



HAL
open science

**Contrôle qualité des matériaux composites marins.
Influence de plis orientés sur la contrainte de
cisaillement interlaminaire mesurée par essai de flexion
= Quality control of marine composites. Influence of
oriented plies on the ILSS measured by flexural test.**

Yves Perrot, Dominique Choqueuse, Nicolas Baral, Peter Davies

► **To cite this version:**

Yves Perrot, Dominique Choqueuse, Nicolas Baral, Peter Davies. Contrôle qualité des matériaux composites marins. Influence de plis orientés sur la contrainte de cisaillement interlaminaire mesurée par essai de flexion = Quality control of marine composites. Influence of oriented plies on the ILSS measured by flexural test.. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00390482

HAL Id: hal-00390482

<https://hal.science/hal-00390482>

Submitted on 11 Jun 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contrôle qualité des matériaux composites marins. Influence de plis orientés sur la contrainte de cisaillement interlaminaire mesurée par essai de flexion.

Quality control of marine composites. Influence of oriented plies on the ILSS measured by flexural test.

Yves Perrot¹, Dominique Choqueuse², Nicolas Baral³ et Peter Davies²

1 : Société NCD
Technopole Brest Iroise 29200 Brest
e-mail : yves.perrot@ncd-composites.com

2 : Service Matériaux et Structures
IFREMER centre de Brest 29280 Plouzané
e-mail : dominique.choqueuse@ifremer.fr, peter.davies@ifremer.fr

3 : Société CDK Technologies
Port la Forêt - 29940 La Forêt Fouesnant
e-mail : cdk-be@wanadoo.fr

Résumé

Pour des raisons économiques, de performances ou de sécurité, la connaissance des propriétés des composites marins est devenu un enjeu majeur. Cet article s'intéresse au problème du contrôle qualité et propose de discuter des avantages et limites de plusieurs analyses disponibles : analyses thermique et physico-chimiques, imagerie, essai mécanique de cisaillement interlaminaire. Pour ce faire, des composites verre/époxy et carbone/époxy sont réalisés respectivement par infusion de résine sous vide et à l'aide de préimprégnés sous autoclave. En particulier, l'essai de cisaillement interlaminaire est étudié en faisant ressortir l'influence des défauts, de la compliance de l'éprouvette et de plis orientés à $\pm 45^\circ$ présents dans l'empilement.

Abstract

In marine structures, the control of composite material properties is essential to ensure high performance and security levels and economic profitability. The aim of this paper is to discuss the main techniques available on quality control : thermal and physico-chemical analysis, imagery, interlaminar shear test. Glass/epoxy and carbon/epoxy laminates are transform by resin infusion technique and with prepreg by autoclave respectively. Three points flexure test and interlaminar shear stress (ILSS) are especially analyse to show the influence of void content, sample stiffness and stacking sequence with $\pm 45^\circ$ oriented plies.

Mots Clés : Structures marines, contrôles qualité, cisaillement interlaminaire

Keywords : Marine structures, quality control, ILSS

1. Introduction

Aujourd'hui, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour réaliser des structures marines ; ce sont en particulier les matériaux référence en construction navale de plaisance et de compétition. Dans ce domaine, les avantages des composites sont nombreux : production de pièces de grandes dimensions (Fig. 1) et de formes complexes en peu d'opérations, obtention de propriétés mécaniques spécifiques élevées, résistance naturelle à la corrosion, production en série à bas coût pour la plaisance, ...

En fonction des applications, les principales problématiques concernant la fabrication sont les suivantes :

- En plaisance une concurrence mondiale de plus en plus importante et une tendance à la hausse du prix des matières premières contrainent les constructeurs à optimiser leur production afin de rester compétitifs. Ces derniers doivent aussi tenir compte des dernières évolutions réglementaires en termes de dimensionnement et de construction. Par exemple, la récente norme ISO 12215-5 (2008) [1] est un texte sur lequel s'appuient désormais les organismes notifiés pour certifier les nouvelles unités avant leur mise en circulation sur le marché.
- Pour la course, toujours poussée par de nouvelles innovations architecturales, c'est la recherche du meilleur équilibre entre performances et sécurité qui domine. Les récentes avaries montrent qu'il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine et que de nombreux problèmes restent ouverts.



Fig. 1. Maxi-trimaran Banque Populaire V – Longueur : 40 m, Largeur : 23 m, Déplacement : 23 T.
(Source Team Banque Populaire)

Dans ce contexte, la connaissance des propriétés matériaux nécessaires au dimensionnement et le contrôle qualité des structures jouent des rôles majeurs. Pour ce texte nous proposons d'aborder la question du contrôle qualité où plusieurs catégories de contrôle existent : contrôles non-destructifs (ultrasons, thermographie infrarouge, ...), analyses physico-chimiques et essais mécaniques. L'essai de flexion trois points avec appuis rapprochés ou de cisaillement interlaminaire tient une place importante dans le contrôle qualité mécanique. Il est simple à mettre en œuvre et permet de tester des échantillons prélevés directement sur les structures réelles. Toutefois, cette simplicité d'utilisation cache une vraie complexité quant à l'interprétation de la valeur de la contrainte apparente de cisaillement interlaminaire obtenue. Cette dernière peut en effet être influencée par de nombreux paramètres [2-3] comme par exemple : la présence de défauts et leur localisation, les propriétés de la matrice et son état de réticulation, la séquence de l'empilement testé.

