

21

AMELIORATION DE LA RESISTANCE DES STRATIFIES POUR BATEAUX*

M. HILDEBRAND¹

Résumé - Les propriétés des matériaux de plus de cinquante stratifiés différents fabriqués par un groupe de chantiers navals finlandais ont été mesurées dans un grand projet d'essais. Des essais de traction, compression, flexion, cisaillement interlaminaire et de choc ont été effectués pour tous les stratifiés. Parmi d'autres, différentes résines polyester, différents tissus tissés et non-tissés, des mats à fibres coupées et des rovings unidirectionnels ont été utilisés comme matériaux de base pour plis. L'effet des divers paramètres a été déterminé, pas seulement au maximum de déformation à la rupture, mais également au niveau de déformation auquel la première rupture apparaît. Les principales différences entre le rapport des résultats d'essais statiques et de choc des différents matériaux ont été déterminées. Les résultats montrent qu'en choisissant efficacement certains paramètres des matériaux, les résistances dans le plan aussi bien qu'au choc des stratifiés de base pour bateaux peuvent être accrues de façon significative. Des essais de choc ont ensuite été développés et une nouvelle méthode pour des stratifiés aussi bien monocouches que sandwichs est proposée.

Mots clés : matériaux composites, stratifiés, bateaux, résistance mécanique.

INTRODUCTION

Les bases de chaque analyse structurale sont une méthode de calcul valable, la connaissance des charges et une série de valeurs de résistance mécanique et de rigidité de matériau, pour déterminer le comportement et les zones critiques de la structure.

Les valeurs de résistance mécanique de stratifiés pour petites embarcations sont normalement obtenues par essais. Pour les stratifiés, à ce jour, aucune méthode de prédiction analytique satisfaisante n'a été obtenue. La plupart du travail associé au problème de prédiction de résistance mécanique a été effectué sur des stratifiés utilisés dans

* traduit de l'anglais

¹VTT/ Technical Research Centre of Finland - Ship Laboratory
P.O. Box 114, SF-02151 Espoo, Finland. Fax +358 0 455 0619

l'aviation et les industries de l'espace, c'est-à-dire sur des stratifiés consistant en un nombre élevé de plis fins et unidirectionnels fabriqués par la technique du préimprégné dans un autoclave (Chamis, 1984). Il est évident que les mêmes méthodes ne sont pas appropriées quand on a affaire à des plis de résine polyester renforcée WR.

De plus, les propriétés de résistance mécanique des stratifiés utilisés dans l'industrie des petites embarcations sont difficiles à prédire correctement, puisque les méthodes de production et les matières premières diffèrent d'un cas à l'autre. Néanmoins, le développement d'une méthode de calcul pour les résistances mécaniques des stratifiés requiert une connaissance des effets des différentes matières premières et des paramètres de fabrication sur les propriétés des stratifiés. Par conséquent, un projet de recherche a été réalisé au Laboratoire Naval de VTT avec les industries finlandaises de bateaux, fibres de verre et de polymères.

Cinquante stratifiés pour bateau différents ont subi des essais de traction, compression, flexion, cisaillement interlaminaire et de choc. De plus, des essais de traction sur des échantillons de matrice pure ont été réalisés. Parmi les stratifiés, différentes résines polyester, divers rovings tissés (WR), roving cousu biaxial, mats à fibres coupées (CSM) et roving unidirectionnel ont été utilisés comme pli de base des matériaux. En considérant cette série d'essais comme étendue, il a été possible d'étudier l'effet des divers paramètres sur la résistance mécanique des stratifiés (Hildebrand & Holm 1991). Durant la totalité du projet, plus de 1500 éprouvettes ont été testées (figure 1). Une banque de données a été constituée, incluant le matériau, la fabrication et les données des essais pour tous les stratifiés. Ceci forme une base unique de comparaison pour les essais futurs.

ASPECTS DE LA RESISTANCE MECANIQUE DES STRATIFIES POUR BATEAUX.

