

22

EVALUATION EXPERIMENTALE ET THEORIQUE DU COMPORTEMENT DE PANNEAUX DE SUPERSTRUCTURES EN COMPOSITES*.

R. DAMONTE¹, R. IACCARINO¹, G. PUCCINI¹, E. RIZZUTO²,
R. TEDESCHI².

Résumé - Les matériaux composites représentent pour les industries de construction navale un moyen possible pour améliorer la compétitivité des produits, particulièrement dans le domaine des navires de haute technologie où les rapports élevés résistance et rigidité sur poids permettent d'obtenir une plus grande capacité de charge transportée, de meilleures performances et des coûts de propulsion réduits. En effet, avec ces matériaux, le concepteur peut obtenir des gains de poids de structure considérables, des techniques de production et d'assemblage de structures de formes complexes plus faciles et de meilleures performances à long terme quand les structures sont exposées à l'environnement marin. Malheureusement, les applications potentiellement larges des structures FRP sont limitées par le manque général de connaissance de leurs comportements mécanique et physique. Dans ce contexte, le développement de recherches théoriques et expérimentales est de la plus haute importance afin de définir les procédures de conception structurale et d'analyse et de permettre d'exploiter tous les bénéfices potentiels dérivant de l'utilisation de ces matériaux. Dans cet article, une partie des activités théoriques et expérimentales ayant pour but d'étudier le comportement des panneaux composites en vue de l'emploi pour les superstructures de navire est décrite.

Mots clés : superstructures navales, panneaux sandwich, étude numérique, étude expérimentale.

INTRODUCTION

L'actuelle crise européenne de la construction navale a posé le problème de la recherche de nouveaux matériaux et technologies permettant d'améliorer la qualité et de réduire les coûts de production. Dans les paquebots et navires marchands de grande taille, une intervention potentielle est représentée par l'application des composants structuraux en composite pour les superstructures (1,2). Pour les paquebots par exemple, il y a un énorme besoin de réduction de poids.

* traduit de l'anglais.

¹CETENA S.P.A., Structural Department.

²Université de Gênes, Naval Architecture Institute, Structural Laboratory.

Une récente analyse (3) d'application possible de FRP à bord des navires a révélé que les bateaux de croisière ont le champ d'application le plus attractif ; en fait, environ 15000 m² de panneaux structuraux verticaux peuvent être employés à moyen terme et 30000 m² de panneaux de pont pourraient être appliqués avec succès grâce à de futures recherches. Une autre application intéressante est en relation avec les navires marchands ; dans ce domaine, environ 2500 m² de panneaux verticaux structuraux sont potentiellement applicables, du moins du point de vue technique. Les poids correspondants sont respectivement 550, 1600 et 160 tonnes et la réduction de poids attendue est d'environ 50 %.

Malgré les avantages offerts, la possibilité d'introduire des matériaux composites dans la construction de navires de grande taille, que ce soit marchands ou de la marine nationale, dépend strictement du développement des activités dans les domaines théorique et expérimental conduisant à une meilleure connaissance des comportements des structures basées sur ces matériaux en vue de l'optimisation de la conception.

Dans cet article, une partie des activités ayant pour but l'étude du comportement des superstructures de bateau en panneaux composites et la création de techniques de conception développées dans le contexte du projet BRITE/EURAM "COMposite MATERIALS for marine STRUCTURES and components - COMAST" (matériaux composites pour les structures et composants marins) (4) sont décrites.

DESCRIPTION DES STRUCTURES ETUDIÉES

Le panneau étudié a été conçu pour une cloison verticale de superstructure d'un navire marchand de grande taille (figure 1) ; ce panneau est composé de deux peaux planes de 5 mm avec une âme interne symétrique oméga d'épaisseur 2,5 mm et de hauteur 60 mm.

Les deux peaux et les omégas sont faits de plastique renforcé de fibres de verre (GRP) ; le renfort est composé d'une bande tissée équilibrée de 500 g/m² et d'un mat de 225 g/m² fabriqué par Vetrotex, la matrice est la résine polyester DSM 871.

