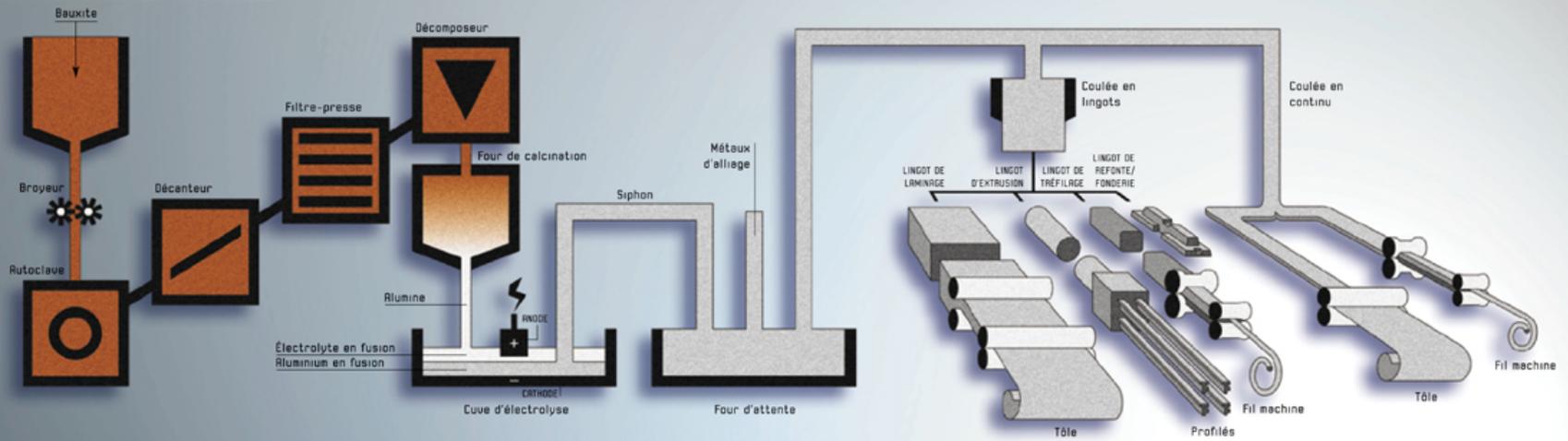


MDS des aluminiums



La fabrication de l'aluminium



La Bauxite



L'alumine



L'électrolyse



2° fusion

Légèreté

L'aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm³, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm³) ou du cuivre (8,96 g/cm³)

Résistance mécanique

L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'aluminium est adaptée à l'application requise.

A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.

Résistance à la corrosion

L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation, laquage,...).

Conductivité thermique et électrique

L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité.

La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules).

A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.

Ductilité, malléabilité

L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées.

Recyclabilité

L'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire.

Imperméabilité, effet barrière

Même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs. De plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique

Propriétés réfléchissantes

L'aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d'éclairage ou les couvertures de survie.

Carte d'identité de l'aluminium

Symbole :	Al
Numéro atomique :	13
Masse atomique :	27 g/mole
Réseau cristallin :	structure cubique à faces centrées
Température de fusion :	660°C
Température d'ébullition :	2056° C
Masse volumique à 20°C :	2,7 kg/m ³
Conductibilité thermique à 20 °C :	240 W /m °C
Pouvoir réflecteur (aluminium poli) :	85 à 90 % dans le spectre visible, 90 à 98% dans l'infrarouge
Module d'élasticité :	67 000 MPa

Influence des éléments d'alliage

La résistance mécanique de l'aluminium pur est relativement faible et interdit son emploi pour certaines applications. Cette résistance mécanique peut être notablement augmentée par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- les alliages sans durcissement structural (alliages non trempants),
- les alliages à durcissement structural (alliages trempants).

Cette différence entre alliages est due à l'élément d'addition principal, quelle que soit sa teneur.

Il n'y a rarement qu'un seul élément ajouté (élément principal). Des additions d'autres éléments secondaires vont aussi influencer sur les caractéristiques de l'alliage.

Il y a enfin des éléments présents dans l'alliage sans qu'ils aient été ajoutés volontairement ; ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car leur influence peut être défavorable.

Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur plusieurs propriétés de l'alliage comme :

- * les caractéristiques mécaniques (charge de rupture R_m , limite élastique $R_{p0.2}$, l'allongement à la rupture $A\%$, la dureté HB),
- * la masse volumique,
- * les conductivités électrique et thermique,
- * la résistance à la corrosion,
- * l'aptitude au soudage,
- * l'usinabilité,
- * l'aptitude à la déformation,
- * l'aptitude à l'anodisation.

L'aluminium est capable de se " marier " avec grand nombre d'autres éléments donnant ainsi naissance à beaucoup d'alliages différents ayant un faisceau de propriétés très larges et permettant de satisfaire un grand nombre d'applications. Les alliages d'aluminium sont classés en sept familles selon l'élément principal d'addition. Dans chaque famille, les différents alliages ont des caractères " génétiques " communs mais ont aussi chacun leur propre personnalité.

Les alliages sont communément désignés par un numéro à 4 chiffres dont le premier désigne la famille :

Les alliages sont communément désignés par un numéro à 4 chiffres dont le premier désigne la famille :

