

Chapitre 9

LA TENUE AU FEU DE L'ALUMINIUM

1. La guerre des Malouines	137
2. La réaction au feu de l'aluminium	137
2.1 Non-inflammabilité	138
2.2 Non-émanation de fumée	138
2.3 Non-étincelage	138
3. Le classement de l'aluminium	139
4. La protection passive de l'aluminium	139
5. Les propriétés thermiques de l'aluminium	140
6. Évolution des propriétés physiques de l'aluminium en fonction de la température	140
6.1 Évolution des caractéristiques mécaniques	140
6.2 Évolution des propriétés physiques	142

9. LA TENUE AU FEU

QUE CE SOIT pour un navire ou pour un bâtiment à terre, la tenue au feu des matériaux le constituant est un des paramètres, sans doute le plus important, de la sécurité des personnes embarquées et de la pérennité du navire en cas d'incendie.

La tenue au feu d'un matériau dépend de ses propriétés physiques intrinsèques (point de fusion, chaleur spécifique, etc.), de sa tendance à l'ignition, au risque de dégagement de fumées en cas de combustion, de l'évolution de ses caractéristiques mécaniques. La diminution éventuelle de celles-ci avec l'élévation de température réduit la capacité à supporter une charge, etc.

Mais la tenue au feu dépend aussi des conditions d'emploi du maté-

riau : son emplacement, les protections éventuelles, les performances (maintien de sa rigidité, échauffement, etc.) lors d'un incendie, généralement imposées par les règlements tels que le SOLAS et le recueil HSC pour les navires à grande vitesse.

Dans la construction navale, l'aluminium fut d'abord utilisé au cours des années 1920-1930, pour la réalisation du mobilier des cabines à passagers des paquebots, en remplacement du bois réputé dangereux en cas d'incendie, car il constitue une charge d'incendie et sa combustion provoque un dégagement de fumées dont on connaît depuis longtemps l'effet catastrophique [1, 2].

L'emploi de l'aluminium a longtemps été contesté dans certai-

nes industries fortement exposées aux risques d'incendie telles que la pétrochimie ou l'offshore.

En dépit de certaines réserves, tenant en particulier à son bas point de fusion, et des controverses nées dans les années 1980 à la suite de la guerre des Malouines, les applications marines de l'aluminium n'ont cessé de progresser depuis 1960 dans la construction navale (navires à passagers, quartiers de vie, liaison de ponts) et dans l'offshore [3, 4].

VESUVIO JET



DE L'ALUMINIUM

1. LA GUERRE DES MALOUINES

La tenue au feu de l'aluminium a fait l'objet d'une vive controverse en mai 1982, lors de la guerre des Malouines qui opposa les forces navales britanniques aux avions argentins et au cours de laquelle neuf navires britanniques furent coulés [5].

Parmi ceux-ci figurait un des deux destroyers de « type 42 » coulés, le *Sheffield*, qui fut atteint par un missile Exocet.

Il fut alors rapporté dans certains médias que ces navires avaient coulé parce que leurs superstructures en alliage d'aluminium avaient été enflammées lors de l'impact des missiles ou des bombes larguées par avion.

L'enquête qui suivit montra que, sur les neuf navires endommagés et coulés, trois seulement avaient des superstructures en alliage d'aluminium, *et celles du Sheffield étaient en acier !*

Rien ne permit d'établir une relation de cause à effet entre l'aluminium et le sinistre de ces navires.

Les autorités britanniques conclurent dans un « livre blanc » publié le 14 décembre 1982 par le ministère de la Défense : « Il n'y a aucune preuve que l'aluminium ait contribué à la perte de ces navires » [6].

2. LA RÉACTION AU FEU DE L'ALUMINIUM

Il est maintenant définitivement acquis et admis que l'aluminium « massif » (1) ne s'enflamme pas, ne dégage pas de fumée quand il est exposé à un incendie, et qu'enfin il ne provoque pas d'étincelles lors d'un choc.

(1) Comme la plupart des poudres métalliques, la poudre d'aluminium est très inflammable et donc d'un maniement à risques. De ce fait, elle a un comportement au feu totalement différent de celui du métal « massif » naturellement recouvert de son film d'oxyde naturel. Les moteurs à combustibles solides des fusées sont généralement constitués de charge pyrophorique à base de poudre d'aluminium spécialement conditionnée.

HSV2



2.1 | Non-inflammabilité

Il n'existe pas de preuve que l'aluminium solide ou liquide s'enflamme de lui-même dans un incendie [7]. De nombreux essais de laboratoire et l'expérience l'ont confirmé.