La stratification des peaux et de l'âme a été conduite en utilisant la technique de moulage par contact dans un moule ouvert à température ambiante. Les différentes parties ont été stratifiées séparément et assemblées dans un moule fermé pendant le traitement ; l'adhésion a été réalisée avec la même résine que celle utilisée pour le laminage ; la cuisson a été effectuée à la température ambiante. Des conditions de sollicitation simples ont été considérées dans l'étude de façon à enregistrer des données sur les mécanismes d'effondrement et les modes de rupture de la structure proposée ; pour la compression dans le plan, une charge uniforme latérale et un cisaillement plan ont été sélectionnés

comme conditions de charge.

Dans la présente étude, les deux premières conditions de charge sont évoquées.

ANALYSE NUMERIQUE

Des calculs par éléments finis (EF) ont été appliqués sur la structure sélectionnée, de façon à obtenir une estimation du comportement et des charges d'effondrement pour les deux cas de charge considérés (5).

En ce qui concerne les propriétés mécaniques du matériau dans son plan de stratification (E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12}), elles ont été obtenues par des essais expérimentaux sur des éprouvettes.

Pour évaluer les constantes hors du plan restantes, il a été nécessaire de faire des hypothèses simplifiées en appliquant l'approche de la micromécanique (6,7).

Les valeurs suivantes ont été estimées par analyse par EF (MARC CODE (8)) :

$$E_1 = E_2 = 10470 \text{ MPa}$$

$$E_3 = 5283 \text{ MPa}$$

$$\nu_{12} = 0,196$$

$$\nu_{13} = \nu_{32} = 0,308$$

$$G_{12} = 2290 \text{ MPa}$$

$$G_{13} = G_{32} = 1590 \text{ MPa}$$

CHARGE DE COMPRESSION

A la figure 2, le modèle par éléments finis d'un quart de la structure (représentant un panneau de 2800 mm de long, 1050 mm de large et 70 mm d'épaisseur), comprenant la structure de serrage est montré. En principe, le panneau a des charnières à ses extrémités, mais le comportement expérimental actuel des charnières n'est pas clairement démontré, alors les calculs ont été conduits avec deux différentes conditions limites imposées aux extrémités de la structure de serrage : condition n°1 correspondant à un panneau avec charnières ; condition n°2 correspondant à un panneau encasté. Pour chacune des deux conditions, un calcul de flambage élastique linéaire et une analyse élastique-plastique non-linéaire ont été conduits, en prenant en compte les défauts géométriques en termes de différentes mesures d'épaisseur des peaux. Comme il a été dit précédemment, la condition de chargement est une charge appliquée dans le plan du panneau par une barre d'acier pour simuler le montage utilisé pour un essai expérimental. Les formes déformées de la structure pour les deux conditions mentionnées ci-dessus, correspondant au premier mode de flambage élastique, sont montrées à la figure 3 ; les valeurs du flambage élastique sont 14840 daN (charnières) et 36860 daN (serré). Les résultats des analyses non-linéaires en termes de déplacement et de contrainte en fonction de la

charge appliquée sont reportés aux figures 7 et 8, où une comparaison avec les essais a été effectuée.

CHARGE DE PRESSION UNIFORME

De façon à simuler le comportement d'un panneau simplement supporté sur ses largeurs et soumis à une charge de pression uniforme, trois différents modèles par éléments finis ont été testés. Le premier est un modèle 3D représentant un quart du panneau, le deuxième est un modèle 2D ayant les mêmes caractéristiques de rigidité que la structure actuelle et le troisième est une bande représentant la moitié de l'ondulation. Un calcul élastique linéaire a été réalisé, et, pour la charge examinée et les conditions limites, les trois modèles ont donné des résultats qui sont en bonne corrélation.

Pour cette raison, le troisième, décrit à la figure 4, nécessitant moins de temps de calcul a été choisi. Dans ce modèle, un calcul de flambage élastique linéaire et une analyse élastique-plastique non-linéaire ont été menés. La forme déformée de la structure correspondant au premier mode de flambage élastique est montrée à la figure 5 ; la valeur du flambage élastique est de 0,29 bar. Les résultats de l'analyse non-linéaire en termes de déplacement hors du plan en fonction de la charge appliquée sont reportés à la figure 15, en même temps qu'une comparaison avec les essais.

