

Chapitre 4

LE CALCUL DE STRUCTURES ET LA TENUE EN FATIGUE

1. Propriétés de l'aluminium	55
2. Détermination de la contrainte admissible en statique	55
2.1 Cas d'une section plane renforcée de raidisseurs	56
2.2 Cas d'une poutre en flexion soumise à une pression hydrostatique uniforme	56
3. Transposition de l'acier à l'aluminium	57
3.1 Cas d'une section plane	57
3.2 Cas d'une poutre en flexion	58
4. La tenue en fatigue des structures en alliage d'aluminium	59
5. Les conditions de service des navires à grande vitesse	60
6. Généralités sur la fatigue des métaux	60
7. Les spécificités de la tenue en fatigue de l'aluminium	61
7.1 La limite d'endurance	61
7.2 La zone affectée thermiquement	61
7.3 Les contraintes résiduelles	61
7.4 Le mode de rupture	62
7.5 Le seuil de propagation	62
8. Le classement des alliages d'aluminium	63
9. Limite d'endurance des joints soudés	64
9.1 Les défauts de soudure	64
9.2 Classement des joints soudés	66
10. L'influence des dispositions constructives et de la fabrication	68
10.1 La conception des assemblages soudés	68
10.2 La conception des assemblages boulonnés et collés	68
10.3 La réalisation des joints soudés	68
11. Normes et règlements	71

4. LE CALCUL DE STRUCTURES

LES RÈGLES de calcul de la résistance des matériaux s'appliquent pour les structures en alliage d'aluminium.

Par rapport aux aciers, les propriétés spécifiques de l'aluminium, tel le module d'élasticité qui est le tiers de celui de l'acier, imposent une vérification par rapport au critère de déformation. Pour rattraper le faible niveau du module de Young, il faut optimiser les inerties, avoir un module d'inertie I/v aussi grand que possible.

Contrairement aux aciers, la zone affectée thermiquement, de part et d'autre du joint soudé, subit un adoucissement sur les alliages d'aluminium. Les caractéristiques mécaniques à prendre en compte sont celles de l'état recuit (O) pour

les alliages à durcissement par écrouissage et de l'état T4 (maturation à la température ambiante) pour les alliages à durcissement structural.

Compte tenu de l'adoucissement, les contraintes résiduelles de soudage sont plus faibles sur les joints soudés en alliage d'aluminium que sur ceux en acier.

La tenue en fatigue dépend essentiellement de la conception des assemblages soudés et de la qualité de la réalisation des soudures.

En tenant compte des spécificités de l'aluminium, concernant les caractéristiques mécaniques et concernant la résistance à la fatigue, l'expérience montre qu'il est possible de réaliser, avec une

structure en alliage d'aluminium, un gain de poids de l'ordre de 50 % par rapport à une structure équivalente en acier.

Le calcul en charge statique des structures des navires relève des règlements des sociétés de classification qu'on ne saurait développer ici (1). Il est fondé sur les principes de la résistance des matériaux, corrigés par des facteurs déduits de l'expérience.

(1) Le lecteur est invité à s'y reporter.

THE PRINCESS



ET LA TENUE EN FATIGUE

1. PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM

Pour tous les alliages d'aluminium utilisés en construction navale, conformément à l'Eurocode 9 (2), les calculs de structures doivent être faits avec les valeurs indiquées dans le tableau 34 pour les propriétés de base.

On notera que le module d'élasticité est de 70 000 MPa, quel que soit l'alliage, soit le tiers de celui des aciers, et que le coefficient de dilatation, $23 \cdot 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, est le double de celui de l'acier.

Le faible module d'élasticité de l'aluminium n'empêche pas du tout de réaliser des structures normalement résistantes au flambement. Il suffit pour cela de profiter des facilités de mise en forme de l'aluminium, en particulier par extrusion, et d'optimiser la répartition des masses ainsi que l'illustrent les exemples développés au paragraphe 3.2.

(2) Eurocode 9 : Conception et dimensionnement des structures en aluminium - Partie 1-1 - Règles générales et règles pour le bâtiment. Norme EN, ENV 1999-1-1.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'ALUMINIUM		
Propriété	Unité	Valeur
Module d'élasticité : E	N.mm ⁻²	70 000
Module de cisaillement : G	N.mm ⁻²	27 000
Coefficient de Poisson : ν		0,3
Coefficient de dilatation thermique : α	10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹	23
Masse unitaire : ρ	Kg.m ⁻³	2 700

Tableau 34

2. DÉTERMINATION DE LA CONTRAINTE ADMISSIBLE EN STATIQUE

En général, les critères retenus par la plupart des sociétés de classification sont fondés sur la comparaison de la contrainte calculée par rapport à la contrainte tolérée, qui est déduite du calcul fait suivant la théorie de la flexion élastique des structures ^[1].

L'échantillonnage minimal d'une structure est déduit :

- de la charge à laquelle la structure est soumise (qui dépend des caractéristiques du navire),
- des caractéristiques mécaniques du matériau,
- des règles de calcul, éventuellement affectées de coefficients correcteurs tirés de l'expérience.

THE PRINCESS



2.1 Cas d'une section plane renforcée de raidisseurs

Pour une tôle mince, de grande longueur, subissant une déformation angulaire de faible amplitude, la contrainte maximale sur une telle structure (figure 28) est égale à [2]:

$$\sigma_{\max} = \rho k \left[\frac{b}{t} \right]^2 \quad [1]$$

avec:

- σ_{\max} = contrainte maximale admissible,
- p = pression hydrostatique,
- k = coefficient correcteur,
- b = largeur du panneau,
- t = épaisseur.

Dans la relation [1], l'épaisseur t de la tôle de la section s'écrit:

$$t = b \sqrt{\frac{pk}{\sigma_{\max}}} \quad [2]$$

Par rapport à la limite d'élasticité du métal $R_{p0,2}$, l'expression ci-dessus s'exprime d'une manière simplifiée:

$$t = \sqrt{\frac{A}{R_{p0,2}}} \quad [3]$$

Suivant les règlements DNV (3), l'épaisseur t peut se calculer d'après la relation suivante:

$$t = s \sqrt{\frac{Cp}{\sigma}} \quad [4]$$

avec:

- σ = contrainte unitaire maximale admissible due à la pression latérale
- p = pression hydrostatique,
- C = coefficient correcteur dépendant de la géométrie.
- s = espace entre raidisseurs,
- t = épaisseur.

2.2 Cas d'une poutre en flexion soumise à une pression hydrostatique uniforme

La contrainte maximale se déduit de la formule (figure 29) [3]:

$$\sigma_{\max} = \frac{Mv}{I} = \frac{M}{S} \quad [5]$$

avec:

- σ_{\max} = contrainte de flexion maximale admissible,
- M = moment fléchissant,
- v = distance par rapport à la fibre neutre,
- I = moment d'inertie,
- $S = I/v$ = module d'inertie.

Connaissant la contrainte de flexion maximale admissible et le moment de flexion dû à la charge entre deux appuis, on a:

$$S = \frac{M}{\sigma_{\max}} \quad [6]$$

Comme pour l'épaisseur, S dépend de la limite d'élasticité du métal:

$$S = \frac{k}{R_{p0,2}} \quad [7]$$

D'après le règlement DNV (4), l'équation [6] s'écrit:

$$Z = \frac{ml^2 sp}{\sigma} \quad [8]$$

avec:

- Z = section du raidisseur,
- m = facteur correctif du moment fléchissant,
- l = portée,
- s = espace entre deux raidisseurs longitudinaux,
- p = pression hydrostatique,
- σ = contrainte admissible de flexion.

(3) DNV Rules, Part. 3, Chap. 3, Sec. 5, B201.

(4) DNV Rules, Part. 3, Chap. 3, Sec. 5, C100.

