

Chapitre 3

LES ALLIAGES D'ALUMINIUM DANS LES APPLICATIONS MARINES

1. Les familles d'alliages de corroyage	36
2. Désignation des alliages d'aluminium de corroyage	36
3. Les alliages à durcissement par écrouissage	37
3.1 Adoucissement par le traitement thermique de recuit	37
3.2 Les états métallurgiques	38
4. Les alliages à durcissement structural	39
4.1 Principe du durcissement structural	39
4.2 Traitement d'adoucissement par recuit	40
4.3 Désignation des états métallurgiques	41
5. Les principaux alliages pour applications marines	43
5.1 Caractéristiques mécaniques garanties à la température ambiante	43
5.2 Caractéristiques mécaniques aux basses températures	43
5.3 Caractéristiques mécaniques aux températures supérieures à 100 °C	45
6. Un nouvel alliage, le Sealium®, « Marine Grade »	45
6.1 Caractéristiques mécaniques	46
6.2 La tenue en fatigue	47
6.3 La tenue à la corrosion	47
7. Les familles d'alliages de moulage	48
7.1 Les alliages au silicium de la famille 40000	48
7.2 Les alliages au magnésium de la famille 50000	48
8. Propriétés des alliages de moulage	49
8.1 Compositions chimiques	49
8.2 Propriétés physiques	49
8.3 Aptitudes technologiques	50
8.4 Caractéristiques mécaniques	50

3. LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

LES ALLIAGES d'aluminium de corroyage (laminés et extrudés) utilisés dans les applications marines appartiennent, pour la plupart, à deux familles :

- la famille 5000, constituée d'alliages aluminium-magnésium,
- la famille 6000, constituée d'alliages aluminium-magnésium-silicium.

Compte tenu de leurs aptitudes spécifiques à la transformation, les demi-produits laminés sont majoritairement en 5000 (*Sealium*[®], 5083, 5086, 5754, etc.), tandis que les extrudés sont en 5000 (*Sealium*[®], 5083) et en 6000 (6082, 6005A, 6061, etc.) (1).

Ils ont été choisis pour leur niveau de caractéristiques mécaniques, leur facilité d'assemblage par soudage et leur excellente résistance à la corrosion en milieu marin.

La composition des alliages de corroyage utilisés dans les applications marines est indiquée dans le tableau 9.

Les propriétés des demi-produits des alliages de corroyage, dont :

- les caractéristiques mécaniques,
- l'aptitude à la déformation à froid,
- la résistance à la corrosion,

dépendent :

- de la composition chimique de l'alliage,
- de la gamme de transformation,
- des traitements thermiques qu'ils ont subis au cours de la gamme de transformation.

Ces propriétés peuvent être sensiblement modifiées lors :

- des déformations à froid (ou à chaud),
- du soudage, qui réchauffe le métal de part et d'autre du cordon de soudure (2).

Il est donc indispensable de bien connaître l'influence de ces opérations sur les caractéristiques mécaniques et les autres proprié-

tés afin d'en mesurer les effets et d'en tenir compte dans les calculs de structure, par exemple.

Cette appréciation s'appuie sur des notions de base de la métallurgie des alliages d'aluminium dont nous rappelons ci-après succinctement quelques-uns des aspects fondamentaux (3).

(1) Le *Sealium*[®] est du 5383 à l'état H116.

(2) Cf. chapitre 6.

(3) Pour plus d'informations, consulter la brochure *Demi-produits en aluminium* de Pechiney Rhenalu, 160 pages, édition 1997.

SEAHAWK



DANS LES APPLICATIONS MARINES

**COMPOSITION DES PRINCIPAUX ALLIAGES DE CORROYAGE
POUR LES APPLICATIONS MARINES (*)**

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Remarques (**)
5454	0,25	0,40	0,10	0,50 1,0	2,4 3,0	0,05 0,20	0,25	0,20	
5754	0,40	0,40	0,10	0,50	2,6 3,6	0,30	0,20	0,15	Mn + Cr : 0,1 - 0,6
5086	0,40	0,50	0,10	0,20 0,7	3,5 4,5	0,05 0,25	0,25	0,15	
5083	0,40	0,40	0,10	0,40 1,0	4,0 4,9	0,05 0,25	0,25	0,15	
5383 (1)	0,25	0,25	0,20	0,7 1,0	4,0 5,2	0,25	0,40	0,15	Zr ≤ 0,20
6060	0,30 0,6	0,10 0,30	0,10	0,10	0,35 0,6	0,05	0,15	0,10	
6005A	0,50 0,9	0,35	0,30	0,50	0,40 0,7	0,30	0,20	0,10	Mn + Cr : 0,12 - 0,50
6106	0,30 0,6	0,35	0,25	0,05 0,20	0,40 0,8	0,20	0,10		
6063	0,20 0,6	0,35	0,10	0,10	0,45 0,9	0,10	0,10	0,10	
6082	0,7 1,3	0,50	0,10	0,40 1,0	0,6 1,2	0,25	0,20	0,10	
6061	0,40 0,8	0,7	0,15 0,40	0,15	0,8 1,2	0,04 0,35	0,25	0,15	

(*) Extrait de la norme EN 573-3.

Tableau 9

(**) Quand une seule valeur est indiquée, elle correspond à un maximum autorisé.

NATALIE M



1. LES FAMILLES D'ALLIAGES DE CORROYAGE

Il y a 8 familles d'alliages de corroyage industriels dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 10.

Elles se répartissent en deux catégories :

- les alliages à durcissement par écrouissage, ceux dont les caractéristiques mécaniques dépendent des gammes de laminage (ou de filage) et des recuits intermédiaires (et finaux, s'il y en a). Ils appartiennent aux familles 1000, 3000, 5000 et 8000,

- les alliages à durcissement structural, dont les caractéristiques mécaniques dépendent des traitements thermiques de mise en solution, trempe, et de revenu. Ils appartiennent aux familles 2000, 6000 et 7000.

Bien qu'ayant des caractéristiques mécaniques élevées, les alliages des familles 2000 au cuivre et 7000 au zinc (avec ou sans cuivre) ne peuvent être utilisés dans les applications marines sans protec-

tion spéciale, parce qu'ils n'ont pas une résistance suffisante à la corrosion.

Les alliages 7000 sans cuivre sont soudables à l'arc. Mais la grande sensibilité de la zone affectée thermiquement à la corrosion feuilletante exige des précautions très strictes pour les applications marines, dont la construction navale (4).

2. DÉSIGNATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE CORROYAGE

La désignation numérique des alliages d'aluminium de corroyage, en 4 chiffres, tous accolés, s'est imposée partout, à partir de 1970. Le CEN (5) en a normalisé les nouvelles désignations en 1994.

Conformément à la norme EN 573-1 (6)(7), le premier chiffre de cette désignation correspond à la famille d'alliage, ainsi qu'indiqué dans le tableau 10. Les 3 chiffres suivants n'ont pas de signification particulière.

En fait, la désignation d'un demi-produit en alliage d'aluminium comprend deux parties :

- la première – 4 chiffres accolés – indique la famille à laquelle il appartient, donc l'élément d'alliage dominant,

- la seconde – 1 lettre (H ou T) suivie de 1 ou plusieurs chiffres – indique son état métallurgique (tableaux 12 à 15, pp. 38-39 et 18, p. 41). À chaque état métallurgique correspond un niveau de caractéristiques mécaniques garanties par les normes (Annexe 1).