ACTIVITES EXPERIMENTALES

ESSAIS DE COMPRESSION

Le montage de l'essai est montré à la figure 6 (9). Les panneaux (2800 mm x 1050 mm) ont été testés verticalement ; ils sont serrés selon leur plus petit côté dans la gorge de deux structures de serrages verticales en forme de U. Une de ces structures est placée dans les charnières d'un support fixe, tandis que l'autre est dans les charnières d'un coussinet glissant, qui est à son tour connecté de façon rigide à un vérin (charge maximale : 39250 daN) agissant horizontalement. Entre le vérin et le coussinet, une cellule de charge est interposée pour la mesure de la charge. Des jauges de déformation sont placées longitudinalement dans différentes positions de la surface externe : à mi-longueur de la section et dans quatre positions symétriques par rapport à la mi-longueur. Un capteur de déplacement est placé sur le support mobile de façon à mesurer la réduction de longueur du panneau dans la direction longitudinale. Pendant l'essai sur le premier panneau, celui-ci était supposé être avec charnières sur les bords : en fait, les charnières ont été quelque peu forcées pendant le positionnement du panneau et ne pouvaient pas tourner librement. Jusqu'à ce que le flambage se produise, le panneau s'est

comporté comme s'il était serré ; ensuite, il y eut une rotation soudaine causant l'effondrement du panneau.

A la figure 7, les déformations moyennes sur les deux surfaces du panneau à mi-longueur sont indiquées en fonction de la charge appliquée : une charge de flambage de 35900 daN a été observée. A la figure 8, les résultats en termes de déplacement axial sont reportés. Le panneau 2 a été placé avec plus de précautions, et les charnières ont fonctionné correctement pendant l'essai : le comportement s'y rapportant est présenté à la figure 9, montrant une charge de flambage de 16300 daN. Dans les deux cas, les deux faces du panneau ont été chargées suivant un comportement linéaire, mais une distance croissante est visible entre les deux courbes, due à quelques dissymétries géométriques dans la section et/ou dans la structure d'application de charge. Pour approfondir cet aspect, le panneau a été déboulonné des charnières, retourné de façon à intervertir les deux côtés, repositionné dans la structure de charge et à nouveau testé : le panneau a flambé du même côté que dans l'essai précédent, avec une courbe charge-déformation très similaire ; ceci permet de conclure que le comportement asymétrique est dû à la géométrie du panneau et pas au montage d'essai. Les essais de flambage du panneau 2 n'ont pas été destructifs, de sorte que le panneau a de nouveau été testé dans une configuration encastree obtenue en bloquant les charnières. Cela a été fait de façon à pouvoir comparer les résultats avec ceux du premier panneau.

Les résultats sont présentés à la figure 10, où la courbe de déformation moyenne en fonction de la charge est représentée pour les deux différentes situations du panneau 2 (serré et avec charnières), avec les deux charges de flambage différentes. La configuration encastree du panneau 2 est ensuite comparée à la courbe correspondante du panneau 1, montrant une bonne corrélation (figure 11) : ceci confirme que le panneau 1 a été testé dans des conditions encastrees.

ESSAIS DE FLEXION

L'essai de flexion était destiné à reproduire une charge hydrostatique uniforme pour un panneau plan simplement supporté sur deux bords (figure 12) (10). Le prototype, représenté par un panneau de 2800 x 2400 x 75 mm, est maintenu parallèle au sol du laboratoire par un cadre en acier conçu pour n'être qu'un simple support pour les côtés les plus courts (les plus longs sont libres) et pour créer une boîte fermée entre le panneau et le sol. A l'intérieur de cette boîte, une poche de pression en nylon a été placée ; cette poche était équipée de deux valves (entrée et sortie) et d'une jauge de pression connectée avec le système d'acquisition ; la charge uniforme distribuée a été obtenue en remplissant la poche avec de l'eau. Pendant ces essais, les niveaux de déformation ont été mesurés au moyen de jauges convenables placées sur les deux peaux et sur l'oméga interne ; les déplacements dans le plan et hors du