Pour cette étude, trois types de matériaux marins hautes performances ont été sélectionnés : un composite verre/époxy réalisé par infusion de résine sous vide, deux composites carbone haute résistance/époxy et carbone haut module/époxy transformés à partir de préimprégnés sous autoclave. L'objectif retenu est double. D'une part, discuter des analyses physico-chimiques disponibles pour renseigner sur l'état de réticulation des composites, visualiser et quantifier d'éventuels défauts (microscopie optique, tomographie RX, mesure de taux de vide par densité ou analyse d'images). Puis d'autre part, identifier les principaux paramètres (taux de vide, souplesse de l'éprouvette, nature de l'empilement) qui influencent la valeur de la contrainte de cisaillement interlaminaire mesurée par essais de flexion trois points avec appuis rapprochés.

En particulier, les effets de plis orientés au sein d'un empilement sont étudiés. Les empilements employés pour fabriquer des pièces structurelles étant rarement composés uniquement de plis à 0° [4], deux séquences sont considérées : $[0_7]_s$ et $[\pm 45/0_5]_s$. Pour des matériaux de qualité similaire (état de réticulation, taux de fibres et défauts), une baisse de la contrainte de cisaillement interlaminaire significative est observée avec l'empilement comportant des plis orientés en peau.

2. Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux mis en oeuvre

Pour réaliser les matériaux nécessaires à l'étude, deux techniques de mise en oeuvre ont été retenues : l'infusion de résine sous vide et la transformation de tissus préimprégnés par autoclave. Ces deux techniques, qui permettent d'obtenir un taux de renfort élevé, sont largement employées pour transformer des pièces composites hautes performances dans le domaine naval.

Des plaques tests sont réalisées avec chaque technique en faisant intervenir deux échantillonnages différents : $[0_7]_s$ et $[\pm 45/0_5]_s$. Les matériaux de base, sélectionnés en fonction du procédé de transformation, sont des références commerciales :

- Infusion : résine époxy Hexion MGS RIM 135, renfort unidirectionnel de verre Cotech (Sicomini).
- Autoclave : nappes unidirectionnelles préimprégnées, fibres de carbone haute résistance (HR)/résine époxy M 10 (Hexcel) et fibres de carbone haut module (HM)/résine époxy R 367-2 (Structil).

Le Tableau 1 détaille ces matériaux et les épaisseurs moyennes relevées sur les plaques suite à leur mise en oeuvre.

Matériau	Résine	Renfort	Empilement	Épaisseur moyenne (mm)
I1	Hexion MGS RIM 135	UD verre 300g/m ² Cotech Sicomin	$[0_7]_s$	3,5 ± 0,1
I2			$[\pm 45/0_5]_s$	3,6 ± 0,1
P1	M 10	Fibre HR 300 g/m ²	$[0_7]_s$	4,2 ± 0,1
P2			$[\pm 45/0_5]_s$	4,1 ± 0,1
P3	R 367-2	Fibre HM 300 g/m ²	$[0_7]_s$	4,2 ± 0,1

Tab. 1. Matériaux mis en oeuvre.

2.2 Caractérisation physico-chimique

2.2.1 Calorimétrie différentielle

Les mesures de calorimétrie différentielle sont réalisées avec une DSC modulée TA Instruments 2920. Les paramètres de mesures employés sont les suivants : vitesse de montée en température de 5°C/min, amplitude de modulation du signal de 1°C et période de modulation de 60s. Deux passages en température sont effectués avec ces paramètres. Les températures de transition vitreuse T_g sont mesurées sur la partie réversible du signal au point d'inflexion de la courbe.

2.2.2 Taux de vide – Méthode par densité

La procédure de la norme ISO 14127 (2008) peut être utilisée pour estimer un taux de vide φ_v . Ce dernier est calculé à partir de mesures de densité ρ_c et de taux de fibres w_f du composite à l'aide des relations suivantes :

$$\varphi_v = 100 - (\varphi_f + \varphi_r) \quad (\text{eq. 1}) \quad \varphi_f = \frac{w_f \rho_c}{\rho_f} \quad (\text{eq. 2}) \quad \varphi_r = \frac{(1 - w_f) \rho_c}{\rho_r} \quad (\text{eq. 3})$$

Les expressions des taux volumiques de fibres φ_f et de résine φ_r nécessitent de connaître les densités des fibres ρ_f et de la résine ρ_r . Plusieurs méthodes normalisées existent pour mesurer la densité du composite et son taux de fibres. Par exemple la méthode par immersion pour la densité et la méthode par combustion pour le taux de fibres. Typiquement, un minimum de trois échantillons est nécessaire afin de garantir la validité des mesures.

