

# Chapitre 6

## LE SOUDAGE

<b>1. Rappel historique</b> .....	<b>84</b>
<b>2. Les spécificités du soudage de l'aluminium.</b> .....	<b>85</b>
2.1 Le film d'oxyde .....	85
2.2 Solubilité de l'hydrogène dans le métal fondu .....	86
2.3 Les propriétés physiques .....	86
2.4 La zone affectée thermiquement (ZAT) .....	87
2.5 Les alliages d'aluminium soudables .....	88
<b>3. Conséquences sur la conception et l'exécution des soudures</b> .....	<b>89</b>
3.1 Les déformations .....	89
3.2 Les contraintes .....	90
3.3 La maîtrise des déformations .....	90
3.4 Application au soudage d'une section avec raidisseurs .....	92
<b>4. Les procédés de soudage à l'arc</b> .....	<b>93</b>
4.1 Le TIG (Tungstène Inert Gas) .....	93
4.2 Le MIG (Metal Inert Gas) .....	94
4.3 Le MIG synergique à courant pulsé .....	94
4.4 Le MIG synergique à courant modulé « Spray MODAL » .....	96
4.5 Les fils d'apport .....	96
<b>5. Le stockage des demi-produits et du fil d'apport</b> .....	<b>97</b>
<b>6. Les préparations de surface</b> .....	<b>98</b>
<b>7. La préparation des bords et l'accostage</b> .....	<b>98</b>
<b>8. Le métal d'apport</b> .....	<b>98</b>
<b>9. Le parachèvement des soudures</b> .....	<b>100</b>
9.1 Reprise des soudures défectueuses .....	101
9.2 Nettoyage .....	102
9.3 Rattrapage des déformations .....	102
9.4 Arasage du cordon .....	102
9.5 Microbillage des cordons de soudure .....	102
<b>10. Les contrôles</b> .....	<b>103</b>
10.1 Les procédures d'agrément .....	103
10.2 Le contrôle des joints soudés .....	103
<b>11. Les défauts de soudure</b> .....	<b>103</b>
11.1 Principaux défauts de soudure .....	104
11.2 Influence des défauts de soudure sur la tenue en fatigue .....	105
<b>12. Les réparations et aménagements</b> .....	<b>106</b>
<b>13. Le soudage laser</b> .....	<b>106</b>
13.1 Principe du laser .....	106
13.2 Les lasers de soudage .....	106
13.3 Le soudage laser des alliages d'aluminium .....	107
13.4 La soudabilité des alliages d'aluminium au laser .....	107
<b>14. Le soudage par friction malaxage (FSW)</b> .....	<b>108</b>
14.1 Principe du soudage par friction malaxage .....	108
14.2 Microstructure du joint soudé par friction malaxage .....	108
14.3 Comparaisons avec le soudage à l'arc .....	109
14.4 Possibilités du soudage par friction malaxage .....	110
14.5 Performances des soudures par friction malaxage .....	111
<b>15. Les normes</b> .....	<b>112</b>

# 6. LE SOUDAGE

**L**E SOUDAGE consiste à assembler, par fusion localisée du métal, deux ou plusieurs pièces de manière à n'en former plus qu'une, les contours primitifs des pièces d'origine ayant disparu après assemblage.

Le soudage à l'arc reste – et de loin – le procédé d'assemblage le plus répandu et le plus utilisé dans la construction navale.

Les progrès techniques du soudage à l'arc, avec le MIG pulsé, ont contribué à améliorer les performances des postes à souder et la qualité des soudures.

Le développement d'autres procédés, tels que le soudage par faisceau laser ou le soudage par friction malaxage FSW, va faire évoluer la conception et la réalisation des sous-ensembles de la construction navale en aluminium.

Quel que soit le procédé de soudage, la qualité d'exécution des assemblages soudés en alliages d'aluminium prend de plus en plus d'importance sur les navires de grande longueur, puisqu'elle conditionne la tenue en fatigue des zones les plus sollicitées du navire. La soudure est un facteur de « premier ordre » de la tenue en fatigue.

## 1. RAPPEL HISTORIQUE

Les premiers essais de soudage de l'aluminium datent de 1904. On utilisait alors la soudure autogène <sup>[1]</sup>.

Jusqu'au début des années 1960, la soudure au chalumeau oxy-acétylénique était le seul moyen disponible pour souder les alliages d'aluminium. Ce procédé était d'un emploi limité aux soudures à plat et aux tôles de faible épaisseur.

Pendant longtemps, la présence du film d'oxyde naturel sur la surface de l'aluminium a constitué une difficulté majeure du soudage de ce métal. Pour souder correctement l'aluminium, il faut pouvoir éliminer le film d'oxyde, protéger le bain de fusion de l'atmosphère environnante et empêcher ainsi sa reformation.

Lors du soudage oxy-acétylénique, des flux étaient déposés, sous forme de pâte diluée dans l'eau, sur les bords à souder et sur le fil de métal d'apport pour éliminer le film d'oxyde. Ces flux étaient à base de chlorures et de fluorures.

Pour éviter tout risque de corrosion par les résidus de flux, il fallait donc les éliminer par brossage ou par rinçage à l'eau.

Comme pour le soudage à l'arc de l'acier, des baguettes de métal d'apport enrobées de flux furent disponibles à partir de 1925 pour souder des produits plus épais. Une des premières applications connues de soudage à l'arc avec baguettes enrobées a été, en 1934, la réalisation de voitures de chemin de fer en 5056 (A-G5) pour la Compagnie Française des Chemins de Fer du Nord <sup>[2]</sup>. Ce procédé n'eut pas beaucoup de développement parce que la qualité des soudures n'était pas satisfaisante.

Les premiers essais de soudage à l'arc sous gaz protecteur (argon ou hélium) datent du milieu des années 1930 <sup>[3]</sup>. Cette technique constitua un très grand progrès. Elle supprimait les flux avec leurs risques de corrosion. Il fut alors possible de souder à grande vitesse et dans toutes les positions. L'aluminium devint ainsi un métal de chaudronnerie « à part entière ».

Le développement industriel des procédés TIG et MIG a commencé au début des années

SOUDAGE D'UN ENCADREMENT D'ÉCOUTILLE



1950 et les perfectionnements de cette technique de soudage n'ont pas cessé depuis. Il en est ainsi du MIG pulsé à régulation électronique introduit au début des années 1990.

Jusqu'au début de la décennie 1960, les bateaux en alliage d'aluminium – et les équipements en alliage d'aluminium sur les navires en acier (superstructures, cheminées, etc.) – étaient assemblés par rivetage, comme l'étaient encore les bateaux en acier.

Le voilier *Morag Mhor*, ketch de 70 pieds, en alliage d'aluminium-magnésium (4 et 5 % de magnésium), dessiné par un architecte naval britannique, est le premier bateau connu qui fut assemblé par soudage MIG en 1953 <sup>[4]</sup>.

## 2. | LES SPÉCIFICITÉS DU SOUDAGE DE L'ALUMINIUM

Bien que les techniques de soudage des demi-produits en alliages d'aluminium soient très proches – voire les mêmes que celles des aciers au carbone –, les conditions opératoires sont sensiblement différentes. Cela tient à la présence en permanence du film d'oxyde ( $Al_2O_3$ ) à la surface du métal (1) et aussi à leurs propriétés physiques très différentes de celles des aciers (tableau 47, p. 87).

(1) Cf. chapitre 10.

(2) En soudage à l'arc avec le procédé TIG continu, la pièce à souder est toujours reliée au pôle – (moins) pour éliminer le film d'oxyde.

(3) Bien qu'isolant électrique, il est trop mince pour constituer une barrière au passage du courant comme le sont les couches d'anodisation dont l'épaisseur courante est de 15 à 20 micromètres.

(4) Les graisses et les lubrifiants sont des chaînes carbonées de formule générale  $C_nH_{2n}O$ .

### 2.1 | Le film d'oxyde

Le film d'oxyde naturel qui recouvre en permanence la surface du métal a une épaisseur de 50 à 100 nanomètres. Il a un point de fusion très élevé, 2 052 °C, et il est insoluble dans l'aluminium solide ou liquide.

Pour souder, il faut obligatoirement l'éliminer (2) et l'empêcher de se reformer pendant la phase d'apport du métal dans le cordon de soudure (3). C'est pourquoi le soudage de l'aluminium à l'arc ou au faisceau laser doit être fait sous atmosphère contrôlée constituée de gaz inerte : argon, hélium, ou leurs mélanges.

Bien que chimiquement stable – c'est un oxyde –, ce film réagit néanmoins avec le milieu extérieur en adsorbant les résidus des huiles de laminage, des lubrifiants de mise en forme, et l'humidité de l'air. Tous ces éléments sont des sources d'hydrogène (4) quand ils sont dissociés dans le plasma de l'arc électrique.

#### LNG CARRIERS



## 2.2 Solubilité de l'hydrogène dans le métal fondu

Compte tenu de la très forte solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium liquide, il est dissous dans le bain de fusion du cordon de soudure en formation (figure 60) (5).

Mais l'hydrogène étant insoluble dans l'aluminium solide, si le refroidissement est très rapide, il aura tendance à rester piégé dans le métal sous forme de bulles qui vont constituer des porosités dans le cordon de soudure (6).

C'est la raison pour laquelle il faut éliminer toutes les sources possibles d'hydrogène sur le métal constituées par l'humidité, les résidus gras et dans les gaz de protection.

## 2.3 Les propriétés physiques

Les propriétés physiques qui ont une influence sur le soudage de l'aluminium sont indiquées dans le tableau 47, comparativement à celles de l'acier. Ce sont les propriétés thermiques qui expliquent les différences importantes des conditions de soudage de l'aluminium par rapport à celles de l'acier.

L'aluminium a une forte capacité calorifique ( $899 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , contre 420 pour l'acier) et une plus grande conductivité thermique ( $229 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , contre 54 pour l'acier). Il en résulte qu'une grande partie de l'énergie apportée par l'arc est consommée pour le chauffage des pièces à souder.

Le haut niveau d'effusivité (7) de l'aluminium nécessite un niveau d'énergie de soudage très élevé. Toutes choses étant égales par ailleurs, l'échauffement des éléments à souder en aluminium sera plus important que sur ceux en acier.

La diffusivité thermique (8) élevée (0,9 contre 0,2 pour l'acier) a pour conséquence une forte dissipation de la chaleur dans le métal, qui doit être compensée par l'apport de l'arc électrique.

Le fort coefficient de dilatation de l'aluminium ( $23 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ), une forte diffusivité, un niveau de température élevé du métal, font que le soudage s'accompagne de plus fortes déformations sur l'aluminium que sur l'acier.

Pour être en régime stable, la vitesse de soudage de l'aluminium doit être plus élevée que celle de la propagation de la chaleur (figure 61).

Si le refroidissement des aciers au carbone est trop rapide, ils subissent une transformation martensitique qui s'accompagne d'une augmentation de volume, laquelle peut provoquer des fissures au pied du cordon de soudure.

Il n'y pas de modifications de ce genre avec les alliages d'aluminium. Par conséquent, la vitesse de refroidissement du cordon de

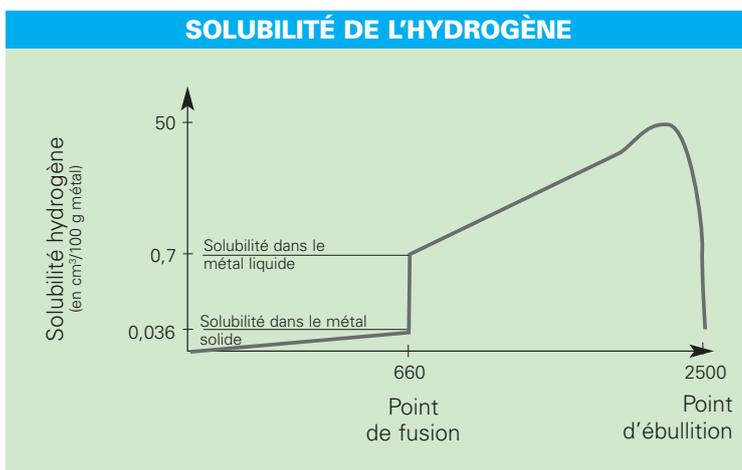


Figure 60

(5) Contrairement à ce qui se passe pour certains aciers, l'hydrogène ne fragilise pas l'aluminium et ne le sensibilise pas à la corrosion sous contrainte.

(6) Cf. tableau 54, p. 104.

(7) L'effusivité « b » est le produit de la conductivité thermique  $\lambda$ , par la masse volumique  $\rho$  et par la capacité calorifique  $c_p$ :  $b = \lambda \cdot \rho \cdot C_p$ .

Cette grandeur décrit la quantité de chaleur que reçoit, par conduction, une zone chauffée, avec :

$\lambda$  = conductivité thermique

$\rho$  = masse volumique

$C_p$  = capacité calorifique.

(8) La diffusivité thermique « a » est définie par la relation

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

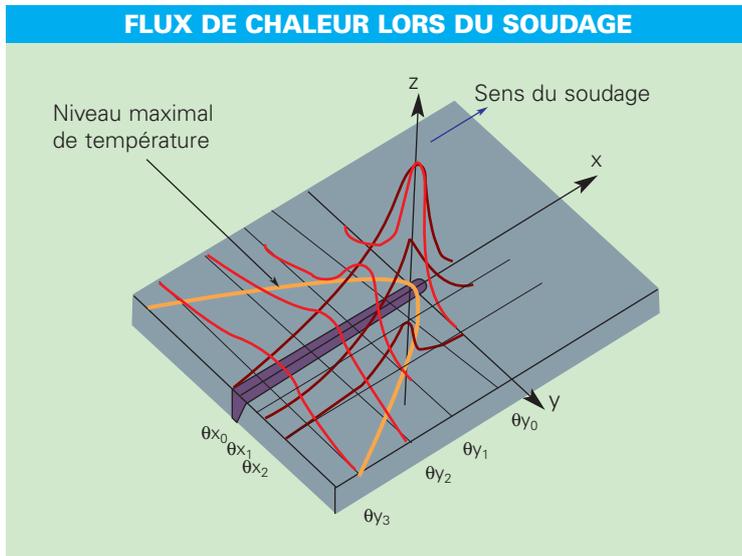


Figure 61

soudure, qui est rapide, de l'ordre de 100 à 1000 °C par seconde, n'entraîne aucun défaut de celui-ci.

C'est pourquoi il n'est généralement pas nécessaire de pratiquer un préchauffage avant soudage sur l'aluminium, comme on peut le faire pour les aciers (pour éviter des ruptures sur le cordon de soudure lors du refroidissement).

Toutes ces données doivent être prises en compte lors de la conception des assemblages soudés et de l'exécution des soudures. Cet aspect très important est traité au paragraphe 3.

(9) Les caractéristiques mécaniques du cordon de soudure lui-même sont généralement supérieures à celles de la ZAT. Quand il y a rupture, celle-ci a le plus souvent lieu hors du cordon de soudure.

## 2.4

### La zone affectée thermiquement (ZAT)

Sur les aciers, les changements de phase durcissent localement, sur une largeur de quelques millimètres, la zone affectée par la chaleur. Au contraire, le chauffage a pour effet d'adoucir les alliages d'aluminium quand ils sont :

- à l'état écroui ; c'est le cas des alliages 5000 aux états H116, H24, H32, H34,
- traités thermiquement ; c'est le cas des alliages 6000 aux états T5 ou T6.