(4) Cf. chapitre 10, paragraphe 5.

(5) CEN : Comité européen de normalisation.

(6) EN 573-1, Aluminium et alliages d'aluminium. Partie 1 : Système de désignation numérique.

(7) En toute rigueur, la norme EN 573-1 prévoit une désignation « alphanumérique » en deux parties, précédées chacune de EN AW (aluminium wrought) : la première numérique de 4 chiffres, la seconde basée sur les symboles chimiques (comme dans la désignation ISO), indiqués entre crochets. Formellement, le 3003 s'écrit « EN AW-3003 [EN AW-Al Mn1 Cu] ».

FAMILLES D'ALLIAGES DE CORROYAGE

Mode de durcissement	Famille	Élément d'alliage	Étendue de la teneur (en %)	Additions possibles	Résistance mécanique Rm (en MPa)
Écrouissage	1000	Aucun		Cu	50 - 150
	3000	Manganèse	0,5 à 1,5	Mg, Cu	100 - 260
	5000	Magnésium	0,5 à 5	Mn, Cr	100 - 400
	8000	Fer et Silicium	Si : 0,30 à 1 Fe : 0,6 à 2		130 - 190
Durcissement structural	6000	Magnésium et Silicium	Mg : 0,5 à 1,5 Si : 0,5 à 1,5	Cu, Cr	150 - 310
	2000	Cuivre	2 à 6	Si, Mg	300 - 450
	7000	Zinc et Magnésium	Zn : 5 à 7 Mg : 1 à 2	Cu	sans cuivre : 320 - 350 avec cuivre : 430 - 600
	4000	Silicium	0,8 à 1,7		150 - 400

Tableau 10

3. LES ALLIAGES À DURCISSEMENT PAR ÉCROUISSAGE

Ils appartiennent aux familles 1000, 3000, 5000 et 8000 (8). Leur gamme de fabrication est faite d'une suite de mises en forme (le laminage pour les tôles) à chaud, puis à froid, associée à des recuits intermédiaires et/ou finaux.

Le durcissement par écrouissage correspond à une modification de structure provoquée par une déformation plastique. Il se produit lors de la fabrication d'un demi-produit pendant le laminage, l'étirage, le tréfilage, mais également au cours de la mise en œuvre des demi-produits en atelier lors de la mise en forme, par pliage, par exemple.

L'écrouissage se traduit par une augmentation de la résistance mécanique et de la dureté, et par une diminution de la ductilité, donc de la capacité de déformation. Cet effet est d'autant plus marqué que la mise en forme subie est importante ou que le taux d'écrouissage est élevé.

Le niveau de caractéristiques mécaniques accessible dépend de la composition de l'alliage. Ainsi, l'alliage 5083, qui contient entre 4 et 4,9 % de magnésium, acquiert une dureté plus élevée, mais une capacité de déformation plus limitée que l'alliage 5754 qui ne contient qu'entre 2,6 et 3,6 % de magnésium.

Cependant, l'augmentation progressive de la résistance mécanique atteint toujours une limite au-delà de laquelle toute déformation devient difficile, voire impossible. Il faut alors, si l'on veut poursuivre la mise en forme, « adoucir » le métal, par des traitements thermiques de recuit.

3.1 Adoucissement par le traitement thermique de recuit

Il est possible de restaurer la capacité de déformation du métal écroui par un traitement thermique appelé « recuit ».

Au cours de ce traitement, qui est effectué à une température supérieure à 300 °C, la dureté et les caractéristiques mécaniques du métal commencent par diminuer lentement, c'est la restauration suivant la ligne A-B (figure 19). Elles diminuent ensuite plus rapidement, ce qui correspond à la recristallisation (courbe B-C), pour finalement atteindre une valeur minimale correspondant aux caractéristiques mécaniques du métal recuit (ligne C-D).

Ces phénomènes de restauration et de recristallisation s'accompagnent d'une modification de la texture et de la taille des « grains » du métal. Ainsi, lors de la recristallisation, il y a réorganisation suivant une nouvelle structure de grains.

Il faut noter que, à égalité de résistance mécanique, la ductilité est plus élevée sur le métal res-

tauré (H2X) que sur du métal écroui (H1X). L'état restauré sera donc préféré lorsque la capacité maximale de mise en forme est recherchée.

Les conditions de recuit (température du traitement, durée de maintien) propres à quelques alliages sont indiquées dans le tableau 11.

Pour conserver une bonne aptitude à la mise en forme, le métal recuit ne doit pas présenter de grain grossier (qui est révélé sous la forme du phénomène de « peau d'orange » au cours des opérations de déformation).

Pour obtenir un métal recuit à grain fin, il faut respecter les conditions suivantes :

- s'assurer que le métal a subi un taux de déformation suffisant, correspondant à une diminution relative de section de 15 %, au minimum. Si cette condition n'est pas respectée, il faut se borner à ne faire qu'un traitement de restauration (donc évi-

(8) Stricto sensu, tous les métaux et alliages durcissent par écrouissage. Mais, dans la métallurgie de l'aluminium, cette désignation est réservée aux alliages des familles qui ne sont pas susceptibles de durcissement structural.

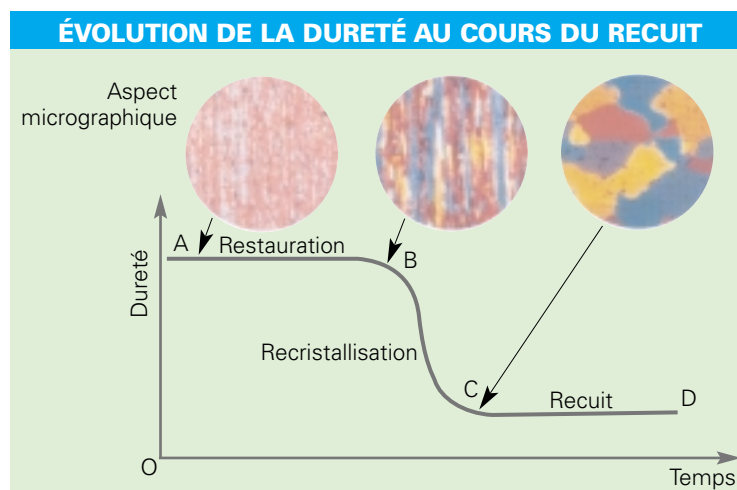


Figure 19

CONDITIONS DE RECUIT

Alliage	Recuit de restauration		Recuit de recristallisation	
	Température (°C)	Durée (heures)	Température (°C)	Durée (heures)
5XXX	240 - 280	1 à 4	330 - 380	0,5 - 2
6060	240 - 280	1 à 4	330 - 380	0,5 - 2
6005A	250 - 280	1 à 4	330 - 380	0,5 - 2
6106	240 - 280	1 à 4	330 - 380	0,5 - 2
6082	250 - 280	1 à 4	330 - 380	0,5 - 2
6061	250 - 280	1 à 4	330 - 380	0,5 - 2

Tableau 11

ter de faire un traitement de recristallisation),

- adopter une vitesse rapide de montée en température, de 20 à 60 °C par heure,

- ne pas atteindre une température trop élevée, au-delà de 350 à 400 °C, ni une durée de maintien en température trop longue, pas plus de 2 heures.