Il est impossible de décrire la résistance mécanique des stratifiés avec une valeur unique. Il y a une diversité de valeurs, toutes importantes, qui décrivent ensemble le comportement à la résistance mécanique d'un stratifié.

La résistance mécanique d'un stratifié de plastique renforcé par fibres (FRP) dépend de la direction de la sollicitation, du type et de la vitesse de charge. Les résistances mécaniques de traction et de compression sont habituellement inégales, leur rapport aussi bien que le rapport de résistance mécanique en tension et en cisaillement dans le plan dépendent de l'orientation des fibres, de la matière de la fibre (verre, aramide, carbone), du type de renfort (mat à fibres coupées, roving tissé, roving unidirectionnel), des propriétés de la matrice et de l'empilement du stratifié.

La résistance à la flexion décrit la résistance mécanique du stratifié sous des charges de flexion. Cependant, la plupart des standards ne prennent pas en compte de la distribution non uniforme de la rigidité à travers l'épaisseur, ni les asymétries possibles qui sont typiques pour les stratifiés pour bateaux. De plus, le fait que les propriétés de tension et de compression du stratifié ne sont pas égales est négligé. Les résultats des essais de flexion sont fortement dépendants de l'épaisseur des couches de résine sur les faces du stratifié. De ce fait, l'utilisation des essais de flexion ne peut être recommandée que pour un contrôle de qualité. Ce n'est pas un essai adapté quand le but est de rechercher les propriétés du matériau.

La résistance au cisaillement interlaminaire (ILS) est une valeur de résistance mécanique typique pour les stratifiés FRP. La délaminage - causée par des contraintes ILS excessives - est un type de rupture commun sur les bateaux, la résistance ILS est donc une valeur importante. Cependant, les normes pour déterminer la résistance ILS ne sont pas satisfaisantes. Les valeurs ILS déterminées à partir d'essais de flexion à appuis rapprochés ne peuvent pas être utilisées comme valeurs pour la conception. On doit garder à l'esprit que la propagation de fissure interlaminaire est, en plus de la résistance ILS, une autre propriété significative décrivant la résistance aux ruptures par délaminage.

L'apparition des premières fissures dans le stratifié à un niveau de déformation substantiellement plus petit que l'allongement à la rupture est typique du comportement des FRP. Les premières ruptures sont habituellement causées par des fissures de la matrice perpendiculairement à la direction de charge. Ces fissures conduisent à une perte de rigidité, visible à un épaulement sur la courbe contrainte-déformation (figure 2). Les premières fissures peuvent être détectées par des mesures d'émission acoustique au cours de l'essai. Il est important d'évaluer le niveau de déformation auquel les premières fissures se produisent. Ce niveau est un important critère de résistance mécanique pour une analyse structurale.

CONSIDERATIONS SUR L'ESSAI DE CHOC

Les propriétés au choc des stratifiés sont d'un intérêt particulier, car la charge de choc est critique à beaucoup d'endroits des bateaux et des petites embarcations. Quand on évolue vers des matériaux plus avancés, la résistance aux chocs devient habituellement une question encore plus critique.

Comme les propriétés des stratifiés FRP sont dépendantes de la vitesse de charge, il est important de déterminer les propriétés de résistance sous des vitesses de charge qui représentent des cas réels. Les propriétés au choc peuvent être déterminées de différentes façons, mais les méthodes d'essai de choc standards présentent des lacunes. A cause de la forme non réaliste de l'impacteur et de la petite taille des échantillons

à tester, les essais de choc standard ne reflètent pas des situations de choc typiques se produisant sur les structures marines.

Un nouvel essai de poids tombant instrumenté a été développé au Laboratoire Marin VTT (Kivelä 1992). Il est compatible pour des stratifiés monocouches et sandwichs. L'impacteur est de forme pyramidale, reflétant un choc entre un coin et le stratifié. La taille des échantillons à tester est de 250x250 mm. L'essai permet la détermination de deux nouveaux critères de rupture : l'énergie absorbée par le stratifié jusqu'au point de perte d'étanchéité et la résistance à la propagation de l'endommagement après la pénétration de l'impacteur (figure 3).