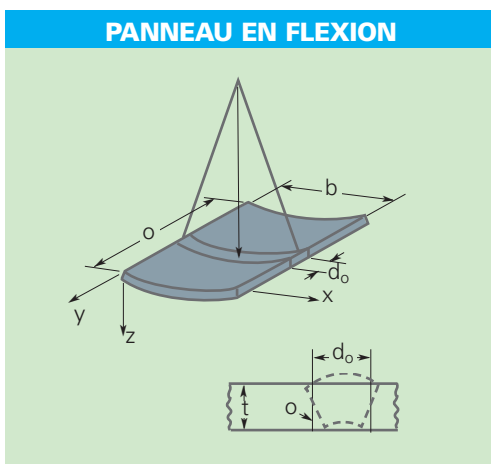


Figure 28

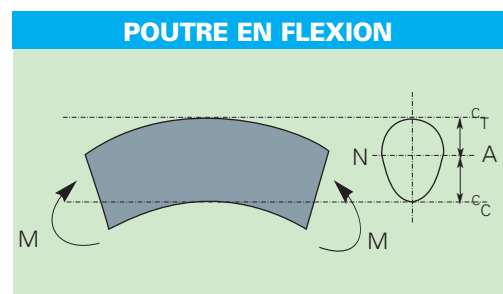


Figure 29

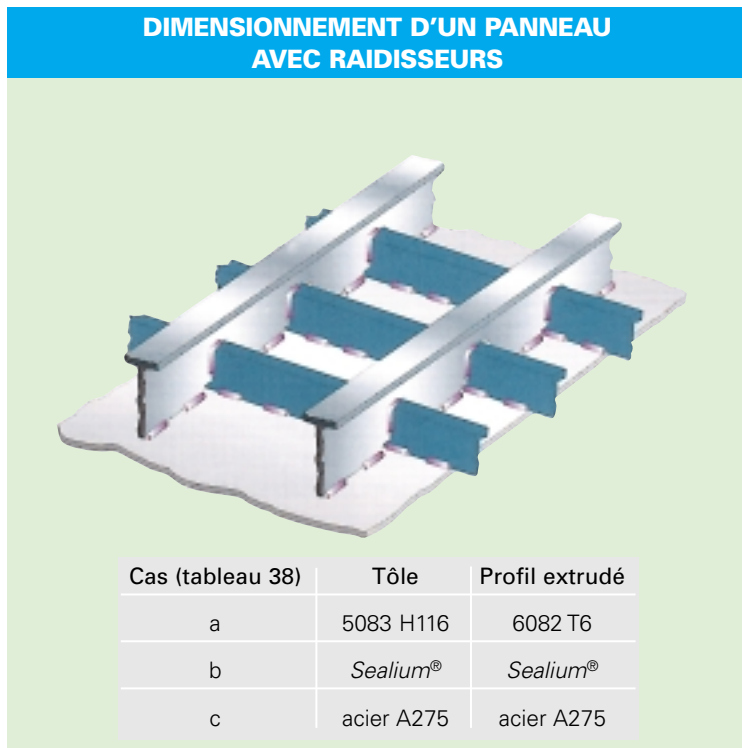


Figure 30

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU YACHT

Dimensions	Valeur
Longueur totale	50,0 m
Rule Length	40,0 m
Largeur	10,3 m
Tirant d'eau	2,09 m
Espace entre couples	0,9 m
Déplacement	450 t
Vitesse	56 nœuds

Tableau 35

NIVEAU DE CONTRAINTES

Paramètres	Valeur
Accélération verticale	1,5 g
Distance entre raidisseurs	213,0 mm
Espace entre couples	900 mm
Contrainte sur le panneau	257,7 kN.m ²
Contrainte sur le raidisseur	257,7 kN.m ²
Contrainte sur le couple	160,9 kN.m ²

Tableau 36

3. TRANSPOSITION DE L'ACIER À L'ALUMINIUM

Deux cas sont à considérer :

- une section plane avec raidisseurs,
- une poutre en flexion.

3.1 Cas d'une section plane

L'exemple choisi est celui d'une section représentative d'une structure classique tôles et raidisseurs (figure 30) du fond d'un yacht de 50 m dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 35.

La comparaison porte sur trois cas :

- tôle et raidisseurs en acier A27S,
- tôle en 5083 H116 et raidisseurs en profilés 6082 T6,
- tôle en *Sealium®* et raidisseurs en *Sealium®*.

Les contraintes prises en compte sont celles de la pression hydrostatique et de la pression due au « slamming ». Elles ont été évaluées suivant les règles du DNV référencées en (4). Leurs niveaux sont indiqués dans le tableau 36.

Les caractéristiques mécaniques retenues sont celles admises par le DNV (tableau 37).

Les règles de calcul du Règlement du DNV (5) appliquées à cet élément de structure aboutissent à l'échantillonnage indiqué dans le tableau 38.

Les structures en aluminium permettent d'économiser entre 48 et 51 % de poids par rapport à l'acier, à l'avantage de la structure tôles en *Sealium®*/profilés en *Sealium®* (tableau 39).

(5) DNV Rules for Ships/High speed, Light Craft and Naval Surface Craft, January 2001.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

Demi-produit	Alliage	Métal non soudé		Métal soudé		
		Rp _{0,2} (MPa)	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)	Rm (MPa)	Coefficient f ₁
Tôles	5083 H116	215	305	125	275	0,60
	Sealium®	220	305	145	290	0,64
	Acier A27S	265	400	Inchangé		1,08
Profilés	6082 T6	260	310	115	205	0,48
	Sealium®	190	310	145	290	0,64 (*)
	Acier A27S	265	400	Inchangé		1,08

(*) Le règlement DNV assimile le 5383 H112 au Sealium® (5383 H116).

Tableau 37

ÉCHANTILLONNAGE DES STRUCTURES

Assemblage	Épaisseur de la tôle (mm)	Dimension des raidisseurs	Dimension des lisses (en T)
5083 H116/6082 T6	7	120 x 6 bulb flats @ 213 mm spacing	500 x 8 + 60 x 8 mm
Sealium®/Sealium®	7	105 x 6 bulb flats @ 220 mm spacing	460 x 8 + 65 x 8 mm
Acier A27S/AcierA27S	5	100 x 6 bulb flats @ 240 mm spacing	460 x 4 + 50 x 6 mm

Tableau 38

GAIN DE POIDS PAR RAPPORT À L'ACIER

Éléments de structure (en kg.m ⁻²)	Acier	Tôle 5083/ profilé en 6082	Tôle Sealium®/ profilé en Sealium®
Tôle	39,2	18,9	18,9
Raidisseur	36,3	11,9	9,9
Lisse	18,7	13,3	12,6
Total	84,40	44,1	41,4
Gain en %		47,8	51,0

Tableau 39

3.2 Cas d'une poutre en flexion

À résistance égale, il faut vérifier la relation :

$$\sigma_{e \text{ acier}} \cdot I/V_{\text{acier}} = \sigma_{e \text{ alu}} \cdot I/V_{\text{alu}}$$

d'où :

$$I/V_{\text{alu}} = \frac{\sigma_{e \text{ acier}}}{\sigma_{e \text{ alu}}} \cdot I/V_{\text{acier}}$$

Dans ce cas, la transposition sera faite avec des profilés extrudés en aluminium (ou reconstitués) dont la hauteur est de l'ordre de 30 % supérieure à celle de profilés (reconstitués) en acier (figure 31).

Ainsi que cela a été développé précédemment (6), la très bonne aptitude au filage de l'aluminium permet de réaliser des profilés aux formes optimisées pour les applications marines : figure 32 et tableaux 41 et 42, pp. 61 et 62.

PROFILÉS ACIER ET ALUMINIUM

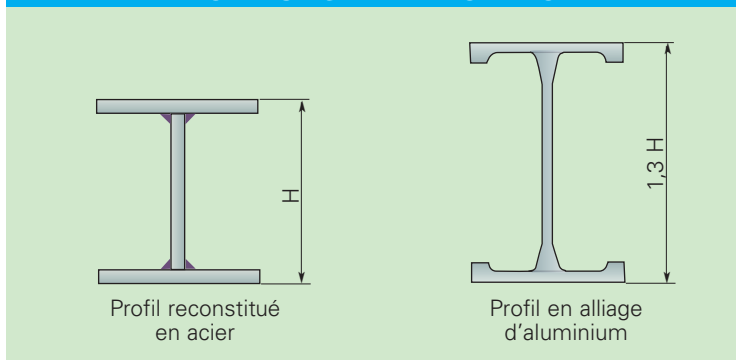


Figure 31

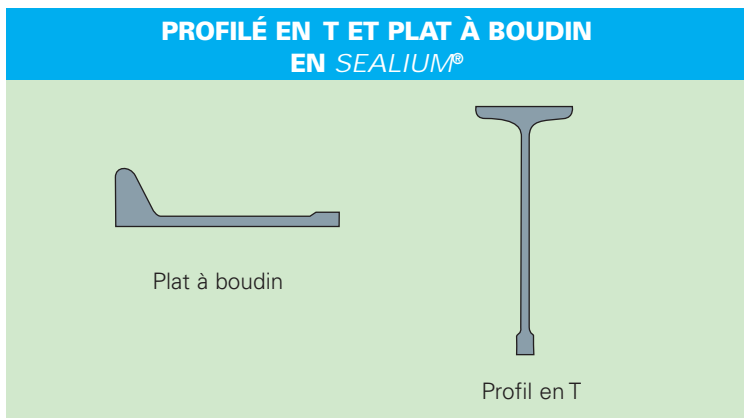


Figure 32

Les calculs montrent que, à déformation égale, un profilé en T en Sealium® pèse deux fois moins au mètre linéaire que son équivalent en acier laminé à chaud, aux formes géométriques simples (tableau 40).

L'aluminium permet de reconstituer des profilés de grande dimension par soudage automatique de semelles de profilés et de tôles (figure 33). Cette solution très élégante présente plusieurs avantages : placer les cordons de soudure dans les zones les moins sollicitées et faire du sur-mesure.