Des essais ont montré que, dans l'oxygène pur, sous la pression de 1 013 bars, la température d'ignition de l'aluminium est supérieure à 1 000 °C, plus élevée que celle des autres métaux usuels qui est de 930 °C pour l'acier, 900 °C pour le zinc. L'ordre des températures d'ignition n'est pas dépendant de celui des températures de fusion [8]. Il y a des métaux dont la température d'ignition est inférieure à la température de fusion et réciproquement (tableau 62).

L'extrême difficulté d'enflammer l'aluminium tient au fait que le film d'oxyde naturel freine la réaction du métal avec l'air ou l'oxygène en « enfermant » le métal liquide dans une enveloppe suffisamment étanche au milieu extérieur pour empêcher l'ignition (2). En d'autres termes, il y a compétition entre deux processus : la formation du film d'oxyde (oxydation) et la combustion de l'aluminium (3).

D'ailleurs, dans des mélanges oxygène-argon, l'aluminium ne s'enflamme que si la température dépasse celle du point de fusion

de l'alumine (2 250 °C), et la combustion de l'aluminium ne devient autonome que si la température atteint son point d'ébullition (3 073 °C) [9].

Dans les fonderies de recyclage, les déchets d'aluminium, quel que soit l'alliage, sont introduits tels quels dans des fours réverbères. La température du bain de fusion est de l'ordre de 750-800 °C !

L'aluminium fondu peut être arrosé par des jets d'eau. La quantité d'eau décomposée par l'aluminium fondu est faible parce que la réactivité du métal est freinée par la formation du film d'oxyde. Il y a très peu d'hydrogène dégagé, donc pas de risque d'explosion.

2.2 | Non-émanation de fumée

Comme pour tous les métaux et alliages usuels, l'échauffement ou la fusion de l'aluminium ne provoque aucune fumée ou émanation de gaz toxique (4).

2.3 | Non-étincelage

Il faut rappeler que l'aluminium (et ses alliages) ne produit pas d'étincelles au moindre choc [4]. C'est la raison pour laquelle on a longtemps utilisé du matériel en alliage d'aluminium dans les mines de charbon (5).



MÂT RADAR

(2) L'expérience montre qu'il n'est pas possible d'enflammer au contact d'une flamme quelconque une feuille mince à usage ménager dont l'épaisseur est de 6 à 7 µm.

(3) Le film d'oxyde est capable de se former sous des pressions très réduites d'oxygène, de l'ordre du millibar et moins, et à des vitesses élevées, de l'ordre de la milliseconde. C'est ce qui explique que l'usinage et le sciage de l'aluminium ne présentent pas de risques.

(4) Sauf ceux émanant de la combustion ou de la décomposition à chaud des revêtements éventuels.

(5) En Europe, les citernes routières de transport de produits pétroliers sont en majorité en alliage d'aluminium (dont le 5083, le 5186, le XTral728).

TEMPÉRATURES D'IGNITION DANS L'OXYGÈNE

Métal	Température d'ignition dans l'oxygène pur (°C)	Température de fusion (°C)
Magnésium	623	650
Molybdène	750	2 620
Plomb	870	327
Zinc	900	419
Fer	930	1 540
Aluminium	1 000	666

Tableau 62

3. LE CLASSEMENT DE L'ALUMINIUM

L'aluminium est classé non inflammable :

- suivant la norme BS 476 ^[10],
- suivant le test ASTM E136 ^[11].

La Convention Internationale pour la Sauvegarde de la Vie Humaine en Mer (SOLAS) ^[12] classe l'aluminium parmi les matériaux non combustibles et autorise explicitement l'emploi d'alliages d'aluminium dans la construction navale (6) :

Acier ou autre matériau équivalent : Toutes les fois que se présentent les mots « acier ou autre matériau équivalent », il faut entendre par « matériau équivalent » tout matériau incombustible qui, de lui-même ou après isolation, possède des propriétés équivalentes à celles de l'acier du point de vue de la résistance mécanique et de l'intégrité, à l'issue de l'essai au feu standard approprié (par exemple, un alliage d'aluminium convenablement isolé).