plan ont été enregistrés respectivement le long des longueurs et des largeurs en utilisant des transducteurs de déplacement de grande amplitude. Les charges ont été appliquées par incréments ; trois cycles de charge pour chacun des panneaux ont été réalisés : le premier jusqu'à 40 % de la charge d'effondrement attendue, le deuxième jusqu'à 60 % et le troisième jusqu'à la charge d'effondrement. Les valeurs de déplacement aux points de mesure les plus intéressants ont été tracées en temps réel de façon à contrôler le comportement du prototype durant l'essai.

Deux comportements différents ont été observés pendant ces deux essais :

- le *panneau 1* a été chargé jusqu'à 0,18 bar, à cette valeur, le délaminage de la peau à un tiers de la longueur et l'effondrement qui a suivi des raidisseurs ondulés transverses ont été observés ; la déflexion maximale correspondante à mi-envergure était d'environ 80 mm ;

- le *panneau 2* a été chargé jusqu'à 0,33 bar, à cette valeur, le délaminage de la peau à mi-longueur et l'effondrement qui a suivi des raidisseurs ondulés transverses ont été observés ; la déflexion maximale correspondante à mi-envergure était d'environ 150 mm .

A la première vue de ces résultats, en dépit du comportement global similaire, les deux différentes charges d'effondrement impliquent localement des différences dans le mode d'initiation de la rupture qui n'ont pas été observées. Comme l'effondrement est dû à une instabilité locale de la peau et à un délaminage subséquent de la peau de l'oméga, la différente position longitudinale où ce phénomène se produit montre que la raison la plus probable de cette différence de valeurs est due à la présence de quelque défaut dans l'assemblage du panneau 1. La réponse des deux panneaux en termes de déplacements montre un comportement linéaire et les pentes des courbes charge-déplacement correspondant aux deux essais étaient approximativement les mêmes. Les courbes charge-déplacement enregistrées pour ces essais sont reportées à la figure 13. Une analyse de la distribution de déformation (figure 14), à la fois dans les peaux et l'âme révèle un comportement expérimental très proche de celui attendu théoriquement. Comme il sera expliqué au prochain paragraphe, les résultats numériques sont en bonne corrélation avec les résultats expérimentaux du panneau 2 (figure 15).

CONCLUSION

La comparaison résumée aux figures 7, 8 et 15 montre une bonne corrélation générale entre les résultats numériques et expérimentaux, à la fois en termes de déplacements et de déformations. Sur la base de ces résultats, quelques considérations peuvent être avancées.

Les valeurs de flambage élastique sont une bonne estimation des mesures de charges d'effondrement, et ceci est d'une importance particulière pour les matériaux composites, caractérisés par leur faible module élastique et par conséquent par une plus grande sensibilité aux

phénomènes instables que les matériaux traditionnels à haut module (11, 12).

Ceci signifie que des analyses non-linéaires complexes ne sont pas toujours nécessaires, mais elles représentent la seule façon d'examiner les mécanismes de rupture et de mieux comprendre les charges et modes actuels d'effondrement.

En fait, les structures composites sont souvent caractérisées par des phénomènes de rupture locale qui peuvent influencer de manière importante le comportement global de la structure ; la pratique d'essais sur des prototypes de grande taille est très utile pour la compréhension de ces phénomènes et pour l'évaluation de la procédure de conception basées sur des techniques d'analyse numérique.

Le développement de programmes de recherche ayant pour but d'améliorer la connaissance du comportement structural des structures composites contribuera à optimiser les procédures de conception de façon à améliorer les avantages offerts par l'utilisation de ces matériaux.