aluminium sans élément d'addition : **1000**

aluminium + cuivre : **2000**

aluminium + manganèse : **3000**

aluminium + silicium (alliages de moulage) : **4000**

aluminium + magnésium : **5000**

aluminium + magnésium + silicium : **6000**

aluminium + zinc + magnésium : **7000**

France		ISO CEN	Allemagne		USA	Grande Bretagne	
Nouveau	Ancien					Nouveau	Ancien
1000 : aluminium sans élément d'addition							
1050A	A5	Al99.5	Al99.5	3.0255	(1050)	1B	1050A
1070A	A7	Al99.7	Al99.7	3.0275	(1070)	-	-
1080	A8	Al99.8	Al99.8	3.0285	1080	1A	1080A
1200	A4	Al99.0	Al99	3.0205	-	1C	1200
2000 : aluminium + cuivre							
2011	AU5PbBi	AlCu6BiPb	AlCuBiPb	3.1655	2011	FC1	2011
2014	AU4SG	AlCu4SiMg	AlCuSiMn	3.1255	2014	(H15)	(2014A)
2017A	AU4G	AlCu4MgSi	AlCuMg1	3.1325	(2017)	-	-
2024	AU4G1	AlCu4Mg1	AlCuMg2	3.1355	2024	-	-
2030	AU4Pb	AlCuPbMg	(AlCuMgPb)	(3.1645)	-	-	-
2618A	AU2GN	AlCu2MgNi	-	-	(2618)	H16	2618A
3000 : aluminium + manganèse							
3003	AM1	AlMn1Cu	AlMnCu	3.0517	3003	(N3)	(3103)
3004	AM1G	AlMn1Mg1	AlMn1Mg1	3.0526	3004	-	-
5000 : aluminium + magnésium							
5005	AG06	AlMg1	(AlMg1)	(3.3315)	5005	N41	5005
5052	-	AlMg2.5	AlMg2.5	3.3523	5052	-	-
5056A	AG5	AlMg5	AlMg5	3.3555	(5056)	N6	5056A
5083	AG4,5	AlMg4.5Mn	AlMg4.5Mn	3.3547	5083	N8	5083
5086	AG4MC	AlMg4	AlMg4Mn	3.3545	5086	-	-
5454	-	AlMg3Mn	AlMg2.7Mn	3.3537	5454	N51	5454
5754	AG3M	AlMg3	AlMg3	3.3535	-	-	-
6000 : aluminium + magnésium + silicium							
6005A	-	AlSiMg	AlMgSi0.7	3.3210	-	-	-
6060	AGS	AlMgSi	AlMgSi0.5	3.3206	(6063)	(H9)	(6063)
6061	-	AlMg1SiCu	AlMg1SiCu	3.3211	6061	H20	6061
6082	ASGM0.7	AlSi1Mg	AlMgSi1	3.3215	-	H30	6082
7000 : aluminium + zinc + magnésium							
7020	AZ5G	AlZn4.5Mg1	AlZn4.5Mg1	3.4335	(7005)	H17	7020
7075	AZ5GU	AlZn6MgCu	AlZnMgCu1.5	3.4365	7075	-	7075

Désignation des états métallurgiques

La désignation des alliages d'aluminium est indiquée dans la norme européenne EN 515 (Aluminium et alliages d'aluminium – Produits corroyés - désignation des états métallurgiques).

Les pièces en alliage d'aluminium obtenues par déformation sont classées en état métallurgique normalisés, **classifiés par une lettre :**

F brut de transformation. Elle s'applique à une pièce après sa transformation (laminage, forgeage, filage etc. Cela sous entend qu'aucun traitement thermique n'a été réalisé et surtout qu'il n'y a pas de garantie de caractéristiques mécaniques

O recuit (le plus bas niveau de caractéristiques mécaniques), apte à l'emboutissage

H écroui. Cet état ne s'applique qu'aux alliages à durcissement par écrouissage,

T trempé . Ne s'applique qu'aux alliages à durcissement par traitement thermique.

Alliages non trempants

Appelés alliages à durcissement par écrouissage, ils obtiennent leurs caractéristiques mécaniques par une succession de déformations mécaniques et d'adoucissements par passage au four. Ce sont les alliages des familles **1000, 3000, 5000**. Leur état métallurgique est symbolisé par la **lettre H**

Niveau de dureté	écroui	écroui et restauré	écroui et stabilisé	écroui puis laqué ou vernis
1/4 dur	H12	H22	H32	H42
1/2 dur	H14	H24	H34	H44
3/4 dur	H16	H26	H36	H46
4/4 dur	H18	H28	H38	H48
Extra dur	H19			

Cas particuliers :

H 111 : Produit recuit et légèrement écroui par planage ou tractionnement.

H 112 : Produit recuit et légèrement écroui par déformation dont on spécifie les limites des caractéristiques mécaniques.

H 116 : Etat spécifique aux alliages comportant au moins 4% de magnésium dont on spécifie les limites de caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion feuilletante.

Alliages trempants

Appelés alliages à durcissement structural, ils obtiennent leurs caractéristiques mécaniques par une succession de traitement thermiques durcissants ou adoucissants. Ce sont les alliages des familles 2000, **6000, 7000**. Leur état métallurgique est symbolisé par la lettre **T**

Principaux états	Définition
T1	Trempe sur chaleur de transformation - TREMPE MURI
T3	Mise en solution séparée - TREMPE ECROUI MURI
T4	Mise en solution séparée - TREMPE MURI
T5	Trempe sur chaleur de transformation - TREMPE REVENU
T6	Mise en solution séparée - TREMPE REVENU
T7	Mise en solution séparée - TREMPE SUR-REVENU
T8	Mise en solution séparée - TREMPE ECROUI REVENU
T9	Mise en solution séparée - TREMPE REVENU ECROUI
T10	trempe sur chaleur de transformation - TREMPE REVENU ECROUI

Des chiffres complémentaires indiquent que des traitements ont été appliqués dans le but de diminuer les tensions internes

Des chiffres complémentaires indiquent que des traitements ont été appliqués dans le but de diminuer les tensions internes

TX51 ou TXX51 : diminution des tensions par traction

TX52 ou TXX52 : diminution des tensions par compression

T7X : Pour les états T7, le deuxième chiffre indique le degré de sur-revenu. Ce chiffre va de 9 (faiblement sur-revenu) à 3 (sur-revenu maximum).

Famille 1XXX

Dans cette famille), il n'y a pas d'alliages au sens strict du mot, mais des « nuances » basées sur le titre de l'aluminium.

Le **1050A** est la nuance la plus courante de l'aluminium non allié, la teneur totale des deux « impuretés » classiques de l'aluminium, fer et silicium, doit être inférieure à 0,50 %

Le 1050A convient très bien pour les applications où ne sont requises que les propriétés singulières de l'aluminium, à savoir légèreté, bonne résistance à la corrosion, bonne aptitude aux traitements de surface dont l'anodisation, sans exigence particulière de propriétés mécaniques. Il est disponible sous forme de tôles, de bandes, de tubes, de profilés, de fils.

Ses domaines d'applications sont très étendus :

- bâtiment : couverture, bardage, revêtements de façade, faux plafonds, gaines de ventilation, etc. ;
- industrie chimique et alimentaire : cuves de stockage, containers ;
- échangeurs thermiques, échangeurs tubulaires, échangeurs à plaques, ailettes d'échangeurs, capteurs plans solaires ;
- emballage : tubes souples, étuis rigides, boîtiers d'aérosols ;
- matériel ménager : ustensiles divers, roll bond pour réfrigérateurs.

Le développement important de l'aluminium dans les échangeurs thermiques et prévisible dans les systèmes solaires thermiques, est dû à l'excellente conductivité thermique de l'aluminium.

Pour l'aluminium non allié, elle est de $230 \text{ W.m}^{-1} .\text{K}^{-1}$ à 20 C , soit 60 % de celle du cuivre.

Elle est très nettement supérieure à celle de l'acier inoxydable dont la conductivité thermique n'est que de $15 \text{ à } 20 \text{ W. m}^{-1} .\text{K}^{-1}$ à 20 C , soit 10 à 15 fois moins que celle du cuivre.

Les **1100** et le **1200**, de titre inférieur au 1050A (99 % seulement), peuvent remplacer le 1050A toutes les fois où leur plasticité est suffisante et leur état de surface compatible avec l'application envisagée.

