

## 28

### MATÉRIAUX COMPOSITES COURANTS : TENUE AU FEU

J. CROQUETTE\* M. BAUDIN\*\*

**Résumé** - Dans le cadre du projet national "Composites navals", plusieurs séries d'essais de tenue au feu ont été effectuées sur des tuyauteries en verre époxy bobiné et divers matériaux de structure monolithiques et sandwichs employés couramment en construction navale. Cette communication décrit les matériaux testés et les procédures d'essais employées pour évaluer la réaction au feu: inflammabilité par l'essai à l'épiradiateur (classement M), émission de fumées (classement F), ainsi que la résistance au feu (OMI A 517(13)). Les conclusions sont tirées sur les méthodes d'essais et les performances des matériaux composites.

mots clés: matériau composite, tenue au feu, sandwich, tuyauteries.

### INTRODUCTION

L'utilisation des matériaux composites à bord des bateaux est souvent conditionnée par les aptitudes à s'opposer à la propagation du feu et des fumées en cas d'incendie. Les exigences réglementaires dépendent du type de bateau (navires à passagers, navires de charge, de pêche), et de la localisation à bord.

Sur les grands bateaux, la coque et la plupart des cloisons doivent être en matériau incombustible. Les matériaux composites sont donc exclus. L'utilisation de tuyauteries composites est autorisée pour quelques circuits et des lignes directrices d'utilisation sont en préparation à l'Organisation Maritime Internationale.

---

\* IFREMER Lorient

\*\*BUREAU VERITAS Centre de Recherches et Développement

Pour les bateaux de pêche et les petits bateaux, les réglementations sont moins sévères. Une cloison classée F par le test OMI (définition dans les paragraphes suivants) peut avoir de nombreuses applications. Pour les bateaux de plaisance, il n'y a pas d'exigence de résistance au feu. Seule l'inflammabilité des matériaux de surface est réglementée dans certains endroits.

Les essais au feu décrits ici comportent l'évaluation des propriétés de réaction au feu -inflammabilité, émission de fumées-, et de résistance au feu de matériaux utilisés pour des tuyauteries, et pour des coques et des cloisons de petits bateaux.

## MATERIAUX TESTES

Ils sont présentés dans le tableau 1. Pour les tuyaux, deux matériaux époxy-verre bobinés employés couramment dans l'offshore ont été choisis. Les panneaux testés ont été fabriqués par différents chantiers, et par l'Ifremer. L1, L2, S1, S2 sont les matériaux de référence du Projet National Composite. Pour le matériau 5, L1 + verre, le côté exposé au feu a été renforcé en verre par l'utilisation d'un RM 1500/300 à la place d'un RM 500/300. Le matériau 6 contient 15 % d'hydrate d'alumine. Le matériau 7 est protégé par un revêtement intumescent. Le matériau 8 contient un polyester spécial résistant au feu, et il est protégé par une peinture à base de poudre de Zn. Le matériau phénolique 9 a été fait par moulage sous pression et il contient également 5 RM 500/300.

## ESSAIS DE REACTION AU FEU

Les essais de réaction au feu donnent des informations importantes sur l'inflammabilité du matériau et son aptitude à produire des fumées et des gaz toxiques. Les propriétés d'inflammabilité sont les plus importantes dans la phase initiale de développement du feu. Des essais adaptés ont été étudiés pour sélectionner les matériaux et les revêtements de protection dans le bâtiment et dans les transports.

### Description des essais

*Classification M* : L'inflammabilité et la capacité à développer une flamme sont mesurées à l'aide de l'essai à l'épiradiateur (Normes NF P 92-501 and 92-507). L'essai est fait sur une plaque de 400x300 mm placée sur un support à 45 ° et exposée au rayonnement d'un épiradiateur ( disque en quartz de 500 W de 100 mm de diamètre) placé à

une distance de 3 cm. Le temps avant inflammation ( $T_i$ ) est noté ainsi que la somme des hauteurs de flammes toutes les minutes ( $\Sigma H_m$ ), et la durée totale de l'inflammation ( $\delta T$ ). Ces données sont introduites dans une formule qui donne la valeur du coefficient  $q$  qui permet de classer le matériau, de "non inflammable M1 à "facilement inflammable M4".

$$q = 100 \times \Sigma H_m / T_i \times \sqrt{\delta T}$$

*Classification F* : Pour l'évaluation de la production de fumées et de gaz toxiques, nous avons appliqué la procédure en cours à la SNCF, (Norme NF F 16-101), qui s'appuie sur deux tests différents: L'émission de fumées est faite au moyen du test en chambre NBS (Norme NF X 10-702), et les gaz à l'aide de l'essai en four tubulaire (Norme NF X 70-100).

