qui est utilisée en quantité infinitésimale a une influence négligeable sur le prix total final.

Dans un voilier de 10 m par exemple, le stratifié principal verre + résine (coque + pont) représente environ 1500 kg dont environ 900 kg de résine. Là, le coût de la résine importe et choisir une résine deux fois plus chère va amener une augmentation du prix de vente de 20 000 F environ. Le chantier va chercher à réduire ce coût matière tout en respectant une qualité correcte. Est-ce que qualité correcte veut dire jamais d'osmose, ou osmose acceptable dans 5 ans, 20 ans, 30 ans ?

Si le but visé, qualitativement contraignant, oblige à choisir une résine beaucoup plus chère, c'est finalement un bateau de prix plus élevé que l'acheteur devra payer. L'équilibre prix/qualité, en ce qui concerne l'osmose en particulier, est déjà difficile à cerner pour le fabricant, il l'est aussi pour l'acheteur, car pour lui, le problème ne se résout pas seulement à l'aspect osmose, mais à tous les autres éléments qui constituent un bateau : esthétique, solidité, tenue à la mer, installations mécaniques et électriques, etc .....

Alors nous n'avons parlé que d'un problème, important sans doute, mais par rapport à l'ensemble que constitue un bateau, il demeure relativement petit. Pas infime tout de même, puisque j'ai réussi par cet ouvrage à vous y intéresser.

\*\*\*\*\*

#### Y a t'il encore des bateaux moulés en résine polyester ORTHO ?

Pour des petits bateaux, moteur ou voilier, qui trempent dans l'eau peu de temps, le temps de la saison d'été puis ils sont au sec plusieurs mois, pourquoi pas.

Pour des bateaux qui sont à l'eau tout le temps ? Je ne sais pas, j'espère que non ... mais. Il reste donc que vous devez poser la question et avoir une réponse sûre avant de signer.

La très grande majorité des chantiers ont opté pour la résine polyester ISO et les premiers mats à liant poudre en couche dure.

Certains sont même passés en vinylester, tant mieux, bravo.

Certains font un projeté avec résine ISO ou mieux vinylester en couche dure.

Mais on a quelquefois des cloques, très petites sous le gelcoat, même après peu d'années.

Le projeté a l'avantage de ne pas nécessiter de liant puisque c'est la mèche de roving qui est utilisée "brute", sans liant, et coupée par le pistolet hacheur qui la coupe et la projette en même temps que la résine et son catalyseur. L'absence de liant, c'est très bon vis à vis de l'osmose. L'inconvénient du projeté c'est que si on "ne presse pas assez sur le rouleau" pour "damer" ce tapis projeté, on peut laisser des creux beaucoup plus facilement qu'avec un mat.

C'est un petit défaut épidermique, il ne s'agit pas d'osmose structurelle.

La qualité de la résine de stratification (Vinylester) et l'utilisation de projeté sans liant permet de ne pas avoir d'osmose structurelle c'est à dire derrière le premier mat, dans le stratifié, avant 30 ans d'âge du bateau, au moins. Par contre il est plus sujet à une osmose épidermique juste derrière le gelcoat.

Dans ce cas je ne conseille pas de faire un traitement car pour le faire il va falloir sabler, laisser sécher et faire un multicouches époxy, tout cela en extérieur avec des conditions climatiques quelquefois hasardeuses, tout cela pour remplacer un projeté vinylester fait en atelier de moulage à ambiance contrôlée. Et tout cela pour des petites cloques superficielles et épidermiques qui n'ont aucune conséquence sur la résistance structurelle de la coque. Je pense que le jeu n'en vaut pas la chandelle. Mais il va falloir vivre avec.

\*\*\*\*\*

