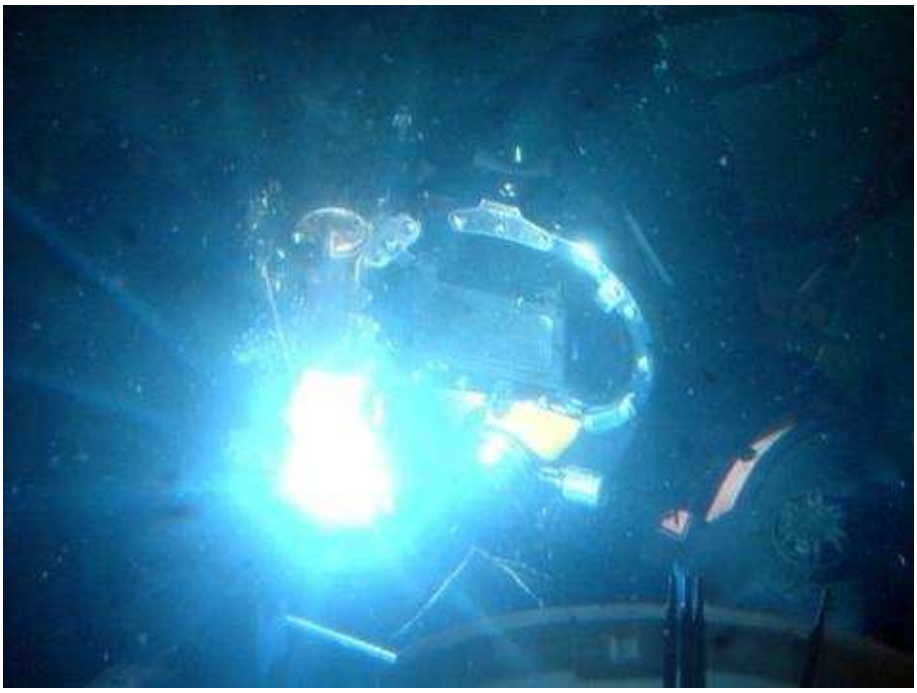
AIDE A LA QUALIFICATION AU SOUDAGE EN PLEINE EAU



Par
Francis Hermans
Octobre 2005

Sommaire

Préface	4
Introduction	5
Historique	5
Le soudage en caisson	7
Le soudage hyperbare	8
Le soudage en pleine eau	9
Principe du soudage à l'arc	10
Principe du soudage à l'électrode enrobée	11
Installation et équipement pour le soudage en pleine eau	13
Les postes de soudage	14
Les postes statiques	14
Les postes rotatifs	15
Caractéristique tombante de l'appareil de soudage	16
Facteur de marche	17
Câble de soudage	17
Pince porte – électrode	18
Pince de masse	19
Broches de connexion	20
Coupe – circuit	20
Verre teinté	21
Les accessoires	22
Description de la fiche technique de l'électrode	23
Les types d'enrobage	24
Identification des électrodes	27
Composition du métal déposé	30
Propriétés du métal déposé	31
Essai de traction	32
La limite d'élasticité	33
La résistance à la traction	33
L'allongement	33
La striction	34
Essais de dureté	34
Essais de résilience	35
Essais de pliage	36
Relation entre les propriétés mécaniques	37
Les caractéristiques électriques	38
Le courant	38
Les types de courant	39
Préparation et technique du soudage en pleine eau	42
Inspection préparatoire	42
DMOS et QMOS	43

Procédure de travail 43
Plan Hygiène et Sécurité 43
Préparation des pièces à souder 43
Installation du chantier 43
Préparation du support 44
Positionnement des pièces 45
Pointage 46
Soudage 47
Mode d'exécution des cordons de soudure 47
Soudage multi – passes 51
Diamètre de l'électrode 53
Intensité du courant de soudage 54
Résistance des cordons de soudure 54
Polarité 54
Contrôle des soudures 56
L'inspection visuelle 56
Le contrôle magnétique 56
Le contrôle par ultra – sons 57
Le contrôle radiographique 57
Les positions de soudage 58
Positions de travail AWS A3.0 59
Positions de travail EN ISO 6947 61
Défauts de soudage 61
Les Fissures 61
Fissuration à froid 62
Fissuration à chaud 63
Les cavités 63
Les inclusions solides 64
Manque de fusion et de pénétration 65
Défauts de forme et défauts dimensionnels 66
Les défauts divers 67
Soudures classe B 67
Soudures classe C 68
Problèmes de soudage 69
Soufflage magnétique 69
Méthode de réduction du soufflage magnétique 71
Les risques 72
Les risques électriques 72
Les risques d'explosion 74
Les brûlures 75
La sidérurgie 76
Fabrication de l'acier 76
Constitution et fonctionnement d'un haut fourneau 77

Types d’acier 78
Métallurgie 81
Carbone Equivalent 88
Les qualifications 89
Le Descriptif du Mode Opératoire de Soudage 89
Questionnaire 97
Test de connaissance générale 98
Bibliographie 105

Préface

Photo n° 1 : Plongeur soudeur en action (doc. Internet)

Depuis 2001 nous avons maintenant en Europe la nouvelle norme EN ISO 15618-1 qui définit les principes à appliquer pour la qualification des plongeurs soudeurs.
Outre la réalisation sous eau d'une éprouvette, le plongeur soudeur devra également pouvoir prouver une certaine connaissance théorique de tous ce qui tourne autour de la soudure.
Le présent guide, ne prétend pas être un manuel de soudage destiné à former des plongeurs soudeurs.
Il est plutôt destiné à donner les connaissances théoriques aux plongeurs qui préparent une qualification de soudage ou qui tout simplement désirent en savoir plus sur le soudage en pleine eau.
Loin d'être exhaustif, ce guide reprend néanmoins une grande partie des sujets abordés dans le test de connaissance.

Introduction

Photo n° 2 : Réalisation d'une soudure en plafond (doc. Hydroweld)

Historique

Les premiers essais de soudage à l'arc électrique furent réalisés au cours de l'année 1889 par le russe Slavianov.

Durant les premières années de sa mise en œuvre, la soudure à l'arc fut réalisée avec des électrodes nues qui étaient constituées par une simple baguette métallique de composition appropriée à celle du métal à souder.

A cause de cela, les soudures étaient de piètres qualités car le bain de fusion n'était pas protégé de l'air ambiant. Ceci qui avait comme conséquence de le polluer par des oxydes divers.

Ce n'est qu'au début du 20 ième siècle, que les chercheurs ont découvert que pour améliorer les soudures il fallait absolument protéger le bain de fusion.

A l'époque, différentes méthodes furent essayées pour finalement aboutir à la mise au point d'électrodes enrobées.

Ce n'est cependant que vers 1920 que cette technique d'assemblage a réellement pris son essor.

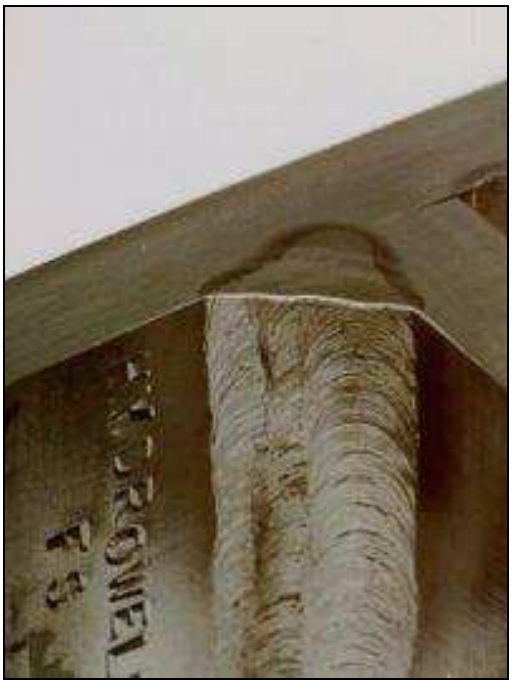
En ce qui concerne le soudage sous eau, ce fut l'anglais Humphrey Davey, qui déjà en 1802 découvrit qu'un arc électrique pouvait être maintenu sous eau, mais ce n'est que vers 1917 que les premiers travaux de soudure immergée furent réalisés par des plongeurs anglais pour l'étanchement de rivets sur les coques de navire.

Ensuite, pendant près de 40 ans, cette technique ne fut qu'accessoirement mise en œuvre pour des travaux de réparation temporaire.

Ceci était principalement dû au fait que le matériel de soudage ainsi que les consommables utilisés n'étaient pas adaptés au milieu sous-marin et de ce fait les soudures était souvent de qualité médiocre et présentaient de nombreux défauts.
En France, ce procédé fut pour la première fois intensément utilisé en 1946, à l'occasion du renflouage du cargo PATRAI qui avait été coulé par une bombe.
Depuis les années 1980, grâce au développement du marché offshore, on a pu observer un regain d'intérêt pour cette technique qui est maintenant couramment utilisée.

L'apport de nouveaux produits, ainsi que le développement de modes opératoires plus adaptés ont permis de réaliser des soudures de qualité qui peuvent être dans certains cas de qualité comparables à celle d'une soudure de surface.

Photo n° 3 : Eprouvette sous-marine (doc.Hydroweld Internet)



Grâce à cela, le soudage sous eau est devenu une technique à part entière et susceptible de respecter des normes de soudage assez poussées puisque même l'industrie nucléaire y fait régulièrement appel.

Trois méthodes différentes permettent de réaliser des soudures sous eau :

- Le soudage en caisson
- Le soudage hyperbare
- Le soudage en pleine eau

Le soudage en caisson

Les caissons sont des batardeaux de formes diverses qui viennent se fixer autour de la zone de soudage et dont la partie supérieure se retrouve hors de l'eau.
Une étanchéité parfaite doit être réalisée autour des bords de la chambre de manière à pouvoir la vider de son eau.
Une fois l'enceinte mise à sec, le travail de soudage peut être réalisé à pression atmosphérique.
Cette technique a le désavantage de ne pouvoir être mise en œuvre que sous des hauteurs d'eau relativement faibles. (0 – 20 m).

Photo n° 4 : Caisson MOBDOCK (doc. HYDREX Internet)

Le soudage hyperbare

Avec cette méthode de soudage, la pièce à souder est protégée par une enceinte ouverte dans sa partie inférieure et dans laquelle l'eau à été chassée par de l'air comprimé, de l'héliox ou par un gaz inerte.

Les chambres hyperbares peuvent être de dimensions diverses allant du mini caisson en plexiglas pesant à peine quelques dizaines de kilos, à la chambre de soudure équipé de vérins d'alignements et pesant plusieurs tonnes.

Ces derniers types de chambre hyperbare sont alors beaucoup plus sophistiqués et sont souvent équipées d'un système de régénération des gaz.

Elles permettent aux plongeurs soudeurs de travailler en salopette et ont par ailleurs l'avantage de rendre possible la réalisation de soudure de qualité jusqu'à de très grande profondeur (350 – 400 m).

Fig. n° 1 : Installation de la chambre de soudure hyperbare (doc. Internet)

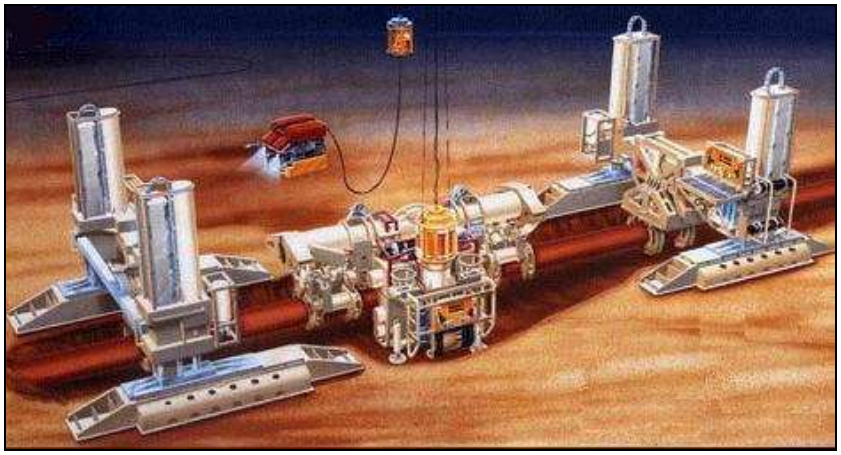
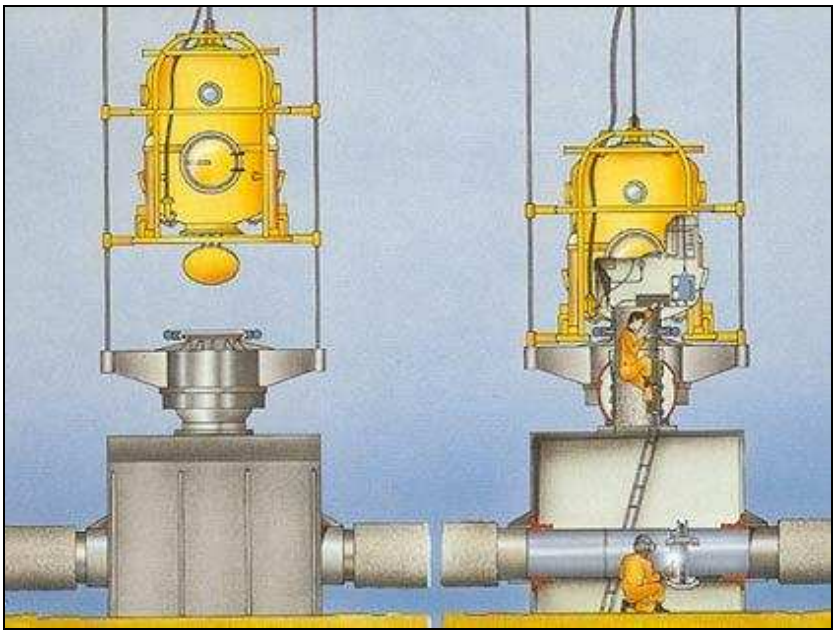


Fig. n° 2 : Soudage en condition hyperbare (doc. Internet)



Le soudage en pleine eau

Le soudage en pleine eau sous entend que le plongeur soudeur, mais également les pièces à souder se trouvent dans le milieu ambiant.
Ce type de procédé est de loin le plus facile et le plus économique à réaliser, mais actuellement, il est rarement utilisé à des profondeurs supérieures à 40 – 50 mètres.
La plupart des soudures en pleine eau sont réalisées dans les travaux suivants :

Travaux de maintenance :

- Maintenance structurale.
- Construction légère.
- Installation et connexion d'anodes sacrificielles.

Travaux de réparation :

- Réparation de fissures.
- Colmatage de perforations ou de fuites.

Travaux de renforcement :
Installation de doublantes, de goussets ou d'entretoises.

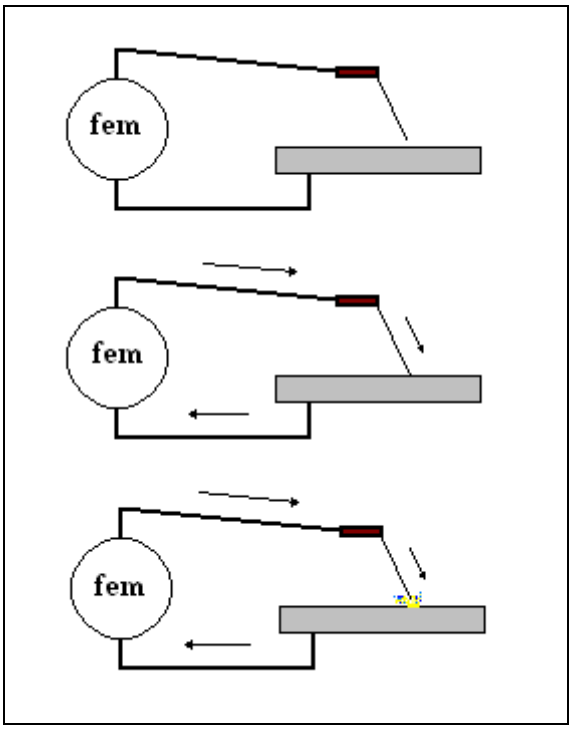
Dans le présent guide, seul le soudage en pleine eau sera passé en revue.

Photos n° 5 : Soudage en pleine eau (doc. Internet)

Principe du soudage à l'arc

Le soudage à l'arc est un procédé qui permet l'assemblage de pièces de métal, grâce à la fusion simultanée du bord des pièces et par l'apport du métal de même nature contenu dans l'électrode.
Le principe de fonctionnement en surface est le suivant :
Les bornes positives et négatives d'une source de courant (continu ou alternatif) sont reliées par des câbles, l'un à la pièce à souder, l'autre à la pince à souder munie d'une électrode.
Tant qu'il n'y a pas contact entre la pièce à souder et l'électrode, le circuit est dit « ouvert » et aucun courant ne peut circuler.

Fig. n° 3 : Principe du soudage à l'arc



Si l'on ferme le circuit en touchant la pièce avec l'extrémité de l'électrode, cela aura pour effet de permettre le passage du courant dit de « court-circuit » ce qui provoquera alors l'échauffement du circuit entier, mais plus particulièrement l'endroit où la résistance au passage du courant est la plus forte c'est-à-dire entre le bout de l'électrode et la pièce à souder.
Suite à l'échauffement excessif, l'extrémité de l'électrode va rapidement rougir et provoquer l'ionisation de l'air au voisinage immédiat du point de contact.
Si l'on écarte alors le bout de l'électrode de 1 à 3mm de la pièce, le courant continuera à passer de l'un à l'autre au travers de l'air devenu conducteur tout en produisant un arc lumineux dont la température avoisine les 5000° C
Au point d'impact de l'arc électrique une petite zone de métal va entrer en fusion. Le métal fondu de l'électrode va passer sur la pièce à souder sous forme d'une pluie de petites gouttes de 0,2 à 3 mm de diamètre et être maintenu en place dans le bain de fusion par capillarité.
Dès que l'arc est amorcé, l'électrode est déplacée progressivement le long des pièces à souder et le métal d'apport est déposé dans le joint sous la forme d'un *cordon de soudure.*

Pendant cette opération, l'électrode doit également être abaissée à une vitesse correspondant à la fusion.
Si l'abaissement est trop rapide, l'extrémité de la baguette va venir se coller contre la pièce et suite au court-circuit ainsi produit, va rapidement rougir tout en la mettant hors d'usage.
Si au contraire, le déplacement vertical est trop lent et que le bout de l'électrode s'écarte trop de la pièce, la résistance électrique va devenir trop importante et l'arc s'éteint.

Divers procédés de soudure à l'arc électrique existe actuelle parmi lesquels on peut citer :

- Le soudage manuel à l'électrode enrobée
- Le T.I.G (tungsten inert gas).
- Le M.I.G (metal inert gas).
- Le M.A.G (metal active gas).
- Le soudage avec fil fourré.
- Le soudage sous flux en poudre.
- Le soudage plasma.