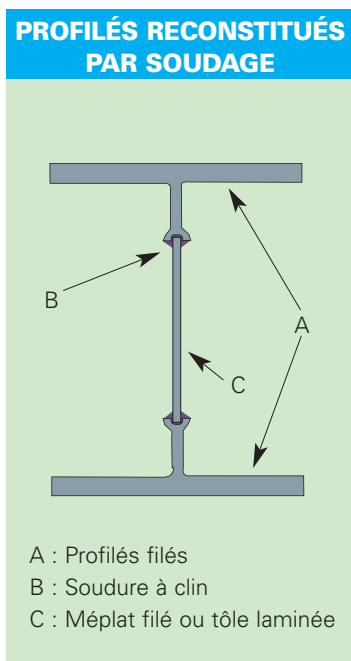


Figure 33

(6) cf. chapitre 2.

4. LA TENUE EN FATIGUE DES STRUCTURES EN ALLIAGE D'ALUMINIUM

Jusqu'à une époque récente, la fin des années 1980, les problèmes de fatigue sur les navires en aluminium étaient pratiquement inexistants parce que leur longueur ne dépassait pas 50 m. Les structures étaient largement dimensionnées pour supporter les chargements locaux, sans grand risque de propagation de fissures.

Depuis, avec l'allongement de la taille des navires en aluminium, 80 m et plus, avec des conditions de service plus dures « en mer formée », avec le transport de véhicules (automobiles et surtout cars et camions), la tenue en fatigue est devenue une des préoccupations majeures des architectes et des armateurs^[4].

Pour ces grands navires, l'expérience montre qu'ils peuvent présenter, après des durées de service plus ou moins longues, des fissures de fatigue, situées dans les zones les plus sollicitées, qu'il faut réparer.

COMPARAISON PROFIL EN T EN SEALIUM® ET EN ACIER

Dimensions	Acier Profil en T P 80X5	Sealium® Profil en T T100 X50	Rapport Sealium® à l'acier
Masse (kg.m ⁻¹)	4,25	2,20	- 48 %
Hauteur (mm)	80	100	+ 25 %
Surface latérale (mm ²)	541	830	+ 53 %
Moment d'inertie (mm ⁴)	338 700	927 952	+ 274 %
Moment de flexion élastique par rapport à l'axe x - x (mm ³)	6910	14 193	+ 205 %
Produit E x I (*)	71 127	64 957	- 9 %

(*) Pour compenser l'écart (de 1 à 3) des modules d'élasticité, à déformation égale, l'inertie d'une poutre en aluminium doit être 3 fois plus élevée que celle d'une poutre en acier. Pour une même charge, une même longueur de poutre et des conditions limites identiques, la déformation est proportionnelle à 1/E*1.

Tableau 40

Compte tenu de l'importance de la tenue en fatigue sur la longévité d'une structure et sur les coûts de maintenance des navires en aluminium (ou en acier), cette question doit être prise en compte dès la conception du navire et lors de sa construction ^[5].

La sensibilité à la fatigue n'est pas un problème spécifique à l'aluminium, il concerne tout autant les aciers et surtout les aciers à haute limite élastique.

5. LES CONDITIONS DE SERVICE DES NAVIRES À GRANDE VITESSE

Ces bateaux sont soumis à des contraintes cycliques dues essentiellement à trois types de chargements :

- de faible niveau, mais avec un grand nombre de cycles, ils ont pour origine les vibrations dues aux moteurs, aux lignes d'arbre et aux waterjets,

- de niveau élevé, mais avec peu de cycles, ils sont produits lors des embarquements et des débarquements des véhicules (cars, camions, automobiles),

- de niveau moyen et de fréquence moyenne, ils sont dus à l'effet des vagues ^[6, 7].

Sur les navires à grande vitesse, on considère que les chargements dus aux moteurs, aux arbres et aux waterjets sont prépondérants par rapport au moment de flexion de la poutre que constitue le navire ^[8].

Il en résulte qu'il existe des zones très fortement sollicitées sur ces navires, ainsi que l'illustre la figure 34.

L'expérience montre que les problèmes de fatigue se localisent généralement dans les zones de changement d'orientation, et aussi dans les embrasures de portes, de fenêtres, etc.

(7) Cela est vrai pour les aciers.

(8) Cf. chapitre 3, paragraphe 6.2.

6. GÉNÉRALITÉS SUR LA FATIGUE DES MÉTAUX

La fatigue est un phénomène complexe qui concerne la plupart des métaux usuels, dont les alliages d'aluminium. Elle se produit quand les structures subissent des variations cycliques de chargements.

L'expérience montre que les niveaux de contraintes pour lesquels on peut observer des fissures (et des ruptures) de fatigue sont généralement très inférieurs à la contrainte admissible, calculée en statique.

La tenue en fatigue dépend de plusieurs paramètres, relatifs :

- aux propriétés des métaux et des alliages,
- au design,
- à la réalisation,
- aux chargements dont le niveau dépend des conditions de service (itinéraire des navires, fréquence d'embarquement et masse du fret embarqué, etc.).

La très longue expérience de la fatigue sur des structures métalliques (en acier, en aluminium, etc.) montre que les deux paramètres les plus importants sont la conception et la réalisation, dont le soudage.

Conformément aux codes de calcul, seule la configuration du joint soudé en alliage d'aluminium est prise en compte pour établir la limite d'endurance (FAT). La nature de l'alliage d'aluminium n'est pas prise en compte (7), même s'il est établi que ses performances en tenue en fatigue sont meilleures, ce qui est le cas pour le *Sealium*[®] (8). Il n'en demeure pas moins que, en s'en tenant aux règles obligatoires, ce nouvel alliage apporte un supplément de résistance à la fatigue, donc une meilleure sécurité d'usage.

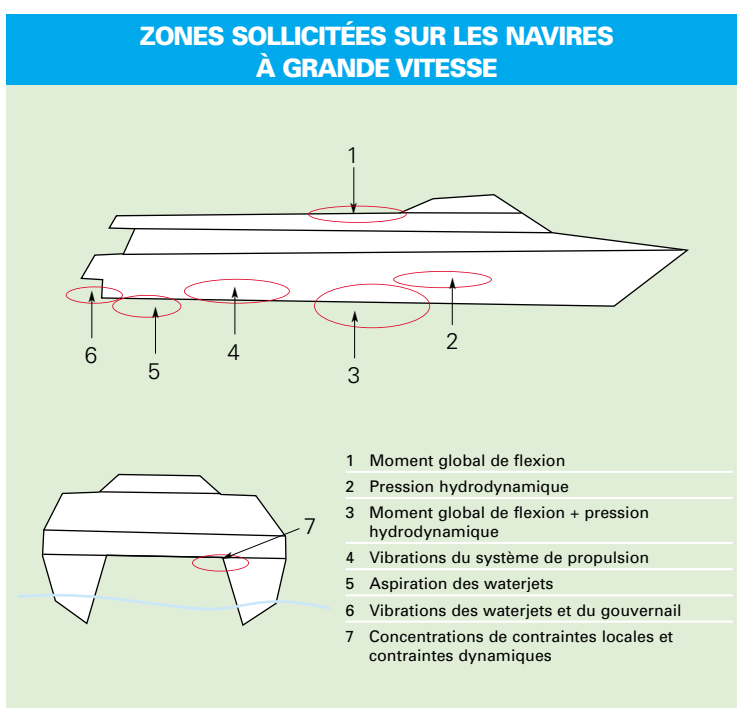


Figure 34

7. LES SPÉCIFICITÉS DE LA TENUE EN FATIGUE DE L'ALUMINIUM

Par rapport à l'acier, les alliages d'aluminium présentent plusieurs différences, dont :

- la limite d'endurance,
- la zone affectée thermiquement,
- les contraintes résiduelles,
- le mode de rupture,
- le seuil de propagation.

7.1 La limite d'endurance

Sur éprouvette lisse, l'aluminium a une courbe S/N qui décroît toujours (figure 35). Il en résulte que la vérification du calcul en statique doit être faite par rapport au niveau de contrainte au-dessous duquel il n'y aura pas de propagation de fissure pour une durée donnée, fixée habituellement à $2 \cdot 10^6$ alternances ^[9].

À ce niveau, la limite d'endurance, déterminée sur éprouvette « lisse », du métal de base, est de 420 MPa pour l'acier et de 140 MPa pour l'aluminium. Sur les assemblages soudés, le rapport des contraintes admissibles (FAT) suivant les codes de calcul entre l'acier et les alliages d'aluminium sont, en fait, au cas par cas, plus proches de 2 (9).

7.2 La zone affectée thermiquement

Du fait de l'échauffement provoqué par le soudage, ses caractéristiques mécaniques sont celles de l'état recuit (O) pour les alliages à durcissement par écrouissage et celles de l'état trempé (T4) pour les alliages à durcissement structural (figure 35) (10).

Sur les aciers, le soudage a un effet inverse : il y a durcissement de la zone affectée thermiquement du fait du refroidissement rapide (effet de trempé).

Mais, comme sur les aciers, le soudage a pour effet d'abaisser le seuil de contraintes admissibles sous chargement variable. Ces seuils (FAT) sont fixés par les normes, les codes de calcul, les sociétés de classification (11).

7.3 Les contraintes résiduelles

Elles sont plus faibles que sur l'acier parce que la zone affectée thermiquement est adoucie par la chaleur dégagée lors du soudage.