2.2.3 Observations et analyses d'images

Pour observer d'éventuels défauts au sein des composites, deux techniques sont bien adaptées au contrôle qualité : la traditionnelle microscopie optique et la tomographie RX. Cette dernière permet d'obtenir

un objet virtuel en trois dimensions dans lequel il est possible de visualiser des défauts sur tout le volume de l'échantillon testé. La tomographie RX ne nécessite par ailleurs aucune préparation d'échantillon particulière ce qui est un avantage par rapport aux techniques de microscopie.

Si la qualité des images le permet, plusieurs logiciels commerciaux sont disponibles (par exemple *Visilog*) pour effectuer une analyse. Ils sont généralement basés sur la décomposition des images en niveaux de gris et la définition d'un seuil qui permet de différencier matière et vide (Fig. 1). Un taux de vide est alors déterminé par un rapport de surfaces.

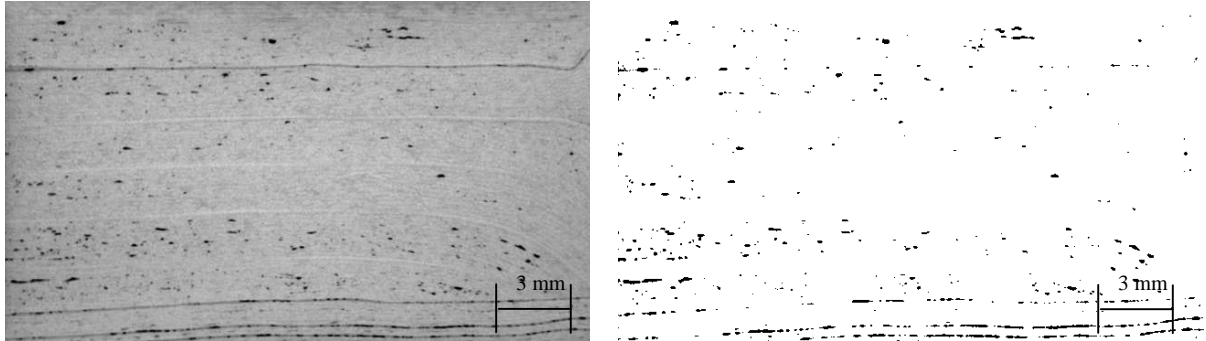


Fig. 1. Analyse d'une image obtenue par tomographie RX.

2.3 Cisaillement interlaminaire

2.3.1 Essai de flexion avec appuis rapprochés

L'essai de flexion trois points avec appuis rapprochés est un essai mécanique très utilisé en contrôle qualité car il permet de tester des échantillons ayant été directement prélevés sur des pièces industrielles. Plusieurs normes d'essais existent pour des composites renforcés de fibres unidirectionnelles (ISO 14130, ISO 3597, L 17412, ...). Un rapport longueur entre appuis / épaisseur de 5 est généralement préconisé et une contrainte apparente de cisaillement interlaminaire CIL peut être déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$CIL = \frac{3F}{4bh} \quad (\text{eq. 4})$$

avec, F l'effort maximal relevé au cours de l'essai, l'épaisseur h et la largeur b de l'éprouvette.

2.3.2 Analyse de l'essai

Pour analyser l'essai de flexion trois points avec appuis rapprochés, l'expression de la compliance C de l'éprouvette faisant intervenir la contribution du cisaillement transverse est utilisée.

$$C = \frac{l^3}{48 \langle EI \rangle} + \frac{kl}{4 \langle GS \rangle} \quad (\text{eq. 5})$$

avec, l la longueur entre appuis, $\langle EI \rangle$ la rigidité équivalente de flexion, $\langle GS \rangle$ la rigidité équivalente de cisaillement et k le coefficient de section réduite pris à 6/5 pour une poutre homogène. Notons que la compliance de l'éprouvette dépend à la fois des propriétés élastiques du matériau et de la longueur entre appuis de l'essai.

Les propriétés élastiques E_{11} , G_{12} et G_{23} des plis rentrant dans le calcul des rigidités $\langle EI \rangle$ et $\langle GS \rangle$ sont déterminées à l'aide d'équations micromécaniques classiques présentées dans la littérature [5] et à partir des propriétés de fibres et de matrice du Tableau 1. Les taux volumiques de fibres utilisés, fonction des épaisseurs et du grammage total des stratifiés (Tab. 1) et de la densité des fibres (Tab. 2), sont estimés à : 47,0 % pour le verre, 55,5 % pour le carbone HR et 55,0 % pour le carbone HM.

En complément, un modèle éléments finis de l'éprouvette de flexion est réalisé sous le code de calcul commercial *Magics*. Pour des raisons de symétries géométriques et matérielles seulement $\frac{1}{4}$ de l'éprouvette est modélisé (Fig. 2). Des éléments volumiques à huit nœuds sont utilisés avec un élément dans l'épaisseur de chaque couche. Les propriétés élastiques des couches sont déterminées comme précédemment à l'aide d'expressions micromécaniques. Les calculs sont effectués en élasticité linéaire et petits déplacements. Le principe retenu pour analyser l'éprouvette est le suivant : conditions de déplacement imposé Uz , calcul des réactions totales du modèle suivant z et détermination d'une contrainte moyenne apparente de cisaillement interlaminaire (eq. 4).