A l'exception du soudage manuel à l'électrode enrobée, les autres procédés cités ci-dessus ne seront cependant pas développés dans ce cours, car ils ne sont actuellement pas utilisables sous eau.
Seul quelques essais ont eut lieu récemment à l'aide du procédé de soudage à fil fourré. Mais à ce jour les résultats ne sont pas encore suffisamment probants que pour pouvoir l'utilisé efficacement sur chantier.

Photo n° 6 : Soudage sous eau avec fil fourré (doc. Internet)

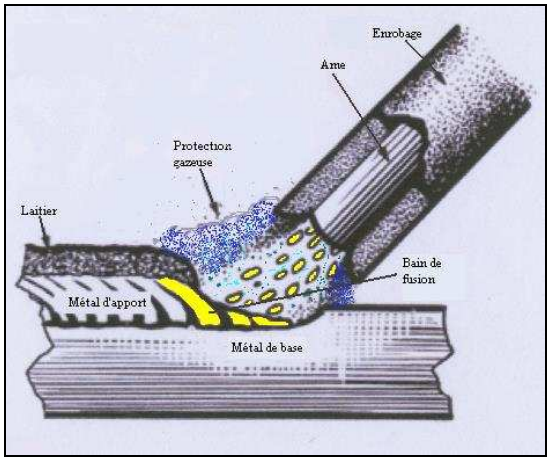
Principe du soudage à l'électrode enrobée

Comme nous l'avons dit au début de ce guide, les toutes premières électrodes utilisées pour le soudage manuel à l'arc étaient des électrodes nues sans enrobage qui ne permettait pas de réaliser des soudures de qualité car le bain de fusion était altéré par l'oxygène et l'azote de l'air.
Avec l'apparition des électrodes enrobées, la qualité des soudures est rapidement devenue irréprochable. Ceci est grandement dû à la présence d'un enrobage qui entoure l'âme métallique de l'électrode.
Le rôle de l'enrobage est multiple car :

- Il facilite l'amorçage de l'arc électrique.
- Il dirige l'arc électrique dans le prolongement de l'électrode.
- Il protège le bain de fusion de l'air (ou de l'eau).

- Il forme une scorie plus légère (le laitier) que le métal déposé qui permet d'assurer l'élimination des impuretés éventuelles déposées dans le métal et assure un refroidissement moins rapide de la soudure.
- Enfin, pour les travaux de soudage en surface, il stabilise l'arc électrique et permet ainsi l'emploi du courant alternatif.

Fig. n° 4 : Principe du soudage à l'électrode enrobée



INSTALLATION ET EQUIPEMENT POUR LE SOUDAGE EN PLEINE EAU

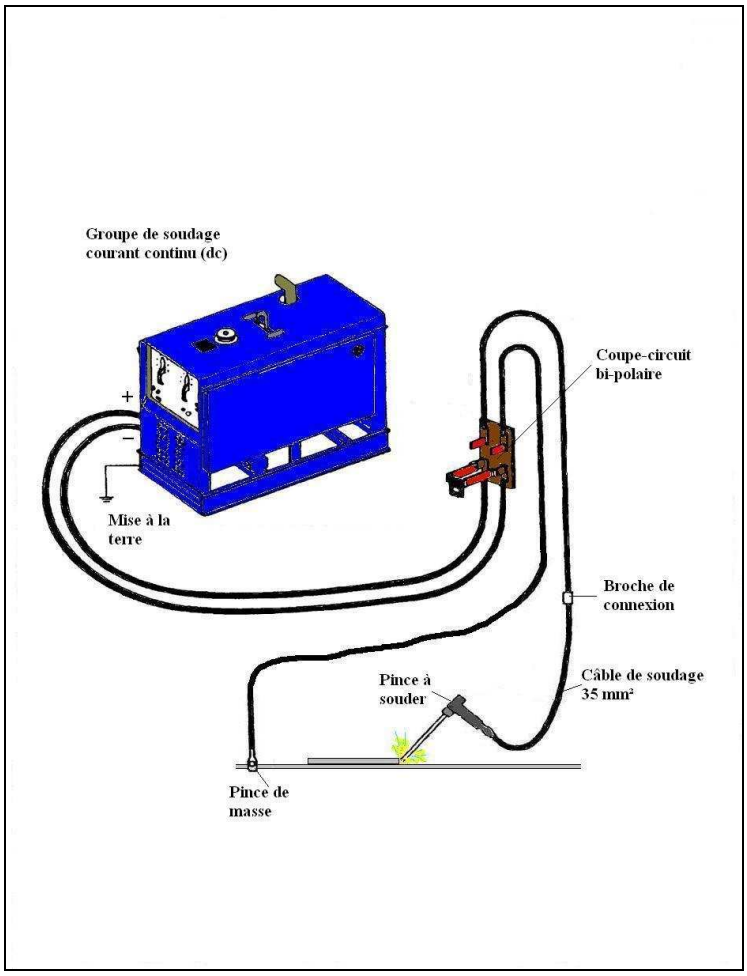


Figure n° 5 : Installation pour le soudage en pleine eau

Pour le soudage sous eau, seul le courant continu est utilisé. Ceci est principalement dû à des raisons de sécurité mais également à cause du fait qu'il est beaucoup plus difficile à maintenir un arc stable avec du courant alternatif.

Une installation pour le soudage en pleine eau se compose en général de l'équipement suivant :

- Poste de soudage
- Câbles de soudage
- Porte-électrode
- Pince de masse
- Broches de connexion
- Coupe-circuit
- Verre teinté
- Accessoires
- Electrodes

Les postes de soudage

Les postes de soudage à l'arc sont des appareils électriques qui peuvent être soit alimentés par un courant de réseau, soit délivrer leur propre courant par l'intermédiaire d'une génératrice.
Le rôle de ces appareils est :

- D'abaisser la tension délivrée à une valeur égale à la tension à vide requise.
- D'isoler le circuit primaire du circuit secondaire.
- De permettre un réglage de l'intensité du courant de soudage
- De permettre un réglage de la tension à vide.
- D'assurer aussi rapidement que possible le passage de la tension à vide en une tension d'arc.
- De maintenir un arc de soudage stable.

Ils peuvent être classés en deux catégories bien distinctes :

- Les postes statiques
- Les postes rotatifs

Les postes statiques

Ce type de poste est toujours alimenté par une source de courant alternatif qui par l'intermédiaire d'un transformateur va délivrer un courant apte au soudage.
Les postes statiques sont divisés en 3 types de générateurs :

- Les transformateurs monophasés qui ne fournissent que du courant alternatif à 50 hertz.
- Les transformateurs monophasés ou triphasés qui alimentent un élément redresseur qui fournit alors du courant continu.
- Les inverteurs qui sont des transformateurs électroniques équipés d'un convertisseur de fréquence lequel transforme le courant alternatif de 50 hertz en un courant alternatif de très haute fréquence (400 à 6000 hertz). Ce courant est ensuite retransformé en courant continu par l'intermédiaire d'un redresseur.

Photo n° 7 : Poste de soudage inverteur (doc. Internet)

Les postes rotatifs

Les postes rotatifs peuvent être alimentés par un courant de secteur ou par un moteur thermique, ce qui les rend alors entièrement autonome.
Le courant délivré peut être alternatif ou continu.

Photo n° 8 : Groupe de soudage rotatif (doc. Internet)

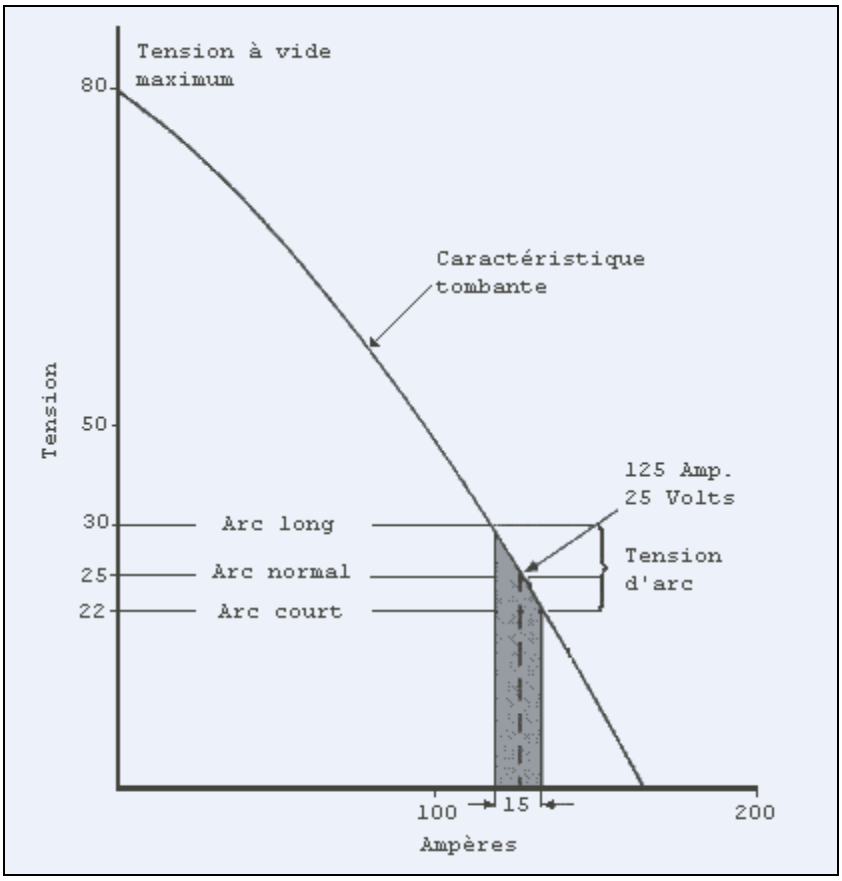
La plupart des appareils de soudage modernes disposent d'un volant pour le réglage en continu de l'intensité.

Photo n° 9 : Détail du volant de réglage (doc. Internet)

Caractéristique tombante de l'appareil de soudage

Quelque soit le choix du poste de courant, il est indispensable que celui-ci possède une bonne *caractéristique tombante* qui permet de passer en quelques millisecondes de la tension à vide (80 - 65 volts) à la tension d'arc (30 – 22 volts).

Figure n° 6 : Caractéristique tombante



Sur certains postes de soudage, le réglage de la tension à vide peut se faire via un volant ou autre dispositif permettant de choisir entre deux ou trois valeurs différentes.
Si l'on reporte sur un graphique la courbe de cette caractéristique, on peut voir que lorsque le circuit électrique est ouvert, la tension à vide est maximum et l'intensité est évidemment égale à zéro.
Dès que l'électrode entre en contact avec la pièce à souder, la tension va chuter et l'intensité va augmenter.
Sous eau, à cause des difficultés techniques de maintenir un arc de longueur constante il est fréquent d'avoir des variations de tension de 6-8 volts et de ce fait il est préférable que la courbe de la caractéristique tombante de l'appareil utilisé soit assez raide puisque dans ce cas, les variations de courant pour une longueur d'arc donnée seront moins importantes.

Facteur de marche

Lorsqu'un appareil de soudage débite du courant, il a tendance à chauffer et de ce fait, le facteur de marche à intensité maximum ne peut en principe pas dépasser un certain pourcentage de temps.
La plupart des machines américaines ont un facteur de marche pratiquement égal à 100 % alors que les appareils de construction européenne ont un facteur de marche de 60%.
En clair, cela signifie que sur une période de 100 minutes le poste de soudage ne peut souder à son intensité maximum que durant 60 minutes, les 40 minutes restantes devant permettre à l'appareil de refroidir.
Il est généralement exceptionnel que le facteur de marche soit dépassé lors de travaux de soudage sous-marin car le temps passé entre le soudage de chaque électrode est généralement plus long qu'en surface et de ce fait le débit de l'appareil est également moins élevé.

Actuellement, les groupes rotatifs thermiques sont les plus fréquemment utilisés sur chantier, mais ils sont de plus en plus remplacés par les appareils inverteurs lorsqu'il s'agit de réaliser des soudures de qualité et que du courant de secteur est disponible.

Dans tous les cas, quelque soit le poste de soudage sélectionné il devra au minimum avoir une tension à vide égale à 60 volts et être capable de débiter 300 ampères sous un régime de fonctionnement de 60%.

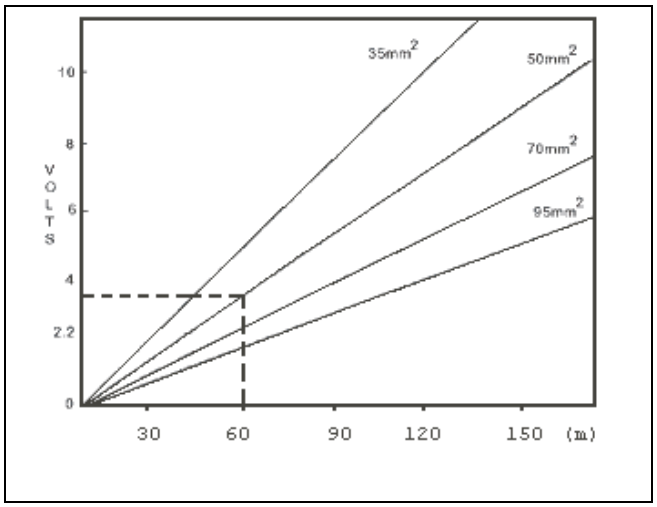
Câbles de soudage

Photo n° 10 : Diverses sections de câble de soudage (doc. Internet)

Le courant arrive du poste de soudage jusqu'à la pièce par l'intermédiaire de deux câbles souples isolés.
L'un des câbles amène le courant jusqu'à l'électrode, l'autre après fermeture du circuit, le ramène vers le poste de soudage.
La réussite d'une opération de soudage est fortement liée aux caractéristiques des câbles de soudage.
Ceux-ci doivent avoir une section suffisante pour pouvoir délivrer le courant nécessaire.
Cette section mentionnée en mm² varie en fonction de l'intensité de courant délivré, mais également en fonction de la longueur des câbles.
En effet, plus on s'éloigne de la source de courant, plus la tension au niveau de la soudure va diminuer.
Généralement, une section de 50 mm² est largement suffisante tant que la longueur des câbles ne dépasse pas 50 mètres.
Pour des longueurs plus importantes des sections de câbles plus grandes sont à prévoir.

Une chute de tension peut également être constatée en cas de mauvais contact au niveau des connections, ou lorsque les câbles utilisés sont abîmés.
Dès lors, pour limiter cette perte de tension, il est préférable d'utiliser des longueurs de câbles de soudage aussi courtes que possible.

Fig. n° 7 : Diagramme de chute de tension en fonction de la longueur et section du câble



A cause de leur poids ainsi que de leur rigidité, l'utilisation de câble de soudage de 50 – 70 mm² peut après un certain temps fatiguer le plongeur soudeur.
Pour éviter cela, une faible longueur de câble (1 – 2 m) de 35 mm² est généralement raccordé sur la pince porte - électrode.
Il est important, lorsqu'une grande longueur de câble reste en surface de ne pas lover l'excédant sur lui-même, car cela peut avoir comme conséquence de provoquer un champ d'induction magnétique capable d'influencer le soudage.
L'excédant de câble devra au contraire être lové en long ou en U.
L'âme des câbles de soudage peut être confectionnée par des brins d'aluminium ou de cuivre. Ces derniers sont toutefois préférés car ils ont de meilleures propriétés électriques, sont moins sujet au phénomène de corrosion et ont généralement une durée de vie plus longue.
De même que pour les postes de soudage, les câbles de soudage ont également un facteur de marche à ne pas dépasser sous peine de voir apparaître un échauffement du circuit.

Tableau n° 1 : Facteur de marche des câbles de soudage

Section mm²	100% A	85% A	60% A	30% A
35	225	245	290	410
50	285	310	370	520

En fonction du tableau ci-dessus, on constate que dans le cas de soudage en pleine eau seul l'utilisation de câbles à faible section est susceptible de provoquer un échauffement du circuit.
A l'inverse, l'utilisation de fortes intensités comme celles utilisées en découpage sont elles capable de provoquer assez rapidement l'échauffement des câbles (voir manuel de découpage sous-marin).

Pince porte – électrode

Les pinces porte – électrode sous – marine sont quelques peu différentes de celles utilisées en surface par le fait qu'elles sont généralement plus petites, plus légères et sont beaucoup mieux isolées.
Avec ce type de pince, une seule position d'électrode (90° ou 45°) est généralement possible, le serrage de l'électrode se faisant par l'intermédiaire d'une molette de vissage.

Photo n° 11 : Type de pince porte – électrode sous – marine (doc. Internet)

L'emploi d'une pince porte – électrode utilisée pour le soudage en surface doit être évité car toutes les parties non ou mal isolées vont subir un effet d'électrolyse et de ce fait s'user bien plus rapidement qu'une pince adaptée au milieu humide.
A l'inverse, une pince à souder sous-marine ne doit jamais être utilisée pour le soudage en surface car elle aurait tendance à chauffer rapidement dû au fait qu'elle n'est plus refroidie par l'eau.

Pince de masse

L'extrémité du câble ramenant le courant au poste de soudage, doit être équipé d'une pince de masse.
Celle-ci peut être constituée par un simple serre-joint, une pince crocodile, ou par un clamp magnétique.

Photo n° 12 : Type de pince de masse (doc. Internet)

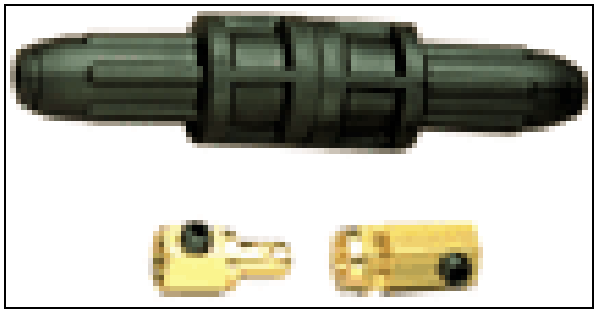
Le clamp magnétique peu s'avérer être utile surtout lorsqu'il n'existe aucune zone de fixation.
A l'inverse ce dernier type de masse peut être à l'origine de problème d'interférence magnétique.

Quelque soit le type de pince de masse utilisé, il importe que la section en contact avec la pièce soit au minimum la même que la section du câble.
L'endroit de fixation doit être au plus près de la zone de travail et être nettoyé de manière à assurer un contact intime avec la pièce.
Afin de limiter les problèmes de magnétisme au niveau de l'arc électrique, une distance inférieure à un mètre entre la masse et le joint à souder est recommandée.

Broches de connexion

Le raccordement des câbles au poste et à la pince porte - électrode se fait par l'intermédiaire de broches de connexion.
Il est important que la bague de serrage des fils soit de section comparable au diamètre des câbles.