(9) Par exemple, pour une soudure bout à bout (cas 211 de l'IIW) contrôlée à 100 %, la FAT acier est de 125 MPa et la FAT alliage d'aluminium est de 50 MPa, soit 40 % de la FAT acier.

(10) Sur les alliages de moulage, la tenue en fatigue du joint soudé est celle de la pièce moulée.

(11) Ces FAT peuvent différer quelque peu d'un code à l'autre, d'un règlement à l'autre, leur mode de détermination également.

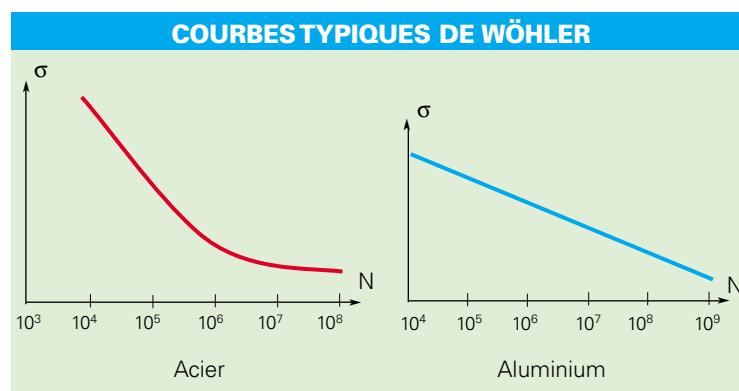


Figure 35

PLATS À BOUDIN EN SEALIUM® (*)

Type	H (mm)	Tw (mm)	H1 (mm)	Tw1 (mm)	Bf (mm)	R (mm)	S (mm ²)	Poids kg.m ⁻¹	C (mm)	I (mm ⁴)	Sxx Haut (mm ³)	Sxx Bas (mm ³)
P50	50	3	9	4,5	10	4	218	0,58	21,25	57 085	2 687	1 985
P60	60	3,3	9,6	4,8	12	4	284	0,76	24,86	107 947	4 342	3 072
P70	70	3,5	10	5	14,5	4	360	0,96	27,95	186 636	6 677	4 439
P80	80	3,7	10,4	8,2	16,6	4	436	1,16	31,34	296 312	9 455	6 089
P90	100	4,2	11,4	5,7	21	4	620	1,65	38,30	659 291	17 215	10 685
P100	120	4,6	12,2	6,1	26	4	833	2,21	44,47	1 271 697	28 600	16 836
P140	140	5,1	13,2	6,6	30,5	4,8	1 106	2,94	50,31	2 267 810	45 078	25 285
P170	170	5,8	14,6	7,3	37,5	5,8	1 580	4,20	58,99	4 717 199	79 966	42 493

(*) Voir figure 32.

Tableau 41

COURBE TYPIQUE DE VITESSE DE PROPAGATION DES FISSURES

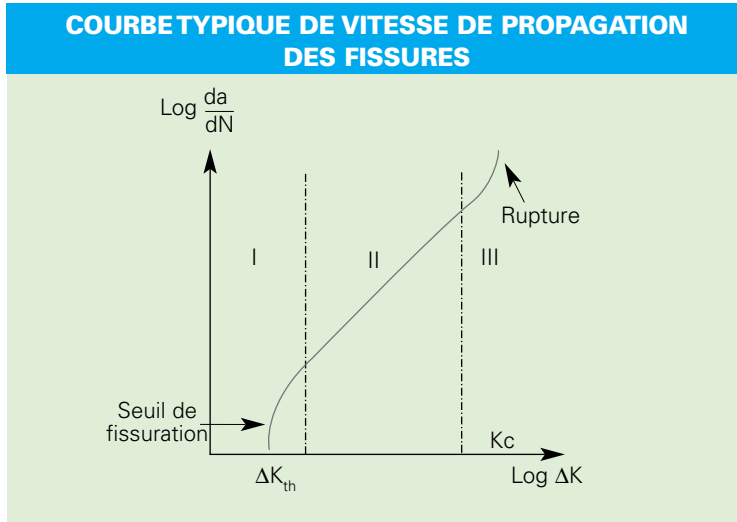


Figure 36

7.4 Le mode de rupture

Il est toujours ductile. Contrairement aux aciers, l'aluminium ne subit pas de rupture fragile, par exemple dans le joint soudé (sous l'effet de contraintes résiduelles), aux basses températures, etc.

7.5 Le seuil de propagation

Il existe un seuil de la valeur ΔK à partir duquel une fissure commence à se propager (phase II de la figure 36). Pour une contrainte limite admise de 50 Mpa (FAT 50), la taille limite du défaut débouchant d'une soudure est de 0,5 mm. On admet qu'une soudure bien faite ne comporte pas de défauts atteignant cette taille.

Ce seuil est relativement élevé sur les alliages d'aluminium, beaucoup plus que sur les aciers, toutes choses étant égales par ailleurs : masse de l'élément de structure soumis à un chargement et niveau de celui-ci (figure 37).

VITESSE DE PROPAGATION DES FISSURES

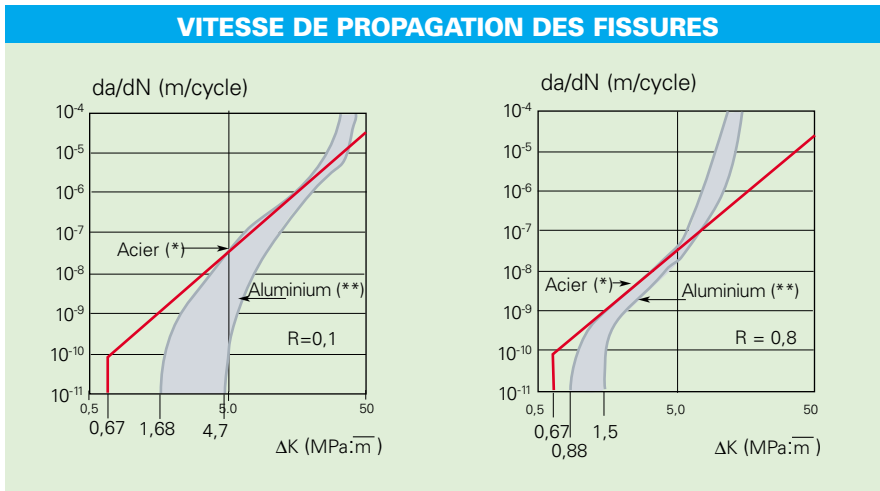


Figure 37

(*) La courbe de l'acier a été corrigée d'un facteur x3 pour tenir compte des différences de densité entre aluminium et acier.

(**) Alliages 5000, 6000 et 7000.

PROFILÉS EN T EN SEALIUM® (*)

Type	H (mm)	Tw (mm)	H1 (mm)	Tw1 (mm)	Bf (mm)	L (mm)	R (mm)	S (mm ²)	Poids kg.m ⁻¹	C (mm)	I (mm ⁴)	Sxx Haut (mm ³)	Sxx Bas (mm ³)
T50	50	3	10	5	30	4,5	4,6	299	0,80	16,74	84 662	5 057	2 546
T60	60	3,5	11	5,5	35	5,1	5,2	402	1,07	19,94	162 062	8 126	4 046
T70	70	4	12	6	40	6,1	6	536	1,42	22,69	287 200	12 657	6 071
T80	80	4,5	13	6,5	45	6,2	6,2	650	1,73	26,55	459 564	17 310	8 598
T100	100	5	14	7	50	6,4	6,4	830	2,20	34,62	927 952	26 805	14 193
T120	120	5,5	15	7,5	5	7,7	7,8	1 091	2,90	41,01	1 735 149	42 315	21 965
T140	140	6	16	8	60	8,7	8,8	1 367	3,64	47,89	2 942 592	61 442	31 947
T170	170	6,5	17	8,5	65	10,3	10,4	1 777	4,73	58,05	5 598 542	96 440	50 010

(*) Voir figure 32.

Tableau 42

8.

LE CLASSEMENT
DES ALLIAGES
D'ALUMINIUM

Comme pour les aciers, il n'y a pas de relation entre la résistance à la fatigue des alliages d'aluminium et leurs caractéristiques mécaniques : charge de rupture et limite d'élasticité.

Ainsi que l'illustre la figure 38, les essais montrent que les limites d'endurance sont du même ordre de grandeur quand les sollicitations atteignent 10^6 alternances.

Tout cela concourt à confirmer l'expérience, à savoir que la tenue en fatigue dépend de l'assemblage – dont la configuration du joint soudé – et non de l'alliage de base (ni de son état métallurgique). Cela est vrai pour les alliages des familles 5000 et 6000. Il en est de même pour les aciers (figure 39).

Le comportement en fatigue des métaux et plus particulièrement des assemblages soudés ne peut être mesuré et apprécié que par des essais et par l'expérience ^[10].

La nature des demi-produits (tôles, profilés, matricés, etc.) d'un même alliage et leur forme n'ont pas d'influence sur la résistance à la fatigue ^[11].

Par contre, l'état de surface est un paramètre important : les rayures en surface, les marques incrustées au « fer » peuvent constituer des amorces de propagation de fissures (figure 40). Il en est de même des irrégularités laissées sur les bords par les outils de découpe. En laissant des bords de découpe nets, le sciage est plus favorable à la résistance à la fatigue que la découpe au plasma.