	Matrice époxy	Verre E	Carbone HR	Carbone HM
ρ (kg/m ³)	1200	2560	1800	1820
E (GPa)	3,2	72,0	230,0	390,0
G (GPa)	1,1	29,0	50,0	20,0
ν	0,35	0,25	0,30	0,35

Tab. 2. Propriétés élastiques des fibres et de la matrice.

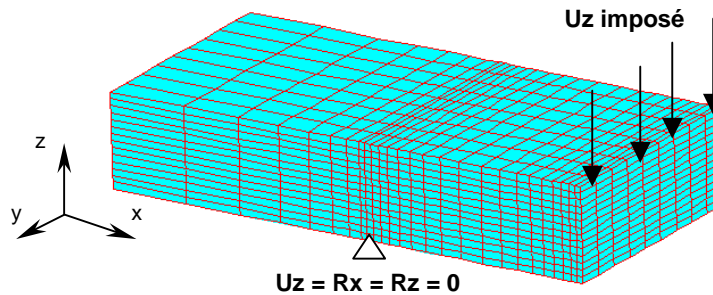


Fig. 2. Modèle de l'éprouvette de cisaillement interlaminaire.

3. Contrôles physico-chimiques

3.1 Etat de réticulation

Tout d'abord il est important de souligner que la matrice joue un rôle capital dans les performances et la durabilité des matériaux composites à usage marins. Les propriétés potentiellement dépendantes de celles de la matrice sont par exemple : le vieillissement en eau de mer [6], le seuil d'endommagement [7], les propriétés en compression [8], les performances en fatigue, ...

Au travers son état de réticulation, les propriétés de la matrice sont affectées par les conditions de transformation employées pour produire des pièces composites. En construction navale de plaisance où le procédé de moulage au contact est encore répandu, la réaction de polymérisation s'effectue à température ambiante et les pièces obtenues sont généralement sous-réticulées. Les techniques d'analyses thermiques (calorimétrie différentielle, analyse mécanique dynamique) permettent de renseigner sur l'état de réticulation notamment en mesurant une température de transition vitreuse T_g . Une précédente étude sur les résines polyester [9] a clairement montré le lien entre temps de polymérisation, T_g et propriétés mécaniques (Fig. 3).

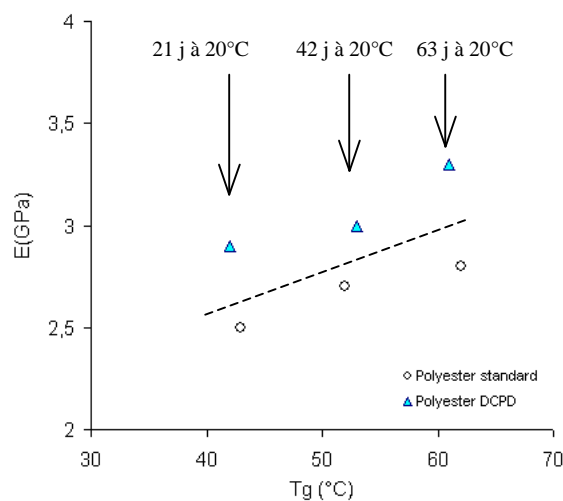


Fig. 3. Module d'élasticité de résines polyester en fonction de l'état de réticulation.

En raison de la faible quantité de matière nécessaire pour la mesure, environ 10 mg, la calorimétrie différentielle est bien adaptée au contrôle de cuisson des pièces industrielles. L'utilisation d'une DSC modulée permet d'effectuer des mesures plus précises en séparant les différentes contributions du signal :

phénomènes réversibles dépendants de la capacité calorifique de l'échantillon (T_g) et phénomènes non réversibles ou cinétiques (pic de polymérisation, relaxation enthalpique, ...).

Pour cette étude, les T_g relevées sur chaque type de matériau (Tab. 3) sont homogènes. La résine époxy pour infusion présente une T_g conforme aux indications de la fiche technique fournisseur mais beaucoup plus faible que celles des résines rentrant dans la composition des préimprégnés. Entre les deux préimprégnés des différences sont également notées, la résine R 367-2 conduisant à une T_g inférieure d'environ 20°C par rapport à la résine M 10.

Matériau	T_g passage 1 (°C)	T_g passage 2 (°C)
I1	76	-
I2	77	-
P1	138	127
P2	137	-
P3	110	105

Tab. 3. T_g des matériaux tests.

Par ailleurs, deux observations conduisent à mettre en évidence la présence de contraintes résiduelles pour les matériaux P1 et P3 :

- au premier passage en température, un pic endothermique de relaxation est relevé en fin de T_g sur le signal total et non sur sa partie réversible (Fig. 4)
- une baisse significative de T_g (entre 5 et 10°C) est visible suite à un deuxième passage en température.

Les valeurs de T_g sont en effet largement influencées par la mobilité des chaînes du réseau thermodurcissable [10]. Un premier chauffage permet de relaxer d'éventuelles contraintes résiduelles. Si tel est le cas, les chaînes du réseau deviennent plus mobiles ce qui se manifeste par une diminution de T_g lors d'un deuxième passage en température.