3.2 | Les états métallurgiques

Les alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage sont disponibles sous trois états métallurgiques fondamentaux (tableau 12), définis par la norme EN 515 (9) :

La plupart des états H classiques sont désignés par deux chiffres dont la signification est indiquée dans les tableaux 13 et 14 :

- le premier correspond à l'état de base,
- le second indique le degré d'écrouissage.

Plusieurs états sont désignés par 3 chiffres, dont le H111 et le H116 (tableau 15).

À tous ces états correspondent des caractéristiques mécaniques minimales définies par les normes EN dont on trouvera des extraits en annexe 1.

Les alliages à durcissement par écrouissage et les états métal-

lurgiques les plus courants utilisés dans les applications marines sont indiqués dans le tableau 19.

Remarques : Conformément à la nouvelle norme ASTM B 928 04 (11), concernant les demi produits destinés aux applications marines des alliages 5059, 5383 et 5456 dans les états H116 et H321 et les demi produits en 5086 dans l'état H116, doivent satisfaire aux tests de sensibilité à la corrosion feuilletante selon le test ASSET ASTM G66 (12) et à la corrosion inter cristalline selon le test ASTM G67 (13).

Le *Sealium*[®] subit donc ces tests.

ALLIAGES À DURCISSEMENT PAR ÉCROUISSAGE ÉTATS MÉTALLURGIQUES FONDAMENTAUX (NORME EN 515)

État	Définition
F	brut de fabrication, sans garantie de caractéristiques mécaniques
O	recuit, la capacité de mise en forme est maximale,
H	durci par écrouissage

Tableau 12

SIGNIFICATION DU PREMIER CHIFFRE DES ÉTATS HXX

Premier chiffre HXX	État de base
1	Écroui
2	Écroui et restauré
3	Écroui et stabilisé(*)

(*) État stabilisé par un traitement thermique à basse température ou par un échauffement introduit en cours de transformation. Cet état concerne principalement les alliages de la famille 5000.

Tableau 13

(9) EN 515, Aluminium et alliages d'aluminium – Produits corroyés – Désignation des états métallurgiques.

(10) Cf. p. 162.

(11) B 928 - 04 : Standard Specification for High Magnesium Aluminum Alloy Sheet and Plate for Marine Service, February 2004.

(12) Et avec la cotation meilleure que « Pb ».

(13) Cf. chapitre 10.

4. LES ALLIAGES À DURCISSEMENT STRUCTURAL

Ils appartiennent aux familles 2000, 6000 et 7000.

4.1 Principe du durcissement structural

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement thermique comprenant 3 étapes (figure 20) :

- la mise en solution faite à température élevée, de l'ordre de 530 °C pour les alliages de la famille 6000. Au cours de ce séjour en température, les constituants d'alliage qui sont sous forme d'intermétalliques dispersés sont dissous pour former une solution solide homogène,

- la trempe, qui est un refroidissement rapide généralement obtenu en plongeant le métal dans de l'eau froide dès sa sortie du four. Les profilés peuvent être « trempés sur presse » en passant dès la sortie de la filière dans un tunnel où ils sont aspergés d'eau sous forme de fines gouttelettes (14),

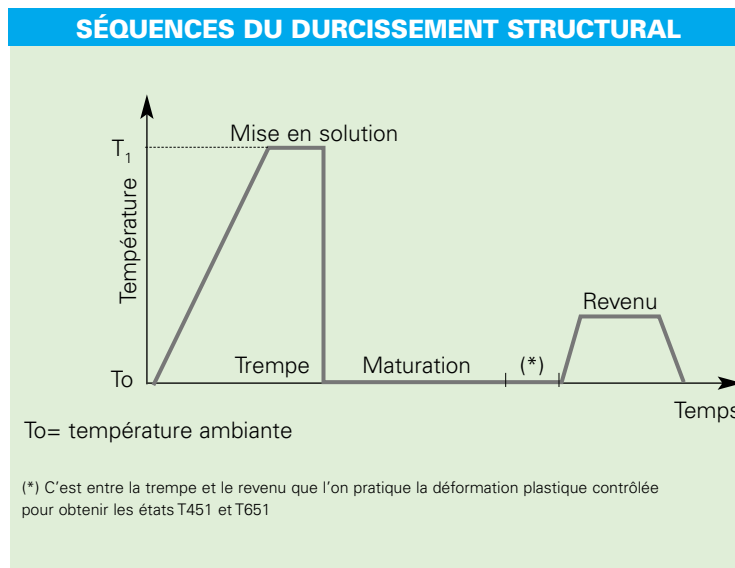


Figure 20

SIGNIFICATION DU SECOND CHIFFRE DES ÉTATS HXX

Second chiffre HXX	Signification	Degré d'écroissage (en %)
2	Quart dur	≈ 12
4	Demi-dur	≈ 25
6	Trois quarts dur	≈ 50
8	Quatre quarts dur	≈ 75

Tableau 14

- la maturation ou le revenu ; le métal trempé est dans un état métastable, en ce sens que sa structure évolue (15) dans le temps pour aboutir à une réorganisation stable dans laquelle les éléments d'alliages sont rejetés de la solution solide sous forme de précipités très fins et dispersés. Cette précipitation augmente la dureté du métal.

(14) C'est une pratique courante pour plusieurs alliages de filage de la famille 6000 (6060, 6005A, 6106), qui sont ainsi « trempés sur presse » par refroidissement à l'air soufflé ou au brouillard. Ce sont les états T1 (trempé mûri) et T5 (trempé revenu).

(15) Assez rapidement, en quelques heures pour certains alliages.

ÉTATS HXXX (NORME EN 515)

État	Caractéristiques
H111	Cet état se distingue de l'état O par le fait que les demi-produits livrés dans cet état ont subi, après recuit, un planage pour améliorer leurs caractéristiques dimensionnelles, dont la planéité.
H112	Cet état concerne les demi-produits dont le niveau de caractéristiques mécaniques est acquis par transformation à chaud ou par déformation à froid limitée.
H116	Cet état concerne les demi-produits de la famille 5000 dont la teneur en magnésium est supérieure ou égale à 4 % (5083, 5086, etc.). Dans cet état, les demi-produits doivent présenter une résistance définie à la corrosion feuilletante après l'essai ASTM G66 (test ASSET) (10).
HXX4	Cet état s'applique aux « tôles relief » gravées à partir de l'état HXX correspondant.

Tableau 15

CONDITIONS DE MISE EN SOLUTION, TREMPE ET REVENU

Alliage	État	Mise en solution Température (°C) (1)	Milieu de trempé	Revenu		Maturation minimale (jours)
				Température (°C)	Durée (heures)	
6060	T4	530 ± 5	Air soufflé (3) ou eau			8
	T6	530 ± 5	Air soufflé ou eau	175 ± 5 ou 185 ± 5	8 6	
6005A	T4	530 ± 5	Eau ≤ 40 °C (3)		8	
	T6	530 ± 5	Eau ≤ 40 °C	175 ± 5 (2) ou 185 ± 5	8 6	
6082	T4	530 ± 5	Eau ≤ 40 °C (3)			8
	T6	530 ± 5	Eau ≤ 40 °C (3)	165 ± 5 (2) ou 175 ± 5	16 8	
6061	T4	530 ± 5	Eau ≤ 40 °C			8
	T6	530 ± 5	Eau ≤ 40 °C	175 ± 5 (2) ou 185 ± 5	8	6

(1) La durée de maintien est indiquée dans le tableau 17.