1. SMITH C.S., CHALMERS O.B.E., 1986, R.I.N.A., Design of ship superstructures in fibre-reinforced plastic.
2. ULFARSON A.Y.J., 1989, 1st International Conference on Sandwich Constructions, Superstructure of large ships and floating offshore platforms built in FRP-sandwich - a feasibility study, Stockholm 1989.
3. COMAST REPORT, février 1992, Mid-term assessment progress report.
4. BRITE/EURAM PROJECT BREU0178, Composite materials for marine structures and components, COMAST, technical annex of the contract.
5. DAMONTE R., IACCARINO R., PORCARI R., juillet 1992, NAV92 symposium, Genova, Numerical analyses on structural behaviour of large ship superstructures GRP panels for design purposes.
6. JONES R.M., 1975, Hemisphere Publishing Corporation, Mechanics of composite materials.
7. COMAST REPORT, août 1991, Review of analytical and numerical methods for mechanical characterisation of FRP materials.
8. MARC, 1991, Marc Analysis Research Corporation, Palo Alto, Californie, user's manual version K4.2.
9. COMAST REPORT, février 1992, Compressive test on a GRP panel.
10. COMAST REPORT, février 1991, Bending test of a GRP panel subjected to uniform pressure.
11. SMITH C.S., 1990, Elsevier Applied Science, Design of marine structures in composite materials.
12. SMITH C.S., DOW R.S., 1985, 3rd International Conference on Composite Structures, Paisely, Compressive strength of longitudinally stiffened GRP panels.

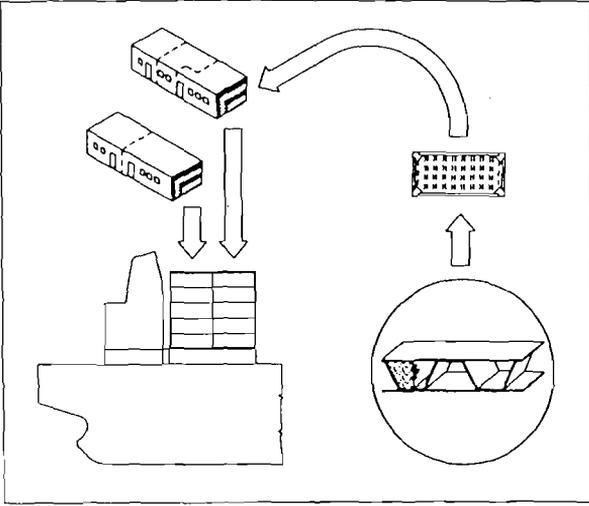


Figure 1. Application de panneaux GRP dans la superstructure de grands navires.
Example of application of GRP panels in large ship superstructures.

Figure 2. Compression : modélisation par éléments finis.
Compression : FE Model.

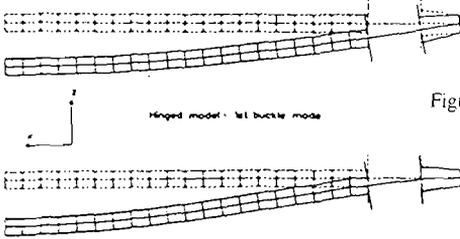
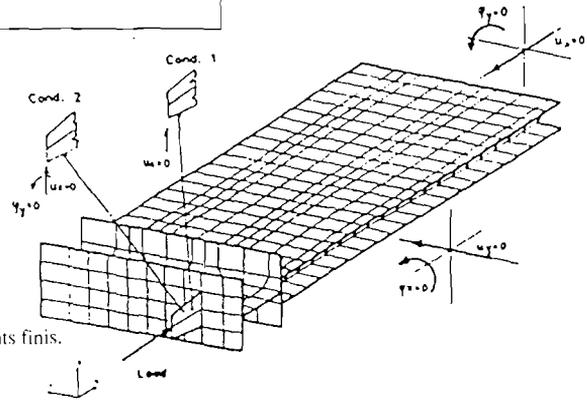


Figure 3. Compression : 1^{er} mode de flambage.
Compression : first buckling model.