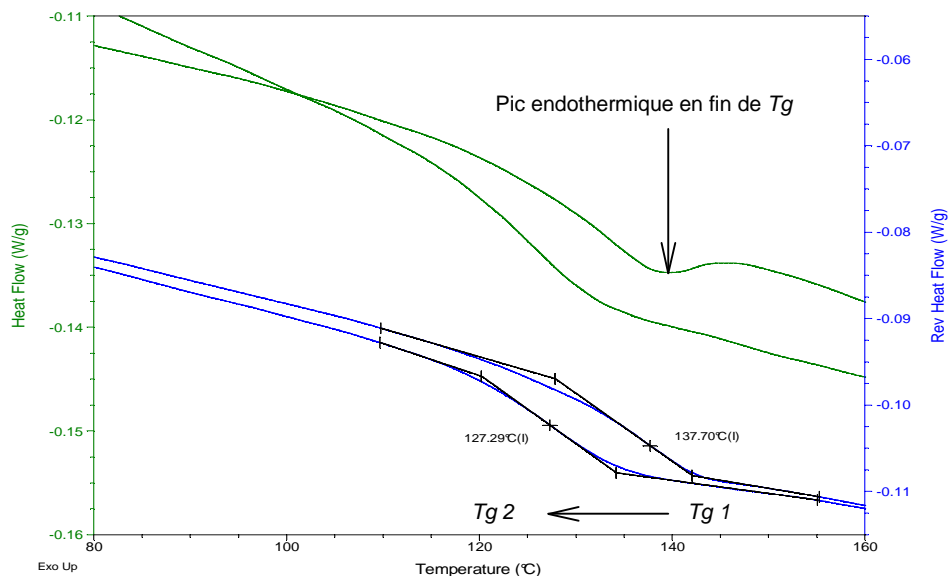


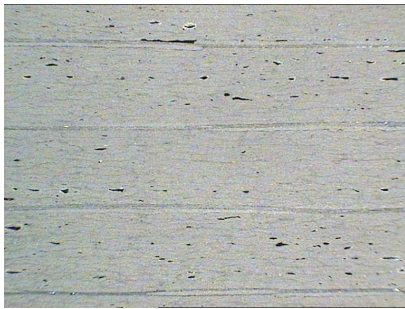
Fig. 4. Thermogramme DSC.

3.2 Proportion et localisation de défauts

Au paragraphe 2.2, deux méthodes permettant d'évaluer un taux de vide T_v ont été présentées : par le calcul à partir de mesures de densité et de taux de fibres, par analyse d'images à partir de micrographies. Une comparaison de ces deux méthodes est présentée Fig. 5. pour un composite carbone/époxy. Les taux de vide obtenus sont similaires. Toutefois, plusieurs observations doivent être faites sur les avantages et limites de ces méthodes. Par analyse d'images, l'étude de plusieurs sections est nécessaire en raison du caractère local de la mesure. Les clichés doivent être également de très bonne qualité afin d'identifier correctement les vides. L'estimation du taux de vide par le calcul présente l'avantage d'être plus globale car les mesures sont effectuées sur de petits volumes de matière. La pertinence des calculs est en revanche fortement dépendante de la connaissance précise des densités des fibres et de la matrice. Ces densités sont difficilement mesurables et bien souvent ce sont les valeurs des fiches techniques fournisseurs qui

doivent être prises comme données d'entrée dans le calcul. Dans le cas de pièces réalisées par le procédé d'infusion, notons toutefois qu'il est possible de mesurer la densité de la matrice sur des carottes résiduelles.

Ceci étant, l'estimation d'une proportion de défauts permet de fixer un critère de validation en fonction du procédé de transformation. Pour des composites marins hautes performances qui comportent des taux de renforts élevés, la limite de 3% de taux de vide est généralement employée.



T_v par densité (%)	T_v par analyse d'images (%)
$1,7 \pm 0,7$	$1,2 \pm 0,1$

Fig. 5. Comparaison de taux de vides T_v obtenus par densité et analyse d'images.

Déterminer une proportion limite de défauts doit cependant être vue comme une étape dans le processus d'acceptabilité d'une pièce. Ces mesures complètent idéalement des contrôles non destructifs type ultrasons et surtout des observations de sections de matériaux. En effet, renseigner sur la géométrie, la taille et la localisation des défauts est capital. Si l'on prend l'exemple d'une pièce soumise à une sollicitation globale de flexion, un défaut acceptable au voisinage de la fibre neutre peut devenir critique dans la zone de déformation maximale en peau (Fig. 6).