La méthode a été appliquée avec succès à plus de 40 stratifiés sandwichs et s'est révélée être de loin supérieure aux essais standard. L'énergie absorbée jusqu'à la pénétration totale (perte d'étanchéité) et la résistance à la propagation de l'endommagement peut être clairement montrée d'après les résultats de ces essais.

PARAMETRES DES MATIERES PREMIERES INFLUENÇANT LA RESISTANCE MECANIQUE.

COURBURE DES FIBRES (CRIMP).

Il est bien connu que la quantité, la direction et le matériau des fibres a une forte influence sur la résistance des stratifiés. Par contre, l'effet des autres paramètres du matériau sur la résistance du stratifié n'a pas été déterminé de façon suffisante, et spécialement pas dans le cas des stratifiés pour bateaux qui ont des plis de renfort relativement épais (0,5 à 1 mm).

La courbure des fibres (figure 4) a une forte influence sur la résistance à la traction et à la compression. Il est souvent mentionné dans les "handbooks" (bibliographie) que la résistance d'un renfort tissé est dépendant du type de tissage (simple, sergé, satin). Il est important de noter que, dans les renforts de roving tissé (WR), la courbure des fibres ne dépend pas forcément du type de tissage. Un WR de type satin n'a pas obligatoirement une courbure de fibre plus petite qu'un WR de type simple. La courbure des fibres dans les directions de trame et de chaîne de beaucoup de produits est également différente.

L'effet de la courbure des fibres sur la résistance à la traction et à la compression a été déduit de nombreux stratifiés symétriques à deux plis de WR : poids entre 450 et 680 g/m²(figure 5) et entre eux aussi bien qu'entre les faces d'une monocouche de CSM (Chop Strand Mat) : 450 g/m². La résistance mécanique des plis de CSM a été calculée en utilisant les données des stratifiés CSM faits par le même fabricant dans les mêmes conditions, en utilisant les mêmes résine et mat. Par conséquent, les résultats suivants ne peuvent être utilisés que pour des plis de WR

entre des couches de CSM.

$$F/b_{(1 \text{ pli WR})} = \frac{F/b_{(WR/CSM)} - \left(\frac{3}{5} \times F/b_{(CSM)} \times \frac{\epsilon_{\max}(WR/CSM)}{\epsilon_{\max}(CSM)} \right)}{2}$$

Voir liste des symboles en fin d'article.

Les résultats ont en outre été calculés pour une masse surfacique de 600 g/m² et pour une quantité égale de fibres dans le sens de la trame et de la chaîne.

$$F/b_{(1 \text{ pli WR } 600 (50/50))} = F/b_{(1 \text{ pli WR})} \times \frac{600}{q} \times \frac{50}{s_i}$$

Beaucoup de produits à roving tissé ont une courbure de fibre différente dans le sens de la trame et de la chaîne. Il est intéressant de noter la relation entre les résistances d'un WR et les plis d'un roving cousu biaxial. Le roving cousu biaxial a une résistance à la traction plus élevée, correspondant à un angle de courbure de fibre d'environ 2°.

La relation suivante a été déduite pour la résistance à la traction pour une monocouche de WR à 600 g/m² et une quantité équivalente de fibres dans le sens de la trame et de la chaîne, une résine polyester orthophtalique, un allongement à la rupture de la matrice d'environ 2% (figure 6). La quantité de fibres dans le stratifié était autour de 27 ± 3% en volume, la courbure des fibres entre 2,5 et 6°.

$$F/b_{\text{tract.}} = 231 - 11,7 \times \Omega$$

La relation correspondante pour la résistance à la compression a été calculée avec la même méthode, en prenant en compte les données de résistance à la compression des stratifiés CSM.

$$F/b_{\text{comp.}} = 291 - 29,4 \times \Omega$$

ALLONGEMENT A LA RUPTURE DE LA MATRICE.