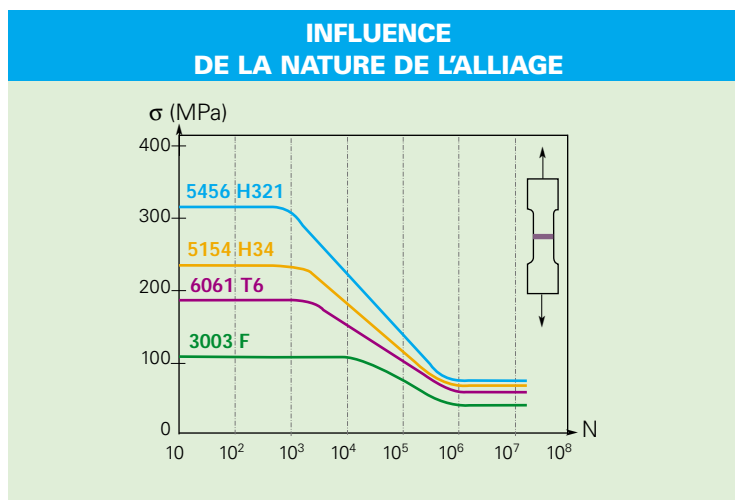


Figure 38

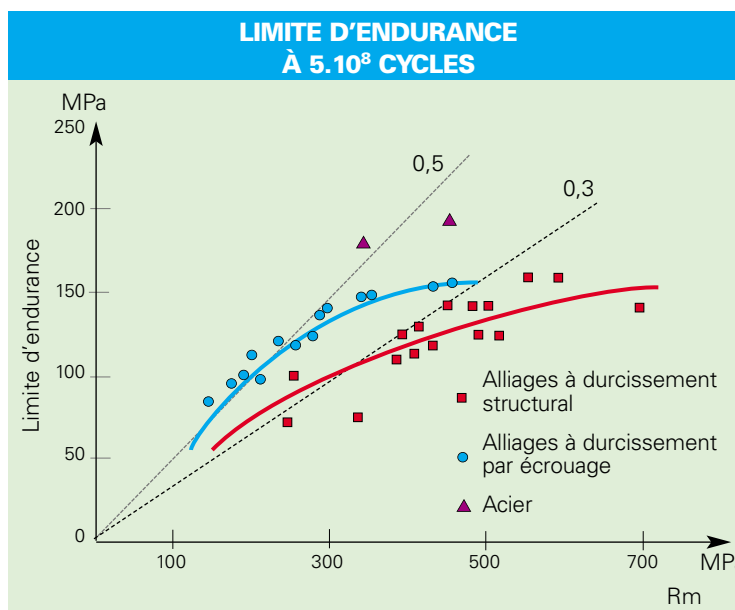


Figure 39

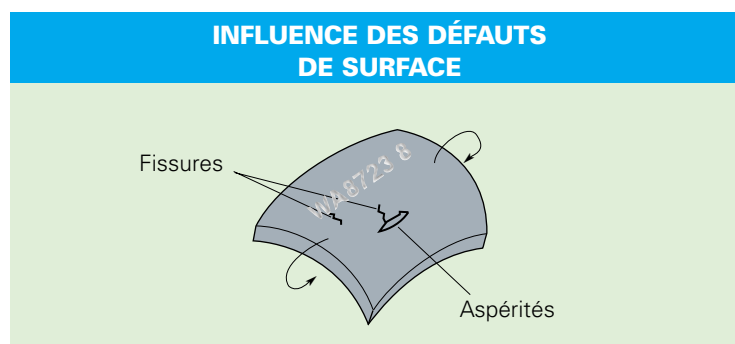


Figure 40

9. LIMITE D'ENDURANCE DES JOINTS SOUDÉS

L'expérience montre que la plupart des fissures de fatigue partent du cordon de soudure : au début, à la fin ou sur la surface (à l'endroit des « rides » superficielles) de celui-ci. La zone affectée thermiquement peut aussi être le point de départ des fissures de fatigue.

Il y a deux causes principales :

- les concentrations de contraintes. Le cordon de soudure est le siège de contraintes dues à son mode de refroidissement ⁽¹²⁾. Au cours de la solidification du bain liquide, du fait de la diminution de volume, il y a formation de petits cratères en surface (figure 41).
- les défauts (ou imperfections) qui sont formés lors de l'exécution de la soudure. Ils sont le siège de concentrations de contraintes (figure 42).

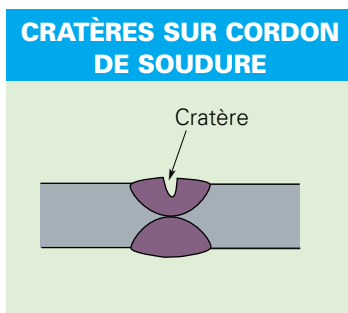


Figure 41

9.1 Les défauts de soudure

Un cordon de soudure peut présenter plusieurs types de défauts (13) : de forme (défaut d'alignement, etc.) ou de constitution dû à l'exécution de la soudure (inclusions, porosités, etc.), figure 43.

Par principe, tout défaut concourt à abaisser la résistance à la fatigue dans la mesure où il est débouchant à la surface libre et où sa taille (2a) dépasse la limite à partir de laquelle une fissure de fatigue peut se propager (figure 36, p. 62).

Le calcul montre que, pour une contrainte de 50 MPa, la taille minimale du défaut à partir de laquelle il y a propagation des fissures est de 0,5 mm. Sur les

jointes soudées correctement exécutés, la dimension des défauts habituels (porosités, criques de retrait, etc.) varie de 0,01 à 0,40 mm (12 et 13), soit un peu moins que la taille critique (14).

(12) Cf. chapitre 6.

(13) La cause de certains d'entre eux est indiquée au chapitre 6, paragraphe 11.

(14) La tenue en fatigue d'un assemblage soudé dépend de la vitesse de propagation des fissures (suivant les lois de la mécanique de rupture).

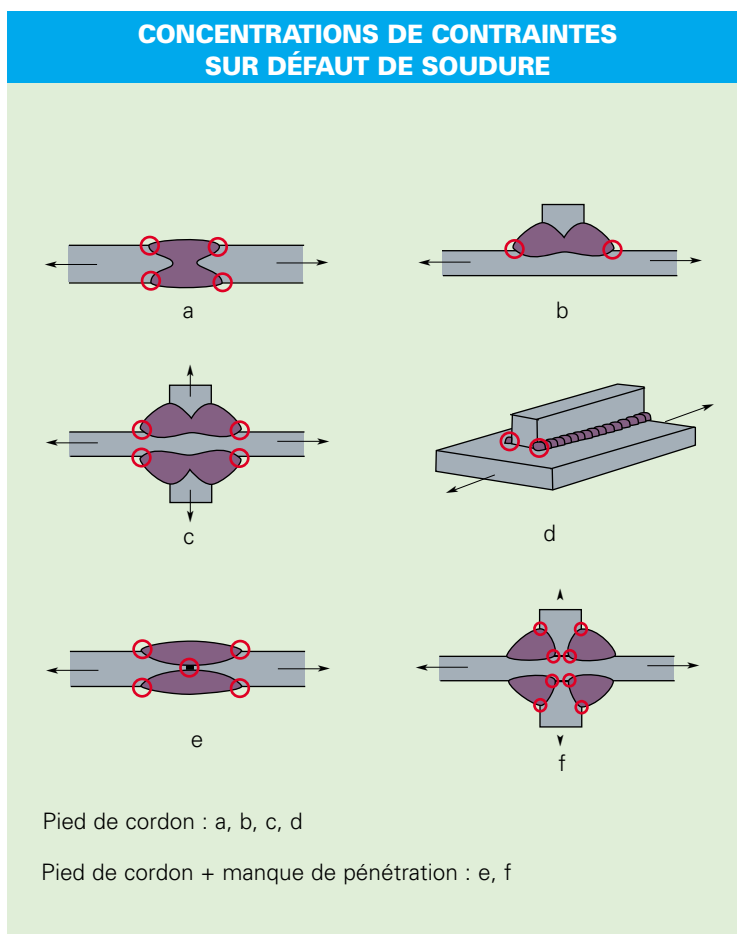


Figure 42

Il en résulte que tous les types de défauts répertoriés n'ont pas la même influence sur la tenue en fatigue.

Parmi les défauts de soudure, le manque de pénétration (défaut 5 de la figure 43) est celui qui pénalise le plus la tenue en fatigue, ce qui explique que la tenue en fatigue des soudures d'angle est inférieure aux soudures bout à bout, toutes choses étant égales par ailleurs.

L'angle de raccordement α du cordon de soudure avec la structure est également un paramètre important de la tenue en fatigue, pour deux raisons :

- géométrique, le changement de direction que marque l'angle α ,
- structurelle, due au collage de rive éventuel débordant du cordon de soudure (figure 44).

La résistance à la fatigue est d'autant plus élevée que l'angle α est obtus. Elle est à son maximum quand le cordon est arasé : $\alpha = 180^\circ$ (figures 45 et 46).

