

29

LES TRAVAUX DU GROUPEMENT NATIONAL MATERIAUX COMPOSITES EN TECHNOLOGIE NAVALE

M. BAUDIN*

Résumé - Cette communication présente un programme de recherche concernant le comportement des matériaux composites utilisés dans les structures navales : Propriétés, méthodes de calculs, tenue au feu, mise en oeuvre. Les conclusions de ce projet se présenteront sous forme de fiches de recommandations qui permettront d'aider les constructeurs français à réaliser des gains de productivité, de compétitivité et de qualité.

mots clés : materiau composite naval, monolithique, sandwich, calcul, feu

GENERALITES

SITUATION LORS DE L'ETABLISSEMENT DU PROJET

Les constructeurs français de bateaux de plaisance, de pêche, de bateaux utilitaires et de structures en composite destinées à des utilisations maritimes sont parmi les leaders mondiaux pour ce type de construction mais, les potentialités d'amélioration restent importantes en raison de la spécificité des produits et de leur utilisation.

*BUREAU VERITAS - Centre de Recherche et Développement
Directeur

Dans ce but, un programme de recherche s'inscrivant dans le cadre de l'action du Ministère de l'Industrie a été établi en faveur d'une meilleure connaissance des matériaux composites dans la construction navale, et devant permettre de réaliser des gains de productivité, de compétitivité et de qualité par :

- La réduction des coûts de production des bateaux petits et moyens, du fait d'une meilleure optimisation du projet.
- La réduction des problèmes de réparation.
- La standardisation pour la construction et la production des bateaux.
- Une meilleure assurance qualité de la production.

OBJECTIF GENERAL

L'objectif général de la recherche en cours est de mettre au point des méthodes et des moyens afin d'aider les concepteurs et les chantiers dans le choix des matériaux, pour obtenir une structure résistante, tenant compte des contraintes de construction et d'exploitation en maintenant des coût les plus bas possibles.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de passer par cinq thèmes de recherche, l'interaction entre les axes de recherche étant à tout moment effective.

Ces cinq thèmes de recherche sont les suivants :

- 1 - Etat de l'art
- 2 - Propriétés des matériaux
- 3 - Méthodes de calcul
- 4 - Tenue au feu
- 5 - Mise en oeuvre

Ces travaux théoriques et expérimentaux débouchent sur la rédaction et la diffusion de recommandations pratiques aisément exploitables par les industriels

MOYENS MIS EN OEUVRE

Pour effectuer les travaux, les sociétés et organismes suivants associent leurs efforts par une prestation scientifique et/ou technique, et/ou une aide financière et/ou la fourniture de matériaux nécessaires au projet :

- Bureau Veritas, coordinateur général du projet, coordinateur technique du thème 1 "Etat de l'art" et responsable de l'élaboration du document final "Recommandations".
- GIS Ouest Matériaux Composites, coordinateur technique du thème 2 du projet "Propriétés des matériaux"
- Institut de Recherche de la Construction Navale (IRCN), coordinateur du thème 3 du projet "Méthodes de calcul"
- IFREMER, coordinateur technique du thème 4 du projet "Tenue au feu"
- INERN
- Service Technique des Constructions et Armes Navales (DGA/DCN/STCAN)
- Fédération des Industries Nautiques (FIN)
- Chantiers navals (au nombre de 16)
- Etablissements Chomarat et Induplast
- Société Bourguignonne de Plomberie Industrielle (SBPI)
- Laboratoire National d'Essais (LNE)
- Universités et Grandes Ecoles, Université de Montpellier, Ecole Centrale de Nantes, Ecole Centrale de Lyon.

L'ensemble des travaux est suivi par un comité composé de représentants des Ministères de l'Industrie et de la Mer et des organismes et sociétés nommés ci-dessus.

En outre, des contacts sont maintenus avec les organismes internationaux spécialisés, essentiellement :

- l'Organisation Maritime Internationale (OMI)
- l'Association Internationale des Sociétés de Classification (IACS)

PROGRAMME

ETAT DE L'ART

Le but de cette étude, qui est maintenant terminée, était de sélectionner les solutions adaptées aux problèmes spécifiques posés par des applications marines liées à des navires de pêche, de plaisance ou de transports de passagers.