L'influence de l'allongement à la rupture de la matrice sur la résistance à la traction a été déduit de nombreux stratifiés à 5 plis de CMS (masse surfacique de 450 g/m², liant à émulsion) mais avec des résines différentes (figure 7). Pour déterminer l'allongement à la rupture de la matrice, des échantillons de matrice pure, faits par le même fabricant dans les mêmes conditions que les stratifiés, ont été testés en traction. La quantité de fibres dans les stratifiés était de 20 ± 3% en volume. De façon à minimiser l'influence d'une légère variation du contenu de fibre, les valeurs de résistance spécifique (résistance par masse volumique) ont été utilisées pour comparer les données.

L'effet de l'allongement à la rupture de la matrice sur le niveau de déformation auquel la première rupture se produit a été déterminé à partir des stratifiés WR/CSM symétriques.

Dans les stratifiés WR/CSM (tableau 1), la qualité de la matrice a une forte influence sur le niveau de déformation auquel la première

rupture se produit. La première rupture se produit dans les plis de WR perpendiculairement à la direction de charge.

L'effet de l'allongement à la rupture de la matrice sur la résistance à la traction des WR/CSM est évident. Cependant, avec les résultats de la présente série d'essais, il n'a pas été possible de le quantifier. Cela aurait demandé un nombre important de stratifiés fabriqués avec exactement les mêmes renforts, mais avec des résines différentes.

TYPE DE RESINE.

L'influence du type de la résine (orthophtalique - polyester orthophtalique) sur la résistance au choc est significative, particulièrement pour les stratifiés CSM. La résistance au choc spécifique (résistance au choc par masse spécifique) des stratifiés CSM avec différents types de résine mais le même allongement à la rupture de matrice est comparée à la figure 8.

Les résines qui conduisent à des valeurs de résistance à la traction élevées ont tendance à diminuer leur résistance au choc. Pour de plus amples recherches, des essais de choc appropriés sur des échantillons de matrice pure devraient être entrepris.

CONCLUSION.

L'influence de divers paramètres sur les valeurs de résistance mécanique pour différents stratifiés a été étudié en utilisant les résultats d'une série complète d'essais. La dispersion des valeurs de résistance mécanique entre des stratifiés similaires est pour une forte part le résultat de différences entre les matières premières utilisées. Avec un choix judicieux de certains paramètres au cours de la sélection des matières premières, les valeurs de résistance mécanique peuvent être améliorées de 20 à 30%, et dans certains cas jusqu'à même 40%. Cet accroissement est possible sans choisir des matériaux plus coûteux ou d'autres méthodes de production. En améliorant les valeurs de résistance mécanique des stratifiés, le poids structural et la consommation de matériaux peuvent être minimisés. En choisissant des matières premières de façon efficace, il est souvent possible de réduire les coûts des matières premières et de fabrication en même temps.

SYMBOLES

| | |
|--|---|
| Ω | angle de fibre représentant la courbure (degrés) |
| F/b_{tract} | force par unité de longueur à la rupture en traction (N/mm) |
| $F/b(1 \text{ pli WR})$ | force par unité de longueur à la rupture pour un pli de WR (N/mm) |
| $F/b(\text{WR/CSM})$ | force par unité de longueur à la rupture pour un stratifié WR/CSM (N/mm) |
| $F/b(\text{CSM})$ | force par unité de longueur à la rupture pour un stratifié CSM (N/mm) |
| $\epsilon_{\text{max}}(\text{WR/CSM})$ | allongement à la rupture pour un stratifié WR/CSM (%) |
| $\epsilon_{\text{max}}(\text{CSM})$ | allongement à la rupture pour un stratifié CSM (%) |
| $F/b(1 \text{ pli WR600}(50/50))$ | force par unité de longueur d'un pli de WR calculé pour une masse surfacique de 600 g/m^2 et une quantité égale de fibres dans le sens de la trame et de la chaîne (N/mm) |
| q | masse surfacique du renfort (g/m^2) |
| s_i | quantité de fibres dans le sens de la trame - chaîne |
| $F/b_{\text{comp.}}$ | force par unité de longueur à la rupture en compression (N/mm) |

CHAMIS C.C., 1984, New York, Simplified composite micromechanics equations for strenght, fracture toughness and environmental effects, 39th Annual Conference, session 11D.