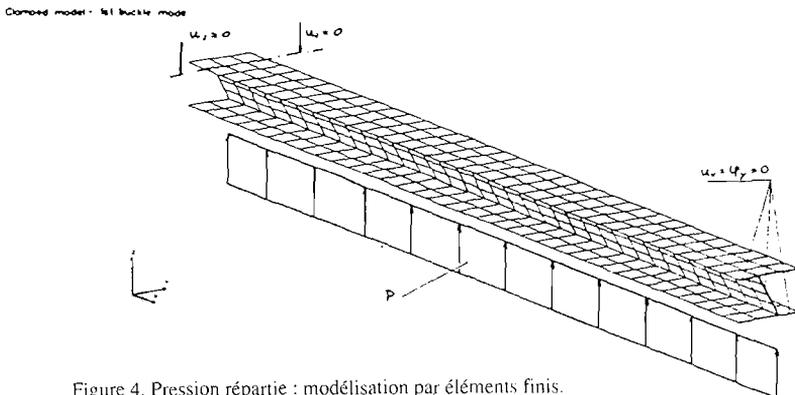


Figure 4. Pression répartie : modélisation par éléments finis.
Uniform pressure : FE Model.

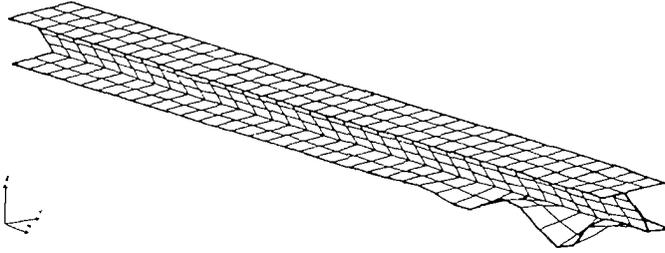


Figure 5. Pression répartie : 1ère mode de flambage.
Uniform pressure : first buckling mode

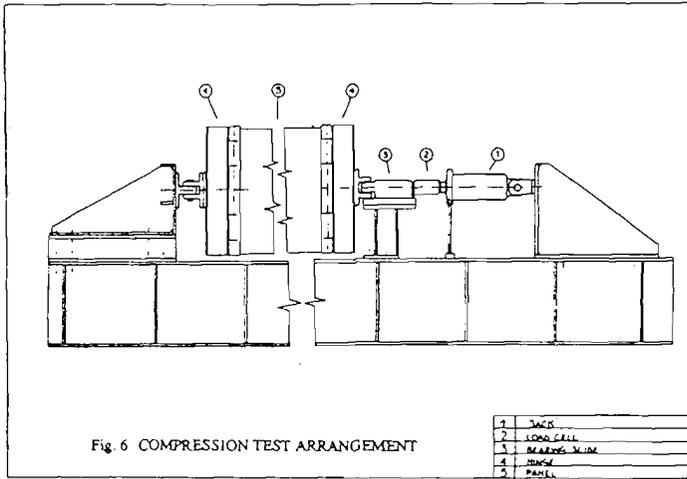


Figure 6. Montage d'essai de compression
Compression test arrangement.

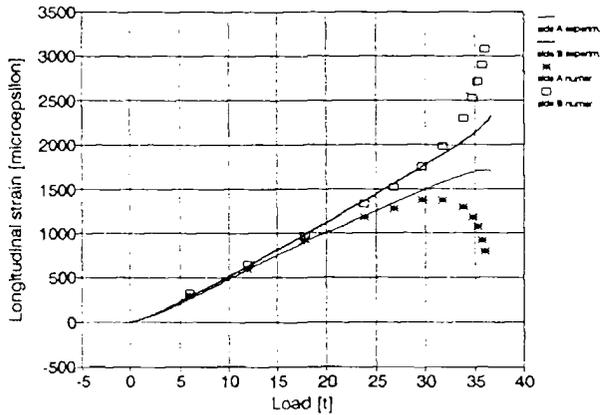


Figure 7. Panneau de compression no. 1 - Comparaison des données expérimentales et numériques (déformations).
Compression panel no. 1 - Comparison of experimental and numerical data (strains).