Ainsi que l'illustre la figure 62, p. 88, la variation des caractéristiques mécaniques est progressive depuis le cordon de soudure jusqu'aux limites de la ZAT (9).

Il en résulte que les caractéristiques mécaniques du joint soudé sont généralement inférieures à celles du métal de base. Elles sont proches de l'état recuit pour les alliages à durcissement par écrouissage et de l'état T4 pour les alliages à durcissement structural.

### PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'ALUMINIUM ET DE L'ACIER E24

Propriétés	Aluminium non allié (1050A)	Acier E24	Rapport Alu/Acier
Intervalle de fusion (°C)	645/658	1 400/1 530	
Point de fusion des oxydes (°C)	2 052	900	
Retrait à la solidification (%)	1,7	1,2	1,4
Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	2 700	7 820	0,34
Capacité thermique massique Cp (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	899	420	2,14
Chaleur latente de fusion (kJ.kg <sup>-1</sup> )	385	210	1,83
Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	229	54	4,24
Diffusivité thermique « a » (10 <sup>-4</sup> .m <sup>2</sup> .sec <sup>-1</sup> )	0,9	0,2	4,5
Effusivité « b » (J. m <sup>2</sup> .K <sup>-1</sup> .sec <sup>-1/2</sup> )	24 000	16 000	1,5
Coefficient de dilatation linéique α (10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup> )	23,5	13,5	1,74
Résistivité électrique ρ (10 <sup>-9</sup> .Ω.m)	292	1010	0,29
Module d'élasticité (MPa)	70 000	210 000	0,33

Tableau 47

C'est pourquoi les codes de calcul et les règlements des sociétés de classification imposent pour les calculs, en statique, des niveaux de limite d'élasticité de l'état recuit pour les alliages à durcissement par écrouissage et de l'état T4 pour les alliages à durcissement structural.

Dans le cas des soudures bout à bout, la largeur de la ZAT est d'environ 25 mm de part et d'autre du cordon de soudure, quelle que soit l'épaisseur du métal de base et quel que soit le mode de soudage, TIG ou MIG.

Pour limiter les conséquences de la diminution des caractéristiques mécaniques du joint soudé, il faut :

- choisir le métal d'apport le mieux adapté à l'alliage de base,
- établir un cycle de soudage aussi rapide que possible pour restreindre l'étendue de la ZAT,
- concevoir l'assemblage de sorte que les joints soudés soient situés dans les endroits les moins sollicités.

## 2.5 Les alliages d'aluminium soudables

La plupart des alliages des familles 1000, 3000, 5000 et 6000 sont soudables avec les procédés conventionnels TIG ou MIG et, également, par les autres procédés à faisceau d'énergie : faisceau d'électrons (FE), laser, etc.

La famille 5000 est celle qui présente les meilleures aptitudes au soudage.

Les alliages de corroyage contenant du cuivre des familles 2000 et 7000 (10) ne sont pas facilement soudables à l'arc (11). La présence de cuivre provoque des fissurations et des criques de retrait sur le cordon de soudure.

La soudabilité des pièces moulées dépend plus du mode de moulage que de la composition chimique de l'alliage. Les pièces moulées sous pression ne sont

pas soudables parce qu'elles peuvent contenir beaucoup d'air introduit à la coulée (on les dit « gazées »).

Les pièces moulées en sable ou en coquille sont soudables sous réserve d'être « saines », c'est-à-dire dépourvues de porosités et de retassures qui produisent des soufflures dans le cordon de soudure (12).

Les alliages 42100 (A-S7G) et 43300 (A-S10G) sont soudables avec ceux de la famille 6000 (13).

(10) Les 7000 sans cuivre, tel le 7020, sont soudables, mais la ZAT est très sensible à la corrosion feuilletante (cf. chapitre 10).

(11) Les règlements et codes de construction soudée, tels que Eurocode 9 et la norme BS 8118, excluent ces alliages des assemblages soudés à l'arc.

(12) Pour éviter la formation de porosités sur les pièces coulées en sable, il est conseillé de disposer des refroidisseurs métalliques qui affinent la microstructure et évitent la formation de porosités.

(13) Les 5000 ne sont pas soudables avec les 42000.

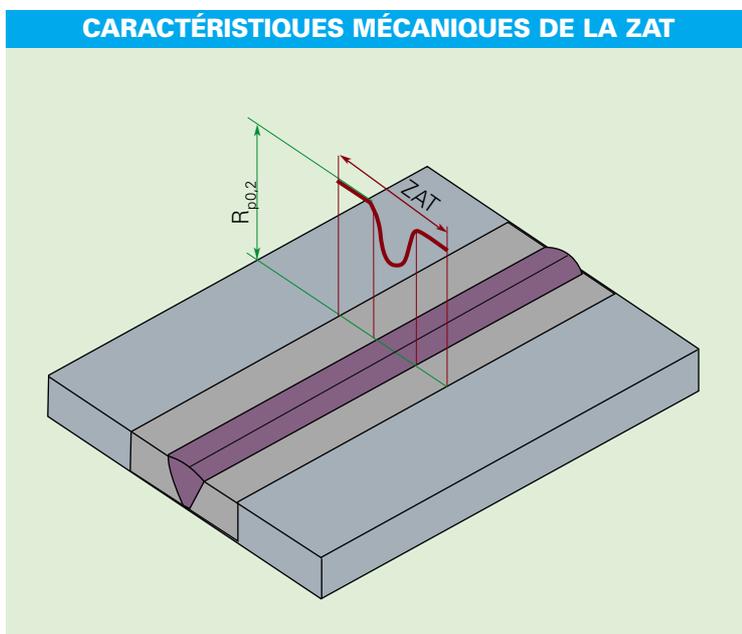


Figure 62

### 3. CONSÉQUENCES SUR LA CONCEPTION ET L'EXÉCUTION DES SOUDURES

Pendant le soudage, chaque point d'une pièce soudée subit un cycle thermique dont le profil est fonction de plusieurs paramètres :

- la puissance de la source de chaleur qui dépend du procédé (MIG, TIG, etc.),
- la géométrie de la pièce,
- la position de soudage (à plat, vertical, en corniche, au plafond),
- la diffusivité du matériau.

Il en résulte une hétérogénéité des températures atteintes dans la pièce au cours du soudage. Elles se traduisent par des déformations résiduelles plus ou moins importantes qui sont dues :

- aux différences de dilatation, entre autres,
- au retrait lors de la solidification du cordon de soudure.

#### 3.1 Les déformations

Les déformations peuvent être longitudinales ou transversales :

■ **les déformations longitudinales** sont dues à la contraction du métal lors du refroidissement qui n'est pas uniforme. Des contraintes s'établissent le long du cordon de soudure (figure 63).

Elles sont dépendantes de la position de la soudure : faibles ou nulles quand la soudure est dans l'axe neutre de la pièce, ou à proximité de celui-ci (figure 64) ; au contraire très prononcées quand la soudure est dissymétrique. La concavité est alors orientée du même côté que les cordons de soudure. Sur les produits longs, la déformation peut se traduire par une torsion difficilement rattrapable (figure 65).

En règle générale, les déformations sont importantes quand les cordons de soudure sont asymétriques par rapport à la pièce.

■ **les déformations transversales** sont dues au raccourcissement du cordon de soudure, plus important en surface qu'à sa racine, provoquant un effet de serrage avec déformation angulaire (figure 66).

Pour limiter cet effet, il faut rééquilibrer les contraintes par une seconde soudure, en X sur les produits épais, du côté opposé pour les soudures d'angle (figure 67).

#### DÉFORMATIONS LONGITUDINALES

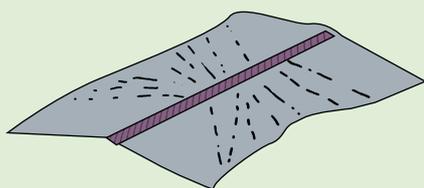


Figure 63

#### SOUDURE SUR L'AXE NEUTRE OU SYMÉTRIQUE

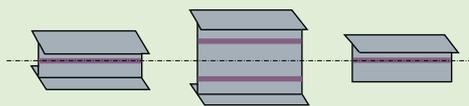


Figure 64

#### SOUDURES ASYMÉTRIQUES

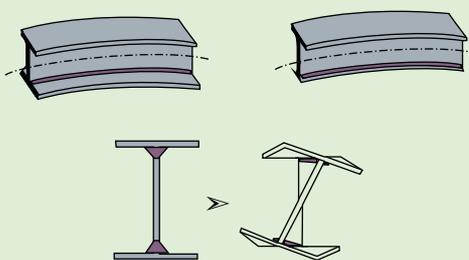


Figure 65

#### DÉFORMATIONS SUR SOUDURES BOUT À BOUT

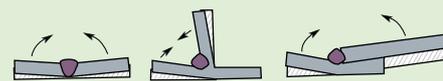


Figure 66

#### RATTRAPAGE DES DÉFORMATIONS

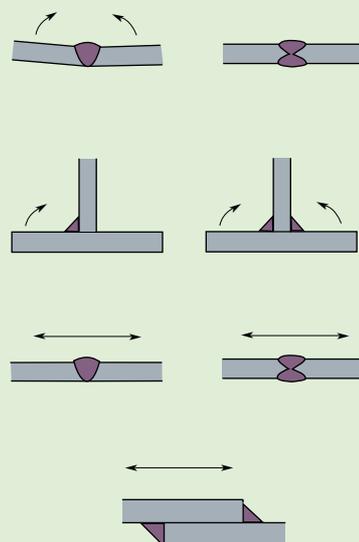


Figure 67

### 3.2 | Les contraintes

Le niveau de contrainte, qui peut dépasser localement celui de la limite d'élasticité du métal, dépend :

- de la forme des pièces,
- de la disposition des cordons de soudure,
- des séquences de soudage,
- des outillages de positionnement,
- du bridage.

À titre d'exemple, la figure 68 indique les niveaux de contraintes résiduelles longitudinales dans des sections reconstituées par mécano-soudage.

### 3.3 | La maîtrise des déformations

Elle passe par :

- **des dispositions constructives** arrêtées dès la conception au bureau d'études en plaçant les soudures dans un plan de symétrie de la pièce et sur les axes neutres de celle-ci (14), et en utilisant, si possible, des profilés spécialement adaptés (15) ;

- **une mise en forme** soignée pour réduire le jeu et la dénivellation entre les composants à souder et les défauts d'accostage ;

- **le séquençage des soudures** : il est important de souder vers les bords libres pour laisser les dilations se faire librement. Les soudures sont exécutées dans l'ordre inverse de leur longueur, les plus courtes en premier pour mieux répartir les déformations. Leur rattrapage est plus facile avec de longs cordons (figure 69). Quand cela est possible, le soudage en automatique avec deux torches est un très bon moyen de réduire les déformations (figure 70).

La répartition des contraintes internes peut être optimisée par un enchaînement correct des sou-

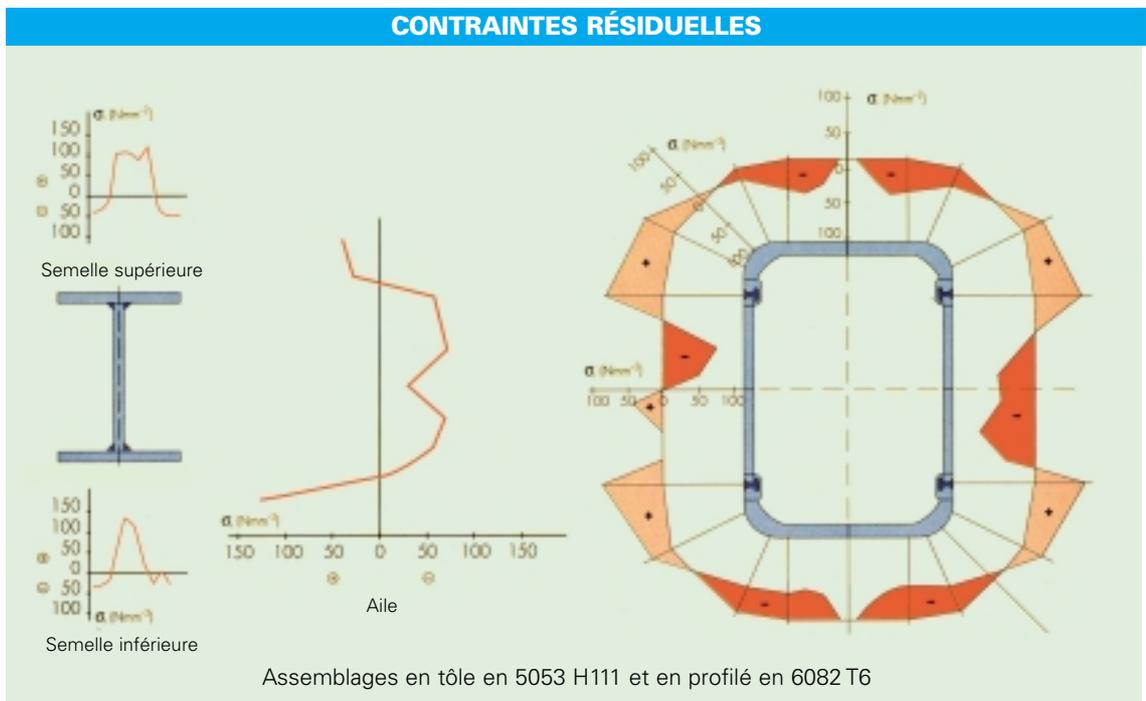


Figure 68

#### CHARPENTE D'UN VOILIER



#### SÉQUENÇEMENT DES SOUDURES

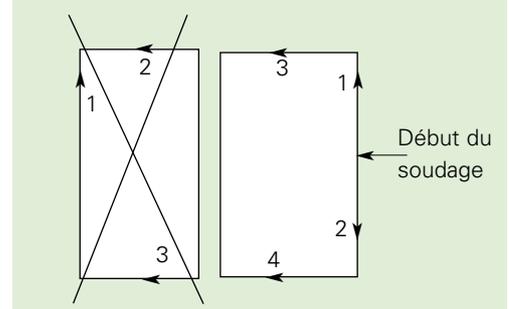


Figure 69

dures dans le but d'induire des contraintes résiduelles de compression dans les cordons sollicités en traction (figure 71). Cette manière de procéder améliore très sensiblement la tenue en fatigue des joints soudés.

■ **le bridage**, qui a pour rôle de maintenir les *pièces en position*. Mais il ne doit surtout pas empêcher la dilatation dans le sens des plus grandes dimensions, sous peine de mise sous contraintes des produits (avec le risque de plastification du fait de la dilatation  $\Delta l$ ). D'une manière générale, il ne faut pas brider dans le sens des plus grandes dilatations car elles exagèrent les déformations transversales à la soudure (figure 72).

Sur les produits épais, les déformations angulaires peuvent être évitées en fixant des raidisseurs temporaires en travers de la soudure (figure 73) ;

■ **les paramètres de soudage** : les déformations sont aussi provoquées par le retrait de solidification du cordon de soudure qui est d'autant plus important que la quantité de métal fondue est grande et que l'échauffement est important. Pour limiter les déformations, il faut utiliser des sources de chaleur aussi énergétiques que possible pour pouvoir souder le plus rapidement possible. Plus le soudage est rapide, moins la chaleur a le temps de diffuser ;

■ **l'équilibre des flux thermiques** ; les déformations longitudinales peuvent être accentuées par une dissymétrie thermique entre pièces à souder due à :  
 – à des masses très différentes des pièces à assembler,  
 – un défaut d'alignement lors du déplacement de la torche,  
 – un mauvais contact avec le support, etc.  
 Chaque fois que cela est possible, il faut donc équilibrer les « masses thermiques » à souder, rechercher une bonne symétrie thermique dans l'assemblage (figure 74).