Ce document examine les aspects réglementaires, les propriétés des matériaux, la mise en oeuvre et les coûts. Il a été complété grâce à la participation de nombreux chantiers qui ont accepté de recevoir des "ingénieurs enquêteurs" de sociétés participant au projet et/ou de répondre à un questionnaire. Lors de la rédaction de ce document, nous avons été amenés à déborder du domaine de la construction navale afin de situer les matériaux par rapport à ce qui existe et de tirer parti si cela est possible des procédures de conception, de

fabrication et de contrôle utilisées dans d'autres secteurs des transports.

Le document examine donc les constructions courantes et des méthodes un peu plus novatrices dont la mise en application paraît possible sans bouleverser l'organisation des chantiers.

Le programme d'études du Projet National Composites ayant pour objectif de rechercher les améliorations possibles dans le domaine composites navals, le document "Etat de l'art" est donc un document évolutif qui sera remis à jour pour prendre en compte les progrès réalisés

PROPRIETES DES MATERIAUX

L'objectif de cette étude est de s'orienter en priorité vers la caractérisation des propriétés du matériau fini, afin de :

- . déterminer les caractéristiques sous charges statiques et dynamiques ainsi que les endommagements associés ; proposer des méthodes d'essais simplifiés pouvant être réalisés éventuellement en chantier ;
- . mesurer les propriétés physico-chimiques nécessaires pour la modélisation du comportement mécanique, et détecter les anomalies éventuelles liées à la mise en oeuvre ;
- . sélectionner les méthodes de contrôle non destructif (CND) applicables sur site dans des conditions de chantier (PME/PMI).

Afin de réaliser cet objectif, les études proposées ont été divisées en 4 phases :

Phase 1 - Choix des matériaux

Ce choix a été établi en liaison avec le groupe "Mise en oeuvre" à partir des enquêtes menées lors de la phase "Etat de l'art". Il a été choisi 2 stratifiés monolithiques et 2 sandwichs représentatifs des constructions en série et artisanale (tab.1).

Phase 2 - Essais normalisés

Essais physico-chimiques

Ces essais, actuellement terminés, étaient nécessaires pour vérifier la qualité de mise en oeuvre et fournir des données pour la modélisation. Deux séries d'essais ont été réalisées, l'une sur les matériaux choisis suite à l'état de l'art, l'autre sur des matériaux de

composition identique de type monolithique mais de fabrication d'origine différente (tab.1).

Les résultats sont résumés (tab.2) ; ils concernent les mesures :

- d'épaisseur
- de diamètre des bulles
- de taux de vide (observation microscope)
- de taux de fibre par grillage
- d'absorption d'eau
- de Tg température de transition vitreuse

L'analyse des résultats obtenus permet de tirer les conclusions suivantes :

- Bulles d'air plus ou moins nombreuses sauf pour 2 échantillons, taux de vide excessif pour certains échantillons, grande dispersion des valeurs de taux de verre.

Essais mécaniques normalisés

Les essais réalisés avaient pour but de déterminer les données de caracté-ri-sation nécessaires afin d'introduire ces données dans les calculs.

Essais de traction 0-90°

Ces essais ont été réalisés sur 2 plaques monolithiques et 2 panneaux sandwich. Un récapitulatif des résultats est donné (tab.3).

Essais de délaminage en flexion

Ils ont été réalisés sur 2 plaques monolithiques L1 (Rovimat - ortho) et L2 (quadriaxial - iso). La valeur moyenne de contrainte de cisaillement pour L1 est de 17 MPa (écart type 1,06 MPa) et pour L2 de 24,1 MPa (écart type 2 MPa).

Essais de flexion 4 points

Ces essais ont été réalisés sur les matériaux sandwich S1 et S2. Les déformations mesurées permettent de calculer les modules des peaux de la poutre. On a obtenu

pour S1 une rigidité de flexion moyenne de 847 N.m² (écart type 56 Nm²)

et pour S2 une rigidité de flexion moyenne de 1340 N.m² (écart type 165 Nm²).

Essais de cisaillement plan

Des premiers essais ont été réalisés sur les monolithiques L1 et L2. Le tab.4 regroupe la moyenne des valeurs obtenues et l'écart type sur chaque moyenne. On a pu observer que la rupture des éprouvettes se produisait principalement au droit des trous par cisaillement de l'éprouvette par les vis de fixation. La contrainte σ ne

peut donc être considérée comme résistance de cisaillement mais comme un minimum de celle-ci.