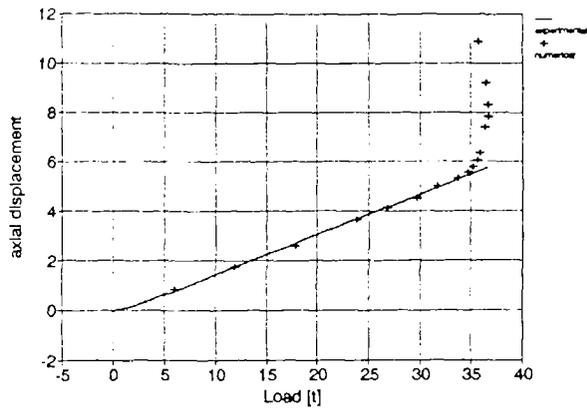


Figure 8. Panneau de compression no. 1 - Comparaison des données expérimentales et numériques (déplacements).
Compression panel no. 1 - Comparison of experimental and numerical data (displacements).

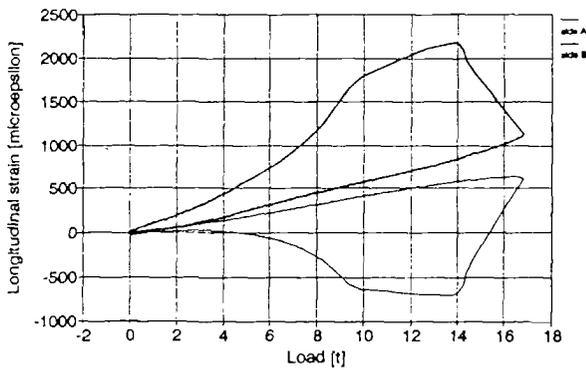


Figure 9. Panneau de compression no. 2. déformations moyennes
Compression panel no. 2 - average strains.

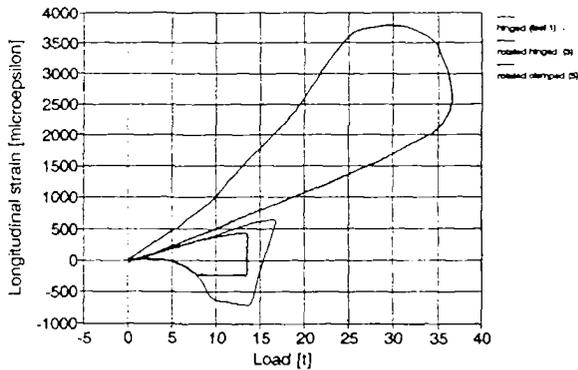


Figure 10. Essais de compression - comparaison des déformations moyennes.
Compression tests - comparison of average strains.

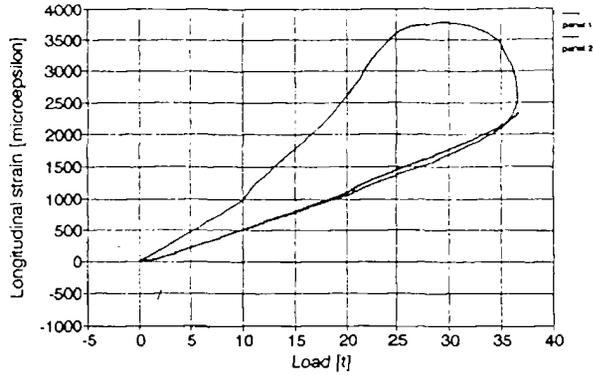


Figure 11. Essais de compression - comparaison des résultats de panneau 1 et 2 (bords fixes)
Compression tests - comparison of panel 1 and 2 (clamped edges).