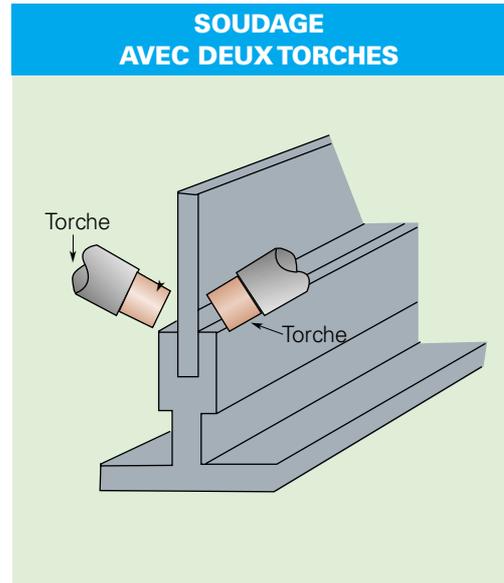


Figure 70

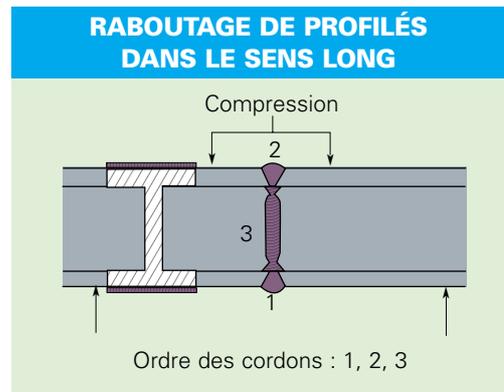


Figure 71

(14) Cette disposition a une incidence positive sur la tenue en fatigue de l'assemblage soudé, cf. chapitre 4.  
 (15) Cf. figures 11 à 14, chapitre 2.

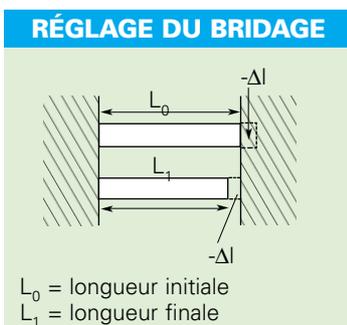


Figure 72

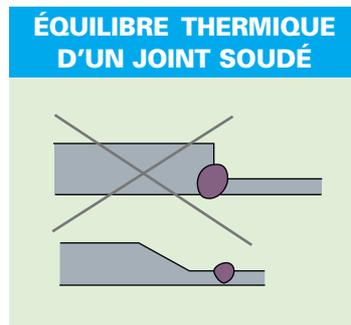


Figure 74

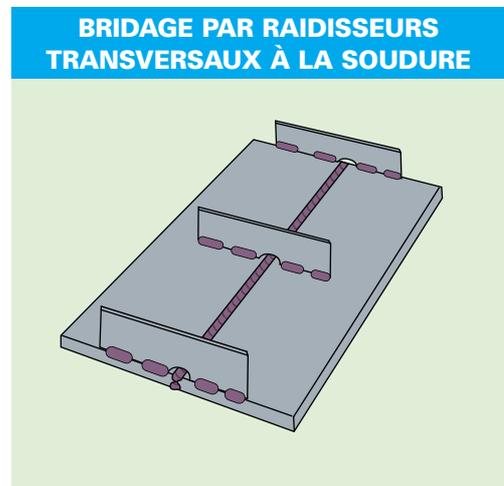


Figure 73

### 3.4 Application au soudage d'une section avec raidisseurs

Pour limiter les déformations lors du soudage des éléments de la section de la figure 75, la gamme de soudage (ordre de réalisation

des cordons de soudure) la plus appropriée est indiquée sur la figure 76.

Le soudage est engagé au centre du panneau et va vers les bords libres de manière à laisser les dilatactions se faire librement.

LEVAGE

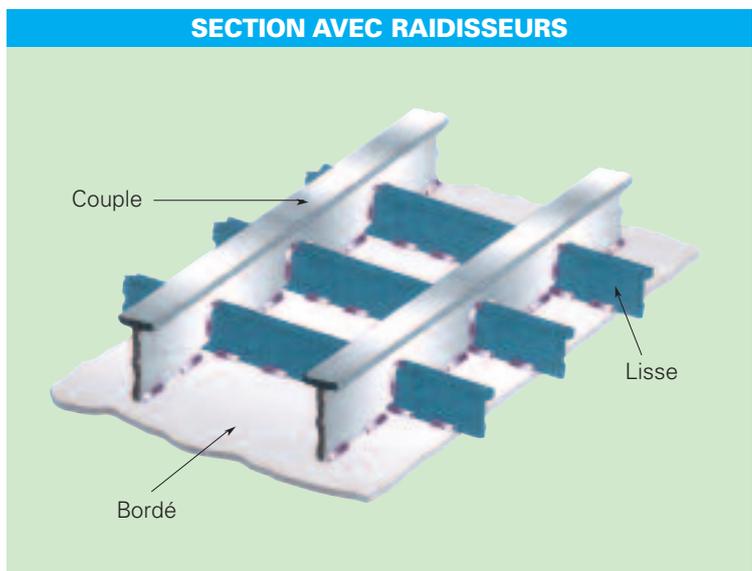


Figure 75

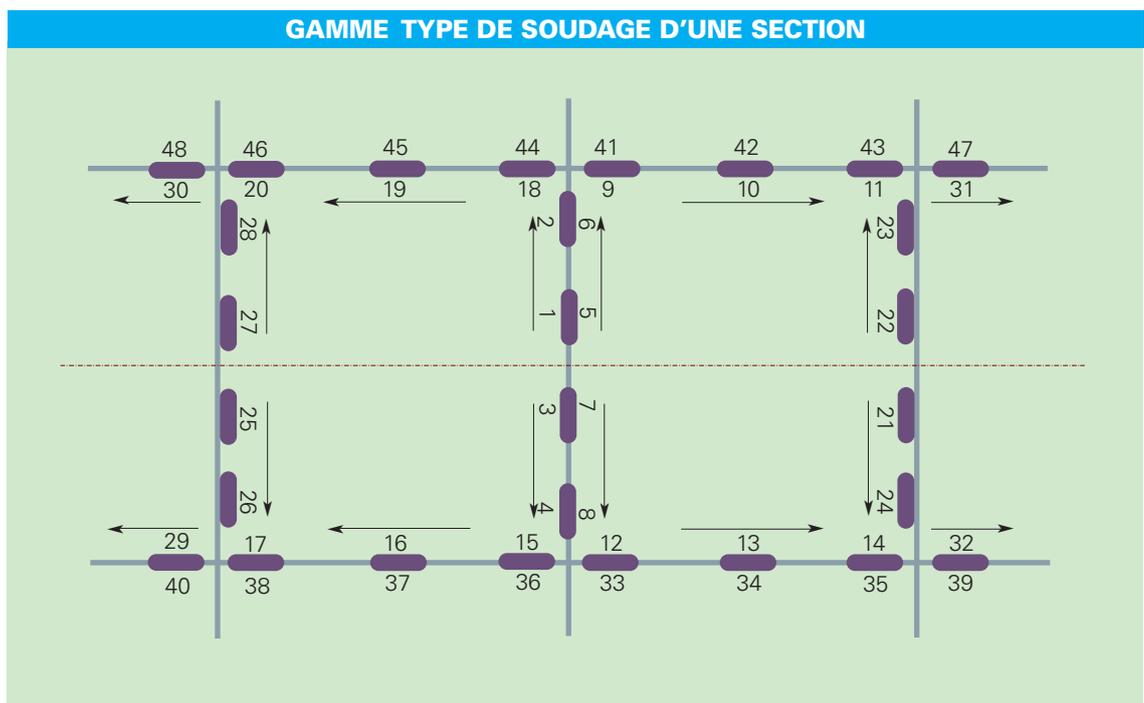


Figure 76

## 4.

## LES PROCÉDÉS DE SOUDAGE À L'ARC

Dans le soudage à l'arc, la liaison entre les éléments à assembler est obtenue par le remplissage d'une forme appropriée (en V, en croix, en tulipe), avec un métal d'apport (bague ou fil) qui y est fondu de proche en proche. Le remplissage du joint peut être effectué en une ou plusieurs passes. Lors de la fusion du métal d'apport, les bords à assembler sont également fondus (alors qu'ils ne le sont pas dans le brasage).

Depuis que le soudage à l'arc de l'aluminium sous gaz neutre (argon ou hélium) est opérationnel, il y a toujours eu deux procédés, plus complémentaires que concurrents (tableau 48, p. 97). L'un est surtout manuel, le TIG, tandis que l'autre, le MIG, peut être complètement robotisé. Ce dernier procédé a beaucoup évolué et progressé depuis le début des années 1990, au point d'avoir considérablement amélioré les conditions de soudage de l'aluminium.

Les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure sont identiques dans les deux procédés, toutes choses étant égales par ailleurs : alliage de base, métal d'apport, épaisseur.

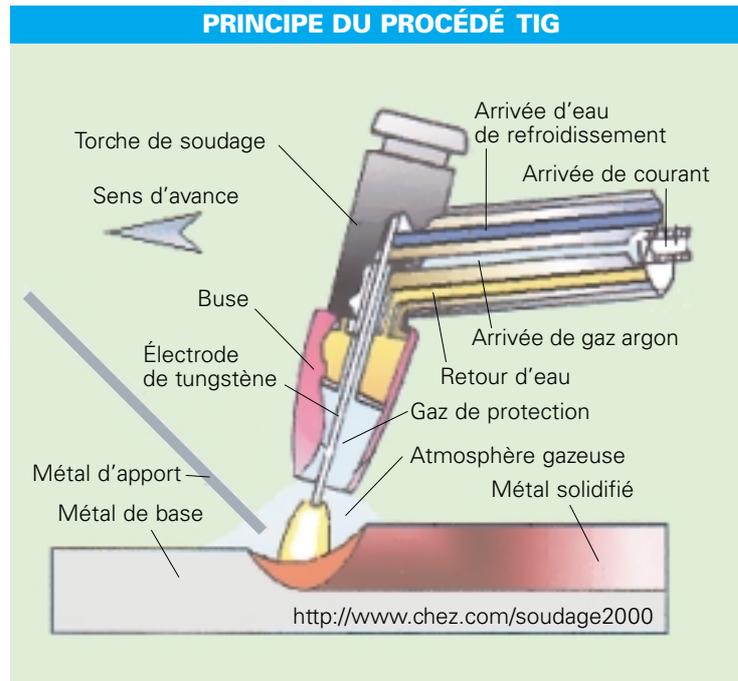


Figure 77

## 4.1

## Le TIG (Tungstène Inert Gas)

Dans le procédé TIG (16), l'arc électrique se forme entre une électrode réfractaire en tungstène et la pièce à souder. Le gaz protecteur, généralement de l'argon, est insufflé par le conduit central de la torche (figure 77).

En fonctionnement manuel, le métal d'apport, sous forme de baguette de fil dressé (diamètre 0,8 mm à 4,0 mm), est tenu manuellement par l'opérateur. En fonctionnement automatique, le

métal d'apport est amené automatiquement, à partir d'une bobine de fil d'un diamètre de 0,8 mm à 2,0 mm, par un dévidoir motorisé.

Les postes fonctionnent en courant alternatif stabilisé HF pour le soudage manuel ou en courant continu lisse ou pulsé pour le soudage automatique. Les postes doivent être équipés d'une platine électronique adaptée au soudage de l'aluminium avec un stabilisateur d'arc par impulsions et un dispositif de réamorçage de l'arc.

La géométrie des électrodes réfractaires est un paramètre important pour la qualité de la soudure. Elles doivent être affûtées, sauf si le poste fonctionne en courant alternatif. En courant continu, son profil doit s'inscrire dans un cône de 30° à 60° et les stries d'usinage (ou de meulage) doivent être dans le sens longitudinal de l'électrode (figure 78).

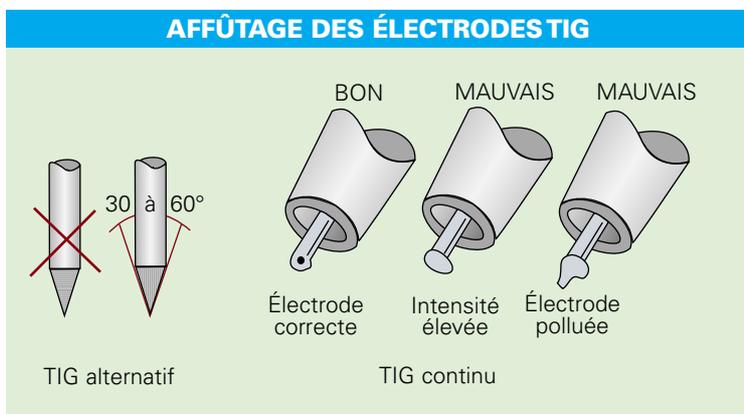


Figure 78

(16) Ce procédé est désigné WIG en Allemagne parce que le tungstène y est appelé Wolfram, et GTAW en Amérique (Gas Tungsten Arc Welding).

Par rapport au soudage en MIG, l'apport d'énergie est plus faible, la zone échauffée est donc plus large (du fait de la diffusivité) et les déformations dues à la dilatation sont plus importantes. La vitesse de soudage, contrôlée par l'opérateur, est lente, de l'ordre de 0,2 m.min<sup>-1</sup>.

Le TIG est avant tout un procédé manuel, simple d'emploi, permettant un travail méticuleux et précis. Il est possible de souder dans toutes les positions.

Ce procédé est utilisable pour des épaisseurs de 1 à 6 mm. Il permet de souder avec des jeux supérieurs à deux fois l'épaisseur des produits minces de moins de 1,5 mm d'épaisseur.

Le soudage TIG, très difficilement robotisable, reste limité à la mise au point de prototypes et est bien adapté à la réparation des soudures défectueuses.

## 4.2 | Le MIG (Metal Inert Gas)

Dans le procédé MIG (17), le fil d'apport sert à la fois d'électrode d'amenée du courant électrique et de métal d'apport (figure 79). Préalablement enroulé sur une bobine, il se déroule automatiquement jusqu'à l'outil de soudage (pistolet ou torche) au fur et à mesure de sa consommation.

L'énergie de soudage – proportionnelle à la quantité de fil apportée au cordon de soudure – est fournie par une source de courant continu qui peut être lisse ou pulsé. Le branchement est fait en polarité « inverse » : la pièce à souder est toujours reliée au pôle – (moins) pour assurer le décapage de la couche d'oxyde.

Le procédé MIG est auto-décapant parce que le transfert des électrons de la pièce vers le fil d'apport fait éclater la couche d'oxyde (dans la mesure où son épaisseur est faible, quelques nanomètres).

Une couche d'oxyde trop épaisse, formée lors d'une longue exposition à l'humidité ambiante, ne peut être complètement décapée. Le cordon de soudure présente alors des inclusions d'oxyde (défaut 303, cf. tableau 54, p. 104). C'est pourquoi il est recommandé de stocker les demi-produits à l'abri de l'humidité (18).

L'intensité varie de 40 à 700 A en fonction de plusieurs paramètres, tels que le diamètre du fil, la position du soudage, la dimension des pièces, etc.