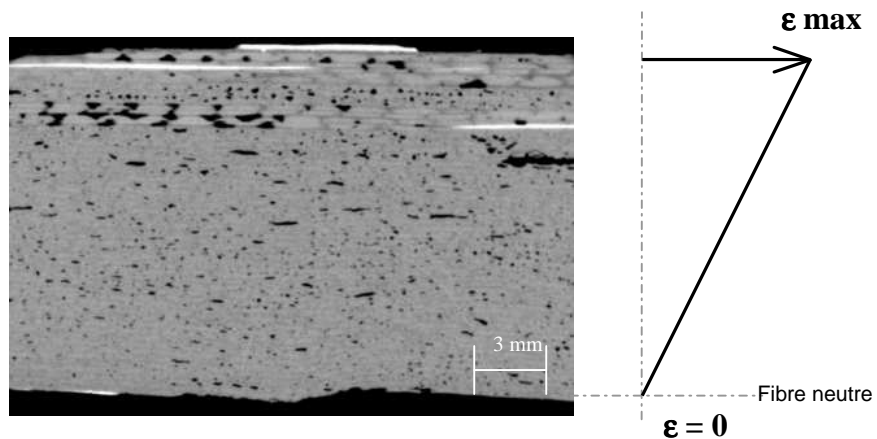


Fig. 6. Demi-section d'une pièce soumise à une sollicitation de flexion

4. Analyse de l'essai de cisaillement interlaminaire

4.1 Influence des défauts

Utilisé lors de contrôles qualité, l'essai de flexion trois points avec appuis rapprochés contribue à identifier la présence de défauts. Si l'on effectue une comparaison par rapport à une référence saine, la présence de défauts se traduit par une baisse de la contrainte apparente de cisaillement interlaminaire CIL . Greszczuck [11] propose une relation (eq. 6) qui permet d'estimer cette baisse de CIL à partir d'un taux de vide T_v du composite et de son taux de fibres V_f en volume.

$$\frac{CIL}{CIL_{T_v}} = 1 - \frac{\pi}{4} \left(\frac{6T_v}{\pi(1 - V_f)} \right)^{2/3} \quad (\text{eq. 6})$$

Dans notre étude, deux séries de matériaux $P1$ comportant des taux de vides respectifs de 0,5 et 1,9% ont été retenues. Pour un composite carbone/époxy de cette nature et dépourvu de défauts une valeur de CIL de 65 MPa peut être prise comme référence. Avec cette référence, les valeurs de CIL estimées à l'aide de la relation précédente sont respectivement de 61 et 55 MPa pour 0,5 et 1,9% de taux de vide. Ces

valeurs sont très proches de celles mesurées expérimentalement pour lesquelles une baisse de 16% de CIL est observée entre les deux séries $P1$ (Fig. 7).

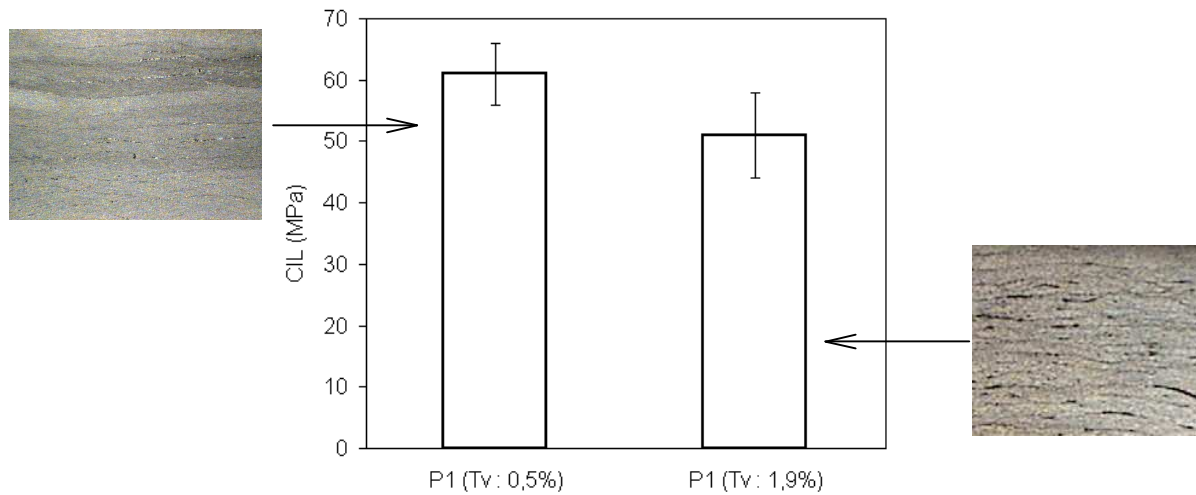


Fig. 7. CIL de composites $[0_7]_s$ en fonction du taux de vide.

4.2 Influence de la compliance de l'éprouvette

D'un point de vue mécanique, la répartition des contraintes de traction, compression et cisaillement au sein de l'éprouvette de flexion trois points est liée à sa souplesse globale qui fait intervenir ses propriétés matérielles et géométriques. Cette souplesse peut être estimée à l'aide de l'expression de la compliance de l'éprouvette (eq. 5). Les paramètres qui influencent cette compliance sont : les modules d'élasticité des plis rentrant dans la composition du composite, la géométrie de l'éprouvette (épaisseur h , largeur b) et la distance entre appuis l . Pour l'essai de flexion trois points avec appuis rapprochés, les normes proposent des conditions d'essais pour les composites renforcés de fibres unidirectionnelles. Des rapports l/h compris entre 4 et 6 et une largeur b de $5h$ ou supérieure à 10 mm sont préconisés. Pour illustrer les effets de la compliance de l'éprouvette, les matériaux $I1$, $P1$ et $P3$ de composition $[0_7]_s$ et pour lesquels l'influence des défauts est négligeable ($Tv < 0,5\%$) ont été analysés.