HILDEBRAND, MARTIN, HOLM, 1991, Gunnar. Stronger laminates in boat production Material parameters (en finlandais), Espoo 1991, Technical Research Centre of Finland, Reseach Notes 1289, 54 pp + 42 pp ann.

KIVELÄ J., 1992, The determination of local impact strenght for small-craft sandwich structures (en finlandais), M.Sc. Thesis, Helsinki University of Technology, 62 pp + 19 pp ann.

ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK, 1987, Vol. 1, Ohio, ASM International, p. 148.

HANDBOOK OF COMPOSITES, 1989, Vol. 2, Structures and design, Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., p. 364.

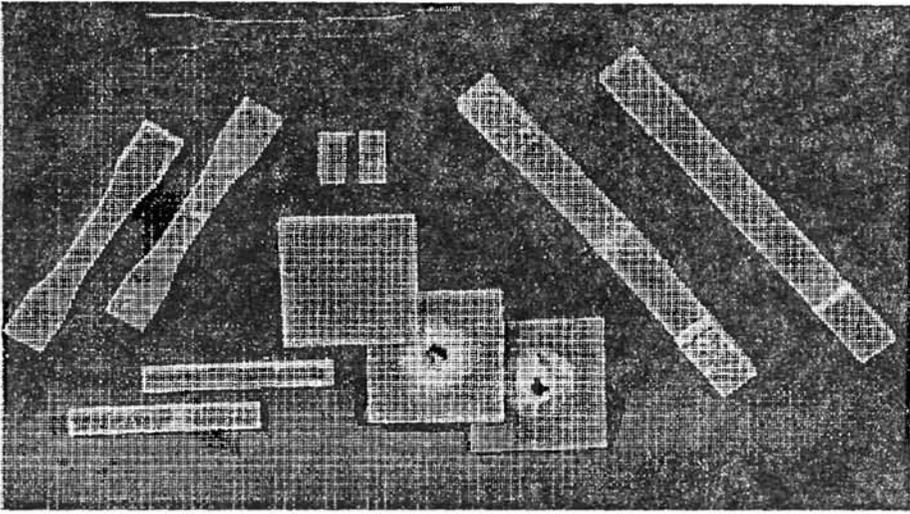


Figure 1. Eprouvettes avant et après essais.
Specimens for the different tests before and after testing.

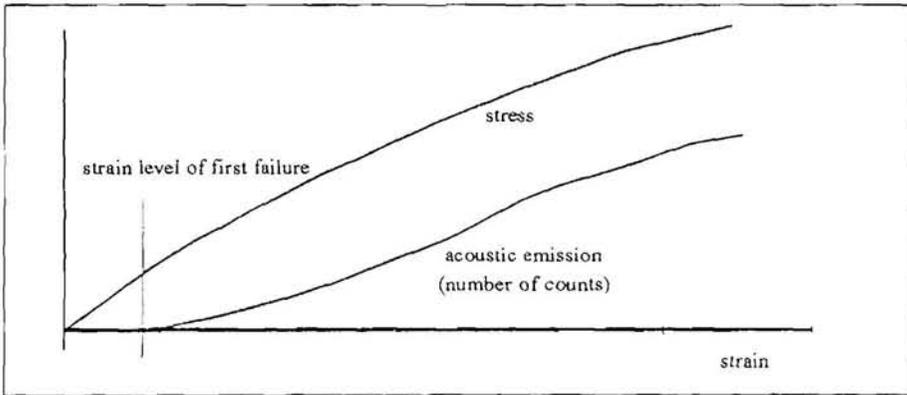


Figure 2. Courbe contrainte-déformation pour stratifié partiellement tissé. Le premier endommagement entraîne une perte de rigidité ("genou")

Typical stress-strain curve of a laminate containing partially woven roving. First damage results in a visible stiffness reduction ("knee").