Pour l'essai en chambre NBS, une petite plaque de matériau est exposée à un épiradiateur, comme pour le classement M, et les paramètres notés sont la densité maximale des fumées ( $D_m$ ) et les densités toutes les minutes  $D_1', D_2', D_3', D_4'$  qui permettent de calculer le coefficient VOF4 qui caractérise la quantité totale de fumées dégagées. ( $VOF4 = D_1' + D_2' + D_3' + D_4' / 2$ ).

L'essai en four tubulaire est fait sur 1g de matériau prélevé dans l'épaisseur, qui est brûlé à 600°C, et les gaz produits sont récupérés. Les analyses portent sur CO, CO<sub>2</sub>, HCl, HBr, HCN, et SO<sub>2</sub>. Le résultat est un index de toxicité noté I.T.C.

Les données d'émission de fumées et de toxicité sont introduites dans une formule qui donne la valeur l'Indice de Fumées (I.F.) qui conduit au classement dans l'une des six classes: de F0 à F5.

$$I.F. = D_m / 100 + VOF4 / 30 + ITC / 2$$

## Résultats

Le tableau 2 présente les matériaux essayés et les résultats.

L'inflammabilité des matériaux est trouvée élevée, sauf pour le phénolique, le matériau 5, qui est ignifugé, et les tubes époxy.

Le comportement de l'âme a une influence sur l'inflammabilité et le développement de la flamme dans le cas des sandwichs: Les peaux de S1 et S2 sont de même nature que respectivement L1 et L2. L1 est plus facilement inflammable que L2, mais l'inflammabilité de S2 est supérieure à S1.

Les résultats d'émission de fumées et de toxicité montrent l'influence de différents facteurs liés à la composition du matériau.

Les matériaux L1, S1 et S2 produisent une forte densité de fumées. La protection par une couche de verre de fort grammage réduit l'émission de fumées (matériau 4), de même que le revêtement

intumescent (matériau 7). La quantité d'hydrate d'alumine dans le matériau 6 est insuffisante pour produire un effet significatif. Le matériau 8 est ignifugé avec des additifs chlorés ou par fixation de chlore sur la résine. La valeur élevée de l'ITC est due au dégagement d'HCl. Il en est de même du sandwich PVC S2..

Les meilleures performances du sandwich balsa S1 comparé à S2 sont apparentes dans le tableau, mais pas dans le classement (tous deux sont en classe F3).

## RESISTANCE AU FEU DES TUYAUTERIES

A bord des bateaux, les tuyauteries sont souvent pleines d'eau, ou peuvent être maintenues pleines. Leur comportement au feu dans ces conditions est meilleur qu'à sec. Les essais de résistance au feu de tuyauteries présentés ici ont été faits sur des canalisations et des accessoires en verre époxy bobiné, qui pourraient être utilisés pour un circuit de refroidissement moteur ou le circuit incendie d'un bateau de pêche. Ils ont été testés pleins d'eau, avec ou sans circulation. Deux épaisseurs, 5 et 17 mm ont été expérimentées, et la comparaison a été faite avec des canalisations en acier employées habituellement pour les mêmes applications, qui ont été placées en parallèle dans le four lors de chaque test.

### Description des essais

Des portions de tuyaux de 4 mètres de longueur, et de 100 mm de diamètre, équipées ou non de coudes, ont été placées dans un four, reposant sur des supports métalliques verticaux distants de 2,5m. Le tuyau était fixé uniquement à une extrémité, afin de laisser la dilatation opérer librement. La longueur exposée à la chaleur était 3,50 m.