Tableau 16

(2) Ce traitement confère les caractéristiques mécaniques optimales associées aux valeurs de A % les plus élevées.

(3) Du fait que ces alliages ont une faible vitesse critique de trempé, les demi-produits de faible épaisseur peuvent être trempés à l'air soufflé.

C'est le phénomène de durcissement structural. Il peut se produire à la température ambiante. Il porte alors le nom de maturation. Avec certains alliages, comme ceux de la famille 6000, il peut être accéléré par un maintien à des températures plus élevées (150 à 190 °C). Il en résulte un durcissement plus important. Ce traitement thermique fait dans un four porte le nom de revenu (ou vieillissement artificiel).

Cette gamme de traitements thermiques doit être faite dans des conditions rigoureuses de température, de durée, de vitesse de trempé. À défaut, les caractéristiques mécaniques finales et, également, la résistance à la corrosion risquent d'en être affectées.

Les conditions des traitements thermiques sont indiquées dans le tableau 16 et les durées de mise en solution dans le tableau 17 pour les principaux alliages de la famille 6000 utilisés dans les applications marines.

DURÉE DE MISE EN SOLUTION

Épaisseur ou diamètre (mm)	Durée minimale de maintien à la température en four air (minutes) (*)
≤ 0,5	20
0,5 - 0,8	25
0,8 - 1,6	30
1,6 - 2,3	35
2,3 - 3,0	40
3,0 - 6,25	50
6,25 - 12,0	60
12,0 - 25,0	90
25,0 - 37,5	120
37,5 - 50	150

(*) Il s'agit de la durée minimale de maintien à la température (suivant la norme AMS STD-2772).

Tableau 17

4.2 Traitement d'adoucissement par recuit

Lors de la mise en forme des demi-produits en 6000, il peut être nécessaire de pratiquer des traitements de recuit intermédiaires pour res-

taurer la plasticité. Les conditions de température et de durée qui dépendent de l'alliage sont indiquées dans le tableau 11, p. 38.

Après ces recuits, la vitesse de refroidissement doit être contrôlée pour éviter un effet de trempé.

4.3

Désignation des états métallurgiques

Les états métallurgiques des alliages à durcissement structural sont tous désignés par la lettre T suivie de 1 à 5 chiffres, dont on trouvera la définition précise dans la norme EN 515 (tableau 18).

Les alliages à durcissement structural et leurs états les plus courants utilisés dans les applications marines sont indiqués dans le tableau 19, extrait de la norme EN 13195-1 (16).

PRINCIPAUX ÉTATS MÉTALLURGIQUES DES ALLIAGES À DURCISSEMENT STRUCTURAL		
État	Signification	Remarque
T1	Refroidi après transformation à chaud et mûri jusqu'à l'obtention d'un état pratiquement stable	<i>Cette désignation s'applique aux produits qui ne subissent pas d'écrouissage après le refroidissement pratiqué à l'issue de la transformation à chaud, ou pour lesquels l'effet d'écrouissage associé au planage ou au dressage n'a pas d'incidence sur les limites de caractéristiques mécaniques.</i>
T3	Mis en solution, écroui et mûri jusqu'à l'obtention d'un état pratiquement stable	<i>Cette désignation s'applique aux produits qui, après mise en solution, subissent un écrouissage pour améliorer leur résistance mécanique, ou pour lesquels l'effet d'écrouissage associé au planage ou au dressage se traduit sur les limites de caractéristiques mécaniques.</i>
T4	Mis en solution et mûri jusqu'à l'obtention d'un état pratiquement stable	<i>Cette désignation s'applique aux produits qui ne subissent pas d'écrouissage après mise en solution, ou pour lesquels l'effet d'écrouissage associé au planage ou au dressage ne se traduit pas sur les limites de caractéristiques mécaniques.</i>
T5	Refroidi après transformation à chaud puis revenu	<i>Cette désignation s'applique aux produits qui ne subissent pas d'écrouissage après le refroidissement pratiqué à l'issue de la transformation à chaud, ou pour lesquels l'effet d'écrouissage associé au planage ou au dressage ne se traduit pas sur les limites de caractéristiques mécaniques.</i>
T6	Mis en solution puis revenu	<i>Cette désignation s'applique aux produits qui ne subissent pas d'écrouissage après mise en solution, ou pour lesquels l'effet d'écrouissage associé au planage ou au dressage ne se traduit pas sur les limites de caractéristiques mécaniques.</i>
T451 T651	Métal à l'état T4 ou T6 ayant subi après trempe une déformation par traction contrôlée pour diminuer les contraintes internes	<i>Cette désignation s'applique aux tôles, tôles épaisses, barres laminées ou finies à froid, pièces ou couronnes forgées et couronnes laminées qui, après mise en solution ou après le refroidissement suivant la transformation à chaud, sont tractionnées de la quantité indiquée :</i> <ul style="list-style-type: none"> ■ tôles épaisses ; 1,5 % à 3 % de déformation permanente ■ tôles : 0,5 % à 3 % de déformation permanente <i>Ces produits ne sont soumis à aucun dressage complémentaire après traction.</i>

Tableau 18

ALLIAGES RECOMMANDÉS POUR LES APPLICATIONS MARINES (NORME EN 13195-1) (16)

Alliage	Tôles et bandes	Produits filés		
		Barres	Tubes	Profilés
5754	O/H111 H112 H32, H34, H36	O/H111	O/H111	H112
5454	O/H111 H112 H32, H34	O/H111 H112	O/ H111 H112	H112
5086	O/H111 H112, H116 (a) H32 (a), H34 (a)	O/ H111 H112	O/ H111 H112	H112
5083 et 5383 (17)	O/H111 H112, H116 (a) H32 (a), H34 (a)	O/H111 H112	O/H111 H112	H112
6082	O (b) T4, T451 T6, T651	O/H111 (b) T4 (c) T6 (c)	O/H111 (b) T4 (c), T5 T6 (c)	O/H111 (b) T4 (c) T6 (c)
6106			T6 (c)	
6005A	T6 (c)	T6 (c)	T4 (c) T6 (c)	

Tableau 19

(a) Les alliages 5083, 5383, 5086 produits à l'état H116 sous forme de tôle, de bande ou de tôle épaisse doivent être soumis à essai afin d'évaluer leur résistance à la corrosion intergranulaire et à la corrosion exfoliante (Cf. chapitre 10).

(b) Cet état n'est pas destiné à une utilisation finale. Le traitement thermique s'applique après formage.

(c) Les caractéristiques mécaniques peuvent être obtenues par trempe sur presse.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES TÔLES ET DES BANDES (*)

Alliage	Épaisseur (mm)	État	R _m (MPa)		R _{p0,2} (MPa)	A % (**) mini	
			mini	max	mini	A ₅₀	A
5754	3 ≤ e ≤ 50	O/H111	190	240	80	18	17
		H24	240		165	10	8
5086	3 ≤ e ≤ 50	O/H111	240	310	100	17	16
	3 ≤ e ≤ 12,5	H112	250		125	8	
	12,5 ≤ e ≤ 50	H112	240		105		
	3 ≤ e ≤ 50	H116	275		195	10	9
	3 ≤ e ≤ 50	H32 et H321	275	335	185	10	9
	3 ≤ e ≤ 50	H34	300		235	9	8
5083	3 ≤ e ≤ 50	H32 et H321	305	380	215	10	9
	3 ≤ e ≤ 50	O et H111	275	350	125	16	15
	3 ≤ e ≤ 50	H112	275		125	12	10
	3 ≤ e ≤ 50	H116	305		215	12	10
5383 (19)	3 ≤ e ≤ 50	O/H111	290		145		17
	3 ≤ e ≤ 50	H116 ou H321	305		220		10

Tableau 20

(*) Extrait du tableau 4 de la norme EN 13195-1.