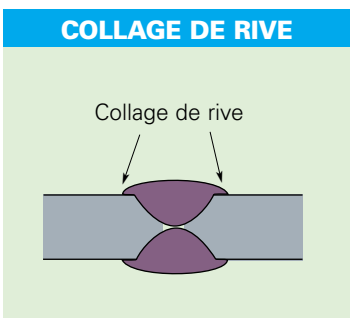


Figure 44

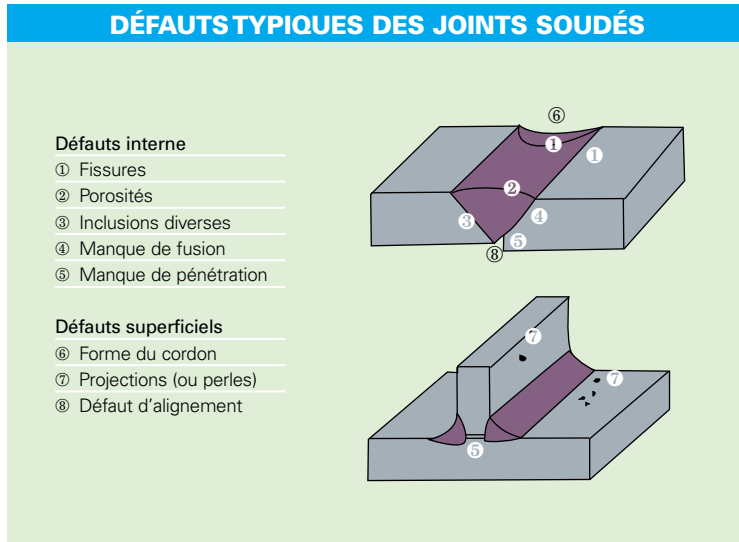


Figure 43

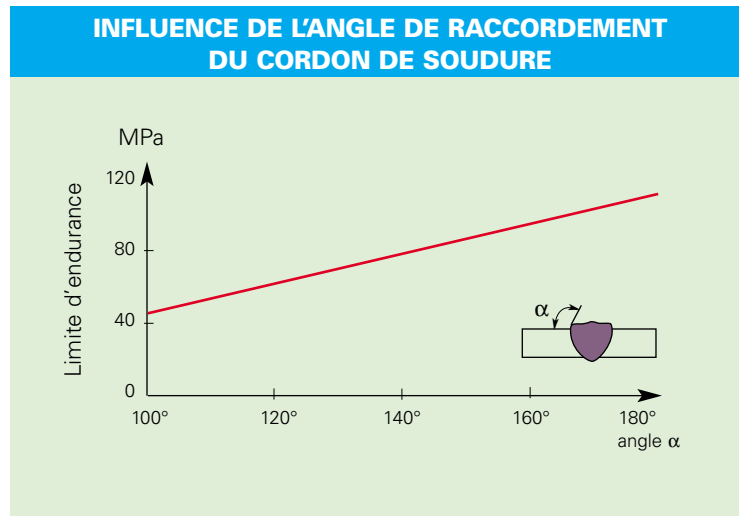


Figure 45

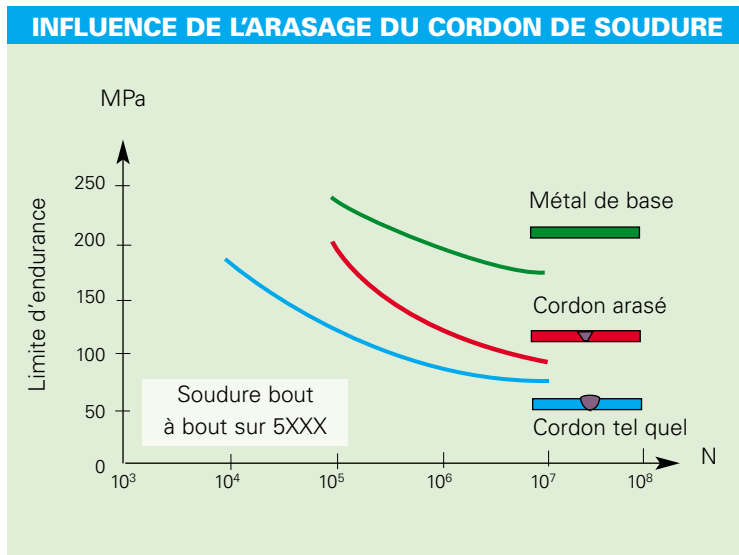


Figure 46

9.2

Classement des joints soudés

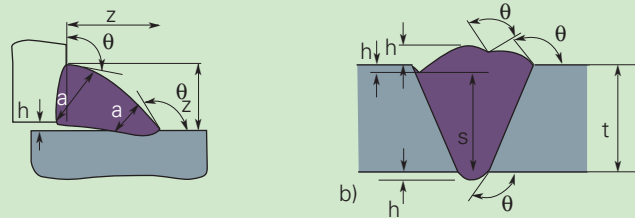
Les limites d'endurance (FAT), indiquées dans les codes et règlements ont été établies à partir d'essais normalisés sur des éprouvettes tirées dans des assemblages et du retour d'expérience de structures en service [14].

L'Eurocode 9 prévoit des limites d'endurance (FAT de 25 à 62 MPa) en fonction de la taille des défauts (figure 47) (défaut d'alignement, caniveau, absence de pénétration à la racine, porosité, fissure, etc.), et l'étendue des contrôles correspondant au niveau de FAT visé.

L'influence de la taille de quatre défauts sur les limites d'endurance (FAT) est indiquée dans le tableau 43.

Les codes de construction et les règlements s'en tiennent à la seule configuration du joint soudé pour définir la limite d'endurance (FAT) acceptable (figures 48 à 50).

LIMITE D'ENDURANCE (FAT) SUIVANT EUROCODE 9



a) a et z sont des distances minimales

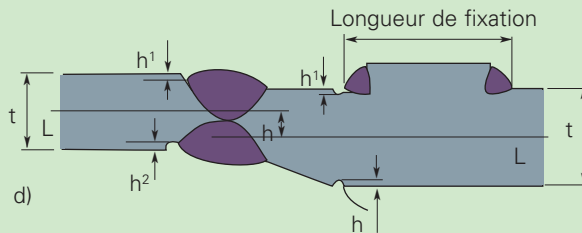
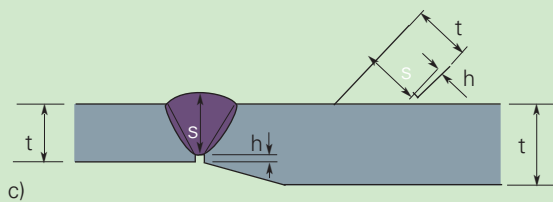


Figure 47

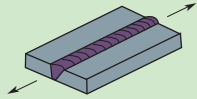
LIMITE D'ENDURANCE (FAT) SOUDURES BOUT À BOUT (recommandations de IIW, Group XIII - XV, 1996)

	Cas 211 : Soudure bout à bout, en X ou en V, arasée, 100 % CND (*) 50
	Cas 212 : Soudure bout à bout, réalisée à plat en atelier, angle de raccordement 30°, CND (*) 40
	Cas 213 : Soudure bout à bout, angle de raccordement 50°, CND (*) 32
	Cas 215 : Soudure bout à bout, angle de raccordement > 50° ou soudure bout à bout avec latte support permanente 25
	Cas 223 : Soudure bout à bout, CND (*), avec réduction d'épaisseur et de largeur
	Gradient 1:5 25
	Gradient 1:3 22
	Gradient 1:2 20

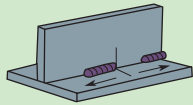
(*) Contrôle non destructif.