Des essais, qui se sont révélés très délicats, ont été également réalisés sur matériaux sandwich S1 et S2. On a obtenu pour S1 une valeur moyenne de la contrainte de cisaillement de 40.4 MPa (écart type 4.25 MPa) et pour S2 une valeur moyenne de 19.1 MPa (écart type 2.39 MPa).

Essais de compression en plan

On a obtenu pour S1 une contrainte moyenne de 48.2 MPa et pour S2 une valeur moyenne de 17.4 MPa. Pour S1, on obtient en général une rupture simultanée des 2 peaux en compression s'accompagnant d'un déversement duquel a résulté un cisaillement de l'âme dans la zone de rupture très localisée. Pour S2, on obtient en général une rupture par flambage local de la peau rugueuse au droit du raccordement entre deux blocs de mousse.

Comparaison du comportement mécanique des 14 panneaux fournis par les chantiers

Les essais réalisés ont été de deux types :

- essais de traction
- essais de cisaillement interlaminaire.

Pour les essais de traction, la dispersion des valeurs de module est relativement faible, coefficients de variation en-dessous de 15 % pour tous les panneaux. Par contre, pour les essais de cisaillement, on note une grande différence entre panneaux (valeurs moyennes entre 14 et 35 MPa). Une étude plus approfondie est en cours dans la phase II.

Phase 3 - Détermination du seuil d'endommagement

Cette étude est actuellement en cours. Les objectifs en sont les suivants :

- A partir d'essais destructifs suivis par différents moyens de contrôle non destructif de définir un critère de premier endommagement et d'évaluer un intervalle de confiance associé à un tel critère.
- Etudier les mécanismes qui interviennent pendant le stade d'endommagement.
- Examiner les possibilités de différentes méthodes de contrôle non destructif pour la détection de cet endommagement.

Phase 4 - Essais de fluage, d'endommagement sous charges répétées, essais d'impact

Ces trois types d'essais sont prévus dans une phase ultérieure.

METHODES DE CALCULS

Les objectifs de l'étude en cours sont les suivants :

- effectuer un effort important d'information et de validation au sujet des outils numériques existants, en ne se focalisant pas sur le contenu théorique de tels outils, mais en précisant le contexte de mise en oeuvre. Ceci permettra à l'utilisateur de savoir ce que peut apporter tel ou tel outil, à quel prix, dans quelles conditions.
- valider les outils numériques sur la base des mesures effectuées au réel ou sur éprouvette.
- dégager des recommandations concernant les méthodes utilisables et l'exploit-tation des résultats qu'elles fournissent.

Enfin, l'objectif de l'étude est aussi de détecter les lacunes des outils actuels pour pouvoir proposer, dans le cadre d'un programme ultérieur, les développements théoriques et numériques les plus urgents à réaliser. L'étude est limitée aux matériaux définis précédemment. Afin de réaliser cet objectif, les études proposées ont été divisées en 5 phases ; actuellement, seule la phase 1 est réalisée, les phases 2, 3 et 4 sont en cours. La phase 5 est prévue ultérieurement.

Phase 1 : Analyse détaillée des moyens existants

On peut distinguer 3 principaux types d'outils pour le calcul des structures en matériaux composites :

- . les logiciels de caractérisation des matériaux,
- . les logiciels simplifiés,
- . les codes éléments finis.

Pour chacun des outils appartenant à ces 3 groupes, une évaluation détaillée a été réalisée sous la forme suivante :

- élaboration d'une grille d'évaluation,
- analyse de l'outil selon la grille d'évaluation,
- synthèse de l'évaluation.

Phase 2 : Etude de cas-tests, éprouvettes

Dans cette phase, on s'attache à retrouver par le calcul le comportement des éprouvettes fournies par les Chantiers et testées expérimentalement par le groupe de travail "Caractérisation des matériaux". Le travail s'effectue sur la base de 5 ou 6 éprouvettes. Les étapes de cette phase sont les suivantes :

- . définition des cas-tests
- . étude numérique des éprouvettes
- . analyse des corrélations calcul/mesures.