Le procédé MIG classique à courant lisse présente beaucoup d'avantages :

- forte productivité due au taux élevé de métal d'apport,
- bonne pénétration,
- projections réduites,
- procédé automatisable.

## 4.3 | Le MIG synergique à courant pulsé

Le procédé MIG a beaucoup évolué depuis l'apparition, au début des années 1980, des générateurs « synergiques à courant pulsé » délivrés par des transistors de puissance.

Antérieurement, la puissance était délivrée par des générateurs à thyristors dont la fréquence de pulsation était en rapport direct avec celle du réseau. Les réglages étaient rendus difficiles et manquaient de souplesse puisqu'il fallait ajuster la vitesse du fil en fonction de la fréquence.

Dans les générateurs synergiques à courant pulsé, il est possible de régler le cycle de soudage (figure 80) :

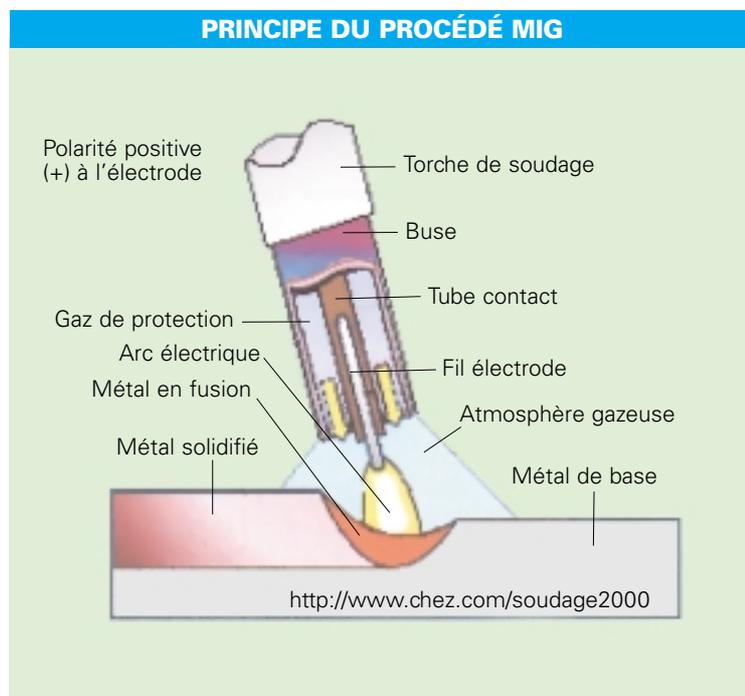


Figure 79

(17) Encore appelé MAG (Metal Active Gas) ou GMAW (Gas Metal Arc Welding).

(18) Cf. paragraphe 5.

- forte intensité en début de cordon pour éviter les manques de fusion et de pénétration,
- décroissance de l'intensité en fin de cordon pour éviter le cratère de fin de soudage.

Pour optimiser le cordon, le soudeur peut agir sur trois paramètres :

- la vitesse du fil, proportionnelle à l'intensité de soudage,
- la vitesse de soudage,
- la hauteur d'arc, proportionnelle à la tension de soudage.

Dans ces postes, tous les paramètres s'ajustent automatiquement en fonction de la vitesse du fil affichée. Les réglages peuvent être affinés en réglant la hauteur d'arc.

Avec ces postes, et grâce au transfert de métal au « goutte à goutte » (c'est-à-dire une goutte de métal par pulsation), l'épaisseur minimale soudable a été abaissée de 3 à 1 mm environ (19).

Par rapport au MIG classique à courant lisse, le MIG pulsé apporte des avantages supplémentaires :

- soudage possible dans toutes les positions,
- limitation des déformations (du fait du faible apport d'énergie),
- reprises de soudure limitées en nombre plus restreint,
- large gamme d'épaisseurs, avec un fil de même diamètre,
- bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques,

- belle apparence du cordon de soudure, notamment en transfert par pulvérisation,
- procédé utilisable en production robotisée.

(19) Avec les anciens générateurs, le transfert du métal par pulvérisation n'était possible qu'à partir de 20 Volts. Au-dessous de cette tension, le transfert globulaire ou en court-circuit est inadapté au soudage de l'aluminium, c'est ce qui explique la limitation d'épaisseur à 3 mm.

### CYCLE D'UN POSTE SYNERGIQUE

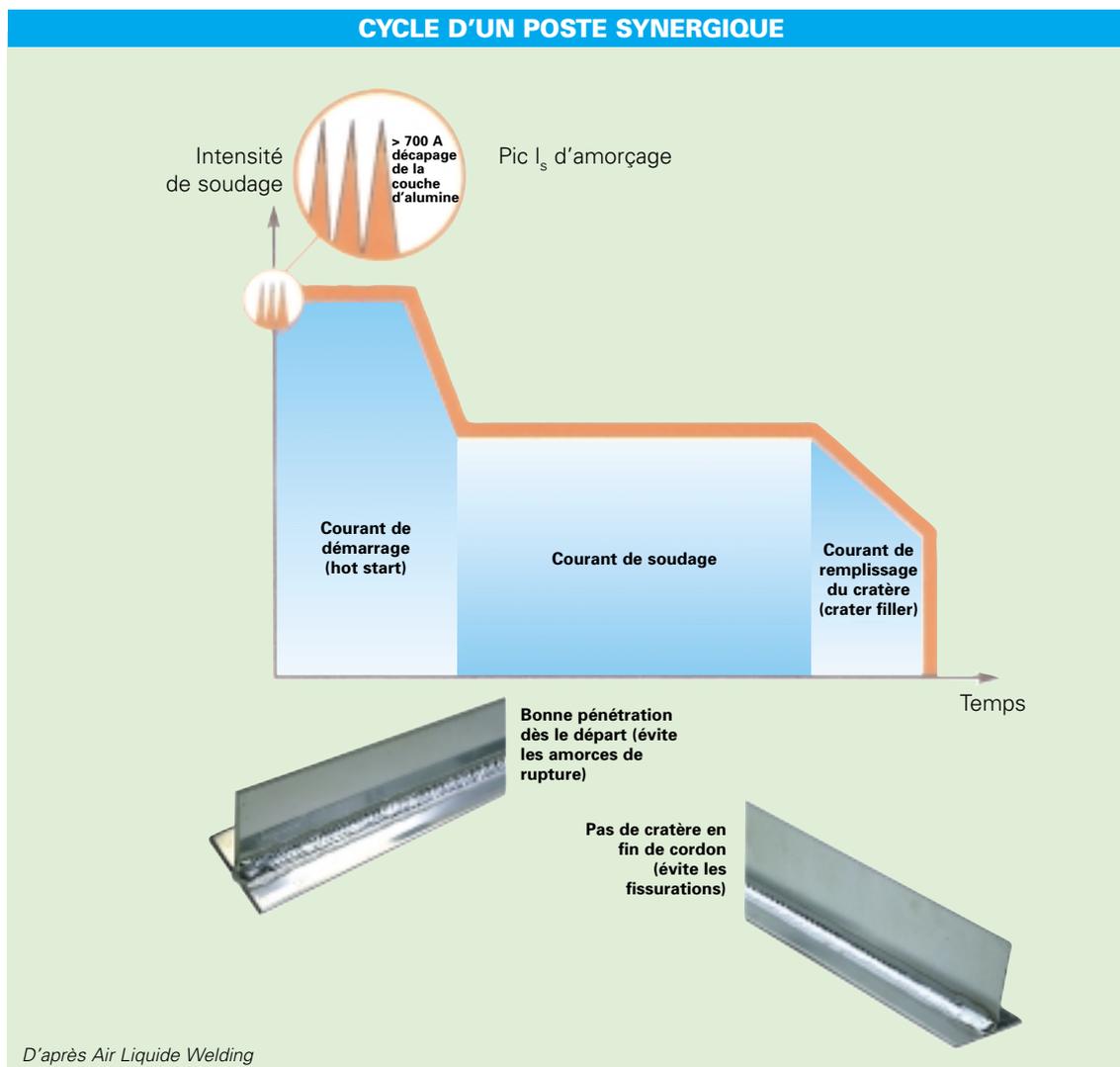


Figure 80

## PROCÉDÉ SPRAY MODAL

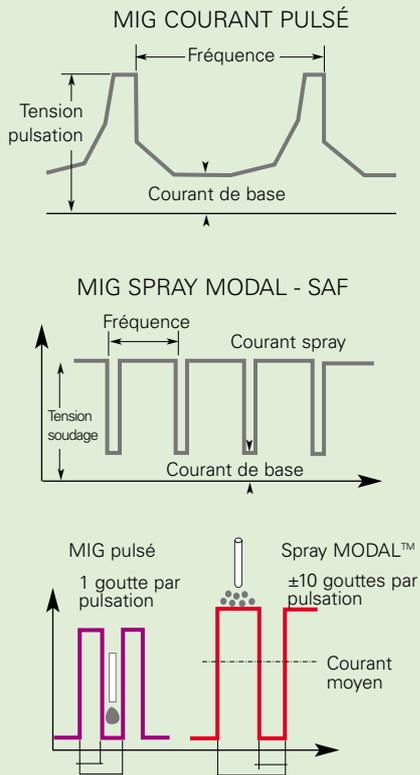


Figure 81

## ÉTAT DE SURFACE DES FILS D'APPORT



GX50

D'après Air liquide Welding

Figure 83

## 4.4 Le MIG synergique à courant modulé « Spray MODAL »

Il existe maintenant une variante des postes synergiques, le procédé « Spray MODAL » (20). Il fonctionne en courant modulé caractérisé par une très forte diminution de l'intensité pendant une très courte durée, quelques millisecondes, à chaque pulsion au cours de laquelle plusieurs gouttes de métal d'apport sont projetées dans le bain (figure 81). Ces brusques variations de tension au sein de l'arc mettent le bain en vibration, facilitant ainsi l'évacuation des bulles d'hydrogène dans le métal encore liquide.

Par rapport au MIG synergique à courant pulsé :

- réduction, voire suppression des porosités dans le joint soudé (figure 82),
- pénétration accrue,
- vitesse de soudage plus élevée.

## 4.5 Les fils d'apport

La régularité du dévidage du fil d'apport assure une bonne stabilité de l'arc, donc la qualité du joint soudé.

La faible rigidité des fils d'apport impose l'usage de dévidoirs adaptés à ces produits afin de limiter le risque de bourrage du fil dans la gaine de la torche. Elle doit être en PTFE (Téflon) pour supprimer les risques d'abrasion.

Pour assurer une meilleure régularité de dévidage, en particulier avec la nuance de fil 4043A, une torche à fil tiré/poussé est recommandée, surtout en soudage robotisé.

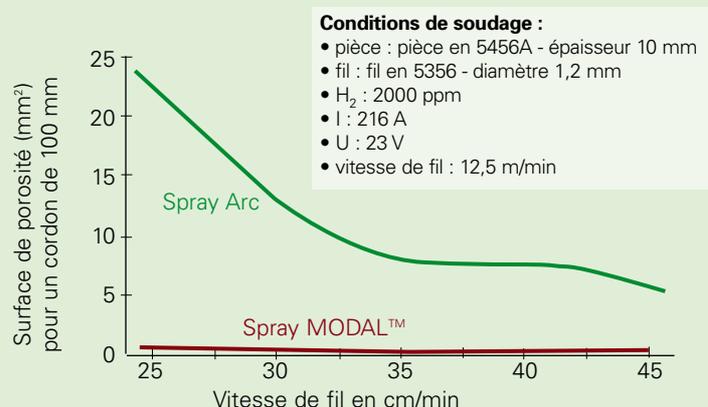
Le diamètre courant de fil d'apport est de 1,2 mm. Il existe également des fils de 1,6 mm de diamètre, plus rigides, dont l'usage se développe avec le MIG pulsé. Ils sont aussi utilisés lorsque le taux de dépôt est important.

L'arasage des fils d'apport lors de la dernière passe d'étrépage a plusieurs effets, tous favorables à la qualité du cordon de soudure :

- élimination de la zone corticale siège des ségrégations en magnésium,
- élimination des résidus des graisses,
- calibrage supprimant les irrégularités de surface qui sont des zones à rétention d'humidité (figure 83).

(20) Breveté Air Liquide.

## EFFET DU SPRAY MODAL SUR LES POROSITÉS



D'après Air liquide Welding

Figure 82

PARAMÈTRES DU SOUDAGE TIG ET MIG			
	TIG en continu	TIG en alternative	MIG en continu
Source de courant	Continu	Alternatif avec HF et évanouissement d'arc (spécialement conçu pour alliage d'aluminium).	Continue à caractéristiques à très faibles pentes descendantes. Une source pulsée est intéressante pour de faibles épaisseurs
Électrodes	Tungstène zirconium	Tungstène pur	Fil d'apport
Inclinaison de la torche	À 80° dans le sens de l'avance	À 80° dans le sens de l'avance	À 80° dans le sens du déplacement
Gaz	Hélium	Argon ou Mélange 70% argon, 30% hélium (*) Débit 10 l.min <sup>-1</sup>	Argon ou Mélange 30% argon, 70% hélium (*et **) Débit 1 l.min <sup>-1</sup> pour une buse de 18 à 25 mm de diamètre
Vitesse de soudage	0,30 à 0,60 m.min <sup>-1</sup>	Lente : 0,15 à 0,30 m.min <sup>-1</sup>	Plus rapide : 0,40 à 1 m.min <sup>-1</sup>
Application	Épaisseur 0,1 à 10 mm Assemblage réalisé en automatique avec une bonne qualité des cordons de soudure	Épaisseur 1 à 6 mm Prototypes Reprise des soudures défectueuses	Épaisseurs à partir de 1 mm, en plusieurs passes si nécessaire Toutes les fabrications mécano-soudées

(\*) L'hélium dans les mélanges argon/hélium a pour effet d'augmenter la vitesse de soudage et d'accroître la pénétration. Tableau 48  
 (\*\*) Les postes MIG pulsé ou MIG Spray MODAL TM synergiques fonctionnent principalement avec de l'argon.

## 5.

### LE STOCKAGE DES DEMI-PRODUITS ET DU FIL D'APPORT

Compte tenu de la très forte affinité de l'aluminium à l'état liquide pour l'hydrogène (figure 60, p. 86), il faut éliminer toute source possible de cet élément, en particulier l'humidité qui pourrait se déposer sur les demi-produits et sur le fil d'apport pendant leur stockage et provoquer une hydratation de la couche d'oxyde.

Le fil d'apport est toujours conditionné dans des emballages étanches qui doivent être stockés dans un local clos et couvert, à la même température que l'atelier de soudage. Les paquets seront ouverts au moment de leur utilisation.

En fin d'utilisation, s'il reste du fil sur la bobine, celle-ci sera stockée en étuve maintenue en permanence à 40 °C.

## 6. LES PRÉPARATIONS DE SURFACE

L'autre source d'hydrogène est constituée par les graisses et les huiles de laminage et de mise en forme retenues à la surface du métal, et autres souillures d'origines diverses, par exemple les restes de peintures.

Il faut donc nettoyer très soigneusement la surface du métal, envers et endroit, en commençant par un dégraissage avec un solvant non chloré pour dissoudre les graisses et les huiles (21). Les solvants étant eux-mêmes des composés hydrocarbonés – contenant des atomes d'hydrogène –, il faut veiller à ce qu'il n'y ait plus aucune trace de ceux-ci avant soudage.