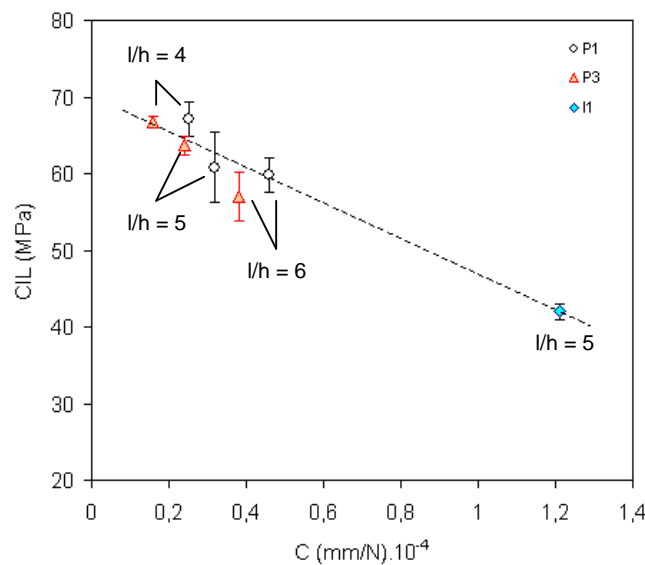


Fig. 8. CIL de composites $[0_7]_s$ ($Tv < 0,5\%$) en fonction de la compliance de l'éprouvette.

Les résultats obtenus (Fig. 8) montrent qu'il existe une relation directe entre la compliance et la contrainte de cisaillement interlaminaire mesurée. L'influence de la nature du renforcement (verre, carbone HR ou HM) et du rapport l/h pour un même matériau sont clairement mis en évidence. Pour cette campagne de tests, en faisant l'hypothèse d'une relation linéaire, la résistance au cisaillement interlaminaire CIL s'exprime en fonction de la compliance C de l'éprouvette par la relation :

$$CIL = 70 - 23C$$

(eq. 7)

Afin de valider cette relation, d'autres essais seront nécessaires notamment en prenant en compte des composites réalisés en voie humide.

4.3 Influence de plis orientés en peau

Les échantillonnages des matériaux composites marins font intervenir des plis unidirectionnels à 0° mais aussi de nombreux plis orientés, le plus souvent à ± 45° et 90°. Pour des pièces structurales, ces plis sont intercalés entre des zones de fibres à 0° et bien souvent situés en surface. L'effet de tels plis orientés en peau est étudié au travers les matériaux *I2*, *P2* et pour des échantillons prélevés dans le cadre d'un contrôle qualité d'une pièce industrielle réelle. Ces derniers présentent une proportion de fibres orientées (environ 20% de l'épaisseur totale) similaires à celles des matériaux tests. Les matériaux *I1* et *P1* ainsi que la zone centrale des échantillons de la pièce industrielle (fibres orientées à 0°) sont pris comme référence. Les valeurs expérimentales obtenues sont ensuite confrontées aux contraintes moyennes apparentes de cisaillement interlaminaires obtenues à partir de modèles éléments finis des éprouvettes (Fig. 9).

Une baisse de *CIL* est observée pour les trois matériaux comportant des plis orientés en surface. Ces baisses sont respectivement de 17, 27 et 32% pour *I2*, *P2* et la pièce réelle. Notons que cet effet est moins important pour le composite renforcé de fibres de verre. Les modèles éléments finis *I2 EF* et *P2 EF*, ayant comme valeurs cibles respectives *I1* et *P1*, conduisent à une bonne estimation des contraintes mesurées. Des écarts par rapport aux valeurs expérimentales de 8% pour *I2* et 3% pour *P2* sont observés.

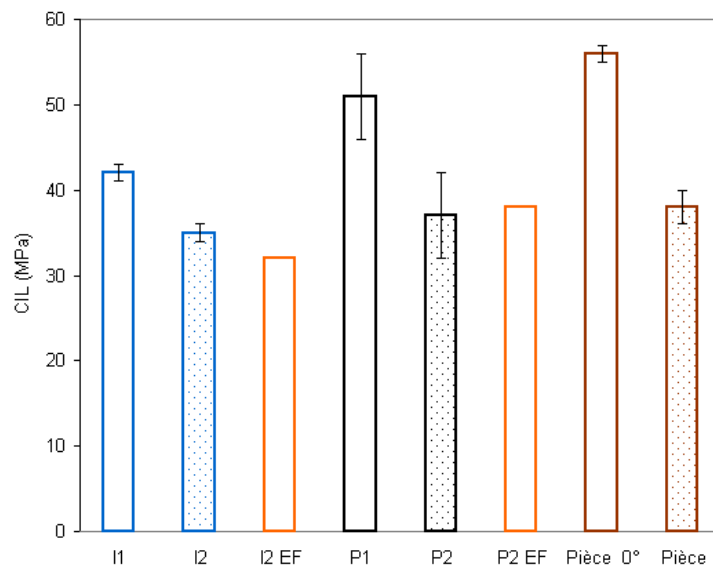


Fig. 9. *CIL* en fonction de plis orientés en peau ($l/h=5$).