(**) Lorsqu'elles sont disponibles, les valeurs de A_{50 mm} doivent s'appliquer jusqu'à (et y compris) 12,5 mm d'épaisseur et les valeurs de A au-dessus de 12,5 mm d'épaisseur.

5.

LES PRINCIPAUX ALLIAGES POUR APPLICATIONS MARINES

La plupart des chantiers de construction navale et de matériel pour l'équipement du littoral et pour l'offshore utilisent les demi-produits des alliages recommandés par la norme EN 13195-1 (16) dont est extrait le tableau 19.

5.1

Caractéristiques mécaniques garanties à la température ambiante

Le lecteur trouvera en annexe 1 les caractéristiques mécaniques garanties par la norme EN 485-2 et EN 1386 pour les tôles relief (18).

Quand les demi-produits sont contrôlés par une société de classification, la norme EN 13195-1 prévoit des caractéristiques mécaniques minimales indiquées dans le tableau 20 pour les demi-produits laminés et dans le tableau 21 pour les demi-produits extrudés.

5.2

Caractéristiques mécaniques aux basses températures

Les alliages d'aluminium, particulièrement ceux des familles 5000 et 6000, peuvent être exposés aux basses températures sans subir de modification structurale (20).

Cette propriété explique le développement des applications cryogéniques de l'aluminium : cuves de méthaniers, échangeurs d'unités de regazéification de GLN, etc.

L'aluminium a été choisi pour la construction de plusieurs bateaux d'explorations polaires et circum polaires.

À titre d'exemple, l'évolution des caractéristiques mécaniques du 5083 O entre -196 °C et $+200\text{ °C}$ est indiquée dans le tableau 22. On notera que la capacité de déformation élastique ne diminue pas aux températures cryogéniques (figure 21).

Le maintien prolongé aux basses températures ne modifie pas les caractéristiques mécaniques après le retour à la température ambiante.

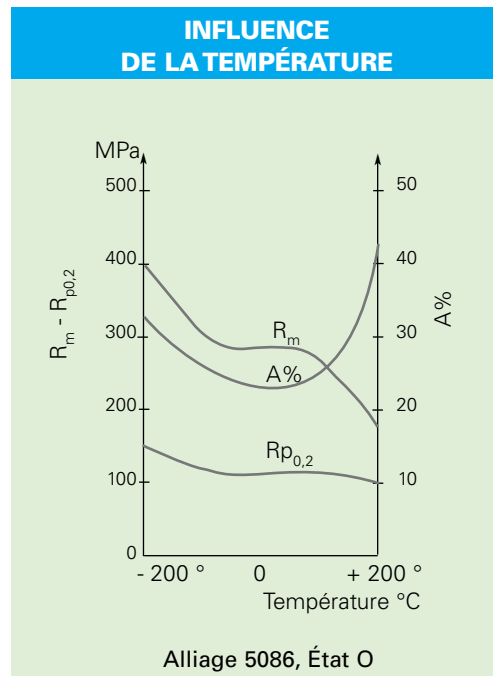


Figure 21

WATERJET LJ114E EN ALUMINIUM



(16) EN 13195-1, Aluminium et alliages d'aluminium - Produits corroyés et pièces moulées pour les applications marines (construction navale, maritime et offshore), décembre 2002, tableau 1.

(17) Le Sealium[®] est du 5383 à l'état H116, pour les laminés, et à l'état H112 (capable de l'état H116) pour les filés.

(18) EN 1386, Aluminium et alliages d'aluminium - Tôles relief - Spécifications.

(19) Le Sealium[®] est toujours à l'état H116.

(20) Contrairement aux aciers, les alliages d'aluminium n'ont pas de « point de transition » (température au-dessous de laquelle les aciers peuvent subir une rupture fragile).

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES DEMI-PRODUITS EXTRUDÉS (*)

Alliage	Forme	Épaisseur (mm)	État	R _m	R _{p0,2} (MPa)	A % (**) mini	
				min	mini	A ₅₀	A
5086	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 50	H112	240	95	10	12
5083	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 50	H111	270	110	10	12
	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 50	O et H112	270	125	10	12
6060	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 25	T5	190	150	12	12
	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 25	T6	190	150	12	12
6061	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 50	T5 ou T6	260	240	10	8
	Profilés fermés	3 ≤ e ≤ 50	T5 ou T6	245	205		4
6005A	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 25	T5 ou T6	260	215	8	6
	Profilés fermés	3 ≤ e ≤ 25	T5 ou T6	250	215		5
6082	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 25	T5 ou T6	310	260	10	8
	Profilés fermés	3 ≤ e ≤ 25	T5 ou T6	290	240		5
6106	Profilés, barre, tube	3 ≤ e ≤ 25	T6	240	195		

(*) Extrait du tableau 4 de la norme EN 13195-1.

Tableau 21

(**) Lorsqu'elles sont disponibles, les valeurs de A_{50 mm} doivent s'appliquer jusqu'à (et y compris) 12,5 mm d'épaisseur et les valeurs de A au dessus de 12,5 mm d'épaisseur.

5083 O - ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES (*)

Température °C (**)	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A %
- 196	390	140	34
- 80	280	120	26
- 28	270	120	24
+ 20	270	120	22
+ 100	270	120	26
+ 150	210	110	35
+ 200	155	105	45

(*) Après 10 000 heures de maintien à la température.

Tableau 22

(**) Température de maintien et de mesure.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES EN TEMPÉRATURE (*) APRÈS 10 000 HEURES DE MAINTIEN

Alliage	État	20 °C			100 °C			150 °C			204 °C		
		R _m	R _{p0,2}	A %	R _m	R _{p0,2}	A %	R _m	R _{p0,2}	A %	R _m	R _{p0,2}	A %
5086	O	262	117	30	262	117	36	200	110	50	152	103	60
5083	O	290	145	25	275	145	36	215	130	50	150	115	60
6082	T6	315	280	12	300	265	14	240	220	17	130	105	28
6061	T6	310	276	17	290	262	18	234	214	20	131	103	28

(*) Elles sont mesurées à la température indiquée.

Tableau 23

5.3

Caractéristiques mécaniques aux températures supérieures à 100 °C

Les caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium aux températures supérieures à 100 °C dépendent du niveau de température, de la durée de maintien ainsi que l'illustre la figure 22 pour le 6061.

de rupture R_m et la limite d'élasticité $R_{p0,2}$ diminuent tandis que l'allongement de rupture $A\%$ augmente. L'évolution des caractéristiques mécaniques des alliages 5083, 5086, 6082 et 6061 est indiquée dans le tableau 23.

La déformation à chaud de ces alliages entraîne donc une diminution importante des caractéristiques mécaniques, surtout dans le cas des alliages de la famille 6000 à l'état T5 ou T6.

6.

UN NOUVEL ALLIAGE, LE SEALIUM®, « MARINE GRADE »

Du fait de la zone affectée thermiquement, le calcul d'une structure soudée en alliage d'aluminium est fait sur la base de la limite d'élasticité σ_0 de l'état recuit (O ou H111) pour les alliages à durcissement par écrouissage.