Photo n° 13 : type de broche de connexion (doc. Internet)

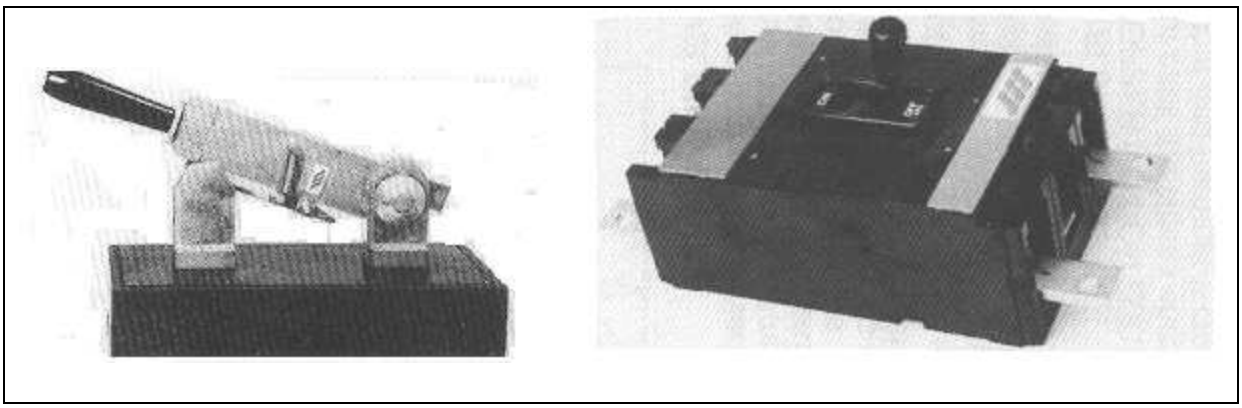


En aucun cas il ne faut diminuer la section des fils car cela entraînerait inévitablement un échauffement du circuit.
Il est également indispensable que les broches de connexion soient en bon état, ne présentent pas de jeu et soient bien isolées par du tape auto vulcanisant.
A défaut, une chute de tension plus ou moins importante pourrait être observée.

Coupe-circuit

Alors que ce type d'équipement n'est pas nécessaire pour les opérations de soudage en surface, il est absolument indispensable en soudage immergé car c'est lui qui assure le plongeur soudeur contre les risques de choc électrique.

Photo n° 14 : Type de coupe-circuit (doc.DIVEX)



Deux types de coupe-circuit peuvent être utilisés :

- Les coupes - circuit à couteau.
- Les coupes - circuit à interrupteur.

Ces accessoires qui peuvent être mono ou bi polaire ont pour rôle d'assurer l'ouverture ou la fermeture immédiate du circuit électrique sur simple demande du plongeur.
Afin de garantir au maximum la sécurité du plongeur soudeur mais également pour limiter l'usure par électrolyse de l'équipement de plongée et de soudage, le circuit ne peut être fermé que durant la période de soudage proprement dite.
Dès que l'électrode est consumée, le plongeur soudeur doit immédiatement faire couper le courant.
Celui-ci n'est remis qu'au moment ou la nouvelle électrode est au contact de la pièce à souder.
Lorsqu'un coupe-circuit mono polaire est utilisé, il est généralement placé sur le câble du porte – électrode.
Le coupe - circuit doit être implanté au plus près du poste de surveillance de manière à ce que le responsable de plongée puisse le manipuler facilement sans être distrait ou incommodé par le bruit extérieur (moteur ou autre).
En ce qui concerne le soudage sous-marin, il importe que le l'équipement sélectionné puisse au minimum supporter un courant de 400 ampères et avoir une tension à vide entre les bornes lorsque le circuit est ouvert de minimum 80 volts.

Photo n°15 : Boîtier de contrôle des paramètres de soudage avec coupe-circuit (doc. Internet)

Certains fabricants ont construit un boîtier qui outre le coupe-circuit comporte également un voltmètre et un ampèremètre. L'avantage de ce système étant bien entendu de pouvoir mieux contrôler les paramètres de soudage.

Verre teinté

Le soudage à l'arc émet une source lumineuse très vive qui est composée de différents types de radiations dont deux sont dangereuses pour les yeux :

- Les ultra - violets.
- Les infra - rouges.

Le rayonnement émis est d'une puissance telle qu'il est absolument impossible de regarder l'arc électrique à l'œil nu.

Pour se faire, un filtre constitué d'un verre teinté doit être interposé entre l'arc et les yeux du soudeur.
Attention, il existe différents types de filtres qui peuvent être soit destinés aux travaux de découpage ou de soudage au chalumeau soit destinés au soudage électrique.
En général, ceux du premier type comportent un chiffre et sont suivi par les lettres GW (gas welding).

Photo n° 16 : Rayonnements ultra – violets (doc. Internet)

Les verres teintés destinés au soudage électrique comportent un ou deux chiffres et sont suivi des lettres EW (electric welding).
Ces chiffres qui vont du numéro 9 au numéro 13 permettent de sélectionner le filtre adéquat en fonction de l'intensité du courant.

Tableau 2 : Numéro de verre teinté en fonction du courant

Filtre n°	Intensité (amp.)
9 / EW	100
10 / EW	100 / 200
11 / EW	200 / 300
12 / EW	300 / 400
13 / EW	< 400 (découpage ou gougeage)

Photo n° 17 : différents types de support de filtre (doc. Internet)

Il est évident, que le choix du type de filtre dépend également de la turbidité de l'eau.
Différents types de supports de filtre existent en fonction du type de masque ou de casque utilisé.
A défaut, pour les interventions spontanées il est toujours possible de fixer le verre teinté avec de scotch isolant.
Dans ce cas, il faut veiller à ce qu'aucune infiltration d'eau ne passe entre la visière et le verre teinté, car à défaut, la visibilité du bain de fusion serait fortement perturbée.

Les accessoires

Les quelques accessoires suivants sont nécessaires au plongeur soudeur :

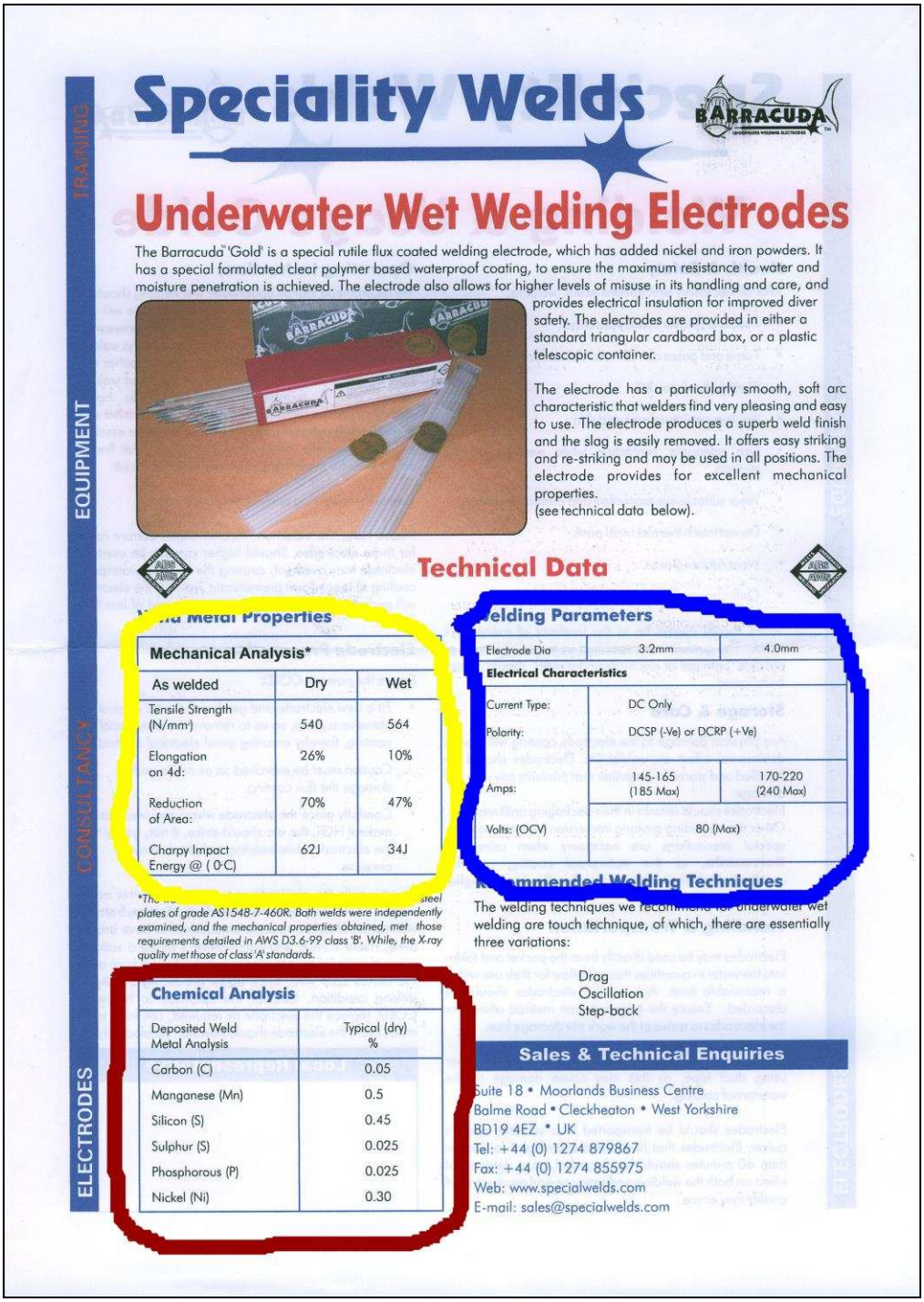
- Marteau – piquette
- Brosse métallique
- Détartreur à aiguille
- Fraise pneumatique ou hydraulique
- Carquois
- Gants isolants
- Source de lumière sur le casque

Photo n° 18 : Accessoires indispensables (doc. Internet)

DESCRIPTION DE LA FICHE TECHNIQUE DE L'ELECTRODE

La fiche technique délivrée par le fabricant d'électrode fournit un certain nombre de renseignements sur la composition de l'électrode ainsi que sur la manière de l'utiliser.

Fig. n° 8 : Fiche technique électrodes BARRACUDA (doc. Speciality Welds)



Speciality Welds

BARRACUDA

Underwater Wet Welding Electrodes

The Barracuda 'Gold' is a special rutile flux coated welding electrode, which has added nickel and iron powders. It has a special formulated clear polymer based waterproof coating, to ensure the maximum resistance to water and moisture penetration is achieved. The electrode also allows for higher levels of misuse in its handling and care, and provides electrical insulation for improved diver safety. The electrodes are provided in either a standard triangular cardboard box, or a plastic telescopic container.

The electrode has a particularly smooth, soft arc characteristic that welders find very pleasing and easy to use. The electrode produces a superb weld finish and the slag is easily removed. It offers easy striking and re-striking and may be used in all positions. The electrode provides for excellent mechanical properties.
(see technical data below).

Technical Data

Mechanical Analysis*

As welded	Dry	Wet
Tensile Strength (N/mm²)	540	564
Elongation on 4d:	26%	10%
Reduction of Area:	70%	47%
Charpy Impact Energy @ (0·C)	62J	34J

*...steel plates of grade AS1548-7-460R. Both welds were independently examined, and the mechanical properties obtained, met those requirements detailed in AWS D3.6-99 class 'B'. While, the X-ray quality met those of class 'A' standards.

Chemical Analysis

Deposited Weld Metal Analysis	Typical (dry) %
Carbon (C)	0.05
Manganese (Mn)	0.5
Silicon (S)	0.45
Sulphur (S)	0.025
Phosphorous (P)	0.025
Nickel (Ni)	0.30

Welding Parameters

Electrode Dia	3.2mm	4.0mm
Electrical Characteristics		
Current Type:	DC Only	
Polarity:	DCSP (-Ve) or DCRP (+Ve)	
Amps:	145-165 (185 Max)	170-220 (240 Max)
Volts: (OCV)	80 (Max)	

...mmended Welding Techniques

The welding techniques we recom... for underwater wet welding are touch technique, of which, there are essentially three variations:

Drag
Oscillation
Step-back

Sales & Technical Enquiries

Suite 18 • Moorlands Business Centre
Balme Road • Cleckheaton • West Yorkshire
BD19 4EZ • UK
Tel: +44 (0) 1274 879867
Fax: +44 (0) 1274 855975
Web: www.specialwelds.com
E-mail: sales@specialwelds.com

TRAINING EQUIPMENT CONSULTANCY ELECTRODES

Les types d'enrobage

Un des premiers renseignements fournit indique la nature de l'enrobage.
Comme nous l'avons vu plus haut, l'enrobage d'une électrode a trois rôles bien définis :

- Rôle électrique.
- Rôle mécanique et physique.
- Rôle métallurgique.

Les enrobages sont fabriqués à partir de plusieurs dizaines de produits différents qui après avoir été pesés, sont mélangés et malaxés avec un liant qui est généralement du silicate.
L'enrobage est ensuite appliqué sur l'âme métallique de l'électrode par pressage.
Etant donné le nombre important de produits utilisés, on a été amené à classer les électrodes en fonction de la nature de leur enrobage.
Les différentes natures d'électrodes sont :

- Acides : A
- Cellulosique : C
- Basique : B
- Rutile : R
- Oxydant : O

Les différents tableaux ci-dessous, reprennent la composition générale des divers types d'enrobage.

Tableau n° 3 : Electrode à enrobage acide.

Composition	Epaisseur enrobage	Laitier	Avantages	Désavantages
Oxyde de fer / oxyde de titane Ferro - manganèse Produit désoxydant	Moyen ou épais	Se solidifie en nid d'abeille Facilement détachable.	Bonne pénétration Cordon plat et régulier Bon rendement	N'est pas utilisable dans toutes les positions Risque de fissuration

Tableau n° 4 : Electrode à enrobage cellulosique.

Composition	Epaisseur enrobage	Laitier	Avantages	Désavantages
Substance organique combustible	Mince	Peu épais Facilement détachable	Bonne pénétration Toutes positions Grande quantité de gaz protecteur	Cordon rugueux avec de fortes ondulations Perte de métal par projection Les gaz contiennent de forte proportion d'hydrogène Ne convient pas pour le soudage en pleine eau

Tableau n° 5 : Electrode à enrobage basique.

Composition	Epaisseur enrobage	Laitier	Avantages	Désavantages
Grande quantité de carbonate (calcium ou autre) Spath – fluor (fluorine)	Epais	Dense Difficilement détachable	Métal déposé très résistant Toutes positions	Produit des gaz irritants voire toxiques Arc instable Ne résiste pas du tout à l'humidité Ne convient pas pour le soudage en pleine eau

Tableau n° 6 : Electrode à enrobage rutile.

Composition	Epaisseur enrobage	Laitier	Avantages	Désavantages
Rutile (oxyde de titane) Cellulose en faible quantité Spath – fluor (fluorine)	Moyen / épais	Visqueux Facilement détachable	Très bonne ionisation de l'arc, donc arc stable Toutes positions Beaux cordons	Les gaz contiennent des proportions plus ou moins importantes d'hydrogène Manque de dureté

Tableau n° 7 : Electrode à enrobage oxydant.

Composition	Epaisseur enrobage	Laitier	Avantages	Désavantages
Oxyde (fer et manganèse)	Epais	Epais et compact Facilement détachable	Bon rendement Bon résultat avec des électrodes de faible diamètre	Métal décarburé Manque de dureté

Comme on peut s'en rendre compte à la lecture des tableaux, les électrodes à enrobage acide, rutile ou oxydant peuvent convenir au soudage en pleine eau.
Dans la pratique cependant, les enrobages rutiles avec adjonction de poudre de fer et de nickel sont malgré tout les plus souvent utilisés.
L'épaisseur de l'enrobage a également une influence sur la forme du cordon de soudure.
En général, plus l'enrobage est épais, plus les gouttes de métal fondu sont fines et moins le cordon de soudure est bombé.

Utilisé tels quel sous eau, les enrobages absorberaient rapidement une grande quantité d'humidité ce qui aurait comme conséquence de rendre l'électrode inutilisable en quelques secondes ou minutes.
Pour remédier à cet inconvénient, les électrodes sous-marines doivent subir un traitement d'adaptation qui consiste à protéger la surface de l'enrobage par un agent protecteur.
Les types de protections les plus utilisés sont à base de vernis, de peinture ou de cire.
Seule l'extrémité sans revêtement n'est pas traitée, de manière à pouvoir être conducteur.
Un petit nombre de fabricants conçoivent des électrodes enrobées exclusivement réservées au soudage en pleine eau.
Les plus connus sont :

- Hydroweld – Broco – Arcair – Specialty welds – Sureweld – Thyssens

Lorsque les électrodes de surface sont marinisées dans l'entreprise, il convient de vérifier que la couche de protection est bien étanche. Ceci peut être vérifié en immergeant une électrode du lot pendant 5 minutes. Ensuite l'électrode est mise en court-circuit pendant 2 secondes avec une intensité légèrement inférieure à l'intensité de soudage. Si aucune boursouflure n'apparaît sous la couche étanche, on peut considérer que la protection est bonne.
La marinisation en entreprise des électrodes n'est pas cependant sans danger, car en fonction des produits hydrofuges utilisés ont peut voir apparaître des gaz polluants qui en se mélangeant au bain de fusion réduisent considérablement la qualité de la soudure.
En situation d'urgence, on peut également utiliser une électrode enrobée destinée au soudage de surface en la protégeant par du scotch isolant.
Mais dans ce cas également, il faut s'attendre à ce que la qualité de la soudure soit nettement moins élevée qu'avec des baguettes spécialement destinées au soudage sous eau.

Identification des électrodes

Divers systèmes de symbolisation ont été rédigé de par le monde tels que :

- AWS A5.1-91
- EN 499 : 1995
- A 81-950 : 1991

Ces codes de symbolisation qui se trouvent sur la boite d'emballage ou sur les feuilles de spécification du producteur permettent à l'utilisateur de rapidement connaître les caractéristiques des électrodes.
Quelque soit la norme utilisée, le code de symbolisation est représenté par une série de lettres et de chiffres. Malheureusement pour l'utilisateur, il n'existe pas toujours de concordance entre les divers systèmes.

Prenons par exemple le code suivant de la norme AWS A5.1 (American Welding Society) :

AWS A5.1 E 70 1 4
(1) (2) (3) (4)

1. E Désigne une électrode enrobée destinée au soudage à l'arc.
2. Les 2 chiffres (70) indiquent la résistance à la traction mesurée en PSI x 1000.
3. Ce chiffre (1) se réfère aux positions de soudure.
4. Ce dernier chiffre (4) indique le type d'enrobage ainsi que le courant utilisable.

Tableau n° 8

Chiffre	Type de position
1	Toutes positions
2	Horizontal & plat
3	Plat

Tableau n° 9

Chiffre	Type d'enrobage
0 ou 1	Cellulosique
2 ou 3	Rutile
4	Rutile oxydant
5 ou 6	Basique

Tableau n° 10

Caractéristiques électriques			
Code	AC (alternatif)	DC (continu)	
		Polarité +	Polarité -
E7014	x	x	x
E7015		x	
E7016	x	x	x
E7018	x	x	x
E7024	x	x	
E7028	x		x

En clair, le code E 7014 signifie qu'il s'agit d'une électrode rutile oxydante ayant une résistance à la traction de 70.000 PSI (470 N/mm²) qui peut être utilisée en toute position, en courant alternatif ou en continu*, et qu'elle peut être branchée sur le + ou le -.