Les applications électriques l'aluminium qui sont très anciennes

– elles datent du début du XXe siècle et sont dues à sa conductivité électrique qui est de l'ordre de 2/3 de celle du cuivre. L'aluminium est paramagnétique (ou n'est pas ferromagnétique), même s'il contient une addition de fer, rarement plus que 0,50 % pour les alliages courants.

L'aluminium, sous forme de barres, de tubes, est également très utilisé dans les postes de connexion des réseaux aériens haute et moyenne tension.

La combinaison des 2 propriétés de l'aluminium « faible masse volumique et bonne conductivité électrique fait qu'à conduction égale, la masse d'un conducteur en aluminium est toujours la moitié de celle d'un conducteur en cuivre.

Le **1370** est la nuance d'aluminium non allié la plus répandue dans les applications électriques, par exemple sous forme de fils pour les câbles aériens.

L'aluminium « raffiné », le 1199, titre au moins 99,99 % d'aluminium

Plus de 70 % de la production mondiale de l'aluminium raffiné titrant entre 99,99 et 99,999 % sert à la fabrication de condensateurs électrolytiques. L'anode est constituée d'une bande mince 80 à 100 microns d'épaisseur ayant subi un traitement de surface spécial pour constituer une couche barrière (en oxyde) de très grande surface.

Du fait de son bel état de surface, de son aptitude aux traitements de surface décoratifs, le 1199 est utilisé dans des emballages de luxe, dans les réflecteurs, etc.

Le **1085**, de titre supérieur ou égal à 99,85 %, moins coûteux que le 1199, est largement utilisé dans la confection de réflecteurs d'éclairage et les concentrateurs paraboliques dans les systèmes solaires.

Famille 2XXX

C'est la plus ancienne famille d'alliages d'aluminium à durcissement structural

le « Duralumin » à 4 % de cuivre, marque déposée Allemagne par Wilm en 1909. La fabrication de cet alliage a débuté en France dès 1911, à Dives dans la Calvados, avec la création de la Société française du Duralumin.

La compréhension des phénomènes de durcissement structural mobilisa de nombreux métallurgistes en France dont Léon Guillet et André Guinier .

Étant le premier alliage d'aluminium présentant des propriétés mécaniques, comparables à celles de l'acier ordinaire, le « Duralumin », « alliage léger », contribua largement au développement de la construction aéronautique dès le début des années 1920, (et aussi dans les applications mécaniques).

C'est ce qui explique l'attention et l'intérêt des métallurgistes de l'aluminium puisque cette famille d'alliage est l'objet de très nombreuses recherches depuis 80 ans.

Les alliages de cette famille sont caractérisés par :

- un niveau de performances mécaniques élevées à l'état trempé revenu T6 ;
- une bonne tenue à chaud ;
- une bonne usinabilité.

Par contre, ces alliages, en dessous de 6 % de cuivre, ne sont pas soudables à l'arc.

Leur résistance à la corrosion est médiocre du fait de la présence du cuivre. Ils ne peuvent donc être utilisés sans protection s'ils doivent être exposés à un milieu corrosif ou, tout simplement, aux intempéries.

Le **2017A** (autrefois désigné Duralumin et A-U4G) est disponible sous formes de tôles minces et épaisses, de bandes, de fils, de profilés, de tubes, et de produits forgés et matricés.

Il est surtout utilisé:

– à l'état O pour les mises en forme difficiles (après quoi, les pièces subissent les traitements thermiques de durcissement structural) ;

– à l'état T4 pour lequel les caractéristiques mécaniques sont optimales. C'est l'état métallurgique habituel où il est disponible

Le **2014** (anciennement A-U4SG) présente à l'état T4 des propriétés voisines de celles du 2017A.

Mais, du fait de sa teneur plus élevée en silicium que celle du magnésium, ses caractéristiques mécaniques à l'état T6 sont supérieures à celles de l'état T4.

Ses principales applications sont dans l'aéronautique, la mécanique, la cryogénie.

Le **2024** (anciennement A-U4G1) présente des caractéristiques mécaniques plus élevées du fait d'une teneur en magnésium supérieure à celle du 2017A.

Cet alliage est disponible sous formes de tôles minces et épaisses, de barres et de profilés. Les applications sont, surtout, dans la construction aéronautique et la mécanique.

Les **2124** et le **2214** sont des variantes du 2024, moins chargées en fer et silicium. Ils présentent, de ce fait, une ténacité bien supérieure à celle du 2024.

Le **2618A** (anciennement A-U2GN) présente une bonne résistance au fluage à 110-150°C, une bonne tenue en fatigue à la température ambiante et jusqu'à 150 C et un niveau élevé de caractéristiques mécaniques

Ce fut l'alliage du Concorde toujours largement utilisé dans les applications aéronautiques et mécaniques

Le **2219** est l'alliage de corroyage de la famille 2000, le plus chargé en cuivre (5,8 à 6,8 %).

Il présente une excellente tenue à chaud, des caractéristiques mécaniques élevées et une bonne tenue au fluage, la meilleure pour des alliages d'aluminium dans le domaine des températures 200-300 C.

En plus, il a un bon comportement aux basses températures et une bonne soudabilité à l'arc.

Cet alliage est utilisé pour la construction des réservoirs soudés de fusées.

Les **2030** et le **2011** sont deux alliages de décolletage très usuels.

Bien que les alliages d'aluminium aient une très bonne usinabilité, il est nécessaire de favoriser la fragmentation des copeaux en ajoutant du plomb et/ou du bismuth.

Ces alliages présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques aux états T3 et T8.

Ils sont disponibles sous formes de barres étirées prêtes au décolletage et sont aptes à l'anodisation dure.

Famille 3XXX

L'addition de 0,8 à 1,5 % manganèse dans l'aluminium a pour effet d'augmenter légèrement les caractéristiques mécaniques .

Les alliages de cette famille présentent une bonne résistance à la corrosion atmosphérique, ce qui explique leur développement dans le bâtiment, les échangeurs tubulaires, les échangeurs brasés pour l'automobile et comme ailettes dans les échangeurs liquide/air.

Le **3003**, à 1 % de manganèse (très « vieil » alliage, il date de 1906) est le plus usuel de cette famille.

Facile à mettre en œuvre, facile à souder à l'arc, il remplace le 1050A dès que l'application exige un léger surcroît de caractéristiques mécaniques.

Il est disponible sous forme de tôles et de tubes. L'addition de magnésium dans les alliages au manganèse permet de combiner les effets du durcissement du manganèse (par AlMn6) et du magnésium (dissolution dans la solution solide).

Le **3004**, introduit en 1929, a des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles du 3003, mais une moindre aptitude à la déformation. Il est très utilisé dans le boîtage (corps de canettes) et l'emballage.

Les **3005** et le **3105** présentent des propriétés intermédiaires entre le 3003 et le 3004. Leurs applications sont également très nombreuses : bâtiment, décoration intérieure (tôles laquées), etc.