Par conséquent, l'augmentation de la limite d'élasticité de la zone affectée thermiquement a pour effet de pouvoir accepter, pour une structure soudée, des contraintes unitaires plus élevées, à épaisseur égale du métal de base, ou de réduire celle-ci à contrainte égale.

Un joint soudé est constitué du cordon de soudure, de la zone affectée thermiquement située de part et d'autre de celui-ci, elle-même reliée au métal de base (figure 23).

L'augmentation des caractéristiques mécaniques du joint soudé dépend de celle de chacun des constituants de ce joint : le métal de base, la zone affectée thermiquement (ZAT) et le cordon de soudure, ainsi que de leur structure métallurgique. Les recherches ont montré que les meilleurs résultats sont obtenus avec un métal de base à structure fibreuse et un cordon de soudure recristallisé à grains fins ^[1] (figure 24).

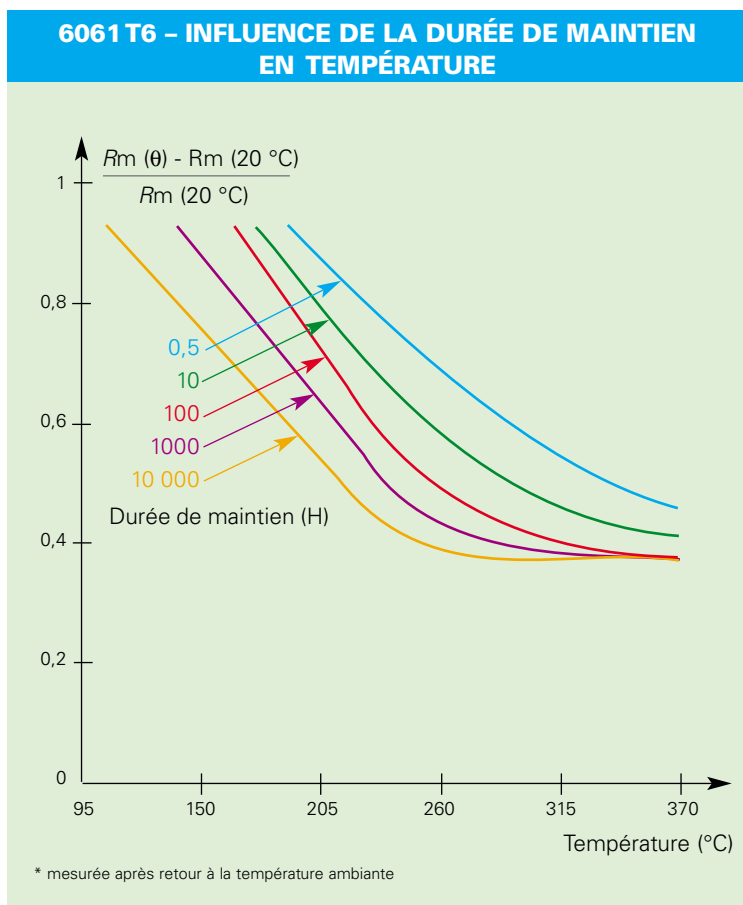


Figure 22

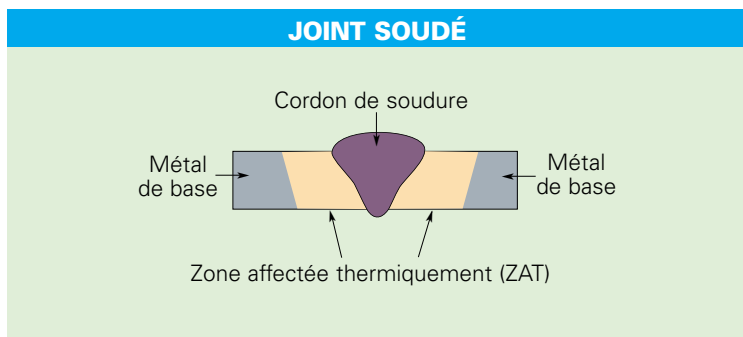


Figure 23



OPUS 45

Pour cela, il faut intervenir sur plusieurs paramètres plus ou moins interdépendants qui aboutissent à une liaison plus homogène entre métal de base, zone affectée thermiquement et cordon de soudure :

- la composition de l'alliage dont l'augmentation contrôlée du titre en magnésium, en zinc et en manganèse a pour effet principal d'élever le niveau des caractéristiques mécaniques du métal de base,

- la structure métallurgique de chacun des constituants, l'addition de zirconium en favorisant le fibrage du métal de base et un grain fin dans le cordon de soudure contribuent à l'amélioration du niveau de caractéristiques mécaniques,

- les conditions de transformation, optimisées pour l'obtention de l'état métallurgique H116.

Les travaux du Centre de Recherches ALCAN (CRV) ont abouti au *Sealium*[®] (Marine Grade) qui est du 5383 toujours à l'état H116. Il répond aux besoins des constructeurs à la recherche d'alliages plus performants.

Ce nouvel alliage, enregistré sous la désignation AA5383 par l'Aluminium Association, a été homologué par la plupart des sociétés de classification :

- American Bureau of Shipping (ABS),
- Bureau Veritas (BV),
- Det Norske Veritas (DNV),
- Germanischer Lloyd (GL),
- Lloyd's Register of Shipping (LR),
- Nippon Kaiji Kyokai (NKK),
- Registro Italiano Navale (RINA).

6.1 | Caractéristiques mécaniques

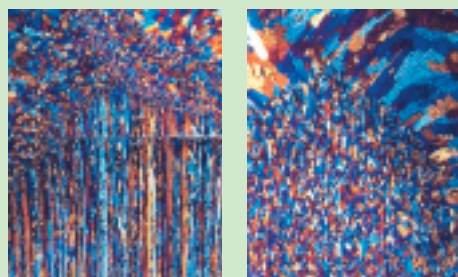
Les publications sur ce nouvel alliage affichent les résultats suivants :

- sur métal de base sous forme de tôle (tableau 24),
- sur métal soudé (tableau 25),
- sur profilé extrudé (tableau 26).

Des essais comparatifs ont été effectués sur des tôles de 6 mm d'épaisseur en 5083 et en *Sealium*[®], soudées bout à bout avec métal d'apport en 5183 [2].

Les caractéristiques mécaniques moyennes (cinq mesures) suivant le protocole DNV (figure 25), sont indiquées dans le tableau 25. Ces résultats montrent que sur le *Sealium*[®] soudé, dans le sens transversal sur soudure, le gain sur la limite d'élasticité est de 12 MPa et de 15 MPa sur la charge de rupture par rapport au 5083, soit 4 % sur la limite d'élasticité et 11 % sur la charge de rupture. Dans la zone affectée thermiquement, le gain est respectivement de 20,5 et 11,6 %.

STRUCTURE DU JOINT SOUDÉ SUR SEALIUM[®]



Sealium[®]

5083 H116

Figure 24

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES SUR SOUDURE

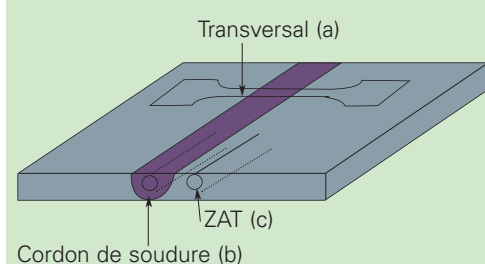


Figure 25

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES MINIMALES DU MÉTAL DE BASE (*) (TÔLES)

Alliage	État	R _m	R _{p0,2}	A %
<i>Sealium</i> [®]	(**)	305	220	10
5083	O	275	125	10
	H116	305	215	10

(*) Épaisseur < 20 mm (**) Le *Sealium*[®] est toujours à l'état H116.