Après l'opération de dégraissage, il faut brosser les bords (après chanfreinage éventuel), à l'envers et à l'endroit sur une largeur suffisante, au moins égale à celle de la zone affectée thermiquement, c'est-à-dire 25 mm. On utilise à cet effet une brosse métallique rotative, en acier inoxydable.

Quel que soit le mode de brossage, manuel ou mécanique, il va de soi que la brosse doit être dans un très bon état de propreté. Les manipulateurs devront porter des gants.

La « durée de vie » d'une préparation de surface n'excède pas la journée. Au-delà de ce délai, il y a risque de reprise d'humidité par le film d'oxyde, surtout dans les atmosphères humides (22).

Pour éliminer l'humidité, on peut alors faire, juste avant soudage, à la flamme d'un chalumeau oxy-acétylénique, une chauffe de « dégourdissage » des bords, à une température supérieure au point de rosée, de l'ordre de 30 à 40 °C.

## 7. LA PRÉPARATION DES BORDS ET L'ACCOSTAGE

Ces opérations, dont dépendent la qualité du joint soudé et le niveau de tenue en fatigue, sont essentielles. Ainsi, un jeu trop important entre les éléments à souder peut provoquer l'effondrement du cordon et la formation de caniveaux très pénalisants pour la qualité du joint soudé et sa tenue en fatigue.

La préparation des bords dépend :

- de l'épaisseur du métal à souder,
- du type de soudure bout à bout à plat ou d'angle, verticale, au plafond ou en corniche,
- de l'usage d'une latte support, subsistante ou non.

En règle générale, jusqu'à 4 mm d'épaisseur, on ne fait pas de chanfreinage.

La préparation des bords à souder est réalisée, de préférence, par usinage avec une fraise à grosse denture ou, à défaut, manuellement avec une lime râpe à grosse denture. Il faut éviter le meulage avec des disques constitués de corindon ou de résines.

Les dispositions des éléments à souder concernent :

- le jeu entre eux qui doit être le plus faible possible (23) pour éviter les déformations,
- la taille et le contour de la latte support (en acier inoxydable).

Plusieurs exemples de préparation de bords et de dispositions, concernant la chaudronnerie navale, sont indiqués aux tableaux 49 et 50.

## 8. LE MÉTAL D'APPORT

Le métal d'apport doit être compatible avec la composition chimique des alliages de base à assembler et doit assurer la meilleure soudabilité possible.

Le choix dépend également des propriétés mécaniques et de la résistance à la corrosion attendue de l'assemblage.

Compte tenu des alliages d'aluminium utilisés en construction navale (et pour les autres applications marines), les métaux d'apport sont :

- des alliages au silicium, essentiellement les 4043A, 4045, 4047A,
- des alliages au magnésium, essentiellement les 5356, 5183, 5556A.

Leur composition est indiquée dans le tableau 51, p. 100.

Selon la hiérarchie des critères retenus pour l'assemblage, le choix possible du métal d'apport est indiqué dans le tableau 52, p. 101, extrait de la norme EN 1011-4 (24). Le 5183 est le métal d'apport le plus approprié pour souder le *Sealium*<sup>®</sup>.

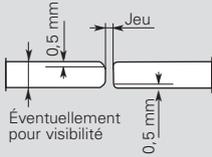
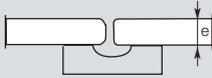
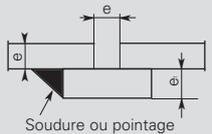
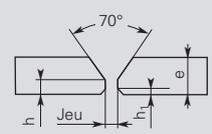
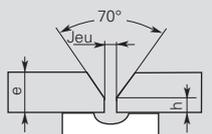
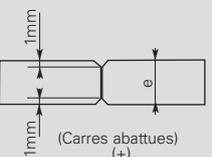
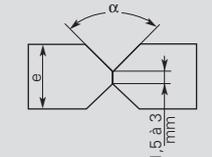
(21) Les décapages chimiques à base de bains alcalins sont fortement déconseillés. Il faut rincer correctement et l'expérience montre que les rinçages sont souvent incomplets, d'où un risque de corrosion ultérieure par les traces de produits alcalins résiduels.

(22) La norme BS 8118 « Structural use of aluminium, Part 2 Specification for materials, workmanship and protection » stipule que l'intervalle de temps entre le nettoyage et le soudage ne doit pas excéder 6 heures.

(23) Le jeu nul est l'idéal.

(24) Norme EN 1011-4. Soudage – Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques. Partie 4 : Soudage à l'arc de l'aluminium et des alliages d'aluminium.

**EXEMPLES DE PRÉPARATION  
DES BORDS SOUDURES BOUT À BOUT SOUDAGE MIG**

Position	Soudure	Support	Épaisseurs (mm)	Préparation	Observations
Toutes	1 seul côté	sans	$3 < e \leq 6$		Jeu maxi 1,5 mm Reprise souhaitable à l'envers pour $e > 4$ mm (*)
		non subsistant			Jeu maxi 3 mm
		subsistant			$e_1 = e + 1$ mm avec maxi 6 mm
À plat, verticale, au plafond	1 seul côté	sans	$3 < e < 25$		Jeu maxi 1,5 mm Reprise souhaitable à l'envers pour $h = 3$ mm (*)
		non subsistant			Jeu maxi 2 mm
À plat	2 côtés alternativement	sans	$8 < e < 30$		Le soudage des épaisseurs supérieures à 12 mm doit se faire en soudage automatique avec courant fort (+). Amélioration et visibilité du joint
À plat, verticale, au plafond	2 côtés alternativement	sans	$e > 10$		$\alpha = 70/90^\circ$ pour les soudures à plat et au plafond $\alpha = 70^\circ$ pour les soudures verticales

(\*) Lorsqu'une reprise à l'envers est conseillée, elle doit être faite après gougeage atteignant le fond du premier cordon.      Tableau 49  
Extrait de la norme NF 87-010 « Aluminium et alliages d'aluminium – Soudage – Préparation des bords ».

# 9.

## LE PARACHÈVEMENT DES SOUDURES

Les opérations de parachèvement ont pour but :

- de reprendre les soudures défectueuses,
- de nettoyer les éventuels dépôts noirs déposés lors du soudage,

- de redresser des structures par trop déformées,
- d'araser le cordon,
- de mettre les cordons de soudure en compression par microbillage,
- de parfaire la concavité du cordon.

EXEMPLES DE PRÉPARATION DES BORDS SOUDURES D'ANGLE SOUDAGE MIG (SOUDURES TOUTES POSITIONS SANS SUPPORT)			
Soudures	Épaisseurs (mm)	Préparation	Observations
2 côtés alternativement ou simultanément en automatique à plat	$e > 4$		
1 côté	$e > 4$		Si possible 1 passe de reprise de l'autre côté gorge, 5 mm (*)
1 côté	$e > 6$		$\alpha = 70^\circ$ Reprise à l'envers si possible

(\*) Lorsqu'une reprise à l'envers est conseillée, elle doit être faite après gougeage atteignant le fond du premier cordon. Tableau 50

(\*) Extrait de la norme NF 87-010, Aluminium et alliages d'aluminium – Soudage – Préparation des bords.

COMPOSITION CHIMIQUE DES MÉTAUX D'APPORT (*)								
Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
4043A	4,5 6,0	0,6	0,30	0,15	0,20		0,10	0,15
4045	9,0 11,0	0,5	0,30	0,03	0,05		0,10	0,20
4047A	11,0 13,0	0,6	0,30	0,15	0,10		0,20	0,15
5356	0,25	0,40	0,10	0,05 0,20	4,5 5,5	0,05 0,20	0,10	0,06 0,20
5183	0,40	0,40	0,10	0,50 1,0	4,3 5,2	0,05 0,25	0,25	0,15
5556A	0,25	0,40	0,10	0,6 1,0	5,0 5,5	0,05 0,20	0,20	0,05 0,20
5556 (**)	0,25	0,40	0,10	0,50 1,0	4,7 5,5	0,05 0,20	0,25	0,05 0,20

(\*) Suivant la norme EN 573-3, Partie 3, Aluminium et alliages d'aluminium – Composition chimique, sauf pour le 5556. Tableau 51

(\*\*) Suivant Aluminum Association.

## 9.1

**Reprise des soudures défectueuses**

Quand des défauts inacceptables sont décelés au contrôle (radiographie, ultrasons), il faut reprendre les soudures.

Sur les épaisseurs inférieures à 4 mm, on peut utiliser une fraise rotative en carbure de tungstène montée sur une perceuse pneu-

matique. L'axe de rotation de la fraise sera parallèle à celui du cordon de soudure de manière à éviter des amorces de fissures.

Pour les épaisseurs supérieures à 4 mm, les zones défectueuses sont éliminées au marteau pneumatique équipé d'une gouge (25).

La reprise de la soudure est faite avec le même procédé, TIG ou MIG, que celui utilisé pour la sou-

dure initiale. Mais les défauts de petite taille sont presque toujours repris en TIG, si les épaisseurs le permettent.

(25) Le gougeage à l'arc au carbone est déconseillé parce qu'il risque d'introduire du carbone dans le cordon de soudure.

(26) Cf. chapitre 10, paragraphe 10-2.

### CHOIX DES MÉTAUX D'APPORT EN FONCTION DE LA COMBINAISON D'ALLIAGES À SOUDER

Pour chaque combinaison, trois choix sont possibles selon le critère retenu, indiqués à l'intersection des lignes :

Propriétés mécaniques optimales : chiffre de la première ligne – Résistance à la corrosion optimale : chiffre de la deuxième ligne – Soudabilité optimale : chiffre de la troisième ligne

Le métal d'apport indiqué est : 4 : famille 4xxx → 4043A, 4045, 4047A – 5 : famille 5xxx → 5356, 5183, 5556A

<b>Alliage A</b>					
Corroyés Famille 5000 Mg < 3 %	5 5 (a) 4 - 5 (b)				
Corroyés Famille 5000 Mg > 3 % (a)	5 5 5	5 5 5			
Corroyés Famille 6000	5 - 4 5 4	5 - 4 5 4	5 - 4 5 4		
Corroyés Famille 7000 sans cuivre	5 - 4 5 4	5 - 4 5 4	5 - 4 5 4	5 - 4	
Moulés Si > 7 % (c)	4 (e) 4 4	5 - 4 (e) 5 4	4 4 4	4	4 (d) 4 4
<b>Alliage B</b>	Corroyés Famille 5000 Mg < 3 %	Corroyés Famille 5000 Mg > 3 %	Corroyés Famille 6000	Corroyés Famille 7000 sans cuivre	Moulés Si > 7 % (c)

(a) Les alliages de la famille 5000 contenant plus de 3,5 % de Mg sont sensibles à la corrosion intergranulaire lorsqu'ils sont exposés à des températures supérieures à 65 °C et qu'ils travaillent dans certaines conditions agressives (26). Tableau 52

(b) Les alliages de la famille 5000 contenant moins de 3 % de magnésium ainsi que les alliages de la famille 3000 contenant du magnésium peuvent être sensibles à la fissuration à chaud.

(c) Les performances mécaniques de la soudure sont dépendantes de la santé interne des pièces moulées. Les matériaux gazés et les pièces moulées par injection sont considérés comme non soudables.

(d) La teneur en silicium du fil d'apport doit être la plus proche possible de celle de la pièce moulée.

(e) Le soudage de pièces moulées en aluminium-silicium (famille 40000) sur des alliages de la famille 5000 doit être autant que possible évité parce qu'il se forme dans le joint soudé des intermétalliques Mg<sub>2</sub>Si qui fragilisent l'assemblage.

## 9.2 | Nettoyage

L'expérience montre qu'après soudage MIG, on observe de très fins dépôts noirs adhérent à la surface du métal, en bordure du cordon de soudure. Cette « suie » se produit surtout lors du soudage de demi-produits en 5000 avec du 5356 comme métal d'apport.

Avec du fil en 4043A, il n'y a pas de dépôt quand les réglages de poste sont corrects (sauf éventuellement en début et fin de cordon).

Cette suie est constituée de particules d'oxydes (d'aluminium et de magnésium) provenant de la vaporisation dans l'arc de faibles quantités de métal d'apport, la température de l'arc étant supé-

rieure à la température d'ébullition de l'aluminium et du magnésium. Les vapeurs se condensent immédiatement sur les parties froides de la tôle proche du cordon de soudure.

Ce dépôt ne nuit qu'à l'esthétique. Il est sans effet sur les propriétés mécaniques du cordon de soudure et sur la tenue à la corrosion.

Il est possible d'éliminer cette suie par un brossage métallique effectué le plus tôt possible après soudage. Si on laisse passer quelques heures, elle devient très adhérente, donc beaucoup plus difficile à enlever.

## 9.3 | Rattrapage des déformations

Dans le cas de petites déformations sur des tôles d'épaisseur inférieure à 3 mm environ, le rattrapage des déformations est fait au marteau ou au maillet.

Quand les tôles présentent des bombés (figure 84), on peut appliquer des « chaudes de retrait » par chauffage au chalumeau aussi localisé que possible des parties bombées. Cette zone auto-bridée se dilate (les zones soudées sont plus courtes que la tôle) sous l'effet du chauffage et se comprime. Un refroidissement rapide, au jet d'eau si nécessaire, provoque un retrait qui met la pièce sous contrainte et rattrape ainsi le gondolement. Il est possible de combiner chaude de retrait et martelage.

La chaude de retrait est plus délicate à appliquer sur l'aluminium que sur l'acier à cause de la plus grande diffusion de la chaleur. Contrairement à l'acier, l'aluminium ne changeant pas de couleur, il faut contrôler la température, soit au suif, soit avec des crayons thermocolorés.

Les chaudes de retrait sont sans effet sur les caractéristiques mécaniques des 5000 à l'état O ou H111. Mais il en est différemment avec les 6000 : ils subissent un recuit, donc un abaissement de leurs caractéristiques mécaniques.

## 9.4 | Arasage du cordon

L'arasage du cordon de soudure contribue à améliorer très sensiblement la tenue en fatigue du joint soudé, sous réserve que le cordon de soudure n'ait pas de défauts internes qui seraient débouchants après arasage.

Ainsi, d'après la norme BS 8118, la limite d'endurance passe de 24 MPa pour un angle de 120° à 50 MPa pour un cordon arasé (27).

L'arasage est généralement effectué au disque abrasif à grain fin (50 à 80).

## 9.5 | Microbillage des cordons de soudure

Le microbillage a pour effet de mettre en compression la surface du cordon de soudure, donc de neutraliser les contraintes internes nuisibles à la tenue en fatigue du joint soudé.

Plusieurs types de billes sont utilisables : verre, céramique ou acier. Ce sont ces deux dernières qui améliorent très sensiblement la tenue en fatigue (figure 85).

Bien qu'il n'y ait pas de moyens de contrôle industriel après traitement, ils pourraient être appliqués sur les soudures des « points chauds ».

(27) Cf. figure 45, p. 65.