Tous les tests sauf un ont été faits avec les tuyaux pleins d'eau avec ou sans circulation à 40 m<sup>3</sup>/heure. La pression était maintenue à 5 bars avec soupape de sécurité à 5,5 bars. Pour l'élévation de température, deux courbes ont été utilisées:

-La courbe SOLAS, qui simule la variation de température dans le cas d'un incendie dans la salle des machines, est adoptée par OMI et par le Secrétariat à la Mer pour les essais de cloisons et de portes. Elle est similaire à la courbe ISO utilisées dans le bâtiment.

-La courbe H, ou courbe MOBIL, ou courbe Hydrocarbure, simule un feu d'hydrocarbures gazeux. Elle est choisie par l'OMI pour des essais sur tuyauteries.

## Contrôles

Tous les échantillons ont été contrôlés visuellement et pesés avant et après essai. Pendant les essais, la température du four et de l'eau était enregistrée en continu, ainsi que les pressions et les débits. A la fin de chaque essai, les tubes étaient maintenus sous pression à 5 bar pendant 15 mn, et le taux de fuite a été mesuré. Ensuite, les tubes ont été découpés, et l'épaisseur restante et l'épaisseur encore intacte ont été mesurées. Un film vidéo présentant les essais et les résultats a été réalisé.

## Résultats

Les principaux résultats sont donnés dans le tableau 3.

Effet du débit d'eau.

- Essais à 40 m<sup>3</sup>/heure

Dans ce cas, les tubes composites droits résistent au test avec la courbe H pendant au moins 60 minutes sans fuite.

Les tuyaux assemblés au moyen de coudes collés résistent 60 mn, mais avec une fuite faible à 5 bars en fin d'essai (goutte à goutte).

-Essais à 0 m<sup>3</sup>/heure

Les tubes droits expérimentés sans circulation d'eau résistent au test H pendant une heure avec une fuite faible en fin d'essai.

Les tuyauteries équipées de coudes placées dans les mêmes conditions, donnent un résultat semblable au bout de 30 ou 60 minutes d'essai (goutte à goutte au niveau du joint collé).

Pertes en poids- Epaisseur restante:

-Les poids mesurés montrent tout d'abord la grande légèreté des tubes composites en comparaison avec les tubes en acier employés pour la même application (4 fois plus légers).

-Les pertes en poids et les épaisseurs encore intactes sont peu différentes au bout de 30 et 60 minutes d'essai sur des matériaux de même type. Ceci confirme les observations faites au cours des essais: après une phase initiale de combustion intense, un état à peu près stable semble atteint en moins de 15 minutes, puis les calories apportées par le four sont évacuées au travers du tube par l'eau de circulation, ou bien la vapeur relâchée par la soupape de sécurité. L'évolution est ensuite très lente.

## ESSAIS DE RESISTANCE AU FEU DE PANNEAUX

Très peu d'informations sont disponibles sur la résistance au feu des matériaux fabriqués par les chantiers navals. Les essais qui suivent ont été faits selon la procédure de l'OMI pour la classification de cloisons et de portes.

### Description des essais

La description détaillée de la procédure d'essai de l'OMI est décrite dans la résolution A 517(13)

La courbe SOLAS choisie pour simuler le feu à bord d'un navire correspond aux températures suivantes:

556°C	après	05 mn
659°C	après	10 mn
718°C	après	15 mn
821°C	après	30 mn
925°C	après	60 mn

Une cloison classée F OMI doit être capable de s'opposer au passage des flammes et de la fumée pendant 30 minutes, et doit avoir un pouvoir isolant tel que, pendant les 30 minutes, la température moyenne sur la face non exposée n'augmente pas de plus de 139°C par rapport à la température initiale, et qu'en aucun point incluant les joints, la température maximale n'augmente de plus de 225°C par rapport à la température initiale.

Les essais sont faits en four. Le panneau à expérimenter remplace une face verticale ou horizontale, et il doit avoir comme dimensions minimales 2440 x 1910 mm.

Dans un premier temps, des essais d'orientation ont été faits sur une série de petits panneaux de 900x600mm, en utilisant un four cubique de 1200 mm d'arête. Tous les panneaux ont été testés en position verticale. Grâce à l'emploi de cette méthode moins coûteuse, l'influence de différents paramètres a pu être étudiée, et ceci a permis de préciser la composition des panneaux de grandes dimensions testés ensuite en suivant la résolution A 517(13).