Famille 4XXX

Il y a deux catégories d'alliages de corroyage au silicium :

les **4006** et **4007**

leur teneur en silicium est inférieure à 2 %, avec ou sans manganèse.

Ils sont mis en forme à l'état recuit .

Leur principale application est la fabrication d'ustensiles culinaires émaillés. La cuisson de l'émail, effectuée à haute température, vers 550°C, pendant un temps court, suivie d'un refroidissement rapide, produit un léger effet de mise en solution et de trempe, suffisant pour durcir le métal.

les **4004, 4104, 4043A**

leur teneur en silicium va de 5 à 13 %, avec diverses additions.

.Ils sont co-laminés avec des alliages des familles 3000 ou 6000, pour servir de brasure dans l'assemblage des échangeurs thermiques pour l'automobile, les unités de liquéfaction du gaz naturel, etc.

Pour le soudage à l'arc TIG et MIG, on utilise couramment du fil d'apport en 4043A.

Famille 5XXX

Les alliages au magnésium, dont le développement industriel commence dans les années 1930, représentent une part très importante des produits corroyés en alliage d'aluminium. Les applications industrielles sont très étendues.

Comme indiqué précédemment, les alliages corroyés industriels ne contiennent guère plus de 5 % de magnésium.

Au-delà de cette teneur, la stabilité structurelle de l'alliage diminue, surtout sous l'effet de la température.

Le maintien prolongé en température provoque la précipitation aux joints de grains du composé intermétallique Al_3Mg_2 .

Il est possible, si l'application l'exige, d'effectuer des traitements thermiques (états H116, H3X) de stabilisation pour les alliages contenant 3 % et plus de magnésium.

Les alliages de la famille 5000 contiennent, le plus souvent, d'autres additions, telles que le manganèse, le chrome, le titane, dont l'effet est d'augmenter la résistance mécanique et/ou d'améliorer certaines propriétés : résistance à la corrosion, soudabilité, entre autres.

Ces alliages présentent :

- une bonne aptitude au soudage, à l'exception des alliages titrant entre 1,8 et 2,2 % de magnésium.

La résistance mécanique d'un joint soudé est sensiblement égale à celle mesurée en pleine tôle à l'état recuit ;

- un bon comportement aux basses températures ;

- une excellente résistance à la corrosion, qu'ils soient soudés ou non.

Leur tenue à la corrosion en milieu marin en a fait les alliages « marine » par excellence ;

- une aptitude aux traitements de surface.

Brillantage ou anodisation leur confèrent de très beaux aspects de surface, surtout si l'alliage est élaboré à partir d'une base faiblement chargée en fer et silicium, ce qui est le cas du 5657 (base 1080).

Le **5005** à 0,6 % de magnésium qui remplace l'aluminium 1050A ou 1200 lorsqu'une légère augmentation des propriétés mécaniques est nécessaire.

Anodisé ou prélaqué en bande, il est très largement utilisé dans le bâtiment (façades, etc.).

Le **5657** est une variante du 5005 dont la base plus pure (1085) permet d'obtenir des « qualités spéciales » pour l'emballage des cosmétiques, les luminaires et la décoration.

Le **5052**, à 2,5 % de magnésium avec addition de chrome, présente un bon compromis de résistance mécanique, d'aptitude à la mise en forme, de résistance à la fatigue et de résistance à la corrosion. Il est très utilisé à l'état H28 pour la fabrication de boîtes alimentaires, et dans un grand nombre d'applications de type chaudronnerie, carrosserie industrielle, signalisation routière, etc.

Le **5049**, sans chrome mais avec du manganèse, est une variante du 5052, très utilisé dans la bande pour calorifugeage et la chaudronnerie.

Le **5754** (autrefois A-G3M), contenant de 2,6 à 3,6 % de magnésium, avec des additions mineures de manganèse et de chrome (Mn + Cr 0,1 à 0,6 %), est utilisé dans la chaudronnerie industrielle, les véhicules industriels, le bâtiment, les travaux publics, les industries mécaniques.

Les **5086** et le **5083**, contenant de 3,5 à 5 % de magnésium, avec additions de manganèse et de chrome, offrent les caractéristiques mécaniques les plus élevées des demi-produits laminés de la famille 5000, y compris aux températures « cryogéniques » .

Ils ont une très bonne aptitude au soudage MIG et TIG et une remarquable tenue à la corrosion, en particulier en milieu marin.

Ils ont connu un très large développement en chaudronnerie navale et industrielle depuis 1950

Le **5383** contient également 4 à 5 % de magnésium, mais il se distingue des précédents par une très forte teneur en manganèse (0,7 %) et une faible teneur en fer.

Par rapport au 5086 et 5083, ce nouvel alliage présente à l'état soudé des caractéristiques mécaniques améliorées.

Il est très utilisé en chaudronnerie et en construction navale

Le **5182**, contenant de 4 à 5 % de magnésium, mais moins chargé en fer et silicium, présente à l'état recuit un bon compromis entre résistance mécanique et aptitude à la mise en forme. Il est utilisé comme renfort intérieur pour l'automobile.

Verni, à l'état H28, il conserve un bon niveau de résistance mécanique et une capacité résiduelle de déformation pour en faire des couvercles de boîtes de boisson.

Le **5019**, à 5 % de magnésium, est réservé pour des applications spécifiques : fils pour rivets, fermetures éclair, agrafes alimentaires.

Famille 6XXX

Les deux éléments d'alliage de la famille 6000 sont le magnésium et le silicium. Ces alliages présentent :

- une bonne aptitude à la transformation à chaud par laminage, par filage et par forgeage ;
- une bonne résistance à la corrosion, atmosphérique
- un bon niveau de caractéristiques mécaniques qui peut être amélioré, soit par addition de silicium, au-delà de la teneur stœchiométrique dans le précipité durcissant Mg_2Si , soit par addition de cuivre ;
- une bonne aptitude au soudage à l'arc, ainsi qu'au brasage ;
- une bonne aptitude à la mise en forme à froid (cintrage de profilés, emboutissage de tôles) à l'état O, et, à un degré moindre, à l'état T4 ;
- un bel aspect de surface après brillantage ou anodisation.

Tout cela explique le très grand développement des applications de cette famille d'alliages dans la menuiserie métallique, en particulier (la consommation mondiale annuelle de produits filés en 6000 est de l'ordre de 7 millions de tonnes).

Ils sont disponibles soit :

- exclusivement en demi-produits filés : 6005A, 6106, 6056, 6060, 6262 ;
- en demi-produits laminés et filés, le 6061 et le 6082.

Le **6060** constitue l'alliage de filage par excellence.

Il permet d'obtenir des formes très complexes.