5. Conclusion

Les problématiques rencontrées en construction navale de plaisance et de compétition sont différentes mais conduisent à mieux connaître les propriétés des matériaux composites utilisés majoritairement pour produire des pièces structurales. La connaissance des propriétés des composites marins fait intervenir la validation de leur qualité de fabrication. Dans cette étude, ce thème a été abordé au travers des analyses physico-chimiques et l'essai mécanique de cisaillement interlaminaire. Les tests réalisés sur des composites verre/époxy et carbone/époxy permettent de faire ressortir les observations suivantes.

Propriétés de la matrice : la matrice joue un rôle majeur dans les performances et la durabilité des composites marins. Au travers son état de réticulation, ses propriétés sont directement dépendantes des techniques et conditions de mise en oeuvre. L'analyse thermique par DSC, en mesurant des températures de transition vitreuse, est un bon moyen pour contrôler un état de réticulation et permet également d'identifier la présence de contraintes résiduelles.

Présence de défauts : deux méthodes ont été présentées afin d'évaluer une proportion de défauts ou taux de vide. A partir de ces mesures, des critères peuvent être définis pour valider des pièces en fonction du procédé de transformation utilisé. Ces mesures ne sont toutefois pas suffisantes pour décider de rebuter

une pièce. Par rapport au type de sollicitation mécanique rencontré, il est en effet important de pouvoir visualiser et localiser les défauts à l'aide de techniques d'imagerie (microscopie, tomographie RX).

Cisaillement interlaminaire : l'essai de flexion trois points avec appuis rapprochés est très utilisé comme moyen de contrôle qualité mécanique de pièces réelles. Il permet de mesurer une contrainte apparente moyenne de cisaillement interlaminaire (*CIL*). Pour des composites renforcés uniquement de fibres unidirectionnelles orientées à 0°, la compliance de l'éprouvette et le taux de vide influencent directement les valeurs de *CIL* mesurées. La présence de plis orientés à $\pm 45^\circ$ en peau contribuent aussi à faire chuter sensiblement les valeurs de *CIL*. Les empilements utilisés pour les structures marines comportent généralement une part non négligeable de plis orientés à 45°. Une attention particulière doit donc être apportée lors de l'analyse d'essais de cisaillement interlaminaires effectués sur ce type d'empilement.

Afin de renseigner sur la qualité de fabrication des matériaux marins, plusieurs analyses ont été discutées : analyses thermiques et physico-chimiques, imagerie, essai mécanique de cisaillement interlaminaire. Complémentaires, ces analyses contribuent à valider avec un maximum de garanties les pièces structurelles composites transformées en construction navale.

Références

- [1] NF EN ISO 12215 – 5 « Petits navires - Construction de la coque et échantillonnage - Partie 5 : pressions de conception pour monocoques, contraintes de conception, détermination de l'échantillonnage ». 2008.
- [2] C. Baley, P. Davies, Y. Grohens, G. Dolto, « Application of interlaminar tests to marine composites. A literature review ». *Applied Composite Materials*, Vol. 11, 2004.
- [3] N. St John, J. Brown, « Flexural and interlaminar shear properties of glass-reinforced phenolic composites ». *Composites Part A*, 29A, 1998.
- [4] H. Devaux, P. Casari, D. Choqueuse, P. Davies, « Comportement en compression et dimensionnement de composites à fibres très hauts modules pour mâts de voiliers de compétition ». *Comptes-rendus des 14^e Journées Nationales sur les Composites (JNC14)*, Compiègne, 22-24 mars 2003.
- [5] J.M. Berthelot, « Matériaux Composites ». *Lavoisier*, 2005.
- [6] D. Choqueuse, P. Davies, F. Mazas, R. Baizeau, « Aging of composites in water : comparison of five materials in terms of absorption kinetics and evolution of mechanical properties ». *High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites*, ASTM STP 1302, Vol. 2, pp. 73-98, 1997.
- [7] Y. Perrot, C. Baley, Y. Grohens, P. Davies, « Damage resistance of composite based on glass fibers reinforced low styrene emission resins for marine applications ». *Applied Composite Materials*, 2007.
- [8] R. Jones, « Mechanics of Composite Materials », *Taylor and Francis*, 1999.
- [9] C. Baley, Y. Perrot, P. Davies, A. Bourmaud, Y. Grohens, « Mechanical properties of composites based on low styrene emission polyester resins for marine applications ». *Applied Composite Materials*, 2006.
- [10] J. Rault, « Les polymères solides », Cépaduès éditions, 2002.
- [11] L.B. Greszczuck, « Effects of voids on strength properties of filamentary composites ». *22nd Annual Meeting of the Reinforced Plastics Division*, Society of The Plastics Industry, Washington DC, 1967.