Les matériaux sont donnés dans le tableau 4. Ils ont été fabriqués au contact, sauf le matériau phénolique qui a été moulé par un

fournisseur de résines. La liste inclut les matériaux les plus courants nus ou protégés, et quelques matériaux supposés plus performants dans des essais au feu.

## **Contrôles**

La température était enregistrée en continu en cinq endroits sur la face non exposée, et, quand nécessaire dans l'épaisseur du matériau (pour les sandwichs aux interfaces peaux-âme) ou sous les couches d'isolation.

Pour les deux essais en grand, la résolution A 517(13) a été appliquée en vue d'une acceptation des panneaux en classe F. Un seul panneau a été expérimenté dans le test de cloison. Il s'agit du sandwich balsa S1 protégé par une couche de laine de roche BX 643 ISOVER de 59 mm d'épaisseur. Pour l'essai de pont, deux panneaux ont été expérimentés simultanément: Le panneau précédent, sandwich S1 protégé par 50 mm de laine de roche, et le sandwich PVC S2 protégé par une couche de 38 mm de fibre céramique Kerlane 45. Les panneaux ont été fixés dans des cadres en béton et en acier pour empêcher toute dilatation.

Un film vidéo film a été réalisé pendant les essais.

## **Résultats**

Essais d'orientation:

Un exemple des courbes obtenues est donné dans la figure 1. Pour faciliter les comparaisons, les temps pour atteindre 150°C sur la paroi froide ont été reportés dans le tableau 4 ainsi que les températures après 15, 30 et 60 minutes.

La résistance au feu d'un stratifié monolithique en verre - polyester mince de 5 à 8 mm d'épaisseur, comme il en existe couramment sur les petits bateaux, est très faible: Les 150 °C sont atteints en moins de 10 minutes sur la paroi froide. Les autres matériaux monolithiques minces expérimentés, incluant le phénolique, ne donnent pas de résultats significativement meilleurs.

Les performances sont supérieures avec un monolithique plus épais et les matériaux sandwichs (150°C atteints après plus d'1 heure pour le monolithique verre-polyester de 3 cm d'épaisseur, 17 mn pour le

sandwich PVC S2, et 30 mn pour le sandwich balsa S1). Dans le cas du sandwich PVC S2, l'âme commence à fondre très tôt, après 2 à 3 minutes.

Des résultats très supérieurs sont obtenus avec les matériaux protégés par des couches d'isolant thermique, même en couche peu épaisse:

Seulement 50mm de laine de roche protègent correctement le monolithique fin L1 et le sandwich balsa S1 pendant au moins 30 minutes.

Les essais en grand OMI réalisés sur les sandwichs balsa et PVC protégés, ont été conclus par l'acceptation de ces matériaux en classe F OMI, après examen des courbes de température sur la paroi non exposée. Les procès verbaux correspondants ont été remis.

Dans le cas du sandwich PVC, la mousse a commencé à fondre avant moins de 15 mn, ce qui provoque la chute des propriétés mécaniques.

Pour les matériaux sandwichs, la température de la face non exposée n'est pas le seul paramètre important. La dégradation par le feu -perte d'adhésion, ou fonte de la mousse, ou destruction- à l'interface peau-âme du côté exposé au feu doit être repérée et évitée. Ceci impose la pose de capteurs supplémentaires, et le définition de critères d'acceptation nouveaux.

Une autre possibilité est de prendre en compte les propriétés mécaniques du matériau lors du test lui même en effectuant par exemple l'essai sous charge. La mesure de résistance mécanique après refroidissement n'est pas significative car les matériaux continuent à évoluer pendant le refroidissement du four.

Une autre conclusion des essais en grand est l'importance des fumées produites, dont la nocivité a été ressentie en particulier dans le cas du sandwich contenant de la mousse PVC.