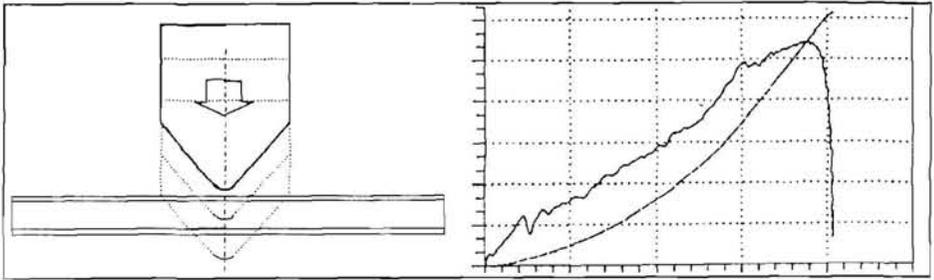


Figure 3. Essai de choc instrumenté avec un impacteur à forme pyramide, (à gauche). Force et énergie v déplacement d'impacteur pour un composite sandwich (à droite).

Instrumental impact testing method using a pyramid-shaped impactor (left). Force and energy versus displacement for a sandwich laminate (right).

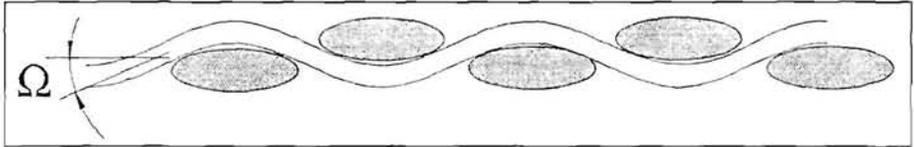


Figure 4. Angle de fibre Ω , pour quantifier la courbure des fibres.
Fibre angle Ω as a measure of fibre curvature.

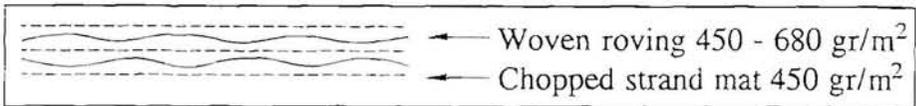


Figure 5. Empilement de stratifiés WR/CSM.
Lay-up of the WR/CSM laminates.

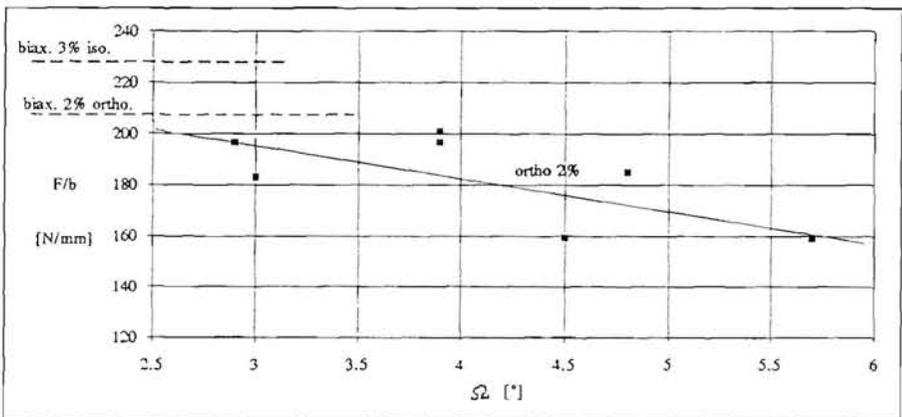


Figure 6. L'influence de la courbure des fibres sur la résistance en traction d'un pli de WR.
The effect of fibre curvature (crimp) on the tensile strength of one ply of WR.