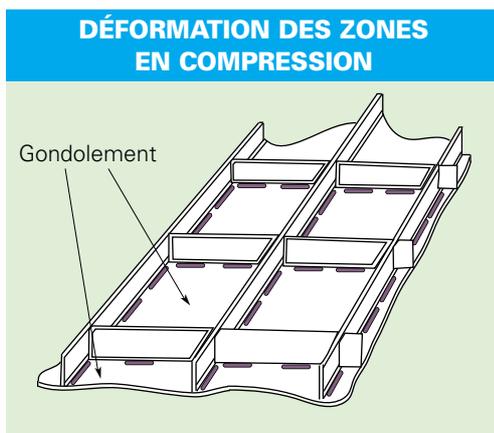


Figure 84

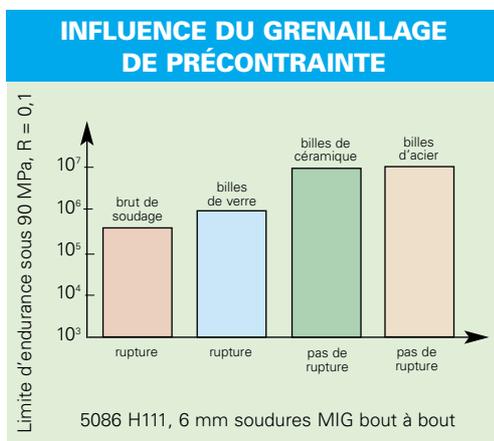


Figure 85

## 10. LES CONTRÔLES

Les contrôles sont faits pour évaluer la qualité des produits fabriqués et plus particulièrement pour situer la qualité d'un joint soudé par rapport à un niveau admissible de défauts.

Le niveau acceptable de défauts dépend de plusieurs paramètres :

- les modes et les régimes de sollicitation – statique et dynamique,
- le niveau de variation des contraintes,
- la sécurité des personnes et des biens,
- les conséquences techniques et financières en cas de défaillance,
- les possibilités de surveillance et de contrôle en service.

### 10.1 Les procédures d'agrément

Les procédures d'agrément sont contractuelles mais font aussi référence à des normes, quand elles existent, et aux règlements des sociétés de classification, en particulier la qualification des soudeurs.

Elles peuvent être complétées par des procédures d'autocontrôle au niveau de l'atelier, en particulier sur la qualification du mode opératoire du soudage.

À cet effet, des essais de traction et de pliage sont effectués sur des éprouvettes suivant des procédures d'agrément définies par les sociétés de classification. Ces essais sont très importants car ils permettent :

- de détecter les collages difficiles à déceler en contrôle non destructif,
- d'ajuster les paramètres pour limiter les défauts.

### 10.2 Le contrôle des joints soudés

La fréquence et l'étendue des contrôles des joints soudés dépendent de plusieurs critères, dont :

- la structure,
- le taux de contrainte,
- le chargement éventuel des soudures.

En cours de fabrication, on procède à :

- des contrôles non destructifs, dont des radiographies par sondage (28), ultrasons, etc.,
- des contrôles visuels, à du ressuage (29) qui peut être fait sur la totalité de certains cordons pour déceler les fissures débouchantes,
- des contrôles de caractéristiques mécaniques et pliage sur des éprouvettes sur des lots de métal soudé suivant le mode opératoire en cours.

(28) La radiographie n'est généralement pas possible pour les soudures d'angle.

(29) Suivant norme NF A 09-120. Essais non destructifs. Principes généraux de l'examen par ressuage. Juin 1984.

(30) Norme EN ISO 6520-1. Classification des défauts géométriques dans les soudures des matériaux métalliques. Partie 1 : Soudage par fusion.

## 11. LES DÉFAUTS DE SOUDURE

Les causes des défauts de soudure sont nombreuses et dépendent soit de la préparation du métal, soit d'une mauvaise exécution du soudage.

Les défauts de soudure le plus fréquemment rencontrés dans le soudage de l'aluminium sont pratiquement les mêmes que ceux rencontrés dans le soudage de l'acier : fissures isolées (dites criques en étoile) ou fissures longitudinales, défauts de pénétration, manque de liaison (mouillage), porosités et caniveaux.

Les normes définissent les défauts de soudure à partir de mesures sur la section droite (figure 86) du cordon et d'observations sur l'aspect du cordon.

Une nomenclature internationale des défauts a été établie. Elle est reprise dans la norme EN ISO 6520-1 (30), qui distingue 6 groupes de défauts, indiqués dans le tableau 53, p. 104.

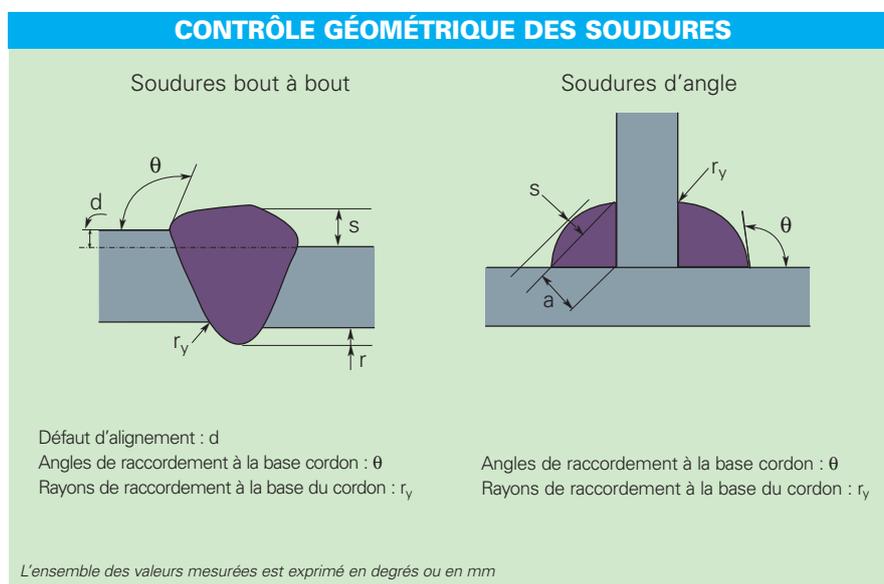


Figure 86

## CLASSEMENT DES DÉFAUTS DE SOUDURE

Groupe	Type de défauts
100	Les fissures
200	Les cavités et les soufflures
300	Les inclusions solides
400	Les manques de fusion et de pénétration
500	Les défauts de forme
600	Les défauts divers

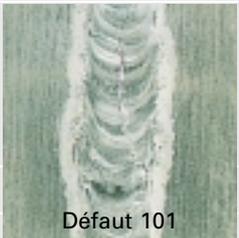
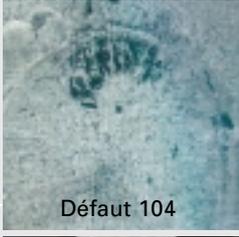
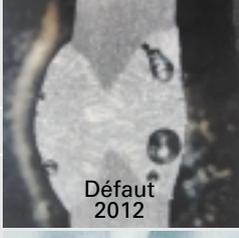
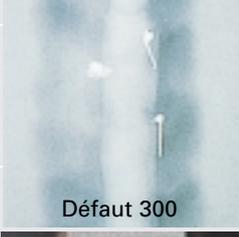
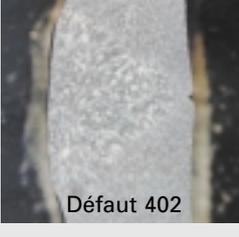
Tableau 53

## 11.1

### Principaux défauts de soudure

Les défauts les plus fréquents ainsi que leurs causes probables sont indiqués dans le tableau 54.

## EXEMPLES DE DÉFAUTS DE SOUDURE

N°	Nature du défaut	Origine probable	Photos de défauts
101	Fissures	Alliage de base inadapté Mauvais choix du métal d'apport Séquence de soudage inadaptée Bridage excessif Refroidissement brutal	 Défaut 101
104	Fissures de cratères	Coupure brutale de l'arc en fin de cordon	
2012	Soufflures réparties	Mauvais dégraissage des pièces Pièce et/ou fil d'apport souillé ou humide Protection insuffisante par le gaz inerte (débit trop faible ou fuite sur le réseau) Démarrage du cordon sur pièce froide Hauteur d'arc trop élevée Refroidissement du joint soudé trop rapide	 Défaut 104
2014	Soufflures alignées	Manque de pénétration (cas double passe) Gradient de température trop brutal entre la latte support et les pièces à souder Jeu excessif entre les bords à souder	 Défaut 2012
300	Inclusions solides	Métal souillé (oxydes, poils de brosse)	
303	Inclusions d'oxyde	Mauvaise protection gazeuse Métal stocké dans de mauvaises conditions Pièces moulées	 Défaut 300
3041	Inclusions de tungstène (TIG)	Diamètre de l'électrode trop faible Mauvaise manipulation du soudeur Densité de courant excessive Mauvaise qualité de l'électrode de tungstène	
402	Manque de pénétration	Nettoyage insuffisant (présence d'oxyde) Préparation des chanfreins incorrecte sur produits épais (trop fermés, talon excessif) Jeu d'écartement trop faible (ou non constant) entre pièces Intensité trop faible, notamment en début de cordon de soudure Vitesse de soudage trop élevée Hauteur d'arc trop importante	 Défaut 402

N°	Nature du défaut	Origine probable	Photos des défauts
4011	Manque de fusion sur les bords	Hauteur d'arc trop importante Intensité trop faible, notamment en début de cordon de soudure Pièce trop froide (différence d'épaisseur entre matériaux à souder)	 <p>Défaut 402</p> <p>Défaut 502</p> <p>Défaut 507</p>
502	Surépaisseur	Mauvais réglage de la puissance (couple UI mal adapté) Vitesse de soudage trop lente Mauvaise préparation des bords sur produits épais Surintensité de démarrage trop faible	
507	Défaut d'alignement	Mauvais positionnement des pièces Mauvais séquençement des soudures	
508	Défaut angulaire	Énergie de soudage trop grande Mauvais séquençement des soudures	
509	Effondrement	Vitesse de fil trop grande Vitesse de torche trop lente Mauvaise orientation de la torche	
602	Projections (ou perles)	Régime d'arc non adapté Problème de contact électrique à la masse	

Tableau 54

## 11.2 Influence des défauts de soudure sur la tenue en fatigue

Certains défauts de soudage réduisent sensiblement la tenue en fatigue du joint soudé :

- les fissures débouchantes ou non, le manque de pénétration sont très pénalisants ainsi que le montrent des essais effectués sur des défauts de soudure <sup>[5]</sup> (figure 87),
- les défauts géométriques, en

particulier les ruptures brutales de courbe (angle du pied de cordon de soudure, désalignement, etc.) qui augmentent les facteurs d'intensité de contrainte.

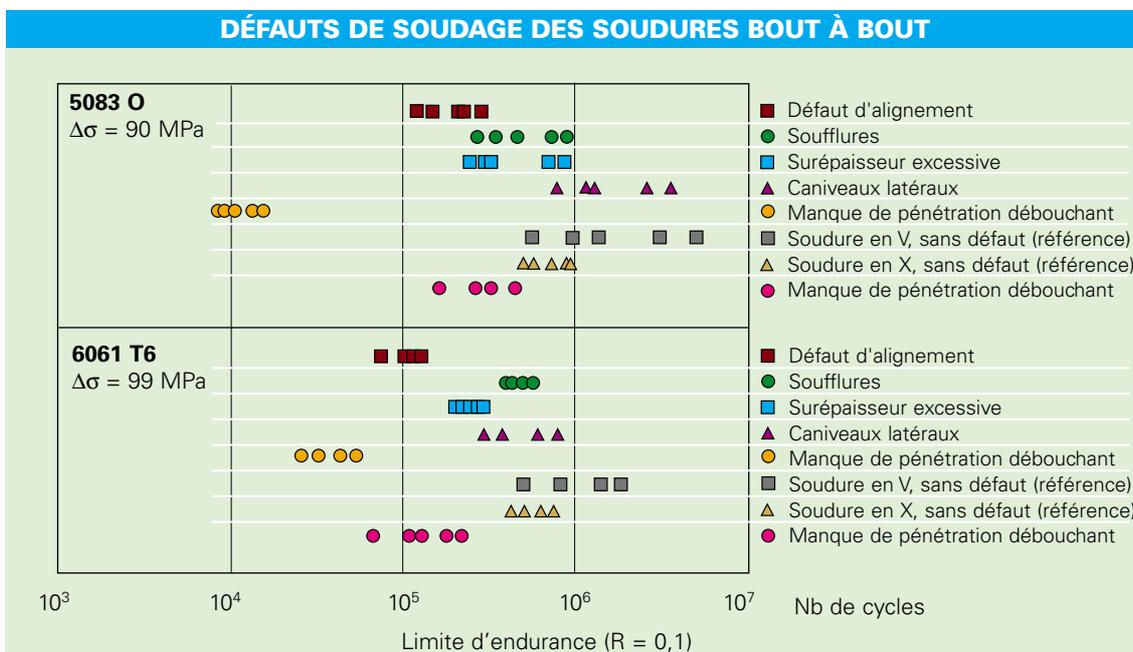


Figure 87

## 12

### LES RÉPARATIONS ET AMÉNAGEMENTS

Pour répondre aux besoins de la maintenance et de l'aménagement des navires à grande vitesse en alliage d'aluminium, des chantiers européens se sont adaptés et spécialisés dans cette activité nouvelle [6, 7 8].

Les chantiers sont appelés à réparer des avaries ou à modifier les aménagements. Du fait de la très longue durée de service des navires en aluminium, il faut les adapter aux conditions de service quand celles-ci viennent à changer, installer de nouveaux équipements, etc.

Les interventions sur les structures en alliage d'aluminium relèvent d'opérations de chaudronnage classique, comme cela se fait couramment sur des navires (ou des équipements) en acier : découpage de tôles, préparation des bords à souder, soudures, rattrapage des déformations, etc.

Les règles de mise en forme et de soudage indiquées précédemment sont valables pour ces opérations.

Pour le soudage sur les parties à réparer (ou à aménager), il est nécessaire de :

- nettoyer avec un grand soin les surfaces proches des cordons de soudure, en particulier d'éliminer par brossage tous les résidus de peintures, d'huiles, de carburants qui auraient pu imprégner les tôles,

- sécher préalablement au soudage pour éliminer toute trace d'humidité,

- souder à l'abri des intempéries et des courants d'air, au besoin sous bâche, si ces opérations sont faites à quai,

- veiller particulièrement aux sens d'exécution des cordons de soudure, cela pour limiter les déformations et les risques de fissuration à chaud dus au retrait,

- choisir le procédé de soudage TIG (pour les épaisseurs inférieures à 6 mm) ou MIG. Pour de petites réparations où l'accès envers n'est pas possible, le procédé TIG est le plus adapté. Dans ce cas, il est d'une utilisation plus aisée et permet un meilleur contrôle de la pénétration que le procédé MIG.

Dans le cas d'une réparation localisée, par exemple une déchirure dans une coque, la pièce rapportée sera parfaitement ajustée à la forme de la zone découpée mais elle aura une surface plus grande (obtenue par martelage) afin de compenser les retraits provoqués par le soudage. Sans cette précaution, les contraintes résiduelles atteignent un tel niveau qu'elles provoquent systématiquement des fissures. Ce phénomène est d'autant plus important que les dimensions de la pièce sont petites.

**Remarque :** Il ne faut jamais intervenir avec un chalumeau ou un arc électrique sur une enceinte ayant contenu de l'eau (ou de l'eau de mer) ou ayant été au contact de l'humidité, sans l'avoir préalablement aérée, voire énergiquement ventilée, pour disperser l'hydrogène qui provient d'une corrosion éventuelle du métal au contact de l'eau. À défaut, il y a risque d'explosion avec des conséquences qui peuvent être catastrophiques pour les opérateurs (31). Une telle précaution s'impose pour toute intervention sur les cuves à fioul.