Il peut être trempé directement à la sortie de presse, (état T5). Il existe plusieurs variantes, basées sur des teneurs en Mg et Si variables, avec additions éventuelles de cuivre ou de chrome.

Toutes tendent à améliorer telle ou telle propriété(ou à optimiser un ensemble de propriétés) : filabilité, aspect de surface, aptitude à l'anodisation, caractéristiques mécaniques, etc.

Le **6005A** a une bonne filabilité, il est trempable en sortie de presse.

À l'état T5, il a une résistance mécanique de l'ordre de 290 MPa.

C'est un alliage qui présente une remarquable ténacité. Il peut donc être utilisé comme élément de structure, dans les véhicules industriels, en construction ferroviaire, dans les applications mécaniques, etc.

Le **6106** est un alliage de filage spécialement développé pour de nombreuses applications « structurales légères ». Il présente une très bonne filabilité, une bonne aptitude à la trempe sur presse et a un bon niveau de résistance mécanique (de l'ordre de 265 MPa) intermédiaire entre celui du 6060 et du 6005A.

Le **6056** présente, à l'état T6, les caractéristiques mécaniques les plus élevées de cette famille d'alliage : Rm 450 à 470 MPa.

Il est utilisé comme renfort de portières pour automobiles.

Le **6262**, avec additions de plomb et de bismuth pour faciliter une bonne fragmentation des copeaux, est un alliage de décolletage.

Le **6082** présente des caractéristiques mécaniques élevées de 320 à 340 MPa à l'état T6. Comme le 6005A, il est très utilisé dans les véhicules industriels, en constructions ferroviaire et navale, dans les applications mécaniques et en ébauche de forge.

Le **6016** présente un niveau de résistance mécanique moyen : 220 MPa, associé à une bonne aptitude à la mise en forme par emboutissage à l'état T4. Il est largement utilisé dans le domaine de la carrosserie automobile.

Le **6061** (d'origine américaine – 1925) est un alliage à moyenne résistance (310 MPa sur T6). On le trouve sous formes de produits filés (barres, profilés, tubes), étirés, laminés et forgés. Il est utilisé chaque fois que l'on a besoin de structure à résistance moyenne, apte à résister à la corrosion. Ses applications sont diverses : transports (ferroviaire, véhicules industriels), tuyauteries (pipelines), pièces chaudronnées soudées, applications mécaniques, tubes pour mobilier.

Le **6101** (anciennement Almelec) est l'alliage pour conducteur électrique, développé à partir de 1925.

Il présente un bon compromis entre les caractéristiques mécaniques, la conductivité électrique, et la résistance à la corrosion atmosphérique. Les câbles aériens nus sont en 6101.

Famille 7XXX

Ces alliages sont d'un développement plus récent que les « duralumins » et correspondent à la fin des années 1930.

Ils ont fait l'objet d'intenses recherches métallurgiques, depuis 30 ans, en vue de leurs applications à la construction aéronautique, au point qu'ils y occupent maintenant une place privilégiée.

Il existe deux groupes d'alliages dans cette famille : sans cuivre et avec cuivre.

7000 sans addition de cuivre

La plupart de ces alliages ont un intervalle de mise en solution très étendu, de 320 à 550°C, et une faible sensibilité à la vitesse de trempe, au point que la trempe peut être faite à l'air libre ou, au mieux, à l'air pulsé.

Ils sont capables de durcissement par simple maturation à la température ambiante, qui peut être complété par un double revenu à basse température, effectué après une maturation de 5 jours à la température ambiante :

–4H à 100 C + 24 H à 140 C pour l'état T5 ;

–4H à 100 C + 24 H à 160 C pour l'état T6.

Ils sont soudables à l'arc et, fait marquant pour les alliages d'aluminium, les caractéristiques mécaniques des pièces soudées sont très proches de celles de l'état T4 (parce que ces alliages, comme indiqué précédemment, sont capables de durcir par maturation).

La zone affectée thermiquement retrouve donc les caractéristiques mécaniques du métal de base.

Mais, ces alliages présentent une forte sensibilité à la corrosion de la zone affectée thermiquement, de part et d'autre du cordon de soudure.

En dépit de nombreuses recherches métallurgiques, on ne sait toujours pas désensibiliser les zones soudées sans faire de revenu après soudage, ce qui est impossible sur de grandes structures.

Cet handicap réduit singulièrement les applications de structures soudées à des applications dont on est certain qu'elles sont à l'abri de tout risque de corrosion feuilletante, parce que bien protégées et bien surveillées.

Le **7020** est l'alliage le plus utilisé en demi-produits laminés ou filés dans différents domaines : transports, applications mécaniques, armement.

À l'état trempé revenu (T5 ou T6), qui est l'état normal d'utilisation, sa résistance mécanique est de l'ordre de 360 à 400 MPa.

La résistance à la corrosion est satisfaisante, s'il n'est pas soudé.

La résistance à chaud est relativement faible, dès que la température dépasse 120 à 130 C.

Des chauffages à température supérieure à 200 C peuvent sensibiliser l'alliage à la corrosion feuilletante.

Cet alliage possède une soudabilité à l'arc satisfaisante (avec métal d'apport 5356) et l'on obtient après soudage des caractéristiques mécaniques équivalentes à celles du métal de base à l'état T4.

7000 avec addition de cuivre

L'addition de cuivre au système aluminium-zinc-magnésium produit les alliages d'aluminium les plus résistants qui soient sur le plan mécanique, à l'état T6.

Pour obtenir des produits résistants à la corrosion en atmosphère agressive et, en particulier, résistants à la corrosion sous contrainte, orientée dans le sens travers court, il est nécessaire de pratiquer des doubles revenus (état T73 et T76) avec, en contrepartie, une baisse (de l'ordre de 20 %) des caractéristiques mécaniques.

L'alliage **7075** est le plus couramment utilisé en produits laminés, filés, forgés et matricés, dans les domaines de l'aéronautique, des applications mécaniques, du matériel de sport et de loisirs.

Soudage des alliages d'aluminium



Les modes opératoires de soudage (MOS) doivent tenir compte des facteurs suivants :

Conductivité thermique élevée

Apport de chaleur important

Pour atténuer le phénomène,

- soudage de sections égales
- talons de faible épaisseur
- chanfrein en V à 40° mini (accessibilité et bonne fusion des bords)

Couche d'alumine

Température de fusion: 2050°C

Température de fusion des alliages d'aluminium : de 575°C à 655°C

- contient de l'eau de cristallisation et absorbe l'humidité (formation des soufflures)
- tenace (ne s'effrite pas) : les inclusions sont des fragments de film d'alumine équivalent à des défauts de type fissure ou collage.

Avant soudage, il faudra donc :

- éliminer la couche d'alumine (usinage, décapage, grattage)
- briser la carre envers

Soufflures

- Oxydes d'aluminium très hygroscopique
- très faible solubilité de H₂ dans Al solide. (19x plus soluble dans le liquide que le solide)
- solidification très rapide

Rappel : Dans 90 % des cas, H₂ provient de surfaces sales ou de l'humidité adsorbée par les produits.