*Pour rappel, sous eau uniquement en courant continu.

Le Système de classification de l'American Welding Society est jusqu'à présent le standard le plus utilisé dans le monde, mais en Europe nous devons maintenant utiliser la classification EN 499.
Ce système de classification comporte un plus grand nombre de données qui permettent de désigner les électrodes enrobées en fonction de la limite d'élasticité, de la résistance à la traction et de l'allongement du métal fondu.
La classification repose sur les propriétés du métal fondu obtenu avec une électrode de 4 mm.
Elle est divisée en huit parties :

1. Symbole du produit.
2. Symbole de la résistance et de l'allongement.
3. Symbole de la résistance à la flexion par choc du métal fondu.
4. Symbole de la composition chimique du métal fondu.
5. Symbole du type d'enrobage.
6. Symbole du rendement du métal fondu et du type de courant.
7. Symbole de la position de soudage.
8. Symbole de la teneur en hydrogène.

Cette classification est séparée en deux sections :

A. Section obligatoire

Cette section comprend les symboles définis en 1 – 2 – 3 – 4 et 5

B. Section facultative

Cette section comprend les symboles définis en 6 – 7 et 8

E désigne une électrode enrobée

Tableau n° 11 : Symbole de la résistance et de l'allongement

Symbole	Limite d'élasticité min N/mm²	Résistance à la traction N/mm²	Allongement minimal (1) %
35	355	440-570	22
38	380	470-600	20
42	420	500-640	20
46	460	530-680	20
50	500	560-720	18
1) La longueur entre repères est égale à cinq fois le diamètre de l'éprouvette			

Tableau n° 12 : Symbole de la résistance à la flexion par choc du métal fondu

Symbole	Température correspondant à une énergie de rupture en flexion par choc moyenne minimale de 47 J °C
Z	Aucune exigence
A	+20
0	0
2	-20
3	-30
4	-40
5	-50
6	-60

Tableau n° 13 : Symbole de la composition chimique du métal fondu

Symbole de l'alliage	Composition chimique 1) 2)		
	Mn	Mo	Ni
Aucun symbole	2,0	-	-
MO	1,4	0,3 – 0,6	-
MnMO	> 1,4 – 2,0	0,3 – 0,6	-
1Ni	1,4	-	0,6 – 1,2
2Ni	1,4	-	1,8 – 2,6
3Ni	1,4	-	> 2,6 – 3,8
Mn1Ni	> 1,4 – 2,0	-	0,6 – 1,2
1NiMo	1,4	0,3 – 0,6	0,6 – 1,2
Z	Toute autre composition convenue		

1) En l'absence de spécification, Mo < 0,2 ; Ni < 0,3 ; Cr < 0,2 ; V < 0,05 ; Nb < 0,05 ; Cu < 0,3.
2) Les valeurs uniques du tableau sont des valeurs maximales.

Tableau n° 14 : Symbole du type d'enrobage

Symbole	Type d'enrobage
A	Enrobage acide
C	Enrobage cellulosique
R	Enrobage au rutile
RR	Enrobage au rutile épais
RC	Enrobage cellulosique au rutile
RA	Enrobage acide au rutile
RB	Enrobage basique au rutile
B	Enrobage basique

Tableau n° 15 : Symbole du rendement du métal fondu et du type de courant

Symbole	Rendement %	Type de courant
1	≤ 105	c.a + c.c
2	≤ 105	c.c
3	> 105 ≤ 125	c.a + c.c
4	> 105 ≤ 125	c.c
5	> 125 ≤ 160	c.a + c.c
6	> 125 ≤ 160	c.c
7	> 160	c.a + c.c
8	> 160	c.c

Tableau n° 16 : Symbole de la position de soudage

Symbole	Position
1	Toutes positions
2	Toutes positions sauf verticale descendante
3	Soudage bout à bout à plat, en gouttière, en angle à plat
4	Soudage bout à bout à plat, en gouttière
5	Verticales descendantes et positions conformément au symbole 3

Tableau n° 17 : Symbole de la teneur en hydrogène

Symbole	Teneur en hydrogène ml/100 g de métal fondu max.
H5	5
H10	10
H15	15

Exemple de désignation :

EN 499 – E 46 3 1Ni B 54 H5

En clair, le code E 46 3 1Ni B 54 H5 indique qu'il s'agit d'une électrode ayant une limite d'élasticité minimale de 460 N/mm² (46), une valeur minimale d'énergie de rupture en flexion par choc de 47 j à – 30°C (3) et une composition chimique de 1,4% de Manganèse et entre 0,6% et 1,2% de nickel (1Ni). L'électrode à enrobage basique (B) et de rendement 140 % peut être utilisée en c.a et en c.c (5) en soudage bout à bout à plat et soudage en gouttière (4).
L'hydrogène ne dépasse pas 5 ml/100 g de métal déposé (H5).

Les divers codes de symbolisation utilisés dans le monde sont jusqu'à présent toujours destinés à des électrodes enrobées destinées au soudage en surface.
Actuellement, il n'existe aucun code de symbolisation spécifique pour les électrodes destinées au soudage en pleine eau.
Seul les français ont édité la norme expérimentale A 81-950 1991, mais elle semble ne pas être utilisée.
Cette norme expérimentale avait le mérite de désigner par une lettre (W) qu'il s'agissait d'une électrode destinée au soudage sous-marin, tandis que deux autres symboles indiquaient le temps de séjour et la profondeur maximale admissible dans l'eau.

Composition du métal déposé

La majeure partie des travaux de soudage sous eau se font sur des aciers ayant un carbone équivalent (CE) inférieur à 0,3 ce qui permet dès lors d'utiliser des électrodes qui déposent un acier au carbone manganèse (voir chapitre métallurgie).
Pour le soudage des aciers ayant un CE supérieur à 0,4 ou pour le soudage d'acier inoxydable on utilise plutôt des électrodes austénitiques ou des électrodes Duplex.
En général, la fiche technique des électrodes mentionne les divers éléments autres que le fer que l'on retrouve dans le métal déposé.
L'analyse chimique du métal déposé est indiquée sous forme de pourcentage mesuré à sec.

Propriétés du métal déposé

Tant le métal de base, que le métal déposé possède un certain nombre de propriétés mécaniques qui peuvent être déterminés par une série d'essais.
Parmi les propriétés mécaniques on distingue :

1. La résistance à la déformation qui comprend :
- La limite d'élasticité (E) en N/mm².
- La résistance à la rupture (R) en N/mm².
- La dureté (HV) (HB) (HR).
2. La capacité à la déformation qui comprend :
- L'allongement (A) en %.
- La striction (Z) en %.
- La résilience (KV) (KCU).

Tous les essais sont réalisés à la température ambiante (+/- 20°C) à l'exception des essais de résilience qui eux se font à basse température (0°C à – 196°C).

Les essais mécaniques sont classés en deux catégories bien distinctes :

1. Les essais statiques.

Les essais statiques sont utilisés pour déterminer la traction, la dureté et le pliage.
Au cours de cet essai, l'effort appliqué croit lentement.

2. Les essais dynamiques.

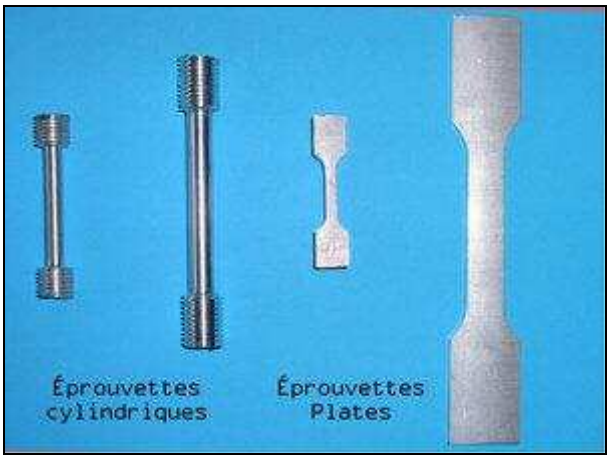
Les essais dynamiques sont utilisés pour déterminer la résilience et la fatigue.
Au cours de cet essai, l'effort appliqué croit rapidement.

Ces différents essais se pratiquent sur des éprouvettes cylindriques, plates ou prismatiques qui ont été découpées dans la pièce à contrôler.

Ils vont ainsi permettre soit :

- D'élaborer un certificat de conformité du produit de base.
- D'établir des fiches techniques concernant les produits d'apport.
- De contrôler le résultat des assemblages soudés.

Photo n° 19 : Modèles d'éprouvette (doc. Internet)



Essai de traction

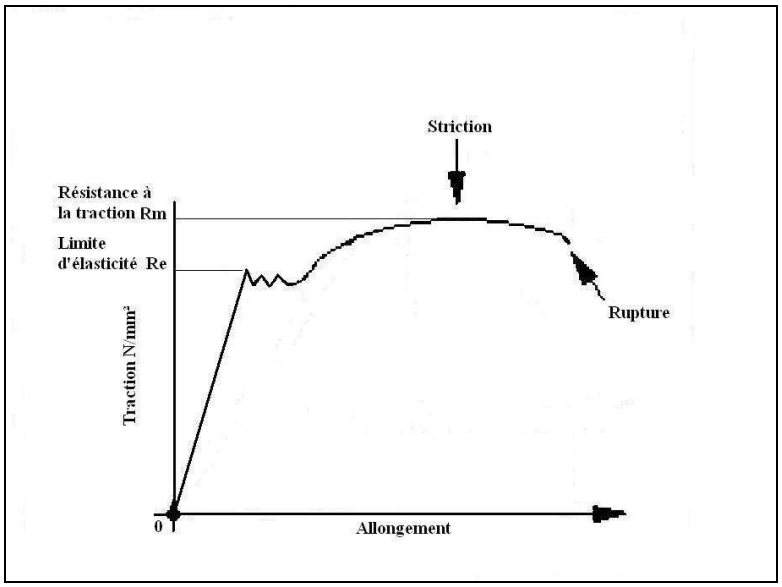
La résistance à la rupture est l'un des facteurs les plus déterminants liés au choix du métal.
A cet effet, une éprouvette est usinée aux dimensions requises, puis elle est bridée par ces deux extrémités dans la machine de test.
Une traction est ensuite réalisée sur l'éprouvette jusqu'au point de rupture.

Photo n° 20 : Test de traction (doc. Internet)

Différentes caractéristiques mécaniques sont enregistrées au cours de cet essai :

- La limite d'élasticité (Re).
- La résistance à la traction (Rm).
- L'allongement (A).
- La striction (Z).

Fig. n° 9 : Diagramme de traction



La limite d'élasticité

Lorsqu'un métal est mis en tension il réagit à la manière d'un élastique. Ainsi, lorsqu'une traction limitée est appliquée sur l'éprouvette, le métal va s'étirer progressivement jusqu'à une certaine valeur. Puis lorsque la traction s'arrête, le métal va revenir aux dimensions d'origines.
Si au contraire la traction continue, le métal va atteindre un stade (Re) à partir duquel il ne pourra plus revenir à sa forme d'origine mais continuera néanmoins à s'étirer.

La résistance à la traction

Une fois que l'éprouvette a dépassé sa limite d'élasticité, le métal va continuer à se déformer.
Si maintenant la traction s'arrête, le métal va rester dans cette forme étirée.
C'est ce que l'on appelle alors la déformation plastique.
Si la traction se poursuit, la déformation plastique augmente jusqu'au point de résistance Rm.
A partir de ce point, le métal va s'affiner progressivement (striction) jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

L'allongement

Est l'augmentation relative de longueur de l'éprouvette pendant l'essai.
Avant de réaliser le test de traction, deux marques sont apposées sur l'éprouvette à une distance généralement égale à quatre (UK/USA) ou cinq (CEE) fois le diamètre de l'éprouvette.
Après rupture, la distance entre les marques est remesurée et rapportée en tant que pourcentage d'allongement par rapport à la mesure initiale.
Cette mesure donne une indication sur la ductilité du métal, c'est-à-dire la capacité qu'à un métal à ce déformer avant de ce rompre.
Certaines fiches techniques mentionnent parfois l'allongement obtenu sur des éprouvettes réalisées dans et hors d'eau et l'on constate alors une forte différence entre les deux valeurs mentionnées (exemple de la fiche technique en fig. n° 8 : 26 et 10 %).
Il faut savoir que plus cette valeur est élevée, meilleure sera l'élasticité et donc indirectement la qualité de l'assemblage soudé.

Quelques rares spécialistes parviennent actuellement à souder sous eau des assemblages dont la qualité des soudures est équivalente à une soudure de surface.
Mais pour obtenir ce résultat, il faut que le métal d'apport garantisse un allongement de minimum 14 %, or actuellement très peu d'électrodes sous-marines garantissent cet allongement minimum.
Le plongeur soudeur, devra donc particulièrement faire attention aux données mentionnées dans la fiche technique de l'électrode car certains fabricants n'hésitent pas à annoncer parfois des valeurs supérieures à 20 %. Dans ce cas, il s'agit plus que vraisemblablement de résultat obtenu en surface.

La striction

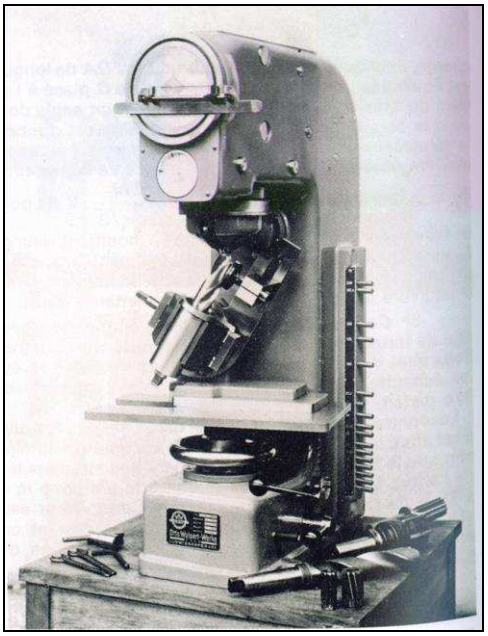
Est la diminution de section du barreau également rapportée en pourcentage par rapport aux dimensions initiales.
Cette mesure donne une indication sur la fragilité du métal.

Essais de dureté

Ce type d'essai permet de déterminer la résistance qu'offre un matériau à la pénétration du corps plus dur.
A cet effet, un pénétrateur de forme variable est pressé contre la pièce.
La profondeur de l'empreinte permet grâce à des tables de conversion de déterminer la dureté en Mpa.
Les essais les plus utilisés en Europe sont :

- Les essais Brinell.
- Les essais Vickers.
- Les essais Rockwell.

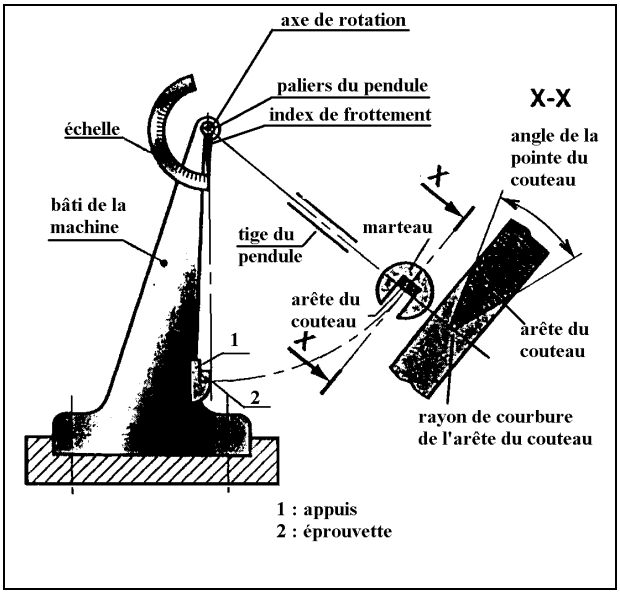
Photo n° 21 : Machine pour essai de dureté Rockwell (doc. Encyclopédie des sciences industrielles Quillet).



Essais de résilience

Les métaux qui sont normalement résistants et ductiles à la température ambiante, peuvent devenir très fragiles aux basses températures et donc être susceptibles d'engendrer des fissures si une force soudaine est appliquée.
Dès lors, afin de pouvoir déterminer la résilience qui est l'inverse de la fragilité, on place une éprouvette entaillée en son milieu sur la machine de test.
Cet essai qui permet de mesurer la résistance à la flexion par choc consiste ensuite à rompre la pièce d'un seul coup à l'aide d'un mouton pendule rotatif qui enregistre l'énergie absorbée par la rupture.
Les éprouvettes sont rompues à différentes températures.
Pour refroidir les éprouvettes, on les plonge dans un produit réfrigérant tel que de l'alcool, du fréon ou de l'azote liquide.

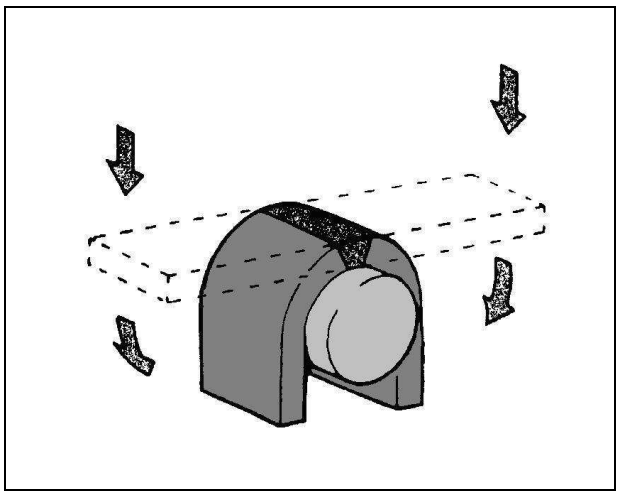
Figure n° 10 : Mouton pendule de Charpy (doc. Internet)



Essai de pliage

Ce type d'essai est également quelques fois utilisé pour déterminer la capacité de déformation possible d'un assemblage

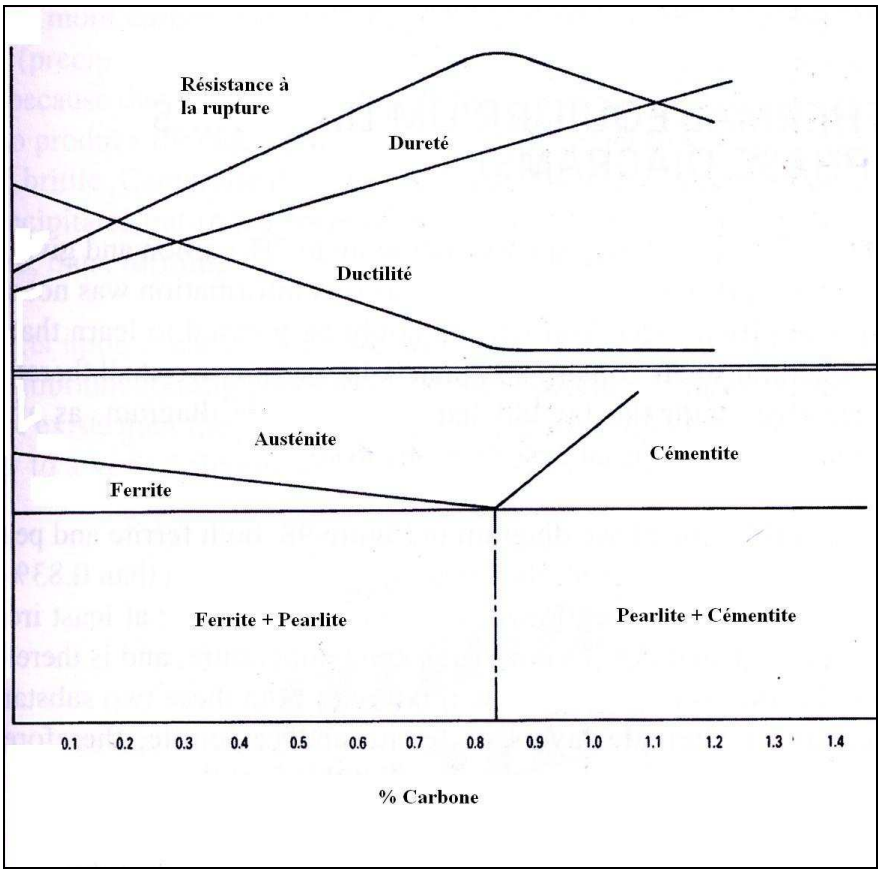
Figure n° 11 : Essai de pliage (doc. Underwater wet welding)



Relation entre les propriétés mécaniques

Tous les métaux possèdent un certain nombre de propriétés qui peuvent changer en fonction du pourcentage de carbone présent dans l'alliage.
Pour chaque type de matériau, il existe une relation quant aux variations relatives de ces caractéristiques par rapport aux autres.
Ainsi par exemple la résistance à la traction, la limite d'élasticité et la dureté varient généralement dans le même sens.
Par contre, l'allongement et la résilience diminuent.
En fonction de cela, on peut dire que pour le soudage en surface il n'est pratiquement pas possible de souder de l'acier contenant plus de 0,8 % de carbone.
Sous eau, cela devient problématique au-dessus de 0,3 %.