(31) Le volume d'hydrogène accumulé dans un ballast peut être considérable même si la corrosion reste superficielle. Ainsi, dans un réservoir de 1 m de côté, de 5 m<sup>2</sup> de surface mouillée, une corrosion superficielle de 1 µm dégage 16,8 l d'hydrogène !

## 13

### LE SOUDAGE LASER

Depuis le début des années 1990, les applications du soudage par faisceau laser (32) se développent dans la construction navale [9].

### 13.1

#### Principe du laser

Le laser est une source de rayonnement lumineux, monochromatique et spatialement cohérent. Dans les machines de soudage, le rayonnement est focalisé pour obtenir des densités de puissance dépassant 10<sup>6</sup> W. cm<sup>-2</sup>, suffisantes pour le soudage industriel des alliages d'aluminium.

Cette puissance permet de générer un capillaire rempli de vapeurs métalliques dont les parois sont tapissées de métal liquide en fusion. Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se solidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces (figure 88).

### 13.2

#### Les lasers de soudage

Il existe deux types de lasers industriels pour le soudage des métaux :

- **les lasers CO<sub>2</sub>** ; le milieu actif est un mélange gazeux constitué de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), d'azote (N<sub>2</sub>) et d'hélium (H<sub>2</sub>) sous pression réduite. La longueur d'onde du faisceau laser est de 10,6 µm. La puissance des lasers CO<sub>2</sub> industriels atteint 1,5 à 40 kW. Le faisceau est transmis par miroirs,

(32) Le terme laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) signifie amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement.

■ **les lasers Nd : YAG** (Néodyme Yttrium Garnet) ; le milieu actif est un solide. Le rayonnement a une longueur d'onde de  $1,06 \mu\text{m}$ . Les puissances maximales disponibles sont de 3 à 4 kW. Malgré leur faible puissance, ces lasers présentent certains avantages par rapport aux lasers  $\text{CO}_2$  : les sources sont plus compactes, et il est possible de transporter le faisceau Nd : YAG par fibre optique, donc de souder suivant des trajectoires complexes à l'aide de robots de soudage.

### 13.3 Le soudage laser des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium peuvent être soudés au laser sans difficulté particulière, à des vitesses de soudage pouvant atteindre plusieurs mètres par minute.

Ce procédé de soudage présente plusieurs avantages :

- simplicité des préparations avant soudage,
- vitesse de soudage élevée, plusieurs m.min<sup>-1</sup> sur des soudures bout à bout de tôles de 6 mm en 5000,
- déformation réduite du fait de la grande vitesse de soudage et de l'étroitesse du joint soudé,
- forte pénétration du faisceau ; il est possible de souder (laser  $\text{CO}_2$ ) en une seule passe jusqu'à 12 mm d'épaisseur des tôles en 5000,
- caractéristiques mécaniques élevées du joint soudé : près de 90 % du métal de base pour du 5083 H116 et 70 % pour du 6082 T6,
- soudage d'épaisseurs différentes,
- soudage par transparence,
- bon état de finition (peu de parachèvement),
- automatisation poussée.

Mais ce procédé exige des tolérances de préparation serrées et à faible rendement énergétique.

### 13.4 La soudabilité des alliages d'aluminium au laser

Les alliages d'aluminium ont un taux d'absorption de la lumière relativement faible dans l'infrarouge lointain : 3 % avec le laser  $\text{CO}_2$  et 25 % avec le laser Nd : YAG. Cependant, ce coefficient d'absorption augmente brusquement au-delà de la température de fusion, et atteint environ 90 % lorsque la température de vaporisation du matériau est atteinte (figure 89).

Pour souder, il faut donc amorcer la vaporisation du métal sous le faisceau. On observe en effet deux types d'interaction bien dis-

tincts, selon la densité de puissance à la surface du matériau (figure 90) :

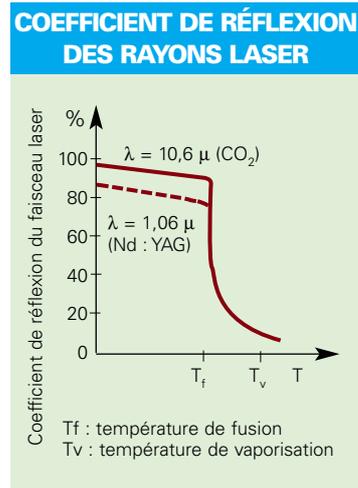


Figure 89

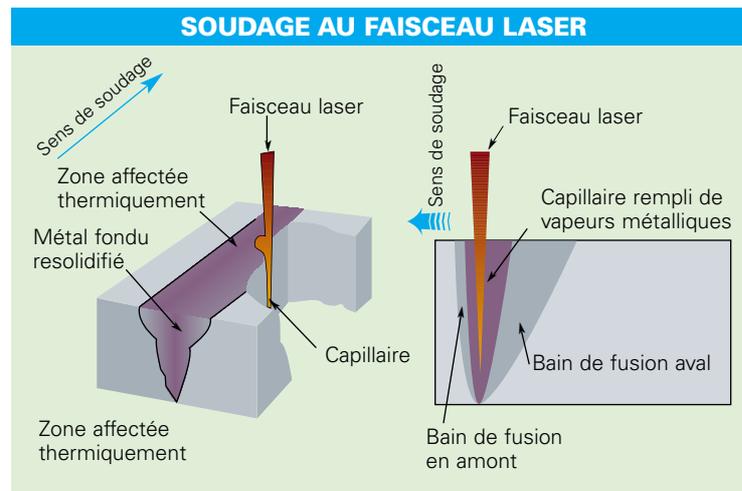


Figure 88

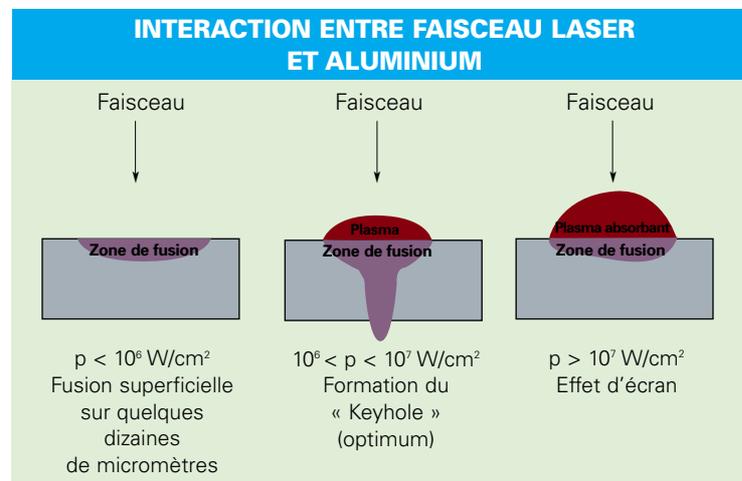


Figure 90

- pour les faibles densités, la fusion est très superficielle,
- pour les densités élevées, il y a formation d'un capillaire de vapeur, c'est-à-dire une zone de fusion étroite et profonde dans le métal. C'est le mode d'interaction qui est recherché en soudage.

Le seuil d'interaction, c'est-à-dire la densité de puissance nécessaire pour former un capillaire de vapeur, est aux environs de  $10^6 \text{ W/cm}^2$ . La valeur du seuil dépend de la composition de l'alliage. On constate ainsi que les alliages contenant du magnésium, de la famille 5000 (5754, 5083, 5086, etc.), ont un seuil d'interaction plus bas que les autres alliages (figure 91), ce qui permet de les souder avec une énergie moindre.

Notons qu'il est inutile d'utiliser une densité de puissance trop élevée, car les vapeurs métalliques forment alors un plasma qui fait écran. Cela est surtout vrai avec les lasers  $\text{CO}_2$ .

Pour éviter une oxydation immédiate du bain de soudure, il est nécessaire d'utiliser un gaz de protection. Avec les lasers  $\text{CO}_2$ , les meilleurs résultats sont obtenus avec des mélanges argon-hélium ou avec de l'hélium pur. Avec les lasers Nd:YAG, on peut également utiliser l'argon.

## 14.

### LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

Le soudage par friction à l'outil (33) a été inventé par le TWI (34). Le premier brevet a été déposé en décembre 1991 <sup>[10]</sup>.

On peut maintenant considérer que c'est un progrès décisif dans l'assemblage des métaux et plus particulièrement des alliages d'aluminium. Cette nouvelle technique de soudage a connu en moins de dix ans un important développement industriel dans plusieurs secteurs, dont la construction navale, l'aéronautique et le transport ferroviaire <sup>[11]</sup>.

Depuis 1995, nombreuses ont été les publications et les conférences présentées sur les applications du soudage par malaxage FSW à la construction navale dans les conférences internationales sur les navires à grande vitesse en aluminium <sup>[12]</sup>. Ces publications traduisent bien l'intérêt que les architectes navals et les chantiers portent à cette nouvelle technique en passe de modifier très sensiblement la construction navale en aluminium et de lui communiquer un nouvel élan <sup>[13, 14]</sup>.

(33) Friction Stir Welding (FSW).

(34) TWI: The Welding Institute.

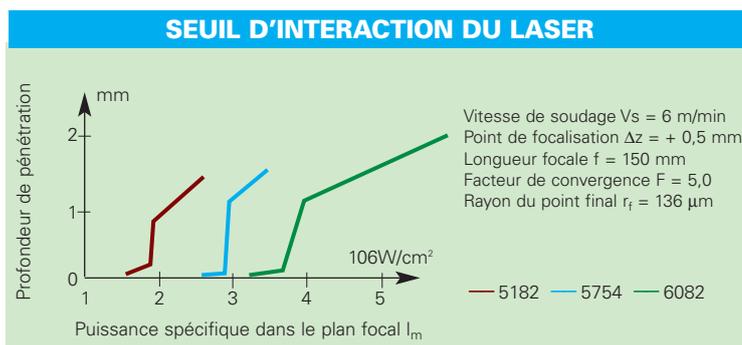


Figure 91

## 14.1

### Principe du soudage par friction malaxage

Le procédé est simple : il consiste à cisailer le métal, sans le fondre (il devient pâteux) au moyen d'un outil rotatif, le « pion », dont la hauteur est légèrement inférieure à celle du joint soudé. En tournant, il mélange le métal des pièces à assembler, le rejette à l'arrière où il y a plastification et forgeage du joint soudé, ainsi formé.

L'écoulement du métal est facilité par l'échauffement provoqué par le frottement de l'épaulement (« shoulder ») sur la surface du métal. L'épaulement de diamètre supérieur à celui du pion contient les particules de métal en mouvement et il maintient une pression qui empêche l'éjection du métal hors de la zone soudée (figure 92).

Compte tenu des efforts très importants sur les pièces, celles-ci doivent être fortement bridées sur le banc de la machine de soudage.

## 14.2

### Microstructure du joint soudé par friction malaxage

Les propriétés spécifiques du joint soudé FSW s'expliquent par sa microstructure très différente de celle d'une soudure à l'arc (MIG ou TIG), du seul fait qu'il n'y a pas de phénomènes de fusion-solidification. Sur le joint soudé FSW, on observe quatre zones bien distinctes (figure 93) <sup>[15]</sup>:

- **zone A**, à l'extérieur du joint soudé, constituée de part et d'autre de la soudure du métal de base de chacun des éléments assemblés. Sa structure n'est pas du tout affectée par le soudage,
- **zone B**, c'est la zone affectée thermiquement. Elle ne subit pas de déformation plastique. Comme pour la ZAT des joints soudés par

les procédés classiques MIG ou TIG, on observe une diminution des caractéristiques mécaniques (figure 94). Cette zone subit un recuit pour les alliages à durcissement par écrouissage et un sur-revenu pour les alliages à durcissement structural (35). Mais on n'observe pas de déformation, du fait que l'échauffement du métal et le niveau de température atteints sont beaucoup plus bas qu'avec les procédés de soudage à l'arc,

■ **zone C**, c'est la zone thermo-mécaniquement affectée qui a subi une déformation plastique et un échauffement. La structure de cette zone dépend de plusieurs paramètres dont la nature de l'alliage,

■ **zone D**, « le noyau » formé de grains recristallisés, dans lesquels sont dispersés les constituants métallurgiques des alliages de base. La taille des grains est généralement plus petite que celle des grains du métal de base. Cette structure est favorable à la tenue en fatigue du joint soudé.

Sur les alliages à durcissement structural, le noyau est dans un état proche de T4 (mise en solution, maturation à la température ambiante) (figure 95).

### 14.3 Comparaisons avec le soudage à l'arc

Ce procédé fonctionnant à une température inférieure au point de fusion du métal, il présente de nombreux avantages :

■ **les conditions de mise en œuvre** sont simplifiées : la préparation de surface est réduite au dégraissage. Quand une préparation des bords est nécessaire, un surfacage des chants suffit. Le soudage est effectué sans métal d'apport, et sans gaz protecteur,

■ **les applications** sont beaucoup plus étendues qu'avec le soudage à l'arc : il est possible d'assembler tous les alliages d'aluminium entre eux, que ce soit des produits moulés ou des demi-produits corroyés,

■ **la qualité du joint soudé** : il n'y a pas de risques de fissuration à chaud (36), ni de porosités du fait qu'il n'y a pas formation d'hydrogène (37),

■ **la qualité des assemblages** : les déformations sont très réduites du fait du faible niveau de température et du soudage en milieu solide,

(35) Par conséquent, les alliages se retrouvent dans l'état métallurgique indiqué précédemment.

(36) Il est possible de souder des alliages au cuivre (familles 2000 et 7000).

(37) S'il s'en formait, il ne serait pas dissous puisque la solubilité de l'hydrogène est nulle dans l'aluminium à l'état solide.

#### ÉVOLUTION DE LA DURETÉ DANS LA ZAT [16]

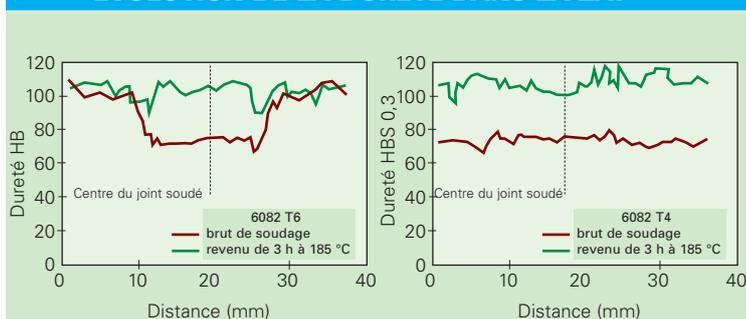


Figure 95

#### OUTILLAGE DU SOUDAGE PAR FRICTION

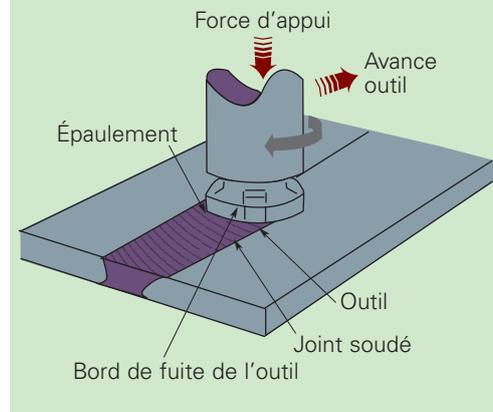


Figure 92

#### MICROSTRUCTURE DU JOINT SOUDÉ FSW

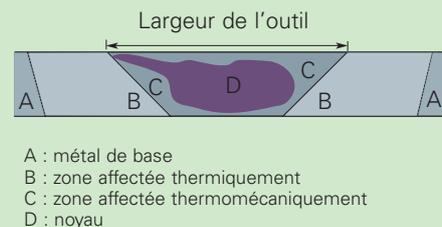


Figure 93

#### ÉVOLUTION DE LA DURETÉ DE LA ZAT DU 5083 [15]

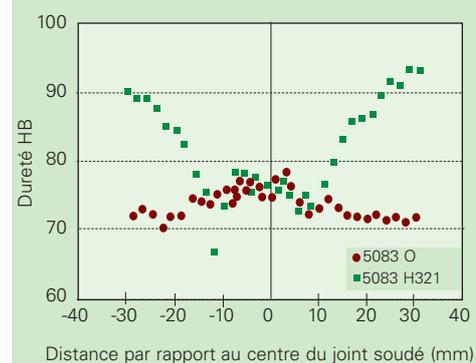


Figure 94

■ **l'environnement et les conditions de travail** ; il n'y a pas de fumée, pas de projections de particules de métal, ni d'émission d'ozone, ni de rayonnement ultraviolet. Ce procédé est économe en énergie, la puissance nécessaire est de l'ordre de 20 % des besoins du MIG.