Dans quelques cas, H₂ provient du métal de base lui-même, et du métal d'apport.

Il est donc recommandé de :

- Nettoyer les métaux de base et les métaux d'apport (décapage)
- n'employer que des produits propres et secs
- protection des produits d'apport de toute contamination
- meuler les points
- bonne protection gazeuse
- préchauffer les pièces (100 °C)
- souder **rapidement** après décapage

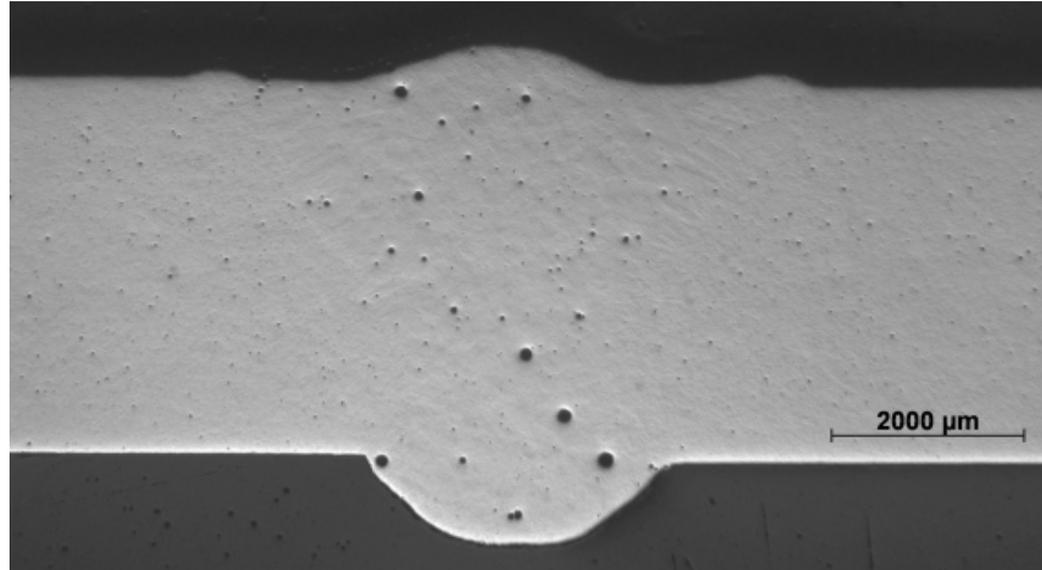


Fig. 2: Exemple d'une soudure poreuse

Sources d'hydrogène

- Humidité :
 - Air ambiant
 - Oxydes d'aluminium
 - Fuite refroidissement torche
 - Air dans le gaz
 - Condensation
- Hydrocarbures
 - Impuretés
 - Huile, graisse, (mains ou gants)

**Dégraissage,
Nettoyage mécanique
Nettoyage chimique**



Fissuration à chaud

Influence du Magnésium (Mg) et de Silicium (Si)

- Adapter la préparation du joint et limiter la dilution (choix du bon métal d'apport)
- éviter le bridage
- vitesse de refroidissement élevée pour limiter les ségrégations

Fig. 5: Exemple d'une fissure à la solidification au coeur d'une soudure TIG aluminium (alliage extrudé avec 0,8% Si)



Pureté

éliminer impuretés
traiter fil d'apport avec soins

- conserver endroit sec
- maintenir emballage fermé
- ne pas toucher à mains nues

Sensibilité forte alliages 6xxx, 7xxx et 8xxx

diminué par utilisation de métal apport à grand intervalle de fusion (4xxx)

Fissuration à la solidification

- tensions de retrait transversales élevées car fort coefficient de dilatation
fissures en cœur de soudure lors de la solidification

Causes probables: métal d'apport inapproprié
forme défavorable de la soudure
retrait empêché à cause de la géométrie

Cordons suffisamment épais pour avoir une section suffisante

Préparation des joints,
Séquences de soudage
amenée de métal d'apport jusqu'au bout (marche arrière)

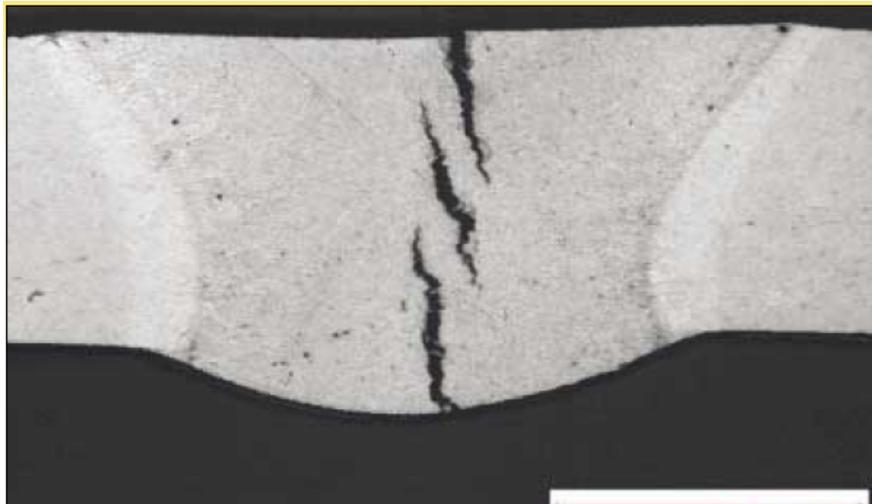


Fig. 6: Coupe d'une fissure à la solidification

Fig. 7: Exemple d'une fissure de cratère typique

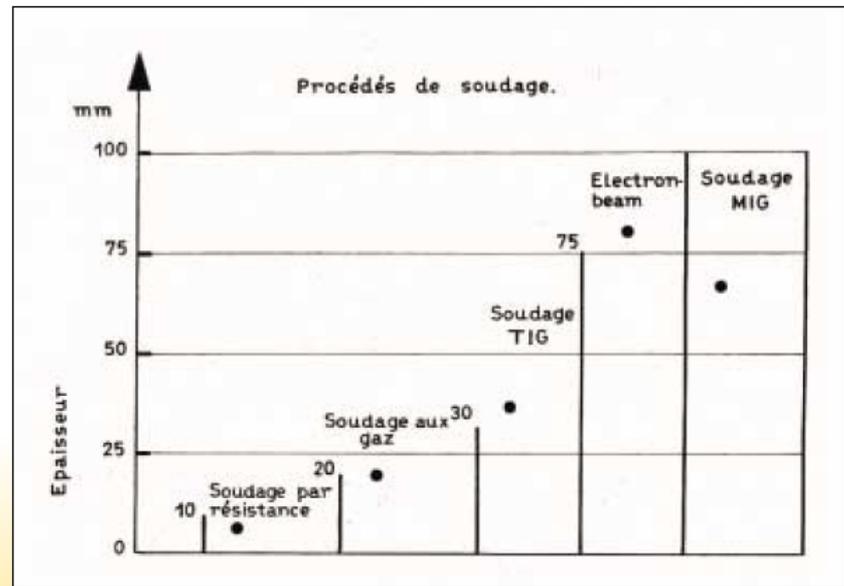


Collages, manque de fusion

Pas assez d'énergie

forte conduction

choix du bon procédé



Mauvais aspect

savoir faire

Procédés de soudage

soudage TIG:

CA carré

balance: décapage
couche d'alumine

Gaz : Argon, Argon-Hélium

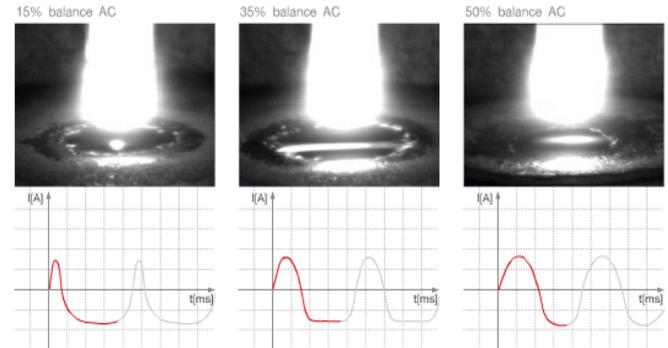
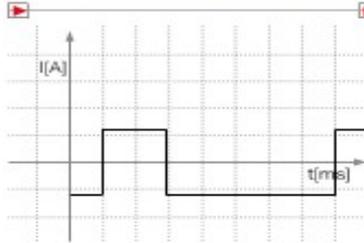
Electrode W pur: pas d'affutage boule
W lanthane : affutage micro-boule

Décapage + casser les cares

Aluminium très conducteur thermique
réguler paramètres (vitesse ou pédale)

Épaisseur 0,5 à 6 mm

Plasma : applications particulières



Procédés de soudage

soudage TIG: CA

Soudage MIG, MIG pulsé

FE

Laser : réflexion

Soudage par points

FSW

Placage par explosion



Soudage MIG, MIG pulsé

CC+ (décapage)

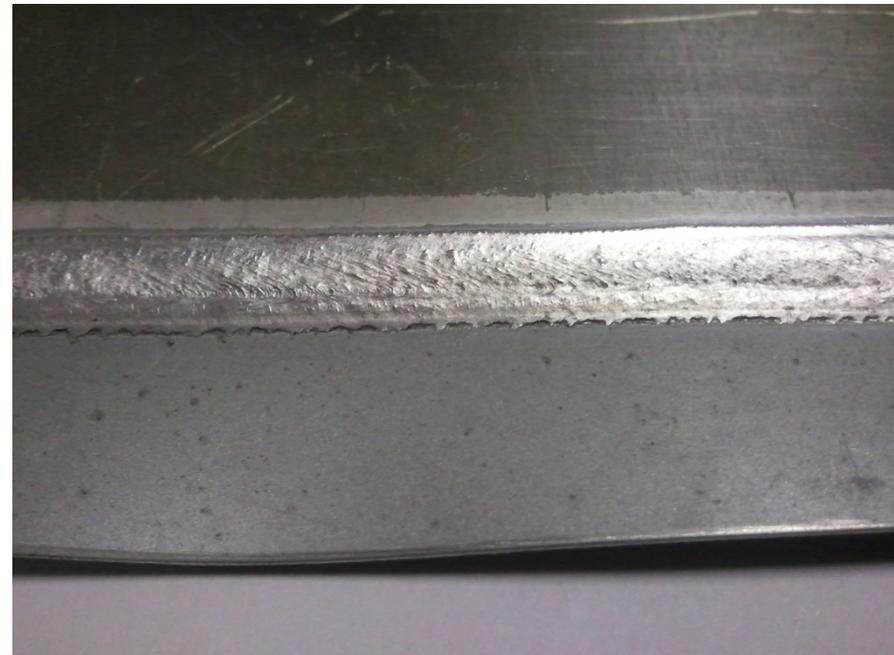
facilité en Courant pulsé
postes synergiques

Argon, Argon-Hélium

Gaine téflon

À partir de 2 mm d'épaisseur + multi-passes

Nettoyage du fil et des tôles



HDE

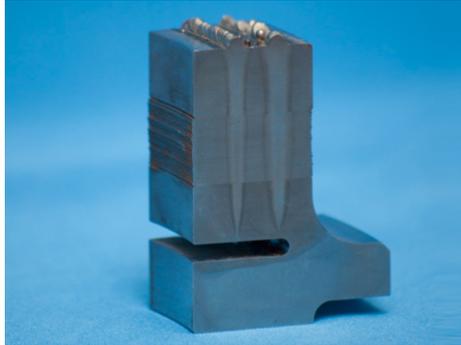
FE

Bonne protection car vide

Fortes épaisseur en mono-passe

ZAT réduite

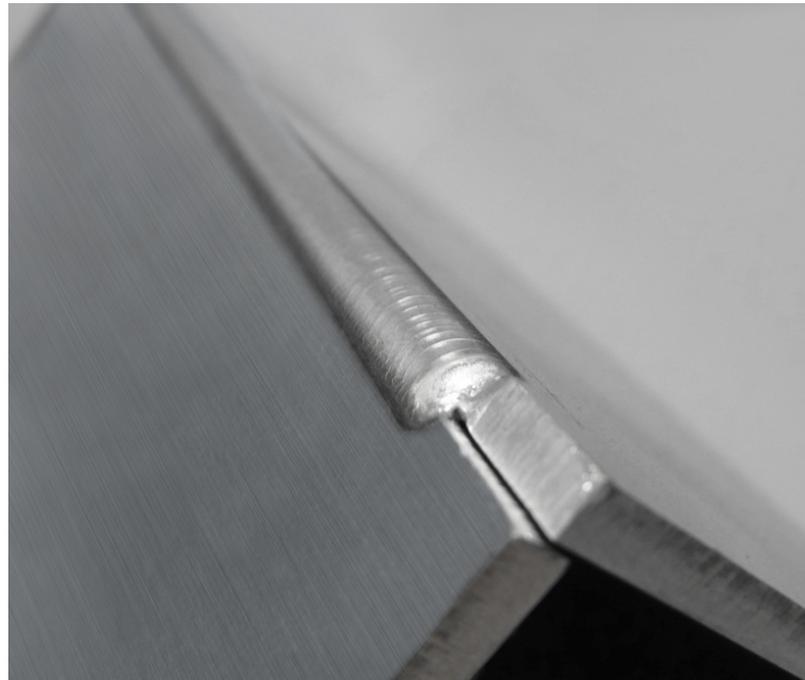
Possibilité de souder facilement serie 2xxx