Figure n° 12 : Variation des propriétés mécaniques en fonction du % de carbone



Les caractéristiques électriques

La fiche technique de l'électrode défini les paramètres électriques qui doivent être utilisés tels que :

- Le type de courant.
- Le mode de polarité.
- La plage d'intensité.
- La tension à vide maximum.

Afin de bien comprendre les différents termes énumérés ci-dessus, nous allons rapidement revoir ce qu'est l'électricité.
Les lois de l'électricité sont régies par quatre principes de base :

1. Existence de deux types de charges électriques – négative et positive.
2. Les charges de même signe se repoussent.
3. Les charges de signe opposé s'attirent.
4. Les charges peuvent se déplacer d'un endroit vers un autre.

La matière est composée d'atomes qui sont eux-mêmes composés d'électrons, de neutrons et de protons.
L'électricité est générée par le déplacement d'électrons qui se déplacent d'un point à un autre dans la matière à la suite d'un manque ou d'un excès.

Le courant

Le courant est une force électromotrice qui se produit dès que des électrons d'une matière se dirigent dans la même direction suite à une différence de charge électrique.
La tension est la différence de potentiel entre deux charges et elle est exprimée en *volts*.
Le voltage en lui-même ne se déplace pas dans le conducteur, mais sans voltage il ne peut y avoir de courant.
Disons pour simplifier les choses que le voltage est une espèce de pression qui oblige les électrons à se mouvoir.
L'intensité du courant indique le nombre d'électrons qui par unité de temps passent dans une matière donnée, elle se mesure en *ampères*.
Pour se donner une idée, on estime que par ampère, la quantité d'électrons qui passent par un circuit durant une seconde est d'environ 6,28 quintillions ($6{,}28^{30}$).
Tous les matériaux n'ont pas la même habileté à transférer les électrons, certains tels que le bois ou le caoutchouc présentent une très forte résistance au passage du courant, d'autre telle que les métaux ont au contraire une très bonne conductibilité.
Les différents facteurs qui déterminent la résistance sont :

- La matière.
- La longueur.
- La section.
- La température.

L'unité utilisée pour mesurer la *résistance* du courant est le *Ohm* (Ω).Un Ohm est la résistance qui permet le passage de un ampère lorsqu'on applique au fil résistant une tension de un volt.
Donc en bref, la tension est la quantité de force électromotrice appliquée à une résistance pour provoquer un flux d'électrons dans cette résistance.

Plus la tension appliquée est grande, plus le flux d'électrons qui traverse la résistance est grand.
Si l'on augmente la résistance d'un circuit auquel est appliquée une tension constante, le flux d'électrons diminue.
Le rapport qui existe entre la tension, l'intensité et la résistance est décrit sous une formule mathématique connue sous le nom de la loi d'Ohm :

$$I = U / R$$
$$U = R \times I$$
$$R = U / I$$

Où :
- I = Ampère
- U = Volt
- R = Ohm

Un autre terme couramment utilisé est le mot *Watt*.
Cette unité défini la quantité de *puissance* nécessaire pour maintenir un courant de un ampère à la tension de un volt, et représente la vitesse à laquelle les électrons sont transportés d'un point à un autre.
L'indication de la consommation en watts des moteurs, des résistances et autres appareils électriques, renseigne sur la vitesse à laquelle ces appareils transforment l'énergie électrique en une autre forme d'énergie.
La puissance électrique se calcule par la formule :

$$P = U \times I$$
$$U = P / I$$
$$I = P / U$$

Le *Joule* est une unité d'énergie qui représente la quantité de travail réalisée par une force de un newton dont le point d'application se déplace de un mètre dans la direction de la force.
Cette valeur est fréquemment utilisée en soudage pour calculer *l'énergie de soudage* qui est l'énergie calorifique apporté par la source de chaleur pour constituer le bain de fusion.
L'énergie de soudage peut être calculée à l'aide de plusieurs formules, mais actuellement celle qui prévaut est :

$$E = (U \times I \times 60) / (V) = J / cm$$

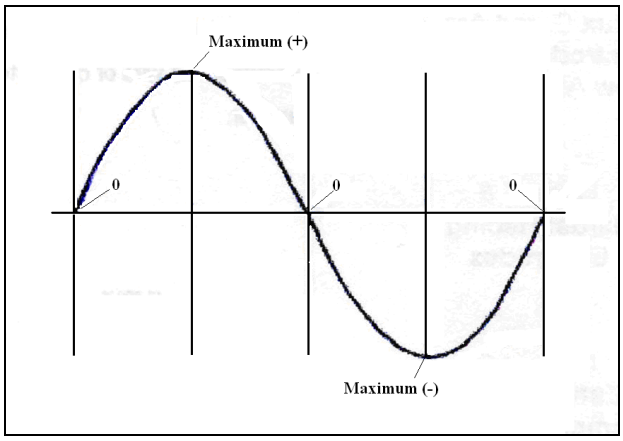
Où :
- U = tension d'arc
- I = intensité de soudage
- V = vitesse d'exécution de la passe (cm / min)

Les types de courant

L'énergie électrique peut être délivrée en courant continu (c.c) ou en courant alternatif (c.a).
Avec du courant continu, le mouvement des électrons dans le conducteur s'écoule toujours dans le même sens.
Avec du courant alternatif au contraire, les électrons vont s'écouler successivement dans un sens, puis dans l'autre en fonction de la fréquence.
En Europe, la fréquence du courant est généralement de 50 Hertz.
Le courant alternatif se représente graphiquement par une ligne sinueuse qui comprend une phase positive, une phase négative, ainsi que la cadence du changement de phase.

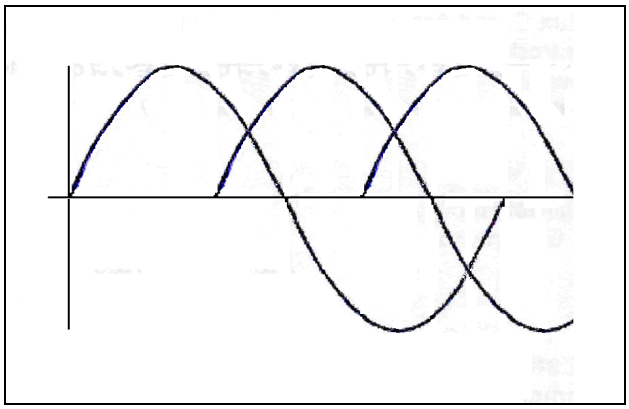
Comme on peut le voir sur le graphique de la figure n° 13 , avec le courant alternatif, la tension part de zéro volt puis après cinq millisecondes atteint un maximum, pour retomber ensuite à zéro en mi période. Il repart ensuite en phase opposée et atteint à nouveau zéro volt en fin de cycle.

Figure n° 13 : Courbe du courant alternatif



On peut donc aisément comprendre que pour le soudage il convient d'avoir une fréquence élevée, sans quoi l'arc électrique n'est pas stable.
C'est d'ailleurs ce qui risque de se passer lorsque le courant est amené à l'appareil de soudage via deux conducteurs (courant monophasé).
Pour éviter cet inconvénient, la plupart des générateurs de soudage professionnel sont alimentés par trois câbles conducteurs (courant triphasé) car cela permet de séparer toutes les phases de 120° et d'obtenir ainsi un courant beaucoup plus régulier.

Figure n° 14 : Courbes courant triphasé



Si nous revenons maintenant aux paramètres de soudage de la fiche technique présenté en figure n° 8 nous voyons qu'elle est rédigée en anglais.
Ceci est du au fait qu'actuellement la majorité des producteurs d'électrodes sous – marines sont anglais ou américains.
Pour ceux d'entre vous qui ne pratiquent pas la langue de Shakespeare vous trouvez ci-dessous la signification des quelques termes utilisés :

- DC Only (Direct Current) = Courant continu
- DCSP (Direct Current Straight Polarity) = Courant continu électrode au –
- DCRP (Direct Current Reversed Polarity) = Courant continu électrode au +

- OCV (Open Circuit Voltage) = tension à vide

Attention, les américains utilisent une autre terminologie pour la polarité :
- Straight Polarity = électrode au –
- Reversed Polarity = électrode au +

Ou :

- DCEP (Direct Current Electrode Positive) = Courant Continu électrode au +
- DCNP (Direct Current Electrode Negative) = Courant Continu électrode au -

PREPARATION ET TECHNIQUE DU SOUDAGE EN PLEINE EAU

Comme nous l'avons écrit au début de ce guide, le soudage sous eau peut être un moyen simple, rapide et économique pour réaliser des travaux de réparation sur des structures métalliques.
Evidemment simple et rapide ne signifie pas que le plongeur soudeur n'a qu'à se jeter dans l'eau et commencer à souder.
Bien au contraire, de même que pour tous les travaux immergés, une opération de soudage nécessite quelques travaux préparatoires qui permettront de réaliser le travail correctement et en toute sécurité.
Parmi ceux-ci, nous retrouvons :

- Une inspection préparatoire.
- La rédaction de la procédure de soudage.
- La qualification de la procédure de soudage.
- La qualification des plongeurs soudeurs.
- La rédaction de la procédure de travail.
- La rédaction du plan d'hygiène et de sécurité.
- La préparation des pièces à souder.
- L'installation du chantier.
- Le nettoyage du support.
- Le positionnement des pièces à souder.
- Le pointage.
- Le soudage.
- Le contrôle des soudures.

La liste ci-dessus n'est bien entendue pas exhaustive et elle dépend de l'importance des travaux à réaliser.

Inspection préparatoire

Cette inspection servira à se rendre compte :

- De l'accessibilité du chantier.
- De l'importance du trafic maritime.
- De la visibilité.
- De la présence ou non de courant.
- De la température de l'eau.
- De l'état général de l'ouvrage.
- Du degré de corrosion.
- De l'épaisseur résiduelle du métal de base.
- De l'état de propreté.
- Des points d'amarrage éventuel.
- Des risques potentiels (analyse des risques).

Dans la mesure du possible un échantillon d'acier sera prélevé sur la structure de manière à pouvoir faire une analyse du métal et définir son CE.

DMOS et QMOS

(Voir page 86)

Procédure de travail

La rédaction de ce type de procédure incombe généralement au conducteur ou au responsable des travaux.

Elle comprend entre autres :

- Le planning de travail.
- Le type et nombre de personnes concernées.
- Le matériel utilisé.
- La chronologie des différentes phases de travail.

Plan Hygiène et Sécurité (PHS)

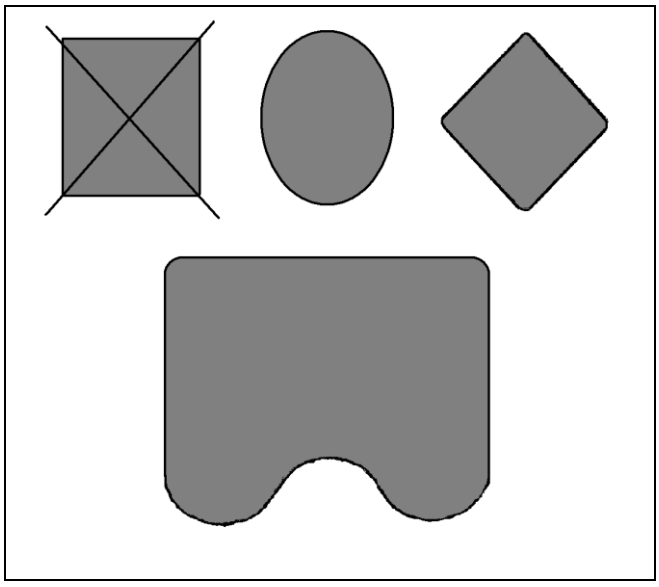
Ce plan de sécurité traite toutes les remarques qui ont été notifiés dans l'analyse des risques.

Préparation des pièces à souder

Dans la mesure du possible, les pièces à souder sont :

- Préparées de manière à pouvoir réaliser des soudures d'angle ou de recouvrement car de cette manière le cordon de soudure est déposé régulièrement dans le joint naturel formé par l'angle des pièces.
- Préparées de manière à limiter les longueurs de soudure au plafond (voir fig. n° 15).
- Arrondies aux angles de coin.
- Equipées d'un anneau ou autre système d'élinguage.

Figure n° 15 : Type de profil permettant de limiter le soudage au plafond.



Installation du chantier

Pour pouvoir réaliser un travail de qualité, il est indispensable que le plongeur soudeur soit correctement installé de manière à pouvoir garder une position stable.

Dès lors, à l'exception des travaux sur le fond, il faut au préalable installer un support sur lequel le plongeur soudeur pourra évoluer.

Diverses méthodes allant de la simple échelle à la nacelle supportée par une grue peuvent être utilisées. L'essentiel est que le plongeur soudeur puisse se sentir à l'aise et se concentrer entièrement sur son soudage.
En aucun cas le soudage n'est exécuté en palmant.

Photo n° 22 : Installation du chantier (doc. Internet)

Il en va de même pour les câbles de soudage où il faut éviter que de grande longueur traîne inutilement dans l'eau et risque ainsi d'offrir une prise au courant ou d'exercer une traction sur la pince porte - électrode et / ou la pince de masse.
Il est donc préférable de bosser les deux câbles à proximité de la zone de travail tout en laissant suffisamment de mou pour pouvoir souder sans contrainte.
La visibilité joue également un très grand rôle dans la qualité des soudures, il peut dès lors être utile d'installer des projecteurs autour de la zone de travail.
Dans tous les cas, le plongeur soudeur doit au minimum être équipé d'un éclairage de tête qui lui permettra de vérifier la qualité de chaque cordon soudé.
Une fois le chantier bien installé, le plongeur soudeur peut si nécessaire se faire envoyer par la main courante une plaque de test de même épaisseur que la pièce à souder qui servira à faire le réglage final de l'intensité de soudage.

Préparation du support

Il est très important que la pièce à souder vienne se plaquer correctement contre la structure de base. Dès lors en fonction de l'importance du chantier, le nettoyage pourra se faire à la main (grattoir, brosse métallique) ou de manière mécanique (brossage, jet HP, sablage).
Le degré de propreté sous la pièce à souder doit correspondre au minimum à un degré de préparation Sa 1 ce qui signifie que le support devra être exempt de toutes substances.
Par contre, ce degré de nettoyage ne suffit généralement pas pour réaliser des soudures de qualité, c'est pourquoi une bande d'une dizaine de centimètre doit également être décapée au droit du joint à souder de manière à obtenir un degré de préparation Sa 2,5 ou Sa 3 ce qui signifie que le métal devra avoir au minimum une couleur métallique sur 80 % (Sa 2,5) ou 100 % (Sa 3) de sa surface (Norme ISO 8504-2).

Photo n° 23 : Nettoyage structure (doc. Internet)

Photo n° 24 : Décapage Sa 3 et Sa 1 (doc. Internet)

Le sablage permet d'arriver assez facilement à ce résultat car l'impact des grains contre le métal provoque l'éclatement de la pellicule d'oxyde ou de peinture et met le métal à nu.
Si l'on se trouve en présence de concrétions marines molles une bande supplémentaire d'environ un demi-mètre doit être succinctement nettoyée de manière à ne pas entraver la visibilité.

Positionnement des pièces

Quel que soit la dimension des pièces à souder, il n'est pratiquement pas possible de maintenir celle-ci d'une main et de la pointer de l'autre, c'est pourquoi la procédure de travail doit prévoir un système de calage de manière à pouvoir bloquer la pièce en position de soudage.
Un système couramment utiliser consiste à souder préalablement à intervalles réguliers des clames équipées d'une vis de rapprochement.
Une fois la tôle bien en place entre les clames, les vis de réglage sont progressivement serrées de manière à bien plaquer la pièce contre la structure de base.

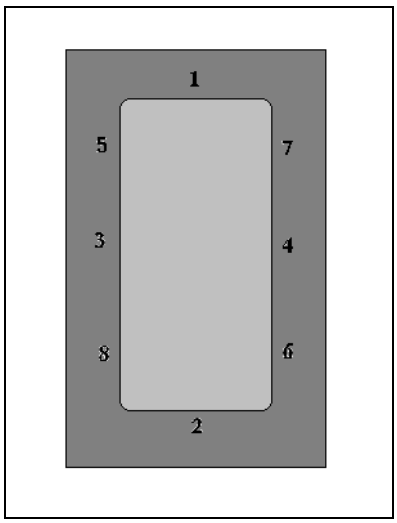
Là où le contact n'est pas intime, les vis de réglage peuvent à condition que la tôle ne soit pas trop épaisse ramener celle-ci contre la structure.
A noter que les clames de maintien ne doivent être soudée que d'un seul coté de manière à pouvoir être enlevées à l'aide d'un bon coup de masse.