Figure 48

LIMITE D'ENDURANCE (FAT) SOUDURES LONGITUDINALES
(recommandations de IIW, Group XIII - XV, 1996)



Cas 313 : Soudure bout à bout, sans début et arrêt de cordon, CND 45
Avec début et arrêt de cordon 36

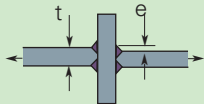


Cas 324 : Soudure d'angle longitudinale en chenille (sur la base d'une contrainte normale σ dans la semelle et d'une contrainte de cisaillement τ dans l'âme en fin de cordon)

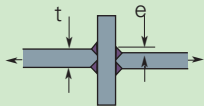
$\tau/\sigma = 0$	32
$\tau/\sigma = 0,0 - 0,2$	28
$\tau/\sigma = 0,0 - 0,3$	25
$\tau/\sigma = 0,0 - 0,4$	22
$\tau/\sigma = 0,0 - 0,5$	20
$\tau/\sigma = 0,0 - 0,6$	18
$\tau/\sigma = 0,0 - 0,7$	16
$\tau/\sigma = > 0,7$	14

Figure 49

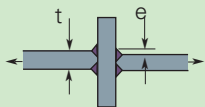
LIMITE D'ENDURANCE (FAT) SOUDURES EN CROIX
(recommandations de IIW, Group XIII - XV, 1996)



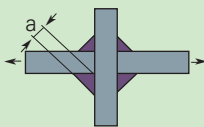
Cas 411 : Soudure en X ou en T, rabotage en K, pénétration totale, sans arrachement lamellaire, défaut d'alignement $e < 0,15$, angles de raccordement meulés, fissure dans l'angle de raccordement 28



Cas 412 : Soudure en X ou en T, rabotage en K, pénétration totale, sans arrachement lamellaire, défaut d'alignement $e < 0,15$, fissure dans l'angle de raccordement 25



Cas 413 : Soudure en X ou en T, soudure d'angle, ou rabotage en K à pénétration partielle, fissure dans l'angle de raccordement 22



Cas 414 : Soudure en X ou en T, soudure d'angle, ou rabotage en K à pénétration partielle (y compris les soudures à raccordement meulé), fissure au pied de la soudure 16

Figure 50

NIVEAU D'ACCEPTATION DES SOUDURES INDUSTRIELLES (*)

Défaut	Soudure	Sens soudure (*)	Figures	Taille du défaut	FAT 25	FAT 31	FAT 39	FAT 49	FAT 62
Angle du cordon	tous types	Trans	a, b	$\theta \geq$	120°	150°	165°	175°	-
		Long	a, b	$\theta \geq$	90°	90°	90°	90°	175°
Surépaisseur excessive du cordon	bout à bout	Trans	b	$h \leq$	5	4	2	0,5	-
		Long	b	$h \leq$	6	5	4	3	0,5
Défaut d'alignement	bout à bout	Trans	d	$h \leq$	D + 0,1 t	D + 0,05 t	D + 0,05 t	D + 0,05 t	-
Manque de pénétration à la racine	bout à bout	Trans	c	$h \leq$	-	-	-	-	-
		Long	c	$h \leq$	D + 0,1 t	D + 0,1 t	D + 0,05 t	D + 0,05 t	-

D = dimension spécifiée sur les plans - (*) Extrait du tableau D.2 de l'Eurocode 9.

Tableau 43

10. L'INFLUENCE DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES ET DE LA FABRICATION

La tenue en fatigue des navires en alliage d'aluminium dépend :

- des dispositions constructives définies par le bureau d'études,
- de la réalisation des joints soudés sur chantier.

10.1 La conception des assemblages soudés

C'est un paramètre très important. Tout en restant dans des limites de coût acceptable, les bureaux d'études doivent proposer des structures dans lesquelles

les concentrations de contrainte sont les plus faibles possibles. La méthode des « points chauds » permet d'identifier les zones sensibles ^[15].

L'influence des dispositions constructives de quelques exemples d'assemblages soudés est indiquée dans le tableau 44.

10.2 La conception des assemblages boulonnés et collés

La configuration des assemblages boulonnés ou collés doit être étudiée pour une bonne tenue en fatigue (figures 51 et 52, p. 70). En particulier, il faut que le diamètre des vis soit proportionnel aux dimensions de l'assemblage.

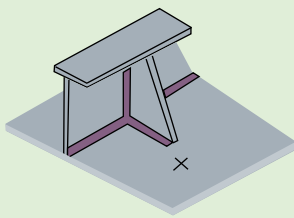
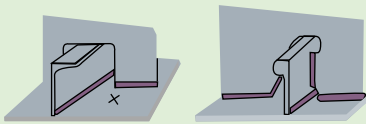
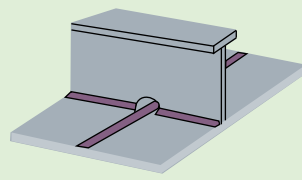
10.3 La réalisation des joints soudés

L'expérience montre que la tenue en fatigue des structures soudées en alliage d'aluminium est plus sensible aux défauts de soudure que celle des structures soudées en acier ^[18].

C'est la raison pour laquelle la construction navale, en particulier, et la chaudronnerie aluminium, en général, requièrent :

- de meilleures compétences pour l'exécution des soudures que la chaudronnerie acier,
- un contrôle plus serré des soudures, au moins celles situées dans les zones les plus sollicitées par des variations de chargement.

INFLUENCE DES ASSEMBLAGES SOUDÉS SUR LA TENUE EN FATIGUE ^[16, 17]

Exemple de structure		Observations
Gousset de varangue sur le fond		Le cordon de soudure doit être contourné à l'extrémité du gousset pour éviter une amorce de fissure.
Passage d'une lisse dans un couple		À gauche, faute de pouvoir accéder sous le profilé, le cordon de soudure ne peut être contourné, d'où risque de fissure. À droite, la réalisation est correcte, les cordons de soudure ne sont pas croisés, la tôle du couple est soudée sur le côté plat du profilé de la lisse.
Passage d'un renfort sur la tôle du bordé		Disposition correcte évitant le croisement des soudures (qui a pour effet de détruire en grande partie la soudure du dessous).

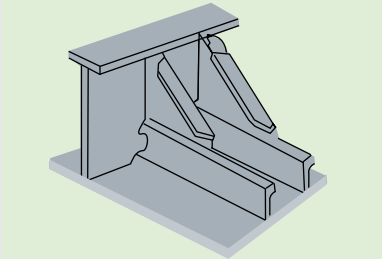
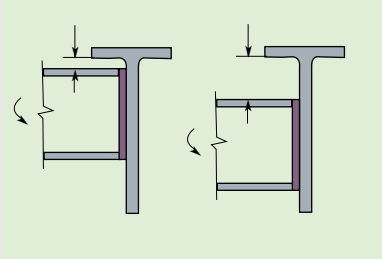
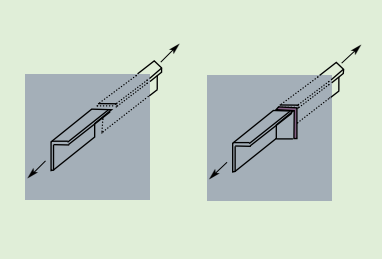
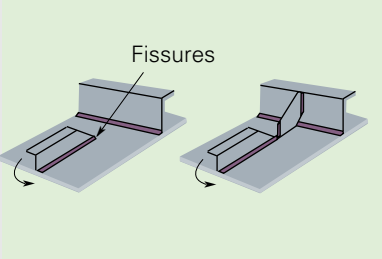
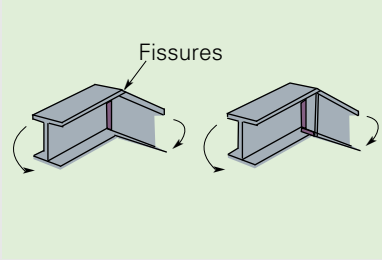
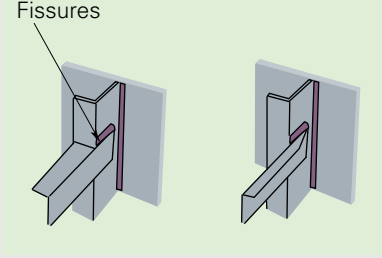
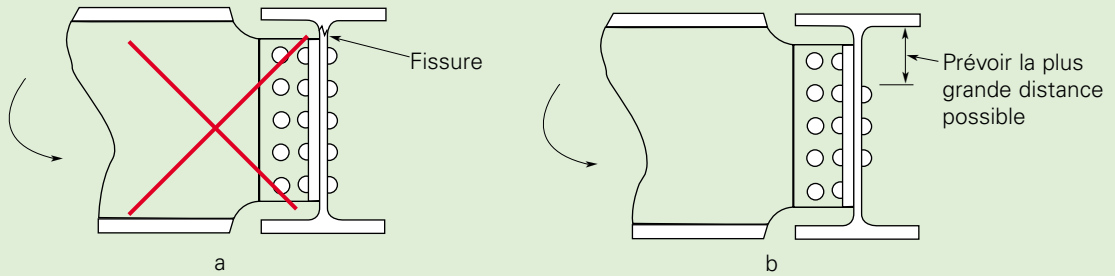
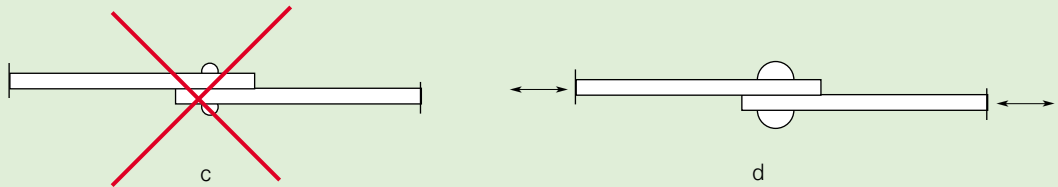
Exemple de structure		Observations
Platelage de pont, croisement d'un barreau et du renfort		Montage trop serré, la torche ne peut atteindre les faces internes des renforts longitudinaux.
Raccordement de deux profils, par exemple lisse et barreau		Il faut laisser suffisamment d'espace pour que la torche accède partout et puisse contourner le barreau transversal sur la lisse.
Traversée de cloison		À gauche, avec un profil de chaque côté de la cloison, il y aura un mauvais alignement et des contraintes. À droite, le profil passe au travers de la cloison qui est accrochée sur le profil.
Raidisseurs sur tôle		À gauche, l'arrêt du raidisseur en pleine tôle induit des contraintes, avec risque d'arrachement par flexion. À droite, le renfort ajouré pour éviter un croisement de soudure répartit les efforts de flexion.
Raccordement de deux profilés		Le changement de direction induit des contraintes de flexion et de torsion. L'ajout d'un tympan qui forme un caisson évite ces contraintes.
Raccordement d'une lisse et d'un barreau sur la tôle de bordé		À gauche, l'entaille sur le profilé provoque une concentration de contrainte qui sera éliminée par le montage de droite.