<b>Résine</b>	<b>Renfort</b>	<b>Ame</b>	<b>Structure</b>
<b>Matériau 01: L1</b> Orthopht. polyester	ROVIMAT verre	-	5 RM 500/300
<b>Matériau 02: L2</b> Isopht. polyester	Quadriaxial verre	-	6 Qx 1034
<b>Matériau 03: S1</b> Orthopht. polyester	mat M300 + RM500/300	Balsa 19 mm	M300/2RM/ Balsa/ 2RM/M300
<b>Matériau 04: S2</b> Isopht.	Qx 1034	PVC 25 mm	2Qx/PVC/2Qx
<b>Matériau 05:</b>	L1 avec RV 1500 300 extérieur		
<b>Matériau 06:</b>	L1+ 15% hydrate d'alumine		
<b>Matériau 07:</b>	L1 + peinture LURIFIGE DB		
<b>Matériau 08:</b>	L1 +additif chloré+revêtement Zn		
<b>Matériau 09:</b>	Phénolique + 5 RV 500/300:		
<b>Matériau 10:</b>	Epoxy tube 1		
<b>Matériau 11:</b>	Epoxy tube 2		
<b>Matériau 12:</b>	L1 + BX 643/ 117mm		
<b>Matériau 13:</b>	L1 + BX 643/ 59 mm		
<b>Matériau 14:</b>	S1 + BX 643/ 59mm		
<b>Matériau 15:</b>	S2 + KERLANE / 38 mm		
<b>Matériau 16:</b>	L1 épais(30mm)		

**TABLEAU 1 : Matériaux expérimentés**

Matériau	Dm/ 100	VOF4/ 30	ITC/2	I.F.	Clst F
01 L1	6.3	31.2	2.25	39.8	F2
02 L2	4.2	5	1.9	11.1	F1
03 S1	6.6	33.3	3.8	43.6	F3
04 S2	9.2	34	21	64.2	F3
05 L1+Verre	3.0	10.8	2.25	16.1	F1
06 L1+Hyd.Al	4.3	23.4	2.4	30.1	F2
07 L1+LURI	2.8	5.8	2.7	11.3	F1
08 L1i+Zn	5.1	6.6	43.1	54.8	F3
09 Phénolic	0.3	0.06	7.6	8.0	F1
10 Tube 1	2.6	5.2	4.1	11.8	F1
11 Tube 2	4.6	10.7	5.2	20.5	F2

Materiau	Ti	$\delta T$	$\Sigma Hm$	q	Clst M
01 L1	96	1100	1980	62	M4
02 L2	94	1106	1070	34	M3
03 S1	110	1090	1660	46	M3
04 S2	70	1130	2036	86	M4
05 L1+Verre	100	1100	2070	62	M4
06 L1+Hyd.Al	120	1080	1620	41	M3
07 L1+LURI	118	1085	1208	31	M3
08 L1i+Zn	0	0	0	0	M1
09 Phenolic	308	194	23	0.05	M1
10 Tube 1	148	390	123	4.2	M2
11 Tube 2	134	403	103	3.8	M2

**TABLEAU 2 : Réaction au feu: résultats**

Test	Matériau	Débit m3/h	Courbe/ Temps	Epaisseur Reste/Intact mm/mm		Poids Initial/Perte Kg/Kg		Fuites l/mn
N°1	1a:tube comp. A5mm	40	H/60	3	1-2	-	-	0
	1b:tube comp. A17mm		H/60	14-15	14-15	-	-	0
	1c:tube acier		H/60	-	-	82	-	0
N°2	2a:tube comp.A5mm	0	S/60	5	3	19.3	1.3	0.21
	2b:tube comp.A17mm		S/60	16	16	59.8	8.4	0.1
	2c:tube acier		S/60	-	-	82	-	0
N°3	3a:tube comp.A5mm	0	H/60	4-5	1	18.4	1.8	0.17
	3b:tube comp.A17mm		H/60	14-15	14-15	59.2	6.5	0.22
	3c:tube acier		H/60	-	-	82	-	?
N°4	4a:tube comp.A5mm	0	H/30	4	1	18.2	1.5	0.18
	4b:tube comp.A17mm		H/30	20-35	0	59.8	9.2	Rupt
	4c:tube acier		H/30	-	-	82	-	?
N°5	5a:tube 2 elb.comp.B6mm	40	H/60	5	1	24	1.4	Rupt
	4B:tube 2 elb. acier		H/60	-	-	85	0	
N°6	6a:tube 2 elb.comp.B6mm	0	H/30	5	1-2	23.9	-	0.15
	6b:tube 2 elb. acier		H/30	-	-	85	-	0