Photo n° 25 : Positionnement pièce à souder (document Internet)

Pointage

Le pointage a pour but essentiel de maintenir la pièce à souder dans la même position par rapport à la structure de base de manière à ce qu'elle ne s'écarte pas à cause des phénomènes d'échauffement.
Il consiste à souder des cordons de soudure très courts et assez minces à des intervalles réguliers.
Etant donné que dans l'eau, l'échauffement général de la pièce est moins important qu'en surface, l'espacement entre les points peut être égal à environ cinquante fois l'épaisseur de la tôle à souder.
Pour limiter les contraintes, la séquence de pointage se fait généralement en étoile.

Figure n° 16 : Séquence de pointage



Au moment de l'opération de soudage proprement dite, le point peut être soit refondu, soit supprimé par meulage ou fraisage.
Cette seconde méthode est toutefois préférable car elle évite la formation d'une surépaisseur, ce qui peut en cas de soudage multi-passes provoquer un début de déviation du cordon.

Soudage

Bien que le soudage sous eau soit à cause de son environnement hostile rendu plus complexe que le soudage en surface, il n'est pas spécialement nécessaire d'être un soudeur qualifié surface pour réussir des soudures de qualité sous eau.
En effet, le soudeur qualifié devra oublier ses petits « trucs » utilisés en surface car sous eau, les sensations ressenties pendant le soudage, sont fort différentes.
Sous eau, le plongeur soudeur doit se fier à trois sens bien définis :

1. Le toucher.

Le toucher est probablement le paramètre le plus important à contrôler car une fois que l'arc est créé entre le bout de l'électrode et la pièce, il faut tout en exerçant une légère pression, laissé celle-ci se consumer naturellement tout en maintenant l'angle d'avancement et l'angle de guidage dans la position appropriée.
C'est grâce au toucher, que le plongeur soudeur peut déterminer si la vitesse de combustion de l'électrode est correcte ou est au contraire trop lente ou trop rapide.
Dans tous les cas, il doit essayer d'adopter la position la plus stable possible.
Le soudage à deux mains, l'une tenant le porte - électrode, l'autre guidant l'électrode permet de bien ressentir le soudage.

2. Le son.

Le son émis durant la combustion de l'électrode est un bon indicateur du réglage de l'intensité. En général un bon réglage peut être reconnu grâce à un crépitement doux et régulier.
Au contraire, un crépitement bruyant et irrégulier signifie souvent que l'intensité de soudage est trop élevée.
A noter, que le son est un peu plus irrégulier lorsque le soudage à lieu en eau douce à cause d'une plus grande instabilité de l'arc.

3. La vision.

La vision permet de contrôler l'intensité et le bon centrage de l'arc électrique mais également la position de l'électrode par rapport au joint à souder.
Le bain de fusion est par contre très difficile à observer à cause du flot incessant de bulle de gaz.
C'est par ailleurs ce phénomène qui génère la complexité du soudage sous eau, c'est pour cela que le plongeur soudeur doit essayer d'adopter une position de travail qui lui permet de garder la tête légèrement sous le flux de bulles car c'est la seule manière qui lui permet de voir son électrode.

Mode d'exécution des cordons de soudure

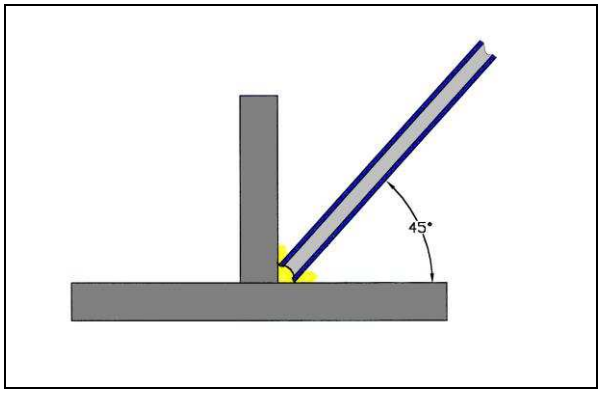
Sous eau, on utilise principalement la méthode dite *automatique manuelle*.
Avec cette technique, l'électrode est *traînée* d'une manière continue contre les pièces à souder.
Durant le déplacement, le plongeur soudeur doit veiller à maintenir une bonne inclinaison de la baguette.

Lors d'une soudure d'angle l'électrode doit respecter deux angles d'inclinaisons :

1. Une inclinaison transversale.
2. Une inclinaison par rapport à la direction d'avancement.

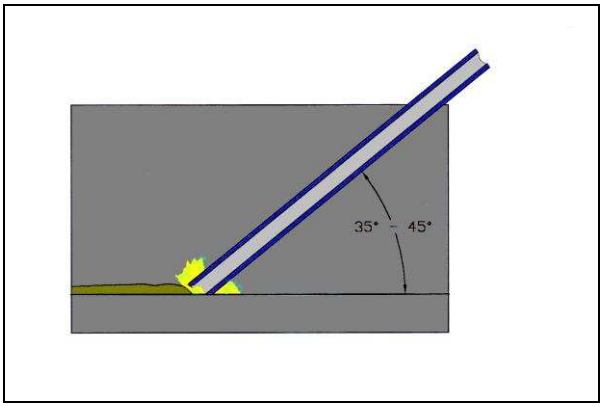
Pour une soudure en simple passe, l'inclinaison de l'électrode doit être égale à la bissectrice de l'angle séparant les deux pièces soit en général 45°.

Figure n° 17 : Angle d'inclinaison position PB (2F)



L'inclinaison de l'électrode dans le sens de l'avancement (angle de guidage) est le plus souvent comprise entre 35° & 45°.
L'augmentation de l'inclinaison par rapport à une soudure de surface qui est rappelons le de 60° - 70° permet une meilleure évacuation des bulles de gaz.
Un léger changement de l'angle de guidage, permet d'influencer la vitesse d'avancement, la largeur du cordon ainsi que la profondeur de pénétration.

Figure n° 18 : Angle de guidage position PB (2F)



De même que pour le soudage en surface les quatre positions de base suivantes peuvent être utilisées sous eau:

1. A plat.
2. Horizontalement.
3. Verticalement.
4. En plafond.

Le soudage à plat est considéré comme étant la position la plus facile car dans ce cas, le métal en fusion est soutenu naturellement et n'a dès lors pas tendance à s'effondrer.

D’autre part, les bulles de gaz peuvent remonter librement sans provoquer d’interférence dans le bain de fusion ce qui réduit le risque de formation de porosité dans la soudure.

Dans un soudage en position horizontale le bain de fusion subit l’influence de la gravité et si celui-ci est trop important, ou si l’intensité de soudage est trop élevée il peut avoir tendance à s’effondrer.
Dans le cas présent, les bulles de gaz peuvent également s’échapper librement réduisant ainsi le risque de formation de porosité dans la soudure.
Cette position de soudage offre l’avantage qu’à cause de la position de travail, la tête du plongeur soudeur se trouve généralement sous le bain de fusion et de ce fait la vision n’est que très peu entravée par le flux de bulles.

Avec le soudage en position verticale, la vitesse d’avancement est l’élément essentiel à maîtriser. Si celle-ci est trop rapide, il y a risque de manque de pénétration avec une mauvaise répartition du métal déposé.
Au contraire si la vitesse d’avancement est trop faible, le plongeur soudeur peut se faire *gagner* par le laitier et avoir des inclusions dans le métal déposé.
En position verticale descendante, le flux de bulles de gaz remonte le long de la soudure, mais également le long du bain de fusion ce qui peut générer la formation de quelques porosités dans le métal déposé.
D’autre part, étant donné que la vitesse de déplacement est plus importante que dans les autres positions, l’énergie de soudage est moindre ce qui a comme conséquence directe de refroidir plus rapidement les pièces et donc d’augmenter la dureté du métal déposé ainsi que dans la zone affectée thermiquement (ZAT).
Ici aussi, en fonction de la position de la tête, le flux de bulles ne doit en principe pas trop affecter la visibilité.
Sous eau, la majorité des soudures verticales se fait en position descendante. Le seul cas ou le soudage se fait en position montante est réalisé lorsque le joint entre les pièces présente un écartement.
De même qu’en surface, le soudage en montant ne peut se faire qu’en passe balancée ce qui sous eau accroît considérablement la difficulté.

Figure n° 19 : Angle d’inclinaison position PG (3F)

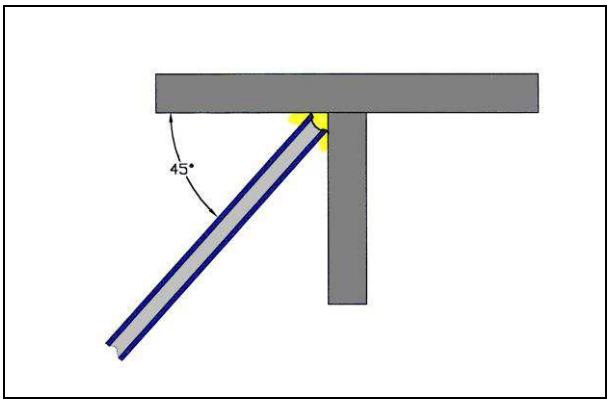
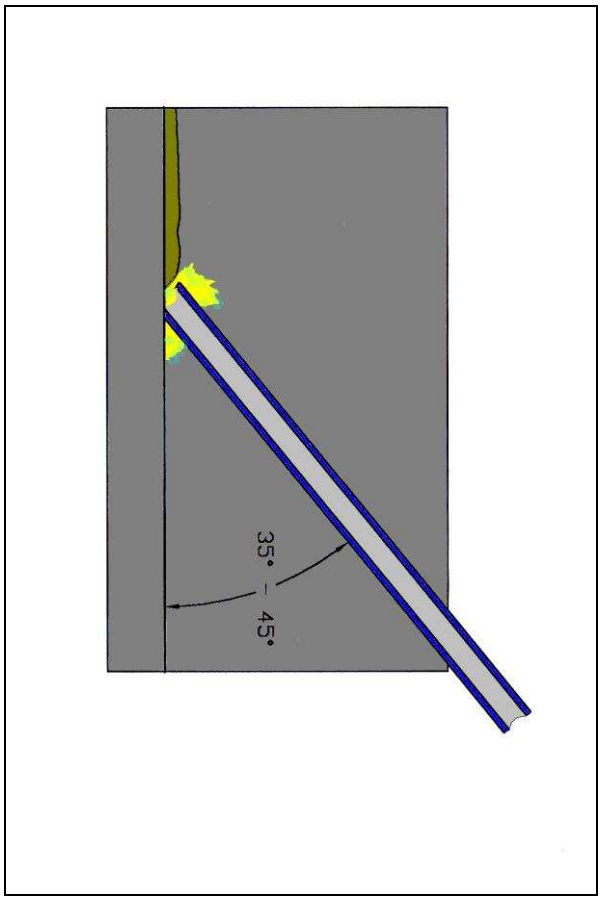
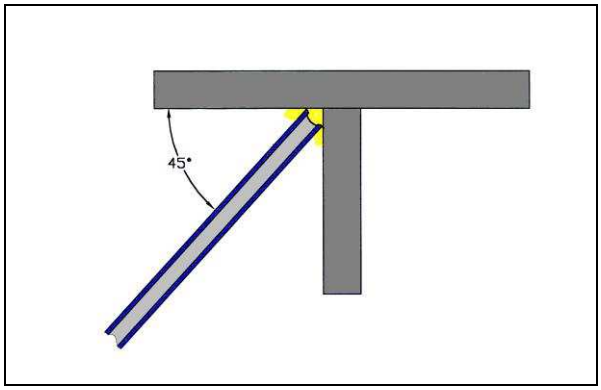


Figure n° 20 : Angle de guidage position PG (3F)



Le soudage en plafond est considéré comme étant le plus difficile à réaliser d'une part à cause du manque de visibilité produit par le flux de bulles et d'autre part par le fait que la gravité a tendance à faire tomber le bain de fusion si l'intensité est trop élevée.
En général, une bonne pénétration est obtenue mais le cordon déposé a une forme convexe et l'on constate souvent la présence de caniveaux.

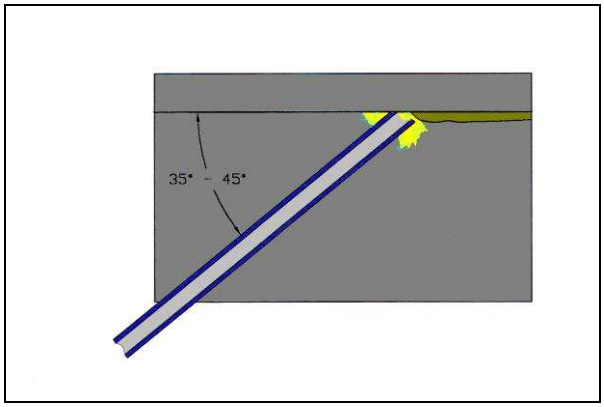
Figure n° 21 : Angle d'inclinaison position PD (4F)



La convexité du cordon peu être quelque peu atténuée en modifiant la technique du soudage.
Ainsi, plutôt que de maintenir un angle d'inclinaison constant de 45°, le plongeur soudeur modifie (en gardant l'extrémité de l'électrode comme centre de rotation) successivement l'angle d'inclinaison entre 35° et 55° tout au long de la progression de l'électrode.

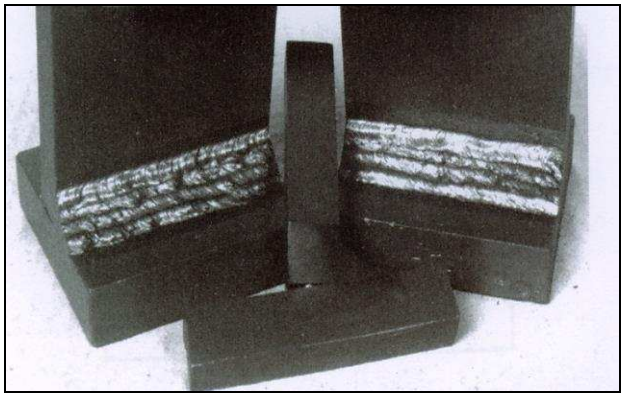
Nul besoin de dire que cette technique demande une certaine pratique.
On s'est également rendu compte qu'avec ce type de position de soudage, la dureté du métal déposé ainsi que celui de la ZAT est moins élevé que pour les autres positions.
Ceci est entre autre dû au confinement des bulles de gaz qui restent plus longtemps en contact avec le bain de fusion et en réduisent dès lors la vitesse de refroidissement.

Figure n° 22 : Angle de guidage position PD (4F)



Soudage multi-passes

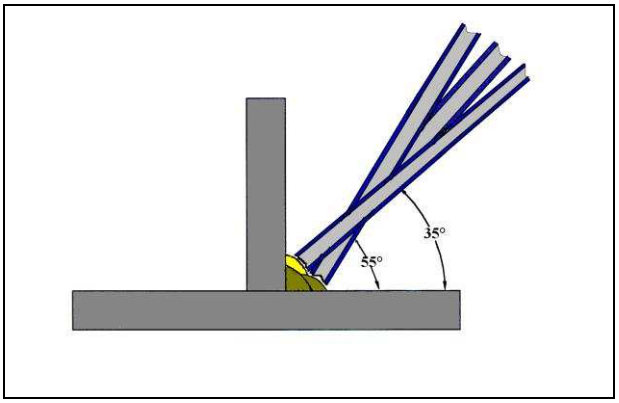
Photo n° 26 : Soudage d'angle en 10 passes (doc. Specialty welds)



Etant donné qu'une grande partie des travaux de soudage réalisés sous eau sont destinés à renforcer des structures, il est rare que le soudage se fasse en une seule passe.
Le soudage en deux passes superposées est parfois autorisé en cas de visibilité limitée mais les caractéristiques mécaniques demandées ne sont pas toujours atteintes.
C'est pourquoi, un minimum de trois passes est souvent exigé.
Outre le fait que le soudage multi-passes permet d'obtenir des soudures ayant une plus grande résistance, il confère également une meilleure ductilité au joint car la passe du fond subit une sorte de *revenu* qui diminue le caractère trempé de l'acier.
Le soudage multi-passes est plus difficile à réaliser car l'électrode n'est plus guidée par l'angle naturel des pièces et elle peut dès lors être facilement déviée de sa trajectoire.
De plus, chaque nouvelle passe doit être déposée de manière à recouvrir 50 % de la passe précédente.

L'angle de guidage pour une soudure multi-passes reste le même qu'en simple passe, mais les angles d'inclinaisons seront respectivement de 35° et 55°.

Figure n° 23 : Angles d'inclinaison en 3 passes



Le nombre de passe est déterminé par la profondeur de la gorge.
Ce calcul est généralement effectué par un bureau d'étude et la cote g doit alors être indiquée sur le plan.
A défaut d'indication, on peut se baser sur les cotes suivantes qui sont calculées en fonction de l'épaisseur des tôles.

Tableau n° 18 : Profondeur de gorge en fonction de l'épaisseur des tôles

Epaisseur (mm)	g (mm pour cordons plats)
5-10	3
10	4
15	5
20	5
25	6
30	7

Une gorge de 3 mm demande généralement le soudage de trois passes réparties en une passe de fond et deux passes de remplissage, tandis qu'une gorge de 4 mm demande en principe le soudage de six passes réparties en une passe de fond, deux passes de remplissage et 3 passes de finition.
La mesure de la gorge peut se faire à l'aide de divers types de jauge.
A défaut de cet accessoire, on peut se baser sur la largeur du cordon de soudure et se reporter au tableau ci-dessous.

Tableau n° 19 : Profondeur de la gorge en fonction de la largeur et forme du cordon

g	Largeur & forme cordon (mm)		
	convexe	plat	concave
3	5	6	9
4	7	8	12
5	8,5	10	15
6	10	12	18

Diamètre de l'électrode

En surface, le choix du diamètre des électrodes est fortement dépendant de l'épaisseur des pièces à souder et le soudeur dispose pour cela d'un large éventail de diamètres compris entre 2 et 6 mm.

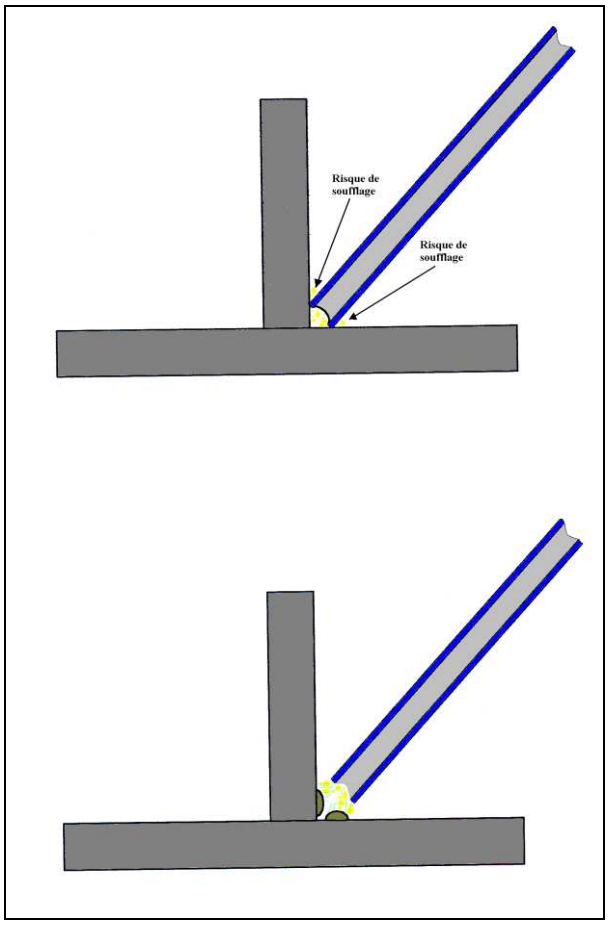
Sous eau, à l'exception du soudage de tôles minces < 3 – 5 mm où des baguettes de 2 ou 2,5 mm peuvent être utilisées, les diamètres les plus couramment utilisés se situent entre 3,2 et 4 mm. En effet, la mise en œuvre d'électrodes de faible diamètre < 3,2 mm ne permet pas de déposer assez de métal dans le joint et de ce fait la soudure manque généralement de résistance.