Dans l'état actuel du développement industriel, ce procédé est bien adapté pour une production *en atelier* de sous-ensembles : sections de ponts, murailles, cloisons, etc. <sup>[17]</sup>. Ils seront ensuite montés sur les navires, et assemblés par les procédés de soudage classique, tel le MIG (38).

Récemment, un prototype de machine « portable » construit par l'Université d'Adélaïde en Australie avec The Welding Institute a été présenté <sup>[18]</sup>. Il s'agit en fait d'un outil couplé à un moteur hydraulique qui est monté sur un chariot pour le soudage sur la coque de navire de tôles d'épaisseur de 5 mm. Cependant, si l'outil est « portatif », les éléments à rabouter doivent être fixés fermement pour encaisser les efforts nécessaires au soudage.

(38) Le code de soudage est en cours d'agrément par les sociétés de classification.

## 14.4

### Possibilités du soudage par friction malaxage

Dans l'état actuel de la technique, il est possible de souder des épaisseurs jusqu'à 25 mm. Les résultats de recherches sur des alliages de la famille 6000 ont montré qu'il est possible d'aller jusqu'à 50 mm d'épaisseur avec une seule tête (figure 96), et à 75 mm avec deux têtes (figure 97).

Dans l'état actuel du développement industriel du procédé, il est possible d'envisager le FSW dans plusieurs configurations de soudures en bout à bout et par transparence, ainsi que l'illustre la figure 98.



Figure 96

### SOUDAGE FSW À DEUX TÊTES

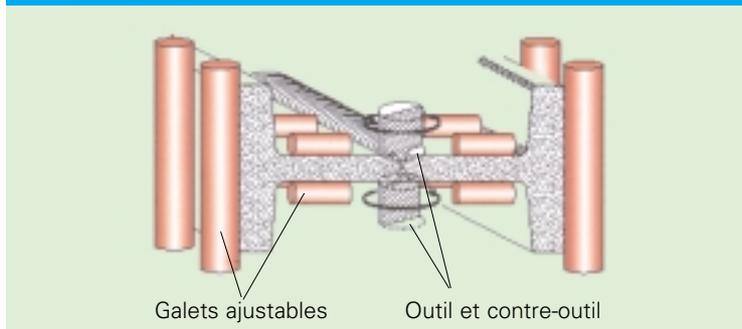


Figure 97

### EXEMPLE DE CONFIGURATION DE SOUDURES FSW

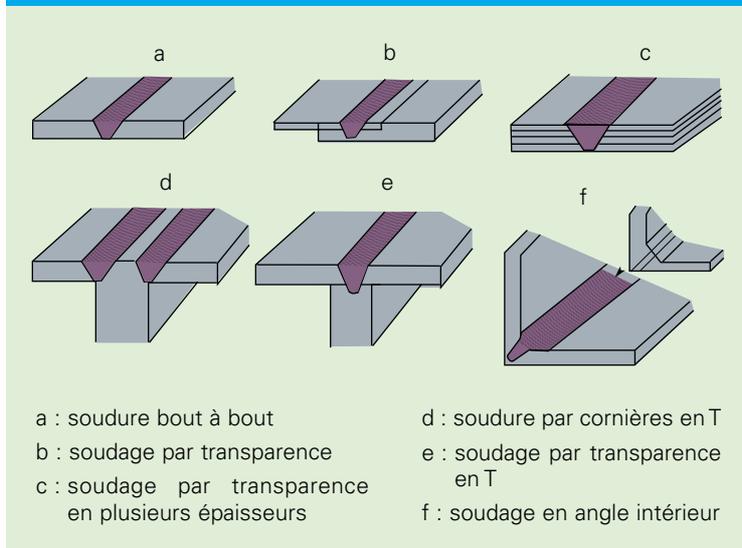


Figure 98

**CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES SUR 5083 ET 5383  
SOUDÉS DE 6 MM D'ÉPAISSEUR [20]**

Alliage	Soudage	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A %
5083 H116	MIG	134	287	12,8
	FSW	157	335	17
Sealium®	MIG	150	308	13,5
	FSW	165	354	17

Tableau 55

**LIMITE D'ENDURANCE SUR 5383  
(À 10<sup>7</sup> CYCLES ET POUR R = 0,1) [11]**

Alliage	Mode de soudage	Limite d'endurance (MPa)
Sealium®	Métal de base	228
	FSW	172
	MIG	144

Tableau 56

## 14.5

### Performances des soudures par friction malaxage

La caractérisation des propriétés (caractéristiques mécaniques, tenue en fatigue, tenue à la corrosion du joint soudé) a fait l'objet de nombreuses études [19].

#### ■ Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques sur métal soudé FSW sont supérieures à celles du métal soudé MIG (tableau 55).

Les ruptures ont généralement lieu en bordure de la zone de friction, jamais dans celle-ci en raison, sans doute, de l'écroutissage provoqué par le patin de l'outil.

La limite d'élasticité est plus élevée sur métal soudé FSW, d'au moins 10 % par rapport au soudage MIG.

#### ■ Tenue en fatigue

La limite d'endurance est supérieure sur métal soudé FSW par rapport au soudage MIG [21] (figure 99 et tableau 56.)

La limite d'endurance sur joint soudé FSW est toujours supérieure à celle du joint soudé MIG, et c'est vrai pour tous les alliages. Cette performance s'explique par le fait que le FSW permet d'assurer une très bonne liaison entre les pièces à assembler. Il n'y a pas de collage. Il va de soi que ce n'est vrai que si le joint soudé FSW est exempt de défauts.

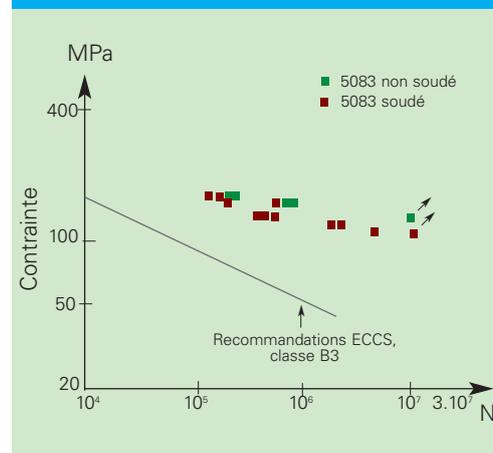
**LIMITE D'ENDURANCE  
DES JOINTS SOUDÉS FSW**


Figure 99

#### ■ Tenue à la corrosion

Les investigations menées jusqu'à maintenant n'ont pas montré de sensibilité particulière à la corrosion des soudures FSW. Leur tenue à la corrosion est au moins égale à celles des soudures réalisées en MIG ou en TIG.

SUPPORT DE MOTEUR ET D'ARBRE MOTEUR



## 15. | LES NORMES

Les principales normes concernant le soudage de l'aluminium sont indiquées dans le tableau 57.

PRINCIPALES NORMES EUROPÉENNES SUR LE SOUDAGE DE L'ALUMINIUM		
Référence	Date	Objet
NF EN 1011-4	déc. 2000	Soudage – Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques – Partie 4 : Soudage à l'arc de l'aluminium et des alliages d'aluminium
NF A 89-310	avril 1973	Aluminium et alliages d'aluminium – Soudage – Assemblages élémentaires types – Critères de choix
NF A 87-010	avril 1973	Aluminium et alliages d'aluminium – Soudage – Préparation des bords
NF EN 288-4/A1	août 1997	Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques – Partie 4 : Épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage à l'arc sur l'aluminium et ses alliages
NF A 89-220	avril 1973	Aluminium et alliages d'aluminium – Soudage – Classification et contrôle des joints soudés
BS 8118		Structural use of aluminium. Part 2. Specifications for materials, workmanship and protection
NF EN ISO 9692-3	déc. 2001	Soudage et techniques connexes – Recommandations pour la préparation de joints – Partie 3 : Soudage MIG et TIG de l'aluminium et de ses alliages (ISO 9692-3 : 2000)
NF EN 12584	juin 1999	Défauts des coupes exécutées par oxycoupage, coupage laser et coupage plasma – Terminologie
NF EN 30042 ISO 10042	juill. 94	Assemblages en aluminium et alliages d'aluminium soudables soudés à l'arc-Guide des niveaux d'acceptation des défauts
NF EN ISO 13919-2	déc. 2001	Soudage – Assemblages soudés par faisceau d'électrons et par faisceau laser-Guide des niveaux de qualité des défauts – Partie 2 : Aluminium et ses alliages soudables (ISO 13919-2 : 2001)
NF EN ISO 6520-1	déc. 1998	Soudage et techniques connexes – Classification des défauts géométriques dans les soudures des matériaux métalliques – Partie 1 : Soudage par fusion (ISO 6520-1 : 1998)
NF EN 83-100-1	déc. 1995	Construction d'ensembles mécano – soudés. Techniques de soudage. Partie 1 – Généralités : Terminologie, Classes de qualité de soudure – Étendue des contrôles
NF EN 12062	oct. 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Règles générales pour les matériaux métalliques
NF EN 970	mai 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés par fusion – Contrôle visuel
NF A 09-120	juin 1984	Essais non destructifs. Principes généraux de l'examen par ressuage

Référence	Date	Objet
NF EN 1289	août 1998	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ressuage des soudures – Niveaux d'acceptation
NF EN 1712	nov. 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 1713	sept. 1998	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons – Caractérisation des indications dans les assemblages soudés
NF EN 1714	oct. 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés
NF EN 1712/A1	févr. 03	Essais non destructifs des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 1714/A1	févr. 2003	Essais non destructifs des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés
NF EN 444	avril 1994	Essais non destructifs. Principes généraux de l'examen radiographique à l'aide de Rayons X et gamma des matériaux métalliques
NF EN 1435	oct. 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par radiographie des assemblages soudés
NF EN 12517	sept. 1998	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par radiographie des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 287-2	juin 1992	Épreuve de qualification des soudeurs – Soudage par fusion – Partie 2 : Aluminium et ses alliages
NF EN 287-2/A1	août 1997	Épreuve de qualification des soudeurs – Soudage par fusion – Partie 2 : Aluminium et ses alliages
NF EN ISO 9956-10	nov. 1996	Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques – Partie 10 : Descriptif d'un mode opératoire de soudage par faisceau d'électrons
NF EN ISO 9956-11	nov. 1996	Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques – Partie 11 : Descriptif d'un mode opératoire de soudage par faisceau laser
NF EN 12345	juin 1999	Soudage – Liste multilingue de termes relatifs aux assemblages et aux joints soudés, avec illustrations
NF EN 1792	février 1998	Soudage – Liste multilingue de termes concernant le soudage et les techniques connexes

Tableau 57

### Références bibliographiques

[1] « Soudure et chaudronnerie d'aluminium », *Revue de l'Aluminium*, n° 99, mars 1938, pp. 1128-1135.

[2] « Le soudage à l'arc des métaux légers avec électrode fusible enrobée », CHARLES GUINARD, *Revue de l'Aluminium*, n° 167, juin 1950, pp. 237-244.

[3] « Die Fügeverfahren des Aluminiums im Laufe der Jahrzehnte » G. AICHELE, *Aluminium*, vol. 75, 1999, pp. 743-753.

[4] « Construction of the All-Welded Twin-Screw Auxiliary Motor Yacht », J. G. YOUNG, *British Welding Journal*, Jan. 1955, pp. 1-18.

[5] « Nocivité des XXX de soudage sur éprouvettes soudées MIG ». D. ALBERT, C. HANTRAIS, M. MÉDIOUNI, M. TRICOT, *Rapport Pechiney CRV 3535*, déc. 1994.

[6] « Repairs yards show their versatility » *Speed at Sea*, April 1998.

[7] « Routine repairs provide annual returns », *Speed at Sea*, Jan. 1999.

[8] « Aluminium skills are part of routine workload », *Speed at Sea*, Oct. 2000.

[9] « Developments in welding techniques for aluminium alloys », J. D. RUSSEL, C. J. DAWES, R. L. JONES, TWI, *Conférence Southampton*, 1996.

[10] « Improvements relating to friction welding », W. M. THOMAS, E. D. NICHOLAS, J. C. NEEDHAM, M. G. MURCH, P. TEMPLE SMITH, C. J. DAWES (TWI), Brevet GB 91 25978.8, international PCT/GB92/02203 et European Patent Specification 0 615 480 B1.

[11] « Application of Friction Stir Welding for manufacture of aluminium ferries », S. W. KALLE, E. D. NICHOLAS, P. M. BURLING, TWI, *4th International Forum on Aluminium Ships*, New Orleans, May 2000.

[12] *4th International Forum on Aluminium Ships*, New Orleans, May 2000.

*European Shipbuilding in the 21st Century*, London, December 2000.

*The Third International Forum on Aluminium Ships*, Haugesund, Norway, May 1998.

*Lightweight Construction – Latest Developments*, The Royal Institution of Naval Architects, London Feb 2000.

[13] « Studies extend Friction Stir Welding potential », *Speed at Sea*, Oct. 1998, p. 45.

[14] « Friction Stir benefits include cost saving ». P. HYNDY, *Speed at Sea*, Oct. 1999, p. 33.

[15] « Friction Stir Welding in aluminium alloys, preliminary microstructural assessment. », P. L. THREADGILL, *TWI Bulletin*, vol. 28 (2), 33, March 1997, p. 30.

[16] *Friction Stir Welding – Weld properties and manufacturing techniques*, Proc INALCO-7, Cambridge April 1998, pp. 171-181.

[17] « Application of prefabricated Friction Stir Welding panels in catamaran building », O. T. MIDLING, J. S. KVÅLE, S. OMA, *4th International Forum on Aluminium Ships*, New Orleans, May 2000.

[18] « Exploiting friction stir welding in explosively-formed aluminium boat hull construction », I. HENDERSON, *Joints in aluminium*, INALCO 98, 1998, pp. 261-267.

[19] « Friction Stir Welding – The state of the art », P. L. THREADGILL, *Report TWI 7417.01/99/1012*.

[20] *Rapport Pechiney*, CRV, février 1999.

[21] « Friction Stir Welding aluminium alloy 5083, Increased welding speed », C. J. DAWES, E. J. R. SPURGIN, D. G. STAINES, *Report TWI 7735.1/98/993.2*.



PORT DE PLAISANCE DE LA TRINITÉ-SUR-MER