Phase 3 : Etude de cas-tests éléments de structure

Dans cette phase, on s'attache à comparer les outils numériques sélectionnés, et notamment les codes éléments finis sur l'analyse de 2 cas-tests réalisés dans les matériaux sélectionnés pour le programme et testés auparavant. Il est prévu de réaliser deux études : l'une sur une plaque circulaire, l'autre sur une plaque raidie avec 6 codes éléments finis différents. Les calculs devront préciser les déplacements et déformations en plusieurs points. Les étapes de réalisation de cette phase sont :

- . définition des cas-tests en concertation avec les chantiers et définition des paramètres à introduire.
- . réalisation des calculs (modélisations, résolution, analyse des résultats) pour chacun des logiciels,
- . confrontation et analyse des résultats.

Phase 4 : Corrélation calculs/mesures sur éléments de structure

Les éléments de structure étant testés par le groupe "Matériaux", l'objectif de cette phase est donc d'établir une corrélation calculs/mesures des cas considérés, car il se pose le problème de la méthodologie d'exploitation des résultats, et plus particulièrement des critères d'analyse de ces résultats.

Phase 5 : Lois d'endommagement

Dans cette étude, qui est prévue ultérieurement, il s'agit d'approfondir le domaine de validité des lois d'endommagement et critères de ruine utilisés habituellement, et éventuellement d'en étudier d'autres. Les résultats de cette phase seront les éléments

principaux qui guideront l'utilisateur dans l'analyse des résultats d'un calcul.

TENUE AU FEU

Cette partie du programme est terminée.

Objectifs

Le programme visait à replacer la réglementation marine dans le contexte des autres réglementations et à proposer des améliorations. Il comprenait aussi plusieurs séries d'essais destinés à mieux connaître les propriétés des matériaux qui sont couramment fabriqués ou utilisés par les chantiers et les améliorations possibles à un coût raisonnable. Le programme était divisé en 2 parties (matériaux de structures pour coque, pont, cloisons et tuyauteries) et s'est déroulé en 4 phases.

Phase 1 : Etude de synthèse des réglementations de tenue au feu.

Les composites sont soumis à diverses réglementations sur la tenue au feu, ce qui conduit à des procédures différentes pour l'agrément ou l'homologation des matériaux, le choix des tests, et à des exigences de performances différentes. Une synthèse des réglementations de tenue au feu existant dans le bâtiment et les transports a été réalisée. L'étude a en particulier analysé la démarche suivie dans ce domaine dans les transports terrestres et l'aviation. Elle présente aussi la réglementation marine internationale et française pour les 3 applications entrant dans le cadre du Groupement National : plaisance, pêche et transports de passagers.

Phase 2 : Matériaux de structures - Choix des paramètres et des méthodes d'essais pour les essais de réaction au feu

La réglementation internationale impose l'incombustibilité et des critères de tenue au feu pour des parois et des portes en fonction de l'emplacement sur le bateau. D'autres propriétés sont seulement mentionnées sans précision. Ces propriétés : inflammabilité, propagation de flamme, dégagement de fumées, nature des gaz de combustion, doivent être prises en compte.

Il existe des méthodes dont certaines sont normalisées : elles ont été appliquées sur les échantillons choisis dans le thème "état de l'art" ainsi que sur des matériaux utilisés uniquement pour le

cloisonnement intérieur et sur des tuyauteries. Les essais ont été réalisés sur 11 matériaux sous forme de plaques ou de tubes fournis par les chantiers dont les caractéristiques sont données tab.5. Le classement correspondant est donné tab.6.

Phase 3 : Essais de résistance au feu sur panneaux

Les essais ont été réalisés sur des cloisonnements fabriqués par les chantiers. Ils ont été orientés vers une évaluation des performances dans les conditions marines en utilisant la courbe "SOLAS" de montée en température choisie habituellement pour simuler le feu à bord d'un navire, et en observant le comportement des structures après 30 et 60 mn d'essai.

Une première série d'essais dits prospectifs ont été réalisés sur 17 plaques. Une deuxième série d'essais dits OMI (plaques de 4m²) sur une cloison et 2 ponts en matériau sandwich ont été ensuite réalisés.

Phase 4 : Essais sur tuyauteries

Dans le cadre de ce programme, il était proposé de mettre au point une méthode d'essai de canalisations plastiques et composites (dans le cadre de ce qui se fait à l'OMI), qui permettait la sélection de tuyauteries, d'accessoires et de méthodes de montage garantissant la tenue au feu voulue.