4. LA PROTECTION PASSIVE DE L'ALUMINIUM

Les règles de protection des structures en alliages d'aluminium sont donc les mêmes que pour celles en acier (7) et s'appliquent bien évidemment sans aucune difficulté :

■ pour les cloisonnements de type A :

– ils doivent être construits de façon à pouvoir empêcher le passage de la fumée et des flammes jusqu'à la fin d'un essai au feu standard d'une heure, suivant la résolution A.754 (8),

– ils doivent être isolés au moyen de matériaux incombustibles approuvés de manière que la température moyenne de la surface non exposée ne s'élève pas de plus de 139 °C par rapport à la température initiale, et que la température en un point quelconque de cette surface, joints compris, ne s'élève pas de plus de 180 °C par rapport à la température initiale, à l'issue des délais suivants :

Classe A – 60	60 minutes
Classe A – 30	30 minutes
Classe A – 15	15 minutes
Classe A – 0	0 minute

■ pour les cloisonnements de type B :

– ils doivent être construits de façon à pouvoir empêcher le passage des flammes jusqu'à la fin de la première demi-heure d'un essai au feu standard d'une heure, – ils doivent avoir un degré d'isola-

tion tel que la température moyenne de la face non exposée ne s'élève pas de plus de 139 °C par rapport à la température initiale, et que la température en un point quelconque de cette surface, joints compris, ne s'élève pas de plus de 225 °C par rapport à la température initiale, à l'issue des délais suivants :

Classe B – 15	15 minutes
Classe B – 0	0 minute

Des produits plus performants en isolation thermique sont maintenant utilisés à bord des navires en alliage d'aluminium ^[13]. Il s'agit de « fibres (de silicates) vitreuses artificielles à orientation aléatoire, dont le pourcentage pondéral d'oxydes alcalins et d'oxydes alcalino-terreux (Na₂O + K₂O + MgO + BaO) est supérieur à 18 % ». Ils sont non toxiques, et conformes aux directives européennes ^[14].

Plus performants en capacité d'isolation, ils sont beaucoup moins épais, donc faciles à étaler.

Ils permettent ainsi un allègement important, de l'ordre de 40 % par rapport aux « laines de roche » traditionnelles, ainsi que l'illustre le tableau 63.

L'expérience montre que, pour un navire à passagers de 40 m de longueur, il suffit de 700 à 800 kg de nappe INSULFRAX pour réaliser l'isolation des parties du navire classées en type A.

EXEMPLE D'ISOLATION AVEC DES FIBRES UNIFRAX

Structure	Type	Épaisseur (mm)	Poids (*) (Kg m ⁻²)
Pont	A30	38	3,65
	A60	50	4,80
Cloison	A30	38	3,65
	A60	50	4,80

(*) Sur une surface plane.

Tableau 63

(6) SOLAS, Chapitre II-2, règle 3, paragraphe 7.

(7) SOLAS, Chapitre II-2, règle 3, paragraphe 3.

(8) Résolution A.754 : Recommandations sur les essais de résistance au feu pour les cloisonnements de type « A », « B » et « F », Code international pour l'application des méthodes d'essai au feu, Code FTP IMO éditions.

5. LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE L'ALUMINIUM

Le point de fusion de l'aluminium est beaucoup plus bas que celui de l'acier : 666 °C contre 1 530 pour l'acier (tableau 64).

Les propriétés thermiques de l'aluminium sont nettement plus élevées que celles de l'acier :

- conductivité thermique trois fois plus élevée pour les alliages de la famille 5000 et quatre fois plus élevée pour les 6000,
- chaleur spécifique deux fois plus élevée.

Le comportement thermique de l'aluminium est donc assez différent de celui de l'acier (9). À masse égale, il faut beaucoup plus d'énergie calorifique pour échauffer l'aluminium. Celle-ci diffuse plus facilement du fait de la très bonne conductivité thermique. La plus grande facilité à évacuer la chaleur élimine les points chauds et accroît la durée de service ultime à l'échauffement.

Toutefois, en facilitant la diffusion de l'énergie calorifique, l'aluminium contribue à échauffer un élément (volume ou structure) contigu. Pour l'éviter, il faut

alors ménager une isolation thermique des structures en alliage d'aluminium.

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium est très élevé, de l'ordre de 80 à 90 % du rayonnement incident contre 5 % pour l'acier peint et 25 % pour l'acier inoxydable. Ce fort pouvoir réflecteur a pour effet de prolonger la durée d'échauffement des structures en alliage d'aluminium exposées au rayonnement calorifique émis par un feu, et de limiter ainsi l'extension de l'incendie.

Le pouvoir réflecteur diminue très peu quand la surface est exposée à des températures élevées. Pour une température de surface comprise entre 500 et 600 °C, le pouvoir réflecteur reste à un bon niveau, de l'ordre de 70 %, même pour des surfaces très anciennes et oxydées.