Tableau 24

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES MOYENNES SUR TÔLES SOUDÉES [1]

Métal de base	En transversal sur soudure (a)			Dans le cordon de soudure (b)			Dans la zone affectée thermiquement (c)		
	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A %	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A %	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A %
5083 H116	134	287	12,8	128	271	22,0	141	301	25,2
<i>Sealium</i> [®]	149	299	10,2	141	279	21,8	170	336	21,3
Gain en % (*)	11,2	4,2					20,5	11,6	

(*) Par rapport au 5083.

Tableau 25

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES MINIMALES SUR EXTRUDÉ

Alliage	État	R _m	R _{p0,2}	A %
Sealium®	H112	310	190	12
5083	O	270	110	14
	H112	270	125	12

Tableau 26

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU SEALIUM® SOUDÉ BOUT À BOUT

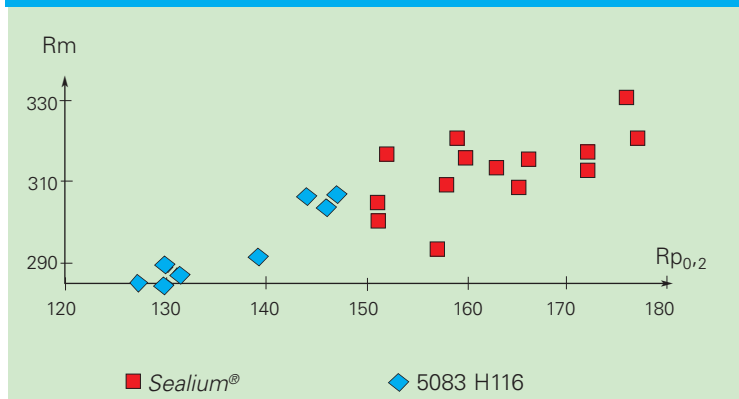


Figure 26

TENUE EN FATIGUE DU SEALIUM®

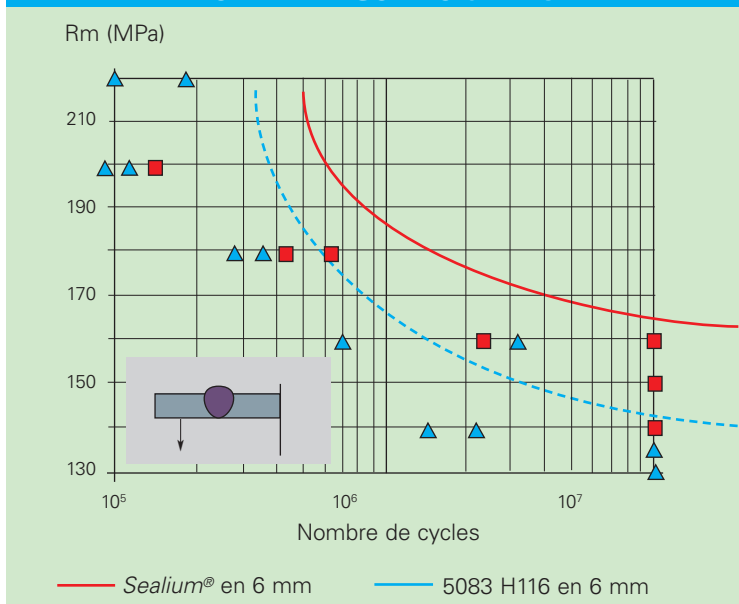


Figure 27

TENUE À LA CORROSION DU SEALIUM®

	Corrosion exfoliante Test ASSET ASTM G66		Corrosion inter cristalline Test ASTM G67 NAMLT	
	Sealium®	5083	Sealium®	5083
Métal de base	N/PA	PA/PB	4 mg.cm ⁻²	4 mg.cm ⁻²
Zone affectée thermiquement	PA	PB		

Tableau 27

D'une manière générale, les essais au travers du cordon de soudure, suivant les recommandations DNV, montrent que la limite d'élasticité du Sealium® (voir note (17) page 43) est toujours supérieure à celle du 5083 H116 (figure 26).

Ces résultats ont été confirmés par des mesures faites sur des tôles soudées (avec le 5183 comme métal d'apport) par plusieurs chantiers navals.

6.2 | La tenue en fatigue

Les essais ont montré que la limite d'endurance du Sealium® soudé bout à bout est supérieure à celle du 5083, de l'ordre de 20 MPa, toutes choses étant égales par ailleurs (figure 27).

6.3 | La tenue à la corrosion

Des essais de corrosion suivant le protocole de la norme ASTM B928 sur plus de 50 lots de Sealium® fabriqués par l'usine ALCAN d'Issoire ont montré que sa tenue à la corrosion est au moins équivalente à celle du 5083 (tableau 27), sinon meilleure.

Pour être acceptable, un lot doit être classé N, PA et PB au test ASSET et la perte de poids au test NAMLT doit être inférieure à 15 mg.cm⁻² (21).

(21) Cf. paragraphe 11 du chapitre 10.

7. LES FAMILLES D'ALLIAGES DE MOULAGE

Il y a 5 familles d'alliages de moulage industriels (tableau 28). Conformément à la norme EN 1706 (22), les alliages de moulage ont, comme les alliages de corroyage, une désignation numérique à 5 chiffres accolés. Les états métallurgiques sont indiqués dans le tableau 29.

Les possibilités offertes par les procédés de moulage, en particulier pour réaliser des formes relativement complexes, permettent d'utiliser les alliages d'aluminium de moulage pour de nombreuses applications marines, telles que :

- les pièces d'accastillage,
- les pièces de structure,
- les nœuds d'assemblage,
- les pièces d'ensembles à fonction mécanique,
- les pièces d'aménagement intérieur,
- des supports divers.

Les alliages utilisés pour ces applications marines sont de première fusion. Ils appartiennent presque exclusivement à deux familles :

FAMILLES D'ALLIAGES DE MOULAGE

Élément d'alliage	Désignation
Aucun	10000
Cuivre	20000
Silicium	40000
Magnésium	50000
Zinc	70000

Tableau 28

- la famille 40000, constituée d'alliages d'aluminium-silicium,
- la famille 50000, constituée d'alliages d'aluminium-magnésium.

Pour des applications marines, l'utilisation des alliages de la famille aluminium-cuivre doit être évitée. À défaut, ils doivent être bien protégés.

7.1 Les alliages au silicium de la famille 40000

Ces alliages présentent :

- une excellente aptitude au moulage permettant de réaliser facilement des pièces saines de formes complexes,
- une très bonne aptitude au soudage (23),
- de très bonnes caractéristiques mécaniques après traitement thermique pour les alliages contenant du magnésium, à durcissement structural (24),
- un très bon comportement en milieu marin.