Avec chaque tuyauterie, en résine thermodurcissable, un réseau acier était testé en parallèle et à titre de comparaison.

Les essais ont été réalisés en four dans un centre spécialisé sur des tuyauteries en verre epoxy réalisées par enroulement filamentaire de 4 m. de long et d'environ 100 à 110 mm de diamètre intérieur, avec ou sans coudes et disposés horizontalement sur des supports métalliques. Tous les tests ont été réalisés sur des tubes remplis d'eau avec ou sans circulation, débit 40 m³/h. Deux courbes ont été utilisées :

- . La courbe "SOLAS", qui simule la variation de température en cas d'incendie dans le compartiment machine d'un navire, est adoptée par l'OMI ; elle est similaire à la courbe ISO utilisée dans l'industrie.
- . La courbe "H" ou courbe des hydrocarbures qui simule les incendies des hydrocarbures et qui est utilisée par l'OMI pour les essais sur tuyauteries.

Commentaires sur les essais de tuyauteries

Les essais effectués étaient les premiers réalisés en France dans les conditions d'applications marines. Ils ont permis une première

expérience pour le choix des matériaux, des accessoires, le montage, les méthodes d'essai, et les performances du matériel (comportement, tenue et pression, résistance au feu).

Ces essais ont donné lieu à la rédaction d'un résumé pour une présentation à l'OMI (groupes Conception et Protection contre l'incendie).

Les essais confirment les bonnes performances des canalisations pleines d'eau et la faible tenue des tuyauteries vides.

Conclusions sur les essais prospectifs

Monolithiques

- La résistance au feu d'une cloison de 5 à 8 mm en verre/polyester est faible.

- L'augmentation d'épaisseur améliore beaucoup la résistance au feu.

- Les quelques améliorations testées sur stratifié mince (renforcement de la couche externe de verre, charge d'hydrate d'alumine à 10 %) ne suffisent pas dans ces conditions pour obtenir des performances nettement meilleures.

- Le stratifié phénolique placé dans les mêmes conditions (monolithique mince) ne conduit pas non plus à un comportement meilleur.

Matériaux sandwich

- Le comportement des sandwichs est très convenable, surtout le sandwich balsa S1 qui peut obtenir le classement F sans aucune protection particulière contre le feu. Cependant, le bois de balsa est en partie consommé avant la fin de l'essai.

- Le sandwich PVC, est plus sensible que le sandwich balsa aux températures élevées.

Conclusions sur les essais OMI

Les deux essais réalisés ont conduit à des procès-verbaux qui accordent le classement F aux deux sandwichs S1 et S2.

Conclusions sur les procédures d'essais

- La résolution A 517 de l'OMI est mal adaptée aux matériaux composites car elle caractérise l'aptitude de la paroi ou du pont à s'opposer à la propagation du feu, sans tenir compte de la destruction

progressive de la paroi conduisant à un affaiblissement de la structure.

- Pour des essais prospectifs ou bien des essais comparatifs de matériaux ou d'isolations, la procédure en petit four employée convient bien. Elle est beaucoup plus économique et plus souple que la méthode OMI.

- Les nombreux résultats d'essais pourraient être exploités utilement pour étudier des modèles de comportement au feu de matériaux et revêtements de protection.

- Le grand four peut n'être réservé qu'à des essais où les dimensions imposées sont indispensables.

- Dans le cas des composites, il serait intéressant de charger les panneaux pendant l'essai afin de détecter la chute de propriétés mécaniques au cours du temps.

- Le dégagement de fumées est dans tous les cas très abondant et il est donc à prendre en compte en priorité.

- Le facteur temps est important dans les dégagements de fumées et il doit être pris en compte dans les tests de toxicité correspondants.

MISE EN OEUVRE

Objectif

Le principal objectif de l'étude est d'établir des recommandations et directives pour la mise en oeuvre et le stockage des matériaux. Pour cela, il faut :

- . quantifier l'effet des paramètres d'influence entrant dans la mise en oeuvre des matériaux composites : formulation des produits de base, stockage chantier, stratification,
- . optimiser les procédures de stratification en vue de réduire les coûts et d'améliorer la qualité, pour les différents types de navires,
- . proposer une procédure d'assurance qualité globale s'appuyant sur des fiches de suivi du produit (navire), du matériau de base à la fin de la vie du navire.