A l'inverse, une électrode de diamètre > à 4 mm n'est pas recommandée car le courant nécessaire à la fusion devient fort élevé et est susceptible de générer les problèmes suivants :

- Mauvais contrôle de l'arc.
- Flux important de bulles.
- Cordon de soudure large mais sans pénétration.
- Porosité du cordon de soudure.
- Effet de trempe plus important.
- Mauvaise répartition du métal déposé.

En résumé en soudage multi-passes on sélectionne de préférence une électrode de 3,25 mm pour la passe de fond suivit d'une électrode de 4 mm pour les passes de remplissage.

Figure n° 24 : Risque généré par l'utilisation d'une électrode trop grosse en passe de fond



Intensité du courant de soudage

L'intensité du courant de soudage est réglée en fonction du diamètre des électrodes et de la position de soudage.
L'ampérage utilisable est indiqué sur la boite d'électrodes mais ces valeurs se situent parfois sur une plage assez large comme par exemple entre 170 – 220 Ampères.
Dans ce cas, on débute généralement le réglage avec une intensité égale à la moyenne des deux valeurs mentionnées (195 Ampères) et en fonction des résultats obtenus, on augmente ou diminue le courant par plage de 5 – 10 Ampères jusqu'à l'obtention du courant optimum.
Afin de pouvoir compenser la résistance ainsi que les pertes de chaleur du bain de fusion dû à l'action de l'eau, l'intensité du courant est majorée d'environ 10 – 20 % par rapport au soudage de surface.
Les valeurs affichées sur les boites d'électrodes conçues pour le soudage sous – marin tiennent compte de cette augmentation d'intensité, par contre si des électrodes de surface marinisées sont utilisées le plongeur soudeur doit rajouter ce pourcentage de majoration aux valeurs mentionnées sur la boite.

Tableau n°20 : Intensité de soudage en eau (valeurs indicatives)

∅ électrode	Position de soudage	Intensité AMPS
3.25	Horizontale / verticale	145 - 185
3.25	Verticale descendante	145 - 185
3.25	Plafond	140 - 170
4	Horizontale / verticale	170 - 210
4	Verticale descendante	170 - 210
4	Plafond	170 - 190

Résistance des cordons de soudure

Lorsqu'aucun test n'est réalisé sur éprouvette, on considère généralement que la résistance à la traction d'un centimètre de soudure linéaire réalisé en 3 passes avec une électrode de 3,25 et 4 mm permet d'atteindre 1800 kg. Cependant, lorsque les soudures sont destinées au levage un coefficient de 10 doit être adopté en raison de l'inconnue que représente les diverses charges dynamiques (flexion, tension, compression).

Exemple : Quelle doit être la longueur linéaire de cordon soudé autour d'une plaque de levage devant supporter une charge de 10 T.

10.000 : 180 = 55 cm

Polarité

Sous eau il est recommandé de souder en polarité directe (électrode au -).
Le choix de ce type de polarité est en grande partie dû au fait que :

1. Les parties métalliques du matériel de soudage, mais également de l'équipement de plongée sont beaucoup moins rapidement détériorées par le phénomène d'électrolyse.
2. Les risques de choc électrique sont diminués.
3. Les risques de surchauffe et d'écaillage de l'enrobage de l'électrode sont moins élevés.

D'autre part, le fait de souder en polarité directe présente également l'avantage d'avoir une meilleure pénétration puisque dans le présent cas, environ 2/3 de la chaleur produite sont générés par la pièce tandis que le 1/3 restant va à l'électrode.

Le soudage en polarité inverse génère lui un bain de fusion plus fluide, moins pénétrant, mais donne un plus bel aspect final du profil. Il peut donc en certaines circonstances être utilisé pour le soudage des passes terminales.
Dans tous les cas, il faut se conformer aux recommandations du fabriquant.

Il peut arriver que le marquage des polarités sur l'appareil de soudage ne soit plus visible, ou que tout simplement on ait un doute sur la nature de la polarité.
Dans ce cas, elle peut être déterminée de la manière suivante :

- Remplir un seau plastique avec de l'eau salée.
- Raccorder le câble de masse à la borne positive supposée de l'appareil de soudage.
- Fixer une plaque métallique sur la pince de masse.
- Immerger la plaque dans l'eau salée.
- Brancher le câble de soudage à la borne négative supposée de l'appareil de soudage.
- Fixer une électrode dans la pince porte - électrode.
- Demander le contact.
- Immerger l'extrémité de l'électrode et la rapprocher à environ 5 cm de la plaque.

Normalement, si la polarité est correcte, un flot de bulles doit apparaître au niveau de l'extrémité de la baguette.
Si ce n'est pas le cas, il faut couper le courant et inverser les câbles au niveau du générateur.
Au cours de ce test, il faut s'assurer que l'opérateur est bien isolé.
Evidemment bon nombre d'opérations de soudage se déroule en eau douce et dans ce cas le phénomène d'électrolyse est moins présent et donc moins facile à observer.
Une simple adjonction d'environ 250 g de sel dans le seau d'eau douce permet de remédier au problème.

Contrôle des soudures

L'augmentation des chantiers de soudage prouve que cette technique offre des critères de qualité satisfaisant si l'opération de soudage a été réalisée dans les règles de l'art.
Il n'est cependant pas rare que sur des chantiers importants le cahier des charges impose qu'un certain nombre de soudures soit contrôlé d'une manière tout à fait aléatoire.
Ce type de contrôle est généralement réalisé par des plongeurs habilités ayant une qualification NDT (non destructive testing).
Diverses méthodes de contrôle non destructif peuvent être mise en œuvre tels que :

- L'inspection visuelle.
- Le contrôle magnétique.
- Le contrôle par ultra - sons.
- Le contrôle radiographique.

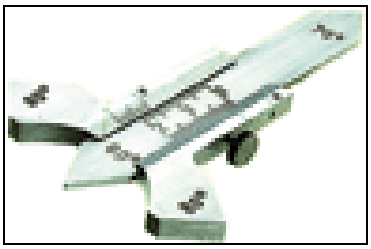
L'inspection visuelle

L'inspection visuelle est réalisée à l'œil nu sur l'ensemble de la pièce afin de déterminer si les soudures correspondent aux normes demandées.
Les points particulièrement vérifiés sont :

- La porosité de surface.
- La présence, le nombre et la profondeur des caniveaux.
- Le profil des cordons.

Pour les soudures d'angle ou à clin on vérifie également à l'aide de jauges que la hauteur de la gorge et la longueur du coté ont les dimensions requises.

Photo n° 27 : Jauge de contrôle (doc. Internet)



Bien que le plongeur soudeur n'est en général pas habilité à contrôler ses propres soudures, il est néanmoins fortement recommandé qu'il vérifie déjà lui-même son travail à l'aide de cette méthode visuelle de manière à pouvoir apporter toutes les corrections nécessaires avant le contrôle réalisé par des plongeurs NDT.

Le contrôle magnétique

Cette méthode permet de repérer des discontinuités telles que par exemple des fissures. L'opération consiste à créer un champ magnétique perpendiculaire au défaut probable à l'aide d'une encre fluorescente composée de poudre métallique et qui est répandue uniformément sur la soudure.
A l'endroit du défaut une concentration de l'encre pourra être observée par l'intermédiaire d'une lampe UV.

Les défauts situés en surface sont facilement repérables avec cette méthode mais elle devient plus aléatoire pour les défauts situés en profondeur.
A noter que seuls les métaux ferreux qui sont les seuls à pouvoir être magnétisés, peuvent être contrôlés avec cette méthode.

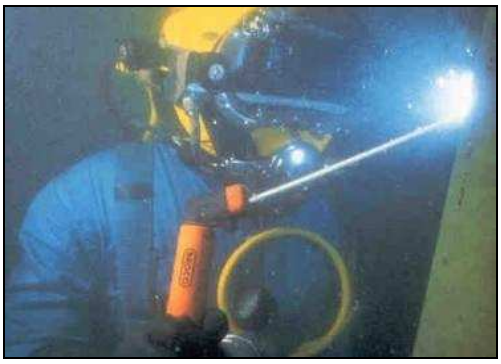
Le contrôle par ultra-sons

Le principe de cette méthode consiste à émettre dans le métal un signal de très haute fréquence (2,5 à 6 MHz) sous un certain angle et d'en recueillir l'onde réfléchie.
Si les ultra-sons ne rencontrent aucune discontinuité dans le métal, ils vont atteindre la face inférieure de celle-ci et se réfléchir selon un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence.
Si par contre, le signal rencontre un défaut quelconque sur son parcours, celui-ci va jouer le rôle de surface réfléchissante et le palpeur recueillera deux ondes réfléchies.
Ce type de contrôle ne permet pas de donner une image du défaut, mais il permet de donner la profondeur exacte de même que son orientation ce qui peut donner une indication utile pour l'angle de prise de vue d'une éventuelle radiographie.

Le contrôle radiographique

Le principe de cette méthode consiste à envoyer un rayon X ou Gamma au travers de la pièce à contrôler de manière à les impressionner sur un film placé derrière la pièce.
En traversant la paroi opaque du métal, les rayons sont partiellement absorbés.
La présence d'un défaut aura une incidence sur l'intensité du rayonnement qui sur le film sera alors détecté par une tache plus claire.
A noter que ce type de contrôle n'est pas très souvent utilisé sous eau car il n'est pas toujours possible de placer le film à l'arrière de la soudure.

LES POSITIONS DE SOUDAGE



Photos n° 28 : Diverses positions de soudage (doc. Internet)

Les positions de soudages peuvent être réalisées :

- A plat
- En corniche
- Verticalement (montant ou descendant)
- Au plafond

Il existe naturellement des positions intermédiaires telles que les demi - montantes ou les demi - descendantes.
Actuellement, deux standards de qualification différents sont utilisés dans le monde.

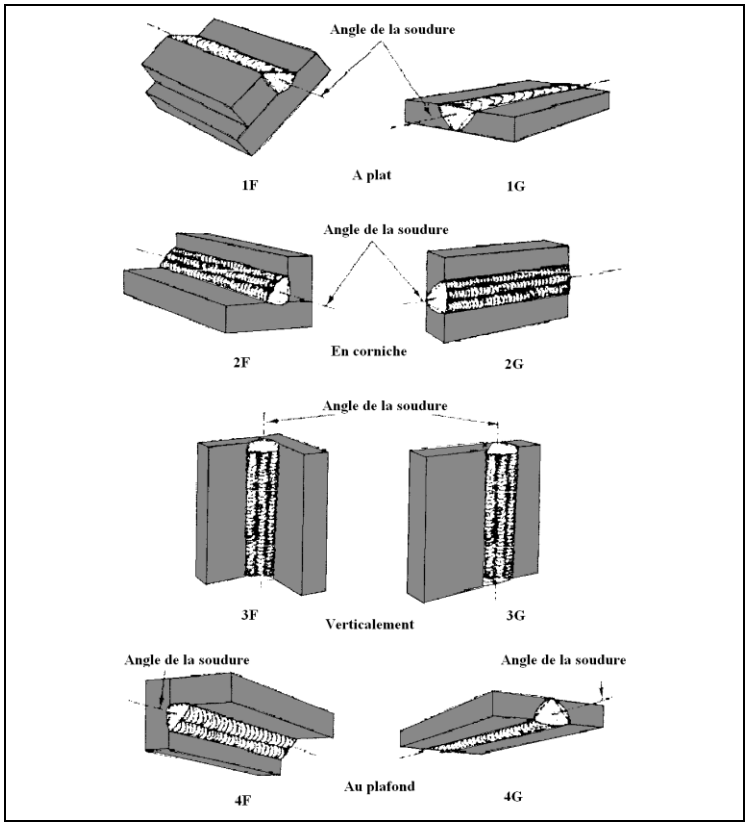
1. Le standard Américain AWS A3.0
2. Le standard Européen EN ISO 6747

Positions de travail AWS A3.0

Selon ce standard de qualification chaque position de soudage est désignée par la combinaison d'une lettre (F ou G) qui est fonction du type d'assemblage et d'un chiffre (1 à 6).
Les assemblages soudés peuvent être classés en deux catégories :

1. Les assemblages bout à bout, réalisés dans un même plan avec ou sans chanfrein.
2. Les assemblages réalisés en angle intérieur, extérieur ou à clin.

Figure n° 25 : Types de préparations et positions de soudage selon AWS A3.0



La lettre G est l'abréviation du mot anglais Groove qui signifie chanfrein et elle est dès lors utilisée pour les assemblages bout à bout, tandis que la lettre F est l'abréviation du mot Fillet qui signifie en congé et elle est donc utilisée pour les assemblages de ce type.
Le chiffre, détermine la position de soudage :

1 = A plat (1F / 1G)
2 = En corniche ou horizontale (2F / 2G)
3 = Verticale (3F / 3G)
4 = Au plafond (4F / 4G)

Cette première série de chiffre concerne les soudures réalisées sur tôle ou sur tube et cela tant en soudage d'angle ou de chanfrein.

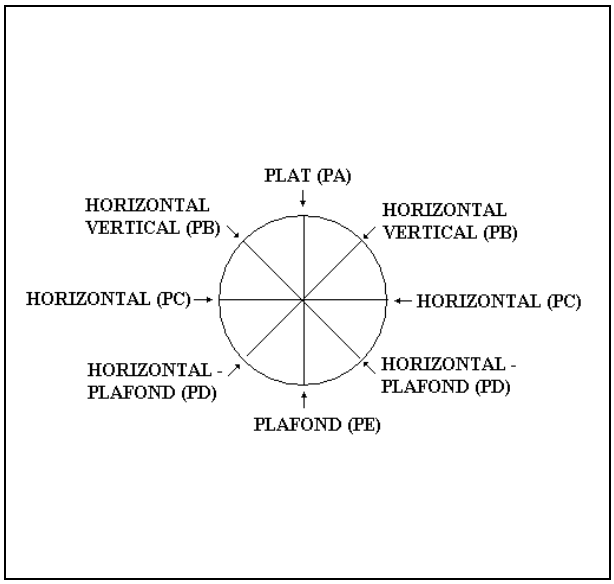
5 = Toutes positions autour d'un tube posé horizontalement (5G)
6 = Toutes positions autour d'un tube posé à 45° (6G)

Positions de travail EN ISO 6947

Un autre standard de qualification EN ISO 6947 utilisé depuis 1997 décrit un autre code de positionnement désigné par 2 lettres :

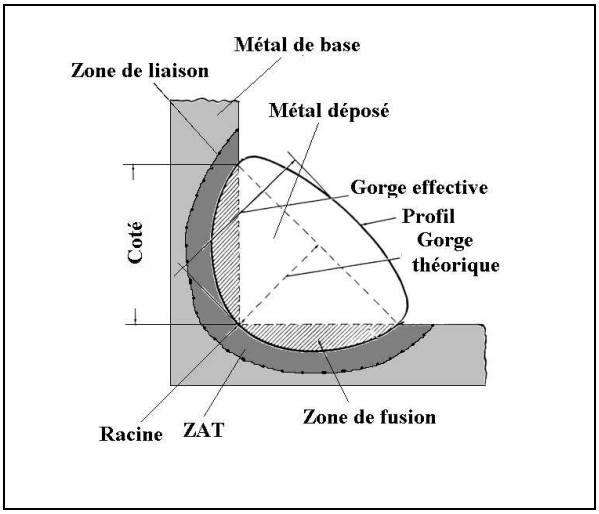
PA = A plat
PB = En corniche à plat
PC = Horizontal
PD = Horizontal au plafond
PE = Au plafond
PG = Vertical descendant
PF = Vertical montant

Figure n° 26 : position de soudage selon NBN EN ISO 6947



DEFAUTS DE SOUDAGE

Figure n° 27 : Caractéristique d'une soudure



Les défauts de soudage sont des imperfections que l'on trouve dans la soudure par rapport à une soudure idéale.
Les défauts peuvent être détectés de diverses manières :

- Inspection visuelle.
- Tests non destructifs.
- Tests destructifs.

La classification des défauts est répartie en six groupes :

1. Fissures (100).
2. Cavités (200).
3. Inclusions solides (300).
4. Manque de fusion (400).
5. Défauts de forme et défauts dimensionnels (500).
6. Défauts divers (600).

Les fissures

Les fissures sont des discontinuités que l'on peut retrouver dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement (ZAT), la zone de liaison ou dans le métal de base.
Elles peuvent se produire par une rupture locale à l'état solide, en cours de refroidissement ou par des tensions.
Les fissures sont des défauts inacceptables car elles ont tendance à se propager ce qui à terme peut mener à la ruine de la structure.
Plusieurs types de fissures existent qui peuvent apparaître sous diverses formes telles que :

- Micro fissure (1001).
- Fissure longitudinale (101).
- Fissure transversale (102).
- Fissures rayonnantes (103).
- Fissure de cratère (104).
- Réseau de fissures marbrées (105).
- Fissures ramifiées (106).

Fissuration à froid

La fissuration à froid peut apparaître lorsque les trois conditions suivantes sont réunies :

1. Présence de contraintes.

Les contraintes se développent au niveau du joint durant le refroidissement et dépendent entre autre des propriétés mécaniques du métal de base, du métal fondu, de la séquence de soudage et du type de bridage.

2. Présence d'hydrogène diffusible.

Au cours du refroidissement, l'hydrogène présent dans le métal fondu va tenter de sortir de celui-ci et donc exercer une tension dans le métal qui risque de provoquer une rupture.

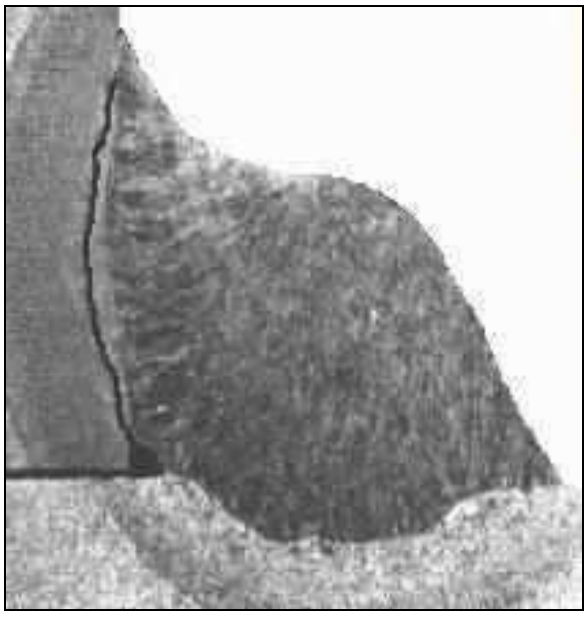
3. Présence d'une soudure peu ductile.