Quand la surface est peinte ou couverte de suie, le pouvoir réflecteur diminue très nettement, il est inférieur de 20 à 30 % par rapport à une surface propre ^[15].

(9) Cf. chapitre 6.

6. ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'ALUMINIUM EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Comme pour la plupart des métaux usuels, l'élévation de température a pour effet de modifier plus ou moins sensiblement les propriétés physiques de l'aluminium.

6.1 Évolution des caractéristiques mécaniques

C'est un paramètre très important qu'il faut prendre en compte pour le maintien de l'intégrité des structures et de leur capacité à supporter les charges initiales.

Le module d'élasticité longitudinal des alliages d'aluminium diminue avec la température (tableau 65) ^[16], ainsi que l'illustre la figure 116.

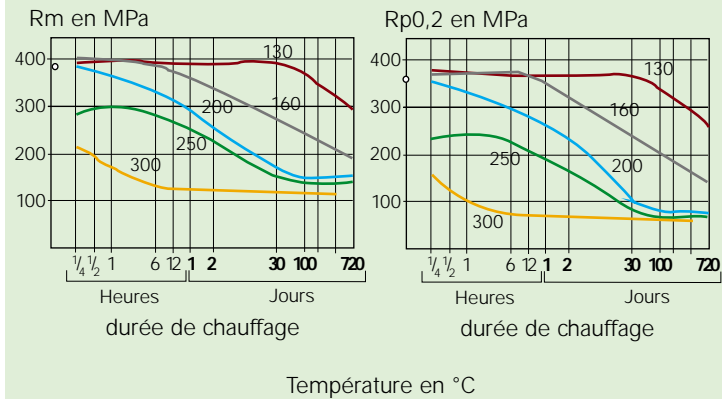
Les caractéristiques mécaniques, dont la limite d'élasticité des alliages d'aluminium, commencent à baisser avec la température, à partir de 150 °C, et la diminution atteint 50 % entre 200 et 250 °C (tableau 64 et figure 118). Les caractéristiques mécaniques de l'acier diminuent aussi avec la température, le seuil des 50 % se situe vers 600 °C (figure 119).

PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE L'ALUMINIUM

Propriétés	Aluminium 1050A O	5083 O	6005A T5	Acier E24
Intervalle de fusion (°C)	645/658	574/638	605/655	1 400/1 530
Point d'ébullition (°C)	2 425	2 425	2 425	2 860
Chaleur de fusion (kJ.Kg ⁻¹)	390	390	390	250
Capacité thermique massique (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	900	900	940	420
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	229	117	188	54
Coefficient de dilatation linéique (10 ⁻⁶ .K ⁻¹ , 20/100 °C)	23,5	24,2	23,6	13,5

Tableau 64

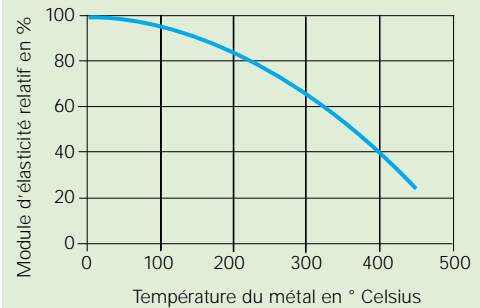
ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU 6082



D'après TALAT de l'EAA

Figure 117

ÉVOLUTION DU MODULE D'ÉLASTICITÉ



D'après TALAT de l'EAA

Figure 116

La durée de maintien en température (10) a peu d'effet sur les caractéristiques mécaniques des alliages à durcissement par écrouissage quand ils sont à l'état recuit, 5083 O et H111, 5086 O et H111, etc. Par contre, elle a un effet de recuit sur les alliages à durcissement structural : 6005A, 6061, 6082, à l'état T6, dès que le niveau de température dépasse 150 °C.

En pratique, si une structure portante constituée avec des alliages d'aluminium à durcissement structural est exposée pendant plusieurs heures à des températures supérieures à 150 °C, il y a lieu de vérifier après le sinistre les caractéristiques mécaniques résiduelles des éléments en alliages de la famille 6000. La perte de caractéristiques mécaniques est d'autant plus rapide que la température d'échauffement a été élevée (figure 117).

(10) Cf. tableau 23, chapitre 3.