L'étude se déroule en 6 phases :

Phase 1 - Caractérisation des produits de base

Cette première phase est terminée. Il a été défini les essais qui doivent être effectués lors du choix des matériaux de base ou lors de leur réception, conformément au cahier des charges du chantier.

Phases 2 - 3 - 4 - 5

Ces phases sont en cours. Elles concernent :

- L'étude du stockage des matériaux de base, c'est-à-dire l'étude de l'influence de différents paramètres (environnement, température, humidité, etc..) sur le stockage des matériaux. Une liste de recommandations sera établie.
- L'étude de la stratification, c'est-à-dire description des procédures - caractérisation des pièces finies - procédures de contrôle de la mise en oeuvre.
- L'établissement de recommandations relatives aux détails de construction élaborées à partir d'une enquête réalisée auprès des chantiers, experts maritimes, sociétés de classification.
- L'établissement de recommandations permettant d'évaluer les dégâts et d'établir des méthodes de réparation.
- L'établissement de recommandations relatives à la maintenance et à l'entretien.

Phase 6

La phase 6 concernant la gestion globale de la qualité prévoit la rédaction d'un guide à l'usage des chantiers couvrant toute la vie du navire (depuis l'élaboration du matériau de base jusqu'à la fin de l'utilisation du navire). Cette phase traitera également des problèmes de sécurité et d'environnement.

RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus au fur et à mesure de l'avancement du projet sont synthétisés sous forme de "fiches" qui seront à l'issue du projet présentées de façon à être directement et aisément utilisables par les chantiers. Les informations pouvant être obtenues de ces fiches porteront sur 6 thèmes principaux :

- Contraintes de conception
- Matériaux de base
- Caractérisation des matériaux
- Méthodes de calculs
- Mise en oeuvre
- Gestion globale de la qualité.

CHOIX DES MATERIAUX SUITE A L'ETAT DE L'ART

MONOLITHIQUES

L1	Résine Orthophtalique (couche ext.iso)	Renfort Rovimat	Structure 5 RM 500.300
L2	Isophtalique	Quadriaxial	6 Qx

SANDWICHES

S1	Résine Isophtalique	Renfort Mat + Rovimat	Ame Balsa	Structure M300 / 2RM 500.300/Balsa 19mm/2 RM 500 300/M 300
S2	Isophtalique	Quadriaxial	PVC	2 Qx / PVC 25 mm / 2 Qx

ESSAIS PHYSICO-CHIMIQUES - MATERIAUX UTILISES

Matériaux	Caractéristiques des matériaux	Description des couches
1.1	SERIE N° 1 Monolithique	5 Rovimats
1.6	Monolithique L1 + Verre	5 Rovimats
2.4	Monolithique L2	6 Quadriaxiaux
2.5.1.	Sandwich S2. Côté moule	2 Quadriaxiaux
2.5.2	Sandwich S2, Côté extérieur au moule	1 Quadriaxial+1 Triaxial
4.3.1	Sandwich S1, Côté moule	2 Mats + 2 Rovimats
4.3.2.	Sandwich S1, Côté extérieur au moule	3 Rovimats
8.3	Sandwich Nidaplast	5 Rovimats
17.2	Monolithique Phénolique	5 Rovimats
9.1	Monolithique L1	2 Rovimats Roving=sergé 2.2
1.2	SERIE N° 2 (Etude statistique) Monolithique L1	5 Rovimats
3.6	Monolithique L1	5 Rovimats
4.1	Monolithique L1	5 Rovimats
5.1	Monolithique L1	3 Rovimats
6.1	Monolithique L1	5 Rovimats
7.1	Monolithique L1	6 Rovimats
8.1	Monolithique L1	5 Rovimats Roving=sergé 7.1 ou 8.1
10.1	Monolithique L1	5 Rovimats
11.1	Monolithique L1	5 Rovimats
12.1	Monolithique L1	5 Rovimats
14.2	Monolithique L1	5 Rovimats
15.4	Monolithique L1	5 Rovimats
16.2	Monolithique L1	5 Rovimats