Tableau 44

ASSEMBLAGES BOULONNÉS SOUMIS À CISAILLEMENT ^[13]



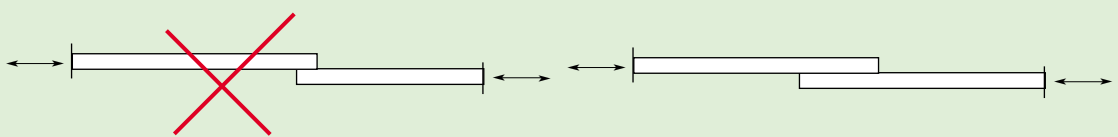
Les boulons placés trop près de la semelle induisent des contraintes en flexion dans celle-ci (a).
La disposition en (b) réduit les contraintes sur la liaison avec la semelle.



De petites fixations dans de grands éléments favorisent les ruptures en fatigue dans les zones de boulonnage (c).
Le diamètre des boulons doit être proportionnel à la dimension des pièces assemblées (d).

Figure 51

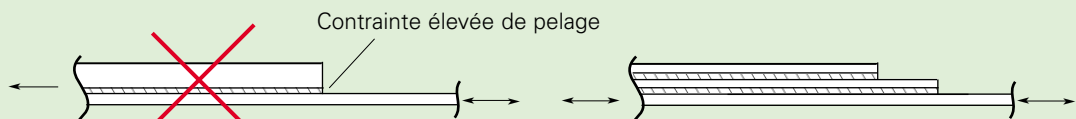
ASSEMBLAGES COLLÉS ^[13]



Une plus grande surface de recouvrement améliore la tenue en fatigue du joint collé.



Sur des joints soumis à des efforts importants de clivage et de pelage, le collage assisté par boulonnage ou par rivetage réduit les risques de rupture par fatigue.



Un renfort épais a pour effet d'induire une contrainte élevée à son extrémité tandis que des renforts minces et progressifs réduisent les contraintes d'extrémité, et donc améliorent la tenue en fatigue.

Figure 52

11. | NORMES ET RÈGLEMENTS

Eurocode 9 : Conception et dimensionnement des structures en aluminium, partie I, Règles générales et règles pour le bâtiment, Norme EN, ENV 1999-1-1, mai 1998.

Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium, partie II, Structures sensibles à la fatigue, Norme EN, ENV 1999-2, mai 1998.

ECCS, 1992, Institut de la Soudure, Recommandations pour le calcul en fatigue de structures en alliages d'aluminium.

British Standard BS 8118, Structural use of aluminium, Part 1, Code of practice for design, 1991.

British Standard BS 8118, Structural use of aluminium, Part 2. Specifications for materials, workmanship and protection.

Bureau Veritas, Rules for the classification of High Speed Craft, Feb. 2002.

ABS, Requirements for materials and welding, Part 2, Aluminum, Fiber Reinforced Plastics (FRP), 1997.

DNV, Rules for classification of ships, high speed, light craft and naval surface craft, New Building, materials and welding, Part 2, Chapter 2, Metallic materials, January 2001.

DNV, Rules for classification of ships. New Building, materials and welding, Part 2, Chapter 3, Welding, January 1996.

DNV, Rules for classification of high speed, light craft and naval surface craft, Structures, equipment, Part 3, Chapter 3 ; Hull structure design, aluminium alloy, July 2002.

Aluminum Structures, A guide to their specifications and design. J. RANDOLPH KISSELL, ROBERT L. FERRY, John Wiley & Sons, Inc, 2002.

Fatigue of aluminium structural weldments, Ship Structure Committee 2000. Rapport SSC-410, NTIS #PB2000-108442.

Fatigue design aluminium components structures. M.E. SHARP, G. E. NORDWARK, C. C. MENZER MCGRAW-HILL.

TALAT, Chapitre F2204. La conception, rédigé par STEINAR LUNDBERG, Hydro Aluminium Structures, Karmoy, 1999, 30 pages.

TALAT, Chapitre F2205. Conceptions particulières, rédigé par TORSTEN HOGLUND, Royal Institut of Technology, Stocklom and DIMITRIS KOSTEAS, Technische Universität München, 1999, 27 pages.

TALAT, Lecture 2301. Design of Members : Examples, prepared by TORSTEN HOGLUND, 1999, 125 pages. Royal Institut of Technology, Stocklom, 1999, 125 pages.

TALAT, EAA, Lecture 2401 : Fatigue behaviour and Analysis, prepared by DIMITRIS KOSTEAS, Technische Universität München, 1994, 81 pages.

TALAT, EAA, lecture 2402 : Design Recommendations for Fatigue Loaded structures, prepared by DIMITRIS KOSTEAS, Technische Universität München, 1994, 60 pages.

TALAT, EAA, Lecture 2403 : Applied Fracture Mechanics, prepared by DIMITRIS KOSTEAS, Technische Universität München, 1994, 49 pages.

TALAT, EAA, lecture 2405. Fatigue and Fracture in aluminium structures, prepared by DIMITRIS KOSTEAS, Technische Universität München, 1994, 40 pages

TALAT, EAA, lecture 2406. Fatigue and Fracture in Aluminium Structures, prepared by Dimitris Kosteas, Technische Universität München, 1999, 5 pages.

TALAT, EAA, lecture 2406, Annex 1. Fatigue and Fracture in Aluminium Structures, prepared by DIMITRIS KOSTEAS, Technische Universität München, 1994, 6 pages

TALAT, EAA, lecture 2406, Annex 2. Fatigue and Fracture in aluminium structures, prepared by DIMITRIS KOSTEAS, Technische Universität München, 1999, 6 pages

Références bibliographiques

[1] « Reexamination of design criteria for stiffened plate panels », D. GHOSE, N. NAPPI, SCC382, June 1994, *Ship Structure Committee*.

[2] « Ship Structural design », HUGUES, 1988, SNAME.

[3] « Engineering Mechanics of solids », E. P. POPOV, Prentice Hall, 1990.

[4] « Fatigue resistance poses design challenge », R. WHITE, *Speed at Sea*, Aug. 1998, pp. 45-46.

[5] « Fatigue design assesement of aluminium fast craft », T. HALL, F. VIOLETTE, H. CHUNG, *The Third Ausmarine Conference*, April 1998, pp. 125-136.

[6] « High strength alloys and the fatigue life of HSLC », H. CRAIG, J. DONAVAN, A. FREDRIKSEN, *14th Fast Ferry International Conference*, Copenhagen, Feb. 1998.

[7] « Fatigue analysis of high speed aluminium catamaran », S. E. HEGGLUND, B. W. TVEITEN, T. MOAN, *The Third International Forum on Aluminium Ships*, Haugesund, Norway, May 1998.

[8] « Fatigue assesment of welded aluminum ships details », B. W. TVEITEN, T. MOAN, *5th International conference on fast transportation*, Seattle, Aug 1999.

[9] « Fatigue of marine grade aluminium alloy », R. C. CALCRAFT, G. O. SCHUMANN, D. M. VIANO, *Australian Welding Journal*, vol 42, 1997, pp. 22-25.

[10] « Fatigue crack propagation in aluminium », R. JACCARD, IIW, Document XIII-1377-90.

[11] « Significance of mechanical properties in design and applications », *Aluminum, design and applications*, vol. II, chap 4, edited by Kent R. Van Horn, ASM, 1967.

[12] Référence JACCARD IIW, Document XIII-1377-90.

[13] « Fatigue design of aluminium alloys structures » S. J. MADDOX, *Proceedings of the Second International Conference on Aluminium Weldments*, Düsseldorf, FRG 1982.

[14] « Calcul en fatigue des joints soudés », M. BRAMAT, *Mécanosoudage et conception*, publication du CETIM.

[15] « Fatigue assesment of aluminium welded components », M. BOUET GRIFFON, M. COURBIÈRES, J.C. EHRSTRÖM, Pechiney CRV, 1999.

[16] « Fatigue damage in aluminium ships and the betterment of details », KAZUYOSHI MATSUOKA, HOROSHI ISHIWATAT, MANTRO HIRAYAMA, YUZURU FUJITA, *The Third International Forum on Aluminium Ships*, Haugesund, Norway, May 1998.

[17] « Fatigue design aluminium components structures », M.E. SHARP, G. E. NORDWARK, C. C. MENZER, MCGRAW-HILL.

[18] « Fatigue of aluminium structural weldments », *Ship Structure Committee 2000*, Rapport SSC-410, NTIS #PB2000-108442.



CHARPENTE D'UN MONOCOQUE