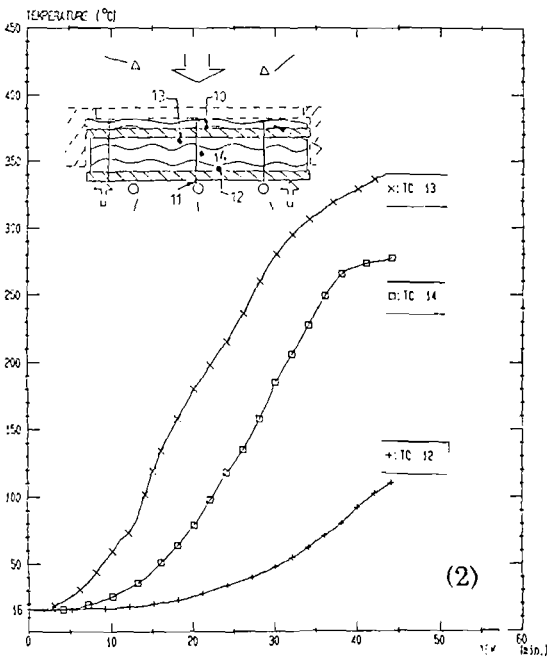
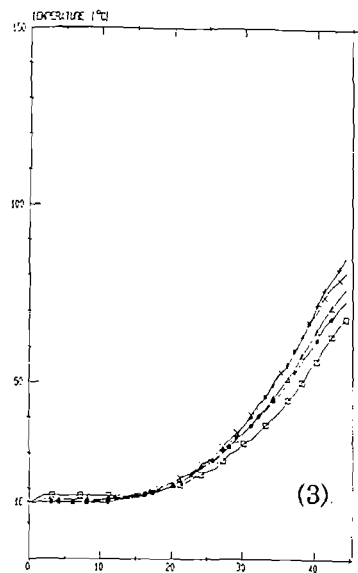
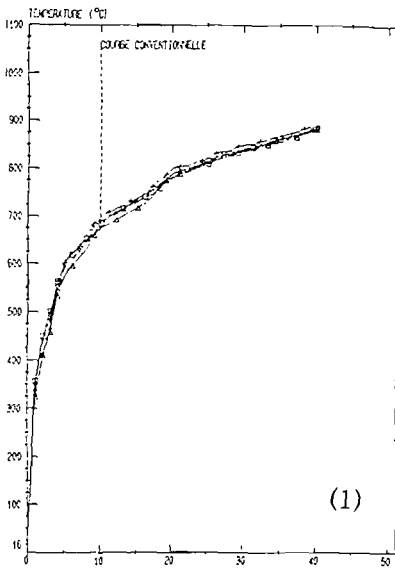
TABLEAU 3 : Résistance au feu des tuyauteries

	T 150	t15	t30	t60
<b>01: L1</b>	10 mn	300	-	-
<b>02: L2</b>	12 mn	180	360	-
<b>03: S1</b>	30 mn	70	150	-
<b>04: S2</b>	17 mn	120	>300	-
<b>05: L1+verre</b>	10 mn	250	-	-
<b>06: L1+ Al hyd.</b>	11 mn	250	500	-
<b>09: Phenolic</b>	10 mn	350	-	-
<b>12: L1+ BX 643 117mm</b>	>30	15	22	-
<b>13: L1+ BX 643 59 mm</b>	60 mn	30	70	150
<b>14: S1+ BX 643 59mm</b>	>60mn	15	40	90
<b>15: S2+Kerlane 38 mm</b>	>30	15	35	-
<b>16: L1 30mm</b>	>60 mn	20	70	110

T 150: Temps pour atteindre 150°C

t15, t30, t60: températures après 15, 30, 60 mn

TABLEAU 4 : Résistance au feu des panneaux



Températures du four(1), aux interfaces et dans l'âme en PVC (2), et sur la face non exposée(3).

FIGURE 1 : Essais de résistance au feu sur le panneau 15