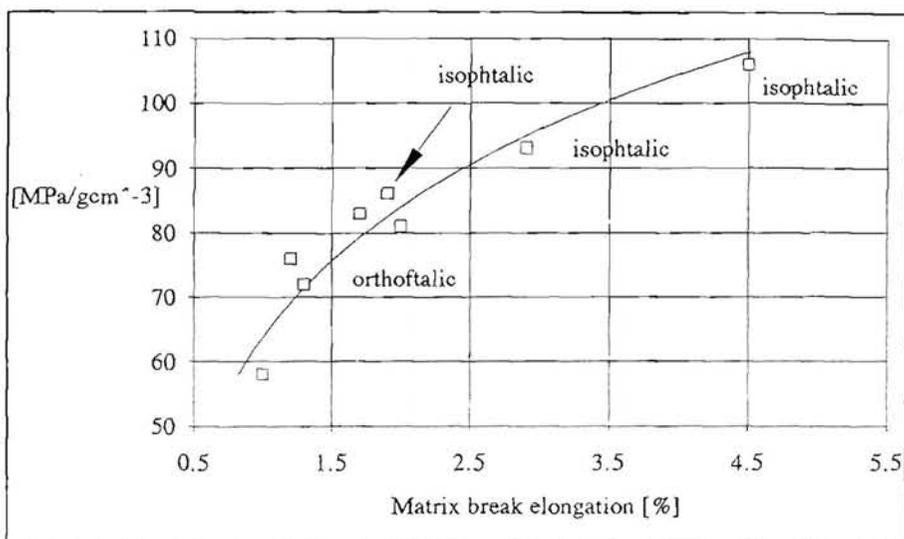


Figure 7. L'influence de l'allongement à la rupture de la matrice sur la résistance spécifique en traction de stratifiés CSM.

The influence of the matrix break elongation on the specific tensile strength of CSM laminates.

Tableau 1. L'influence de l'allongement à la rupture de la matrice sur la déformation qui correspond à la première rupture.

The effect of matrix break elongation on the strain level at which first failure occurs.

| Resin type | Matrix break elongation | Strain level of first failure |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Orthophtalic polyester | 2 % | 0,2 % |
| Isophtalic polyester | 2 % | 0,3 % |
| Isophtalic polyester | 3 % | 0,4 % |

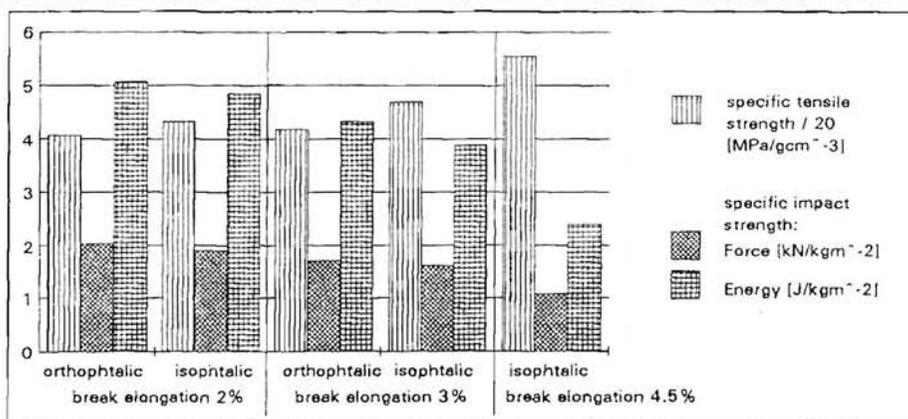


Figure 8. L'influence de la résine sur la résistance spécifique au choc de stratifiés CSM.

The effect of resin type on the specific impact strength of CSM laminates.