TABLEAU 1

Références Matériaux	Epaisseur (mm)	Diamètres des bulles (m) (min - max)	Taux de vide - %	% verre	Absorption d'eau		Tg
					à 1 jour (%)	à 7 jours (%)	
1.1	5,13	55-175	0,9	49,95	0,09		59
1.6	6,97	240-575	(23,4)	49,51			
2.4	6,86	130-300	2,6	56,21	0,01		59
2.5.1.	3,57	210-950	5,2	43,85			
2.5.2	2,80	0	0	58,00			
4.3.1.	3,79	30-220	2,5	33,82	0,25		58
4.3.2.	3,58	35-135	2,8	38,31	0,67		58
8.3.	5,49	45-300	0,9	23,87			
17.2	5,79	1 - 2	22,6	46,14			
9.1	5,45	50-535	10,2	45,90			
1.2	5,70	95-310	0,9	47,73	0,20	0,51	50
3.6	5,55	40-185	4,8	45,90	0,23	0,67	58
4.1	6,38	150	1,6	39,88	0,13	0,44	55
5.1	4,66	55-305	1,3	45,43	0,21	0,66	55
6.1	7,00	295	0,3	42,29	0,10	0,36	56
7.1	7,80	70-390	1,2	40,18	0,15	0,41	58
8.1	9,02	15-405	4,6	30,27	0,18	0,42	56
10.1	7,77	130-260	0,3	46,33	0,12	0,36	56
11,1	5,74	30-390	0,2	46,50	0,16	0,44	52
12.1	7,43	40-790	0,3	38,43	0,16	0,55	51
14.2	5,20	40-220	0,4	48,01	0,08	0,23	50
15.4	6,21	0	0	47,59	0,15	0,51	58
16.2	7,76	30-450	0,3	45,77	0,08	0,21	58

TABLEAU 2
RESULTATS DE L'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE

Matériau	Sens de prélèvement	Contrainte de rupture	Allongement en %	Module d'élasticité
16/3	0	172,7 MPa	1,94	11508 MPa
	90	195,8 MPa	1,68	12559 MPa
2/3	0	252,4 MPa	2,39	14205 MPa
	90	246,8 MPa	2,06	13338 MPa
4/3	0	126,1 MPa	1,67	10468 MPa
	90	133,0 MPa	1,73	9538 MPa
13/2	0	208,8 MPa	2,21	12338 MPa
	90	229,8 MPa	2,17	12939 MPa

TABLEAU 3

TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS DE TRACTION

Matériau	Epaisseur (mm)	G (GPa)	σ (MPa)
L1 16-3 C 0 16-3 C 90	7.59 (0.11)	1.24 (0.14)	38.8 (2.7)
	8.33 (0.23)	1.13 (0.13)	40.5 (2.1)
L2 2-3 C 0 2-3 C 90	6.52 (0.10)	2.97 (0.42)	49.7 (5.3)
	6.57 (0.07)	2.99 (0.22)	48.9 (2.6)

TABLEAU 4

MOYENNE DES VALEURS OBTENUES
ET ECART TYPE SUR CHAQUE MOYENNE

Matériaux	N° de chantier	Forme et dimensions (mm)	Epaisseur (mm)
L1	1	)	5,4
L1 + tissu		)	6,6
L1 + charge	3	) Plaques	5,7
L1 + peinture intumescente		)	5,5
L1 + zinc	15	) 300x400	6,0
Phénolique	17	) 76x76	5,3
S1	16	)	27,5 ramené à 25,0
Tube noir	18	diamètre 11,5 cm longueur 7,7 cm	4,9
Tube jaune	19	diamètre 11,0 cm longueur 7,7 cm	4,8
L2	6	) ) Plaques	8,3
S2	6	) 300x400) 76x76)	32 ramené à 25,0

TABLEAU 5
DEFINITION DES MATERIAUX

Référence matériaux	Classement F	Classement M	
		Classement Juin 1983	Classement Août 1991
L1	F2	M4	M4
L1 + tissu	F1	M4	M4
L1 + charge	F2	M4	M4
L1 + peinture intumescente	F1	M4	M4
L1 + Zn	F3	M1	M1
Phénolique	F1	M1 (surface rugueuse)	M1
		M2 (surface lisse)	M2
S1	F3	M4	M4
Tube noir	F1	M3	M2
Tube jaune	F2	M3	M2
L2	F1	M4	M3
S2	F3	M4	M4

TABLEAU 6
CLASSEMENT DES MATERIAUX