Laser

ZAT faible

réflexion



SOUDAGE DES ALUMINIUMS



METAL De BASE	7020	6082	6101,6060 6063,6005	5083,5056 5086	5052,5454 5754	5005 5050	3103	1050A 1445,1200
Fam. 1000 1050 A 1445 1200	Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn	Si 5 Si 5 Si 5	Si 5 Si 5 Si 5	Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn	Si 5 Si 5 Si 5	Si 5 99.5 99.5	Si 5 99.5 Si 5	Si 5 99.5 Si 5
Fam.3000 3103	Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn	Si 5 Si 5 Si 5	Si 5 Si 5 Si 5	Mg 5 Mg 5 Mg 5	Si 5 Si 5 Si 5	Mg 5 Mg 5 Mg 5	Si 5 99.5 Si 5	
Fam.5000 5005 5050	Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn	Si 5 Si 5 Si 5	Si 5 Si 5 Si 5	Mg 5 Mg 4.5 Mn Mg 5	Mg 5 Mg 5 Si 5	Mg 3 Mg 3 Mg 3		
5052 5454 5754	Mg 4.5 Mn Mg 5 Mg 5	Mg 5 Mg 5 Mg 5	Mg 5 Mg 5 Mg 5	Mg 4.5 Mn Mg 5 Mg 5	Mg 5 Mg 3 Mg 5			
5083 5056 5086	Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn Mg 5	Mg 5 Mg 5 Mg 5	Mg 5 Mg 5 Mg 5	Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn				
Fam.6000 6001 6060 6063 6005	Mg 5 – Mg 5	Si 5 Si 5 Si 5	Mg 5 Si 5 Si 5					
6082	Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn	Si 5 Si 5 Si 5						
Fam.2000 2014	Mg 5 Mg 5 Mg 5							
Fami.7000 7020	Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn Mg 4.5 Mn							

Résistance maxi Rm: 1ere ligne.
 Résistance maxi corrosion : 2ème ligne.
 Résistance optima. fissuration : 3ème ligne.

METAL D'APPORT

AL :1100
 ALSI12 :4047
 ALSI 5 :4043
 ALMG 3 :5154
 ALMG 5 :5356
 ALMG4.5MN :5183



NB :

–Tous les alliages des familles 1000, 3000, 5000 et 6000 sont soudables à l'arc. Il en est de même des pièces moulées en sable ou en coquille (Al-Si,Al-Si-Mg,Al-Mg). Tous ces alliages sont soudables entre eux.
 –Par contre les alliages des familles 2000 et 7000 à de rare exception près (c'est le cas du 2219 et du 7020) ne sont pas soudables.

La plupart des alliages des familles 1000 et 5000 : 1050A, 5754, 5083 etc...sont soudables en TIG sans métal d'apport, ce n'est jamais le cas des 6000.

Les critères de choix des alliages de soudage, fil ou baguettes, sont essentiellement :

–Leur aptitude à former un cordon exempt de fissures.

–Les performances mécaniques qu'ils confèrent aux joints soudés.

La plupart des alliages d'apport appartiennent aux familles 1000, 4000 et 5000 (tableau ci-dessous dans lequel les alliages d'apport usuels sont soulignés). Les normes, les règlements des sociétés de classification peuvent imposer certains alliages. C'est ainsi qu'en chaudronnerie navale, la plupart des sociétés de classification imposent le 5183 comme métal d'apport pour souder les tôles de la famille 5000.

Procédés de soudage

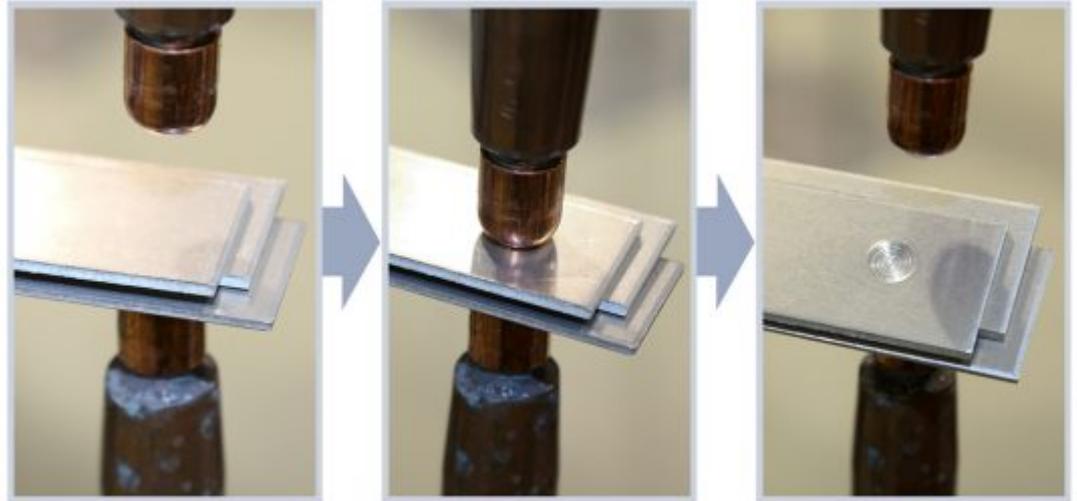
Soudage par résistance

Temps de soudage très court

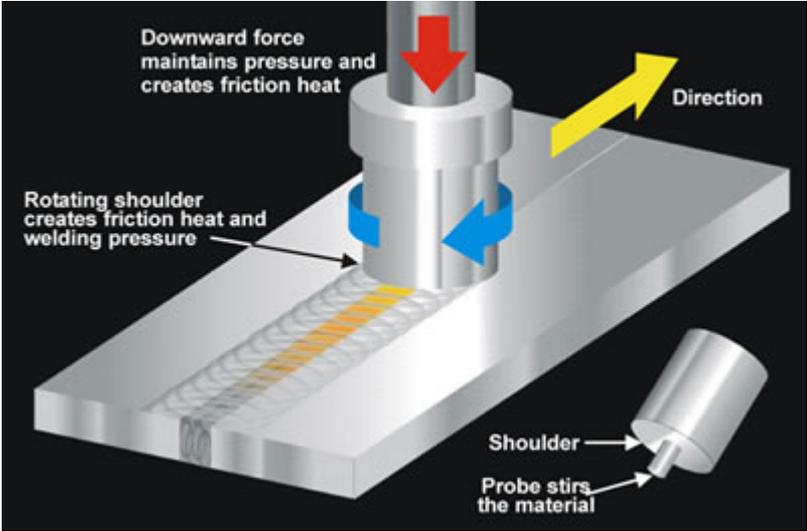
Intensité très élevée

Indentation

Tôles fines



FSW



Placage par explosion

Multi-matériau