ÉVOLUTION DE LA LIMITE D'ÉLASTICITÉ

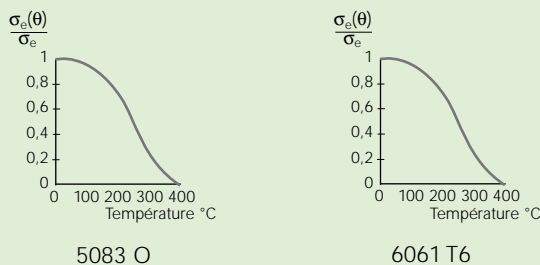


Figure 118

ÉVOLUTION DU MODULE D'ÉLASTICITÉ DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Température (°C)	Module d'élasticité (MPa)
20	70 000
50	69 300
100	67 900
150	65 100
200	60 200
250	54 600
300	47 600
350	37 800
400	28 000
550	0

Tableau 65

ÉVOLUTION DE LA LIMITE D'ÉLASTICITÉ ACIER [17]

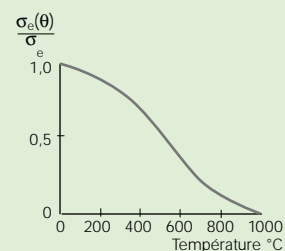


Figure 119

6.2

Évolution des propriétés physiques

La conductivité thermique augmente avec la température, entre 0 et 400 °C, suivant les formules empiriques (figure 120) :

- $\lambda_{al} = 0,07 \theta + 190$ pour les alliages des familles 1000, 3000 et 6000,
- $\lambda_{al} = 0,10 \theta + 140$ pour les alliages des familles 2000, 5000 et 7000.

La capacité thermique massique augmente également avec la température, entre 0 et 400 °C (figure 121), suivant les formules empiriques :

- $Cp_{al} = 0,418 \theta + 900$ pour le 5083,
- $Cp_{al} = 0,710 \theta + 880$ pour le 6061.

Le coefficient de dilatation linéique augmente avec la température, entre 0 et 500 °C (figure 122), suivant la formule empirique :

$$\Delta l/l = 0,1 \cdot 10^{-7} \theta_{al}^2 + 22,5 \cdot 10^{-6} \theta_{al} - 4,5 \cdot 10^{-4}$$

avec :

- l = longueur à 20 °C,
- Δl = dilatation due à la température,
- θ_{al} = température.