Quatre alliages sont particulièrement conseillés :

- le 41000, pour la fabrication des pièces qui doivent présenter un bel aspect après polissage mécanique et anodisation,
- le 42100 et le 42200 pour la fabrication des pièces dont le tracé est complexe et pour lesquelles on exige des caractéristiques mécaniques élevées. Ces deux alliages doivent subir le traitement thermique de durcissement structural

pour présenter de bonnes caractéristiques mécaniques,

- le 44100, pour la fabrication des pièces minces coulées en coquille.

7.2 Les alliages au magnésium de la famille 50000

Les alliages aluminium-magnésium se distinguent par :

- un excellent aspect après polissage mécanique,
- une très bonne aptitude aux traitements d'anodisation pour la protection et pour la décoration,
- une bonne soudabilité ; ils peuvent être assemblés avec des produits moulés laminés ou filés de composition voisine,
- une excellente résistance à la corrosion en milieu marin ; ils sont parfaitement adaptés aux applications marines.

Deux alliages sont particulièrement recommandés :

- le 51100, à 3 % de magnésium,
- le 51300, à 6 % de magnésium.

(22) Norme EN 1706, Aluminium et alliages d'aluminium. Composition chimique et caractéristiques mécaniques.

(23) Le soudage des alliages de moulage 40000 avec les alliages de corroyage de la famille 5000 (et réciproquement) est déconseillé (cf. chapitre 6).

(24) Le traitement thermique de durcissement structural est, pour les 42100 et 42200 : mise en solution 10 H à 540 °C, trempe à l'eau, revenu 6 H à 160 °C, idem pour le 41000, à ceci près que la mise en solution est de 4 H à 540 °C.

ÉTATS MÉTALLURGIQUES DES ALLIAGES DE MOULAGE

Principaux traitements thermiques	EN 1706	AFNOR NF A 57 702 (*)	
Aucun, brut de coulée	F	Y 20	Y 30
Mise en solution, trempe et maturation naturelle	T4	Y 24	Y 34
Mise en solution, trempe et revenu au pic de résistance	T6 (**)	Y 23	Y 33
Mise en solution, trempe et sous-revenu	T64	Y 23	Y 33

(*) Y2X désigne la coulée en sable et Y3X la coulée en coquille. (**) Pour conserver un minimum d'allongement, en pratique, le revenu T6 n'est jamais fait au pic de résistance, mais toujours en dessous. L'état T64 désigne un sous-revenu destiné à favoriser l'allongement.

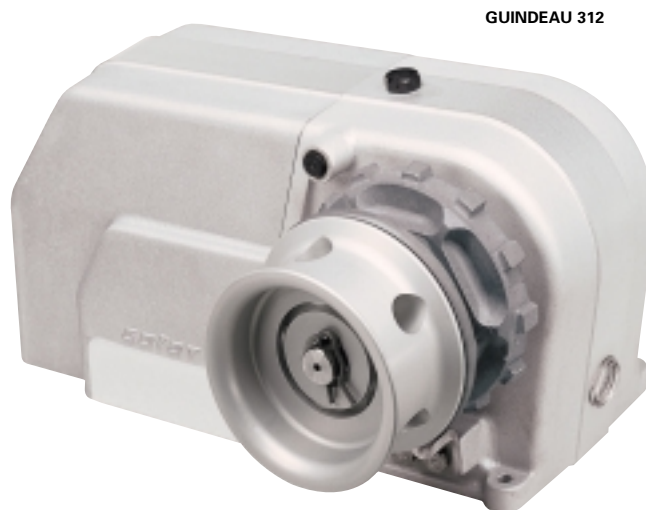
Tableau 29

8. PROPRIÉTÉS DES ALLIAGES DE MOULAGE

Les principales propriétés des alliages de moulage utilisés dans les applications marines sont indiquées dans les tableaux suivants.

8.1 Compositions chimiques

Les compositions chimiques sur pièces suivant la norme EN 1706 sont indiquées dans le tableau 30.



GUINDEAU 312

COMPOSITIONS NORMALISÉES SUR PIÈCES (EN % PONDÉRAL)

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn
41000	1,6			0,30	0,45			0,05		
	2,4	0,60	0,10	0,50	0,65	0,05	0,10	0,20	0,05	0,05
42100	6,5				0,25			0,08		
	7,5	0,19	0,05	0,10	0,45		0,07	0,25		
42200	6,5				0,45			0,08		
	7,5	0,19	0,05	0,10	0,70		0,07	0,25		
44100	10,5									
	13,5	0,65	0,15	0,55	0,10	0,10	0,15	0,20	0,10	0,05
51100					2,5					
	0,55	0,55	0,05	0,45	3,5		0,10	0,20		
51300					4,5					
	0,55	0,55	0,10	0,45	6,5		0,10	0,20		

Remarque : quand une seule valeur est indiquée, elle correspond au maximum autorisé.

Tableau 30

8.2 Propriétés physiques

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ALLIAGES DE MOULAGE

Alliages	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique à 20 °C (W.m ⁻¹ °C ⁻¹)	Coefficient de dilatation linéique entre 20 et 100 °C	Intervalle de solidification °C	Retrait moyen (%)
41000	2700	160	22.10 ⁻⁶	640-555	14
42100	2680	160	21,5.10 ⁻⁶	615-555	12,5
42200	2680	160	21,5.10 ⁻⁶	615-555	12,5
44100	2650	165	20.10 ⁻⁶	580-575	11
51100	2670	145	24.10 ⁻⁶	640-590	14
51300	2640	125	24.10 ⁻⁶	625-540	13

Tableau 31

8.3 | Aptitudes technologiques

APTITUDES TECHNOLOGIQUES DES ALLIAGES DE MOULAGE										
Alliages	Moulage	Sensibilité à la crique	Pièces minces	Stabilité dimensionnelle	Usinage	Soudage à l'arc	Au polissage	Anodisation de protection	Anodisation de décoration	Tenue à la corrosion en milieu marin
41000	2	2	2	3	3	3	4	4	4	3
42100	3	3	4	3	2	3	3	4	0	3
42200	3	3	4	2	3	3	3	4	0	3
44100	4	4	4	4	1	4	2	4	0	3
51100	2	1	1	3	4	4	4	4	4	4
51300	2	1	2	3	4	4	4	4	3	4

0 - Impropre. 1 - Médiocre. 2 - Moyen. 3 - Bon. 4 - Excellent.

Tableau 32

8.4 | Caractéristiques mécaniques

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES SUR ÉPROUVETTES COULÉES A PART					
Alliage	État	Mode coulée	R _m	R _{p0,2}	A %
41000	T6	Y23	240	180	3
		Y33	260	180	5
42100	T6	Y23	230	190	2
		Y33	290	210	4
42200	T6	Y23	250	210	1
		Y33	320	240	3
44100	F	Y20	150	70	4
		Y30	170	80	5
51000	F	Y20	140	70	3
		Y30	150	70	5
51300	F	Y20	160	90	3
		Y30	180	100	4

Tableau 33

Références bibliographiques

[1] « High Strength Marine Grade Aluminium Alloys: A New Generation of 5383 with improved Properties », A. DURAN, C. HÉNON and R. DIF, *18th Fast Ferry Conference and Exhibition*, Nice, France, February 2002.

[2] « The potential of 5383 alloy in marine application », G. M. RAYNAUD, Ph. GOMIERO, Pechiney Rhenalu, *Conférence Alumitech 97*, pp. 353-366.



SALLE DES MACHINES DE L'AQUASTRADA TMV 115



CATAMARAN UAI 50