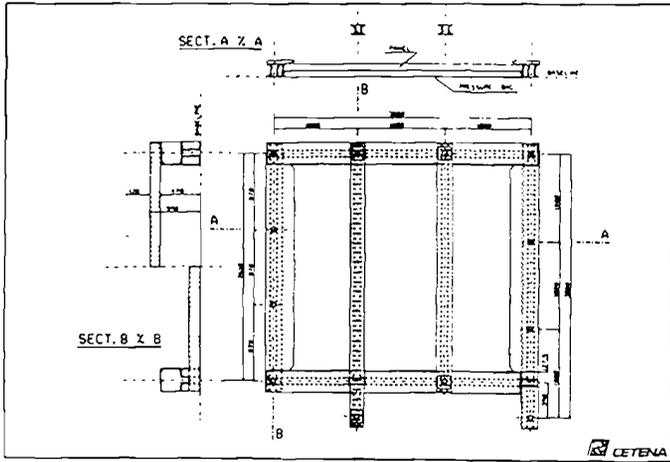


Figure 12. Essai de flexion, montage.
Bending test - arrangement.

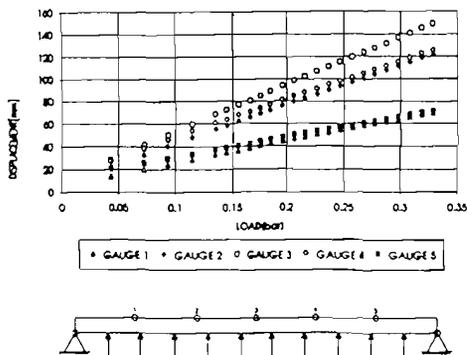


Figure 13. Essai de flexion - déplacements moyens.
Bending test - average displacements.

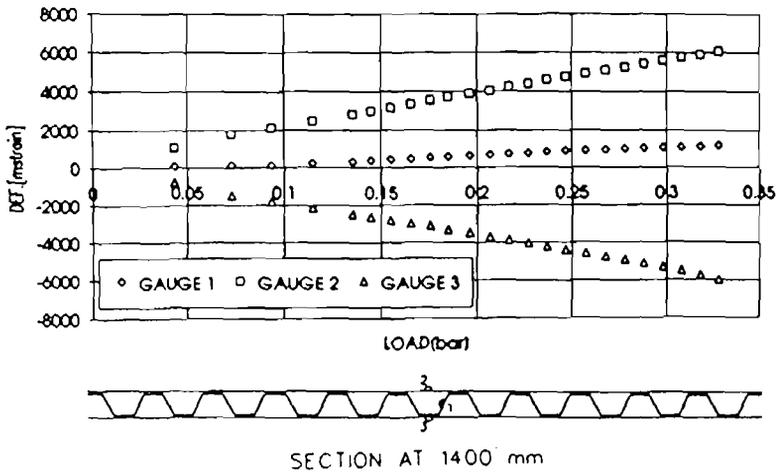


Figure 14. Essai de flexion - déformations moyennes à mi-longueur
 Bending test - average strains at mid-length.

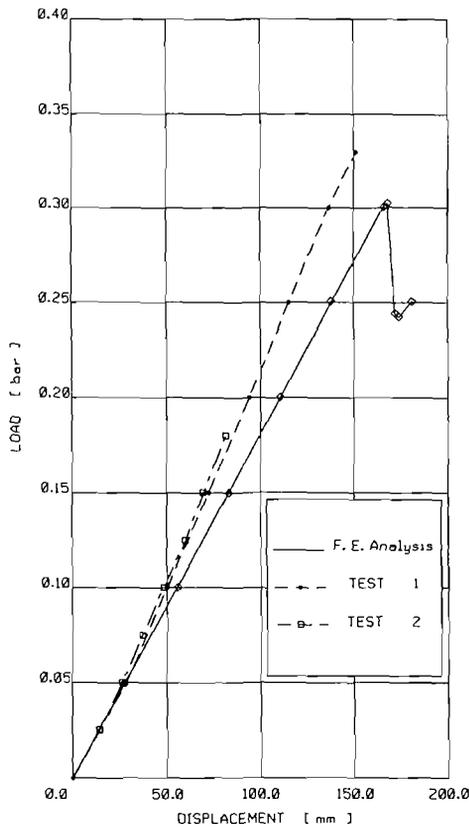


Figure 15. Essai de flexion - Comparaison des données expérimentales et numériques (déplacements).
 Bending test - Comparison of experimental and numerical data (displacements).