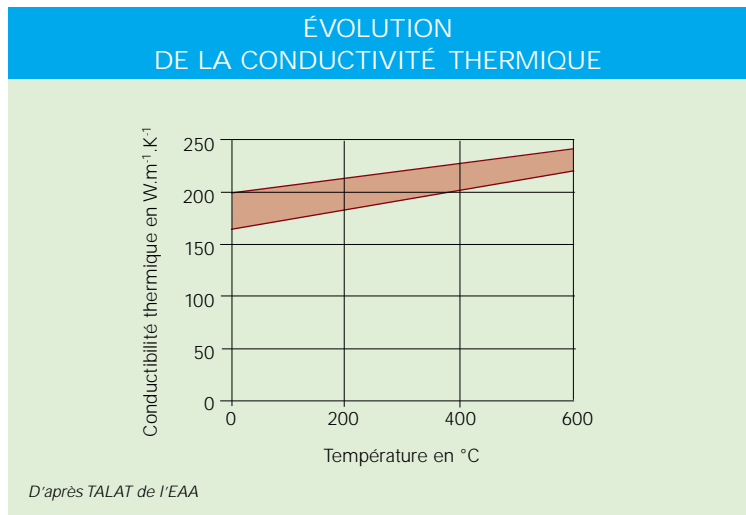


Figure 120

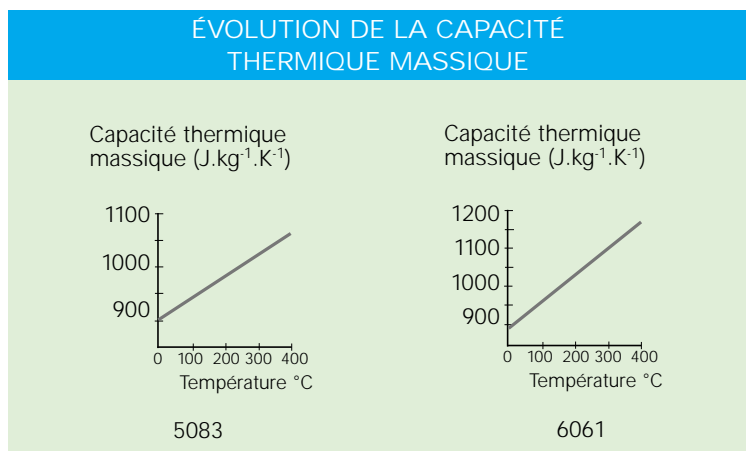


Figure 121

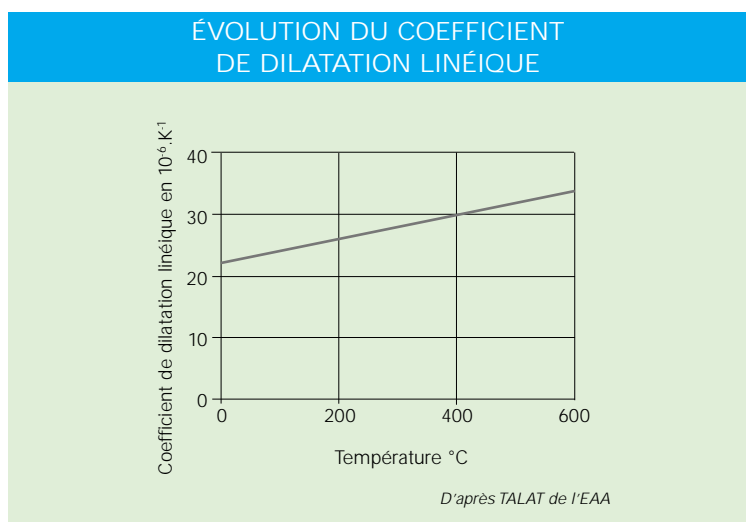


Figure 122

Références bibliographiques

- [1] « Évolution des applications de l'aluminium au cours des cinquante dernières années [1886 – 1936] », *Revue de l'Aluminium*, n° 84, 1936, pp. 381-398.
- [2] « Les constructions navales », P. DE LAPEYRIÈRE, *Revue de l'Aluminium*, n° 117, 1945, pp. 183-192.
- [3] *Fire*, notice ALFED, 1999, Aluminium Federation Limited, Broadway House, Calthorpe Road, Five Ways, Birmingham B15 1TN, UK
- [4] « Application of aluminium to offshore topside structures », M. J. BAILEY, *First International Offshore and Polar Engineering Conference*, Edinburgh, 1991, pp. 265-272.
- [5] « Fire Resistance and Flame Spread Performance of Aluminum and Aluminum Alloys », *The Aluminium Association*, First Edition, Dec. 1997.
- [6] « The Falklands Campaign : The lessons », presented to Parliament by the Secretary of Defense by command of her Majesty, December 1982.
- [7] « Résistance à l'incendie des constructions en aluminium » V. J. HILL, *Rapport du Comité International de développement de l'aluminium*, Rapport CIDA 7132, 1971.
- [8] « Combustion of metals in oxygen », A. V. GROSSE, J. B. CONWAY, *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 50, 1958, pp. 663-672.
- [9] « Température de l'aluminium pendant sa combustion dans les mélanges oxygène-argon, dans l'azote et dans l'air », R. BOURRIANES. *Compte rendu de l'Académie des Sciences*, Paris, vol. 275, 1972, pp. 717-720.
- [10] BS 476, Classification of Materials for Fire Resistance.
- [11] ASTM, Designation E136 : Standard Test Method for behavior of materials in a vertical tube furnace at 750 °C.
- [12] SOLAS, édition récapitulative de 1997. Texte récapitulatif de la Convention internationale de 1974 pour la sauvegarde de la vie humaine en mer et du Protocole de 1978 : articles, annexes et certificats, *Organisation Maritime Internationale*, Londres, 1997.
- [13] « Fire insulation meets demanding standards », P. HYNDS, *Speed at Sea*, 1999, p. 31.
- [14] Directives européennes 97/69, 80/1107, 89/391, 98/24.
- [15] « Aspects physiques des matériaux soumis au feu », S. LUNDBERG, *Hydro aluminium Structures*, Karmoy, TALAT Chapitre F2502.
- [16] Eurocode 9 : Calcul des structures en alliage d'aluminium – Partie 1 2 : Calcul du comportement au feu, CEN TC 250, ENV 1999-1 2 : 2000.
- [17] « Stabilité au feu des charpentes métalliques, matériaux de protection », C. AIMONE CAT, J. KRUPPA, G. LAMBOLEY, CTCIM BP1, F78470 Saint-Rémy-lès-Chevreuse, 1987.

ISOLATION DE LA SALLE DES MACHINES





YACHT À MOTEUR