La composition et la structure du métal a une influence certaine sur le risque de fissuration à froid et celui-ci augmente dès que la teneur en carbone du métal déposé dépasse 0,25%.
Le risque est également accru lors du soudage en pleine eau, car le refroidissement rapide génère une structure bainitique et/ou martensitique donc moins ductile.

Le risque de fissuration à froid peut être diminué en :

- Utilisant une énergie de soudage élevée.
- Limitant le bridage.
- Nettoyant correctement les pièces à assembler.
- Utilisant des électrodes à bas hydrogène.

Photo n° 29 : Fissuration à froid (doc. Internet)



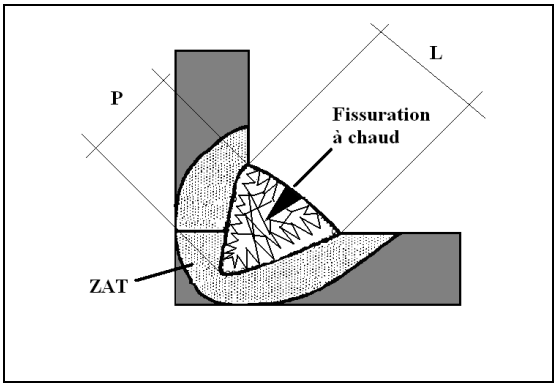
Fissuration à chaud

La fissuration à chaud se forme à très haute température lors du refroidissement du bain de fusion.
Lors de la phase de solidification, des contraintes de retrait vont avoir tendance à séparer les cristaux dans le centre de la soudure.
La forme du cordon peut également être la cause de ce type de défaut si le rapport entre la largeur et la profondeur du joint est inférieur à 0,7.

Le risque de fissuration à chaud peut être réduit en :

- Utilisant des électrodes à haute teneur en Mn.
- Limitant le bridage.
- Soudant des cordons convexes de manière à avoir un excès de métal dans la partie supérieure du joint.
- Respectant le rapport L/P > 0,7.

Figure n° 28 : Fissuration à chaud



Les cavités

Les cavités sont des défauts formés par la présence de gaz emprisonné dans le métal fondu.
Plusieurs types de cavités existent qui peuvent apparaître sous diverses formes telles que :

- Soufflures sphéroïdales (2012).
- Nid de soufflure (2013).
- Soufflures alignées (2014).
- Soufflure allongée (2015).
- Soufflure vermiculaire (2016).
- Piqûre (2017).
- Retassure de cratère (2024).

Les risques peuvent être réduits en :

- Nettoyant correctement les pièces à assembler.
- Utilisant une énergie de soudage adéquate.

En effet, si l'intensité de soudage est trop faible, le bain de fusion peut être trop froid et manquer de fluidité.
A l'inverse, une intensité trop élevée augmente la quantité de gaz.
La vitesse de soudage a également une influence sur l'inclinaison des soufflures.

Figure n° 29 : Nid de soufflures

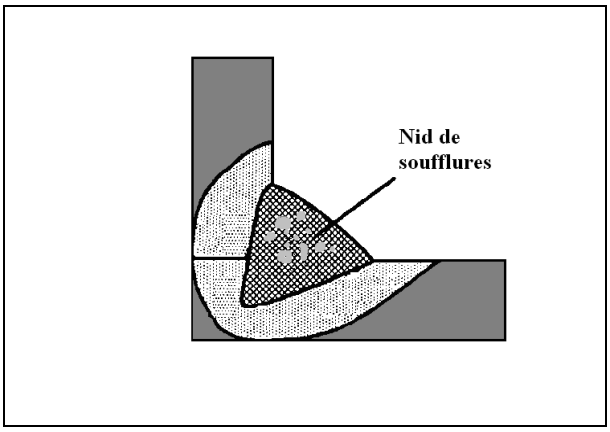
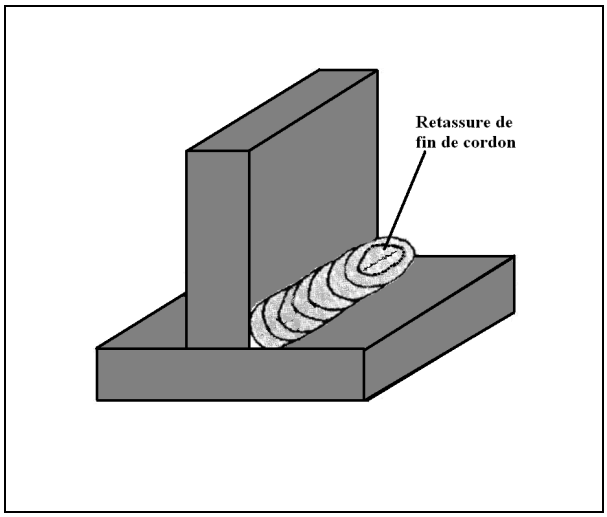


Figure n° 30 : Retassure de fin de cordon



Les inclusions solides

Les inclusions solides sont formées par la présence de corps solides étrangers emprisonnés dans le métal fondu.
Les deux types d'inclusions les plus fréquents sont les :

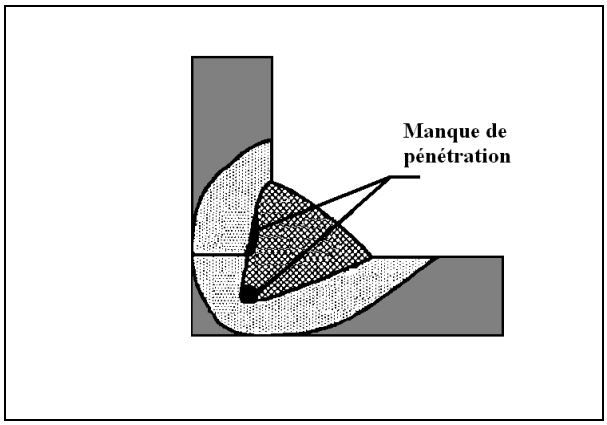
- Inclusion de laitier (301).
- Inclusion d'oxyde (303).

Ce type de défaut n'est généralement pas visible sans contrôle destructif ou non destructif.
Dans ce dernier cas, elle apparaît comme une tache sombre dans le métal fondu.

Les causes sont provoquées par :

- Intensité de courant trop faible.
- Electrodes trop larges.
- Vitesse de soudage trop élevée.
- Mauvaise technique de soudage.

Figure n° 31 : Inclusions



Manque de fusion et de pénétration

Ce type de défaut est dû à un manque de liaison entre le métal de base et le métal déposé ou entre les couches des différentes passes.

Les causes sont provoquées par :

- Vitesse de soudage trop élevée.
- Intensité de courant trop faible.
- Electrodes trop larges.
- Arc trop long.
- Mauvaise technique de soudage.

Ce type de défaut qui apparaît comme une tache sombre dans le métal fondu n'est généralement pas visible sans contrôle destructif ou non destructif.

Photo n° 30 : Manque de fusion et de pénétration (doc. Internet)

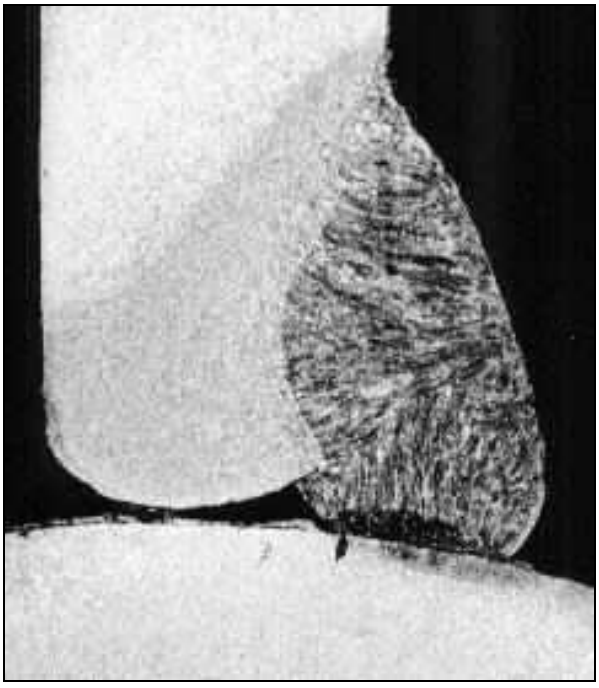
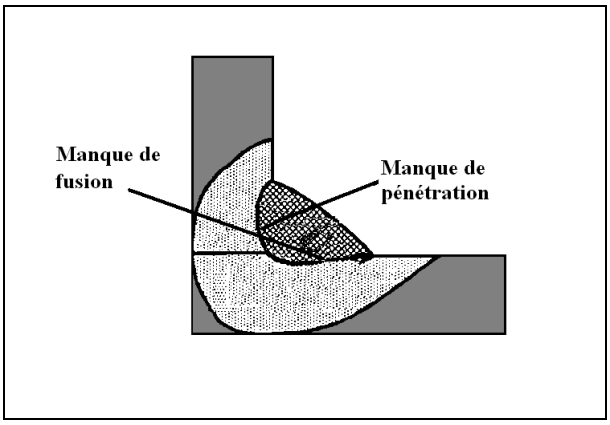


Figure n° 32 : Manque de fusion et de pénétration



Défauts de forme et défauts dimensionnels

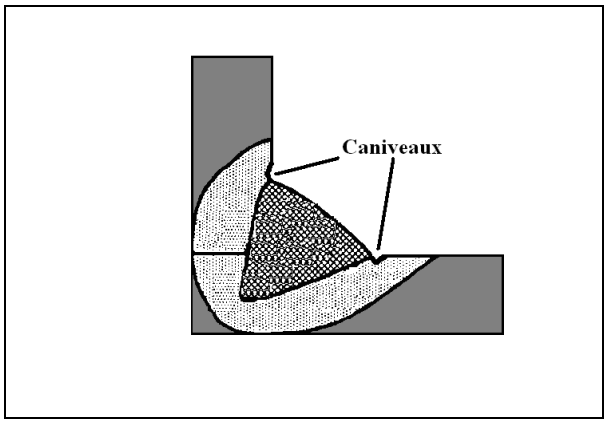
Ces types de défauts sont dus aux formes imparfaites des faces externes de la soudure ou à la forme géométrique imparfaite du joint.
Plusieurs types de défauts de forme existent telles que :

- Les caniveaux (501).
- Les morsures (5012).
- Les surépaisseurs excessives (502).
- Les convexités excessives (503).
- Les excès de pénétration 504).
- Les défauts de raccordement (505).
- Les débordements (506).
- Les défauts d'alignement (507).
- Les défauts angulaires (508).
- Les effondrements (509).
- Les trous (510).
- Le manque d'épaisseur (511).
- Les défauts de symétrie excessif de soudure d'angle (512).
- Les largeurs irrégulières (513).
- Les surfaces irrégulières (514).
- Les retassures à la racine (515).
- Les mauvaises reprises (517).
- Les épaisseurs excessives (5211).
- Les largeurs excessives (5212).
- Les gorges insuffisantes 5213).
- Les hauteurs excessives de gorge (5214).

La plupart de ces défauts sont dus à :

- Mauvaise technique de soudage.

Figure n° 33 : Caniveaux



Les défauts divers

La dernière catégorie de défaut regroupe :

- Les coups d'arc ou amorçages accidentels (601).
- Les projections de métal en fusion (602).
- Les coups de meule (604).
- Les coups de burin (605).
- Les défauts de pointage (607).
- Les résidus de laitier (615).

L'ensemble de tous les défauts énumérés ci-dessus est repris dans diverses normes internationales telles que par exemple la NBN EN ISO 6520-1.
Dans ce cas, chaque type de défaut est repris par un numéro de référence (les chiffres entre parenthèses donnent le numéro général du type de défaut).

Comme on peut s'en rendre compte à la lecture de cette liste, les défauts que l'on risque de provoquer sont assez nombreux et variés.
Heureusement, en ce qui concerne le soudage en pleine eau, les résultats demandés quant à la qualité des soudures sont un peu moins élevés que pour une soudure de classe A (soudure réalisée en surface).
Sous eau, les soudures de classes B et C suffisent généralement. Les résultats à obtenir concernant ces deux classes sont repris dans la norme A89-950.
Dans les lignes suivantes on retrouve quelques uns des critères à obtenir.

Soudures classe B

En ce qui concerne l'examen visuel la soudure doit correspondre aux critères suivants :

- Absence de fissure.
- Pas de manque de fusion entre les passes et entre le métal déposé et le métal de base.
- Les cratères doivent être rechargés.
- Le profil des cordons de soudure doit être suivant la figure n° 34.
- La somme des diamètres des porosités débouchantes de diamètre supérieur à 1,6 mm doit être inférieure à 9,5 mm sur une longueur de 25 mm de soudure.
- La profondeur des caniveaux doit être inférieure à 1,6 mm sauf pour les caniveaux isolés avec une profondeur supérieure à 1,6 mm, mais inférieure à 3,2 mm ou 20% de l'épaisseur du métal de base (la plus petite des deux dimensions), et si séparé par au moins 150 mm d'un caniveau de profondeur maximum de 1,6 mm.

- La somme des longueurs des caniveaux de profondeur de 0,8 à 1,6 mm doit être de 100 mm maximum de longueur de soudure.
- Les caniveaux de profondeur inférieure à 0,8 mm sont acceptés sans réserve.

En ce qui concerne l'examen radiographique la soudure doit correspondre aux critères suivants :

- Soufflures sphériques
  Le diamètre maximal des soufflures ne doit pas dépasser 4,8 mm.
  Le nombre de soufflures éparses de diamètre 1,6 à 4,8 mm doit être inférieur à 7 par 25 mm de longueur de soudure et par 25 mm d'épaisseur de métal déposé.
  Les soufflures de diamètre inférieur à 1,6 mm ne sont pas limitées en nombre.

- Inclusions
  La largeur maximale d'une inclusion ne doit pas excéder 3,2 mm.
  La somme des longueurs des inclusions entre 0,8 et 3,2 mm de large, ne doit pas excéder 100 mm sur 300 mm de longueur de soudure.
  Deux inclusions de largeur supérieure à 0,8 mm doivent être séparées par une distance minimale de 4,8 mm.

- Manque de fusion
  La longueur maximale d'un manque de fusion ne doit pas excéder l'épaisseur du métal de base.
  Un manque de fusion apparemment continu intéressant deux passes ou couches, sera inacceptable quelle que soit la longueur.
  La somme des manques de fusion ne doit pas excéder 100 mm sur 300 mm de soudure.

- Somme des discontinuités.
  La somme des discontinuités ne doit pas excéder 100 mm sur 300 mm de longueur de soudure.

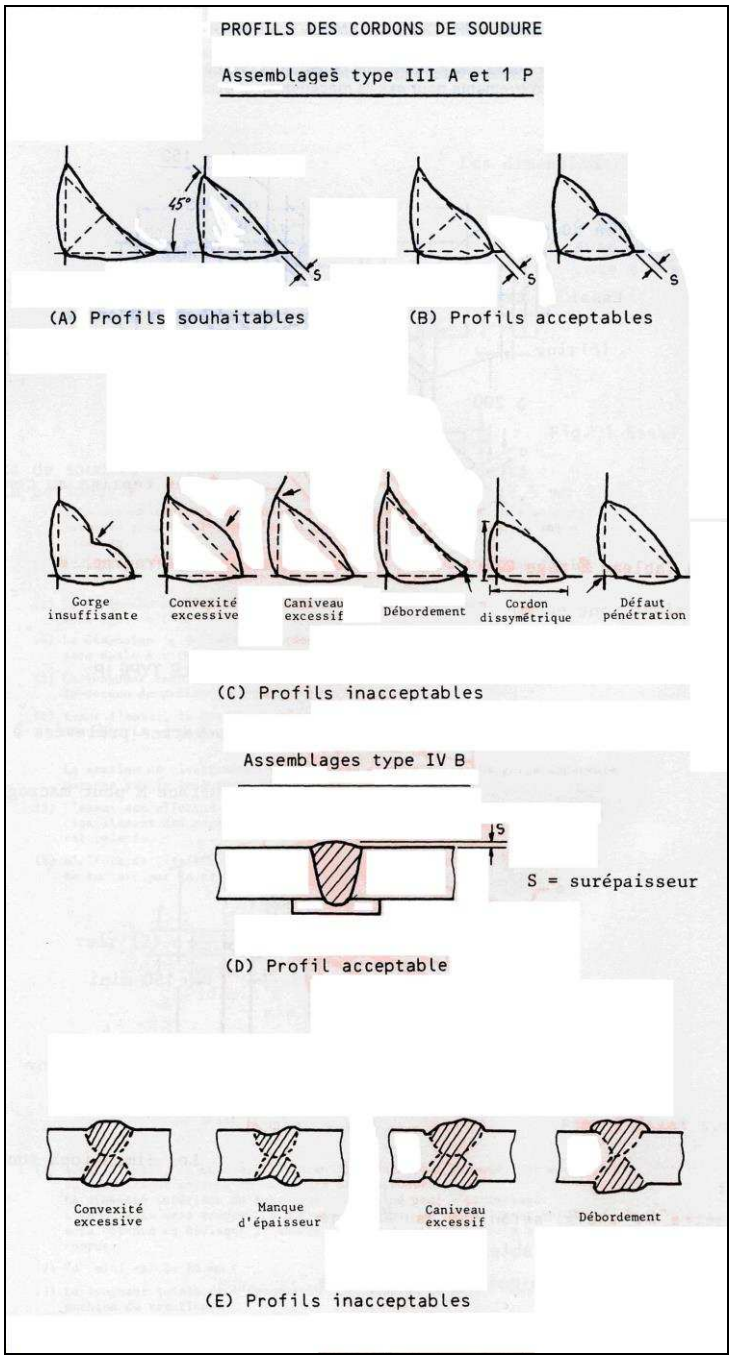
En ce qui concerne les examens destructifs la soudure doit correspondre aux critères suivants :

- Essai de traction.
  La valeur obtenue pour la résistance à la traction en travers du joint soudé doit être au moins égale à la valeur minimale garantie pour l'acier de base.
  En ce qui concerne les soudures d'angle, la charge de rupture doit être ≥ à 60% de la charge minimale de rupture garantie pour l'acier de base.

Soudures classe C

En ce qui concerne l'examen la soudure doit correspondre aux critères de la classe B, sauf en ce qui concerne les soufflures débouchantes qui dans ce cas ci sont admises sans restriction.

Figure n° 34 : Profils des cordons de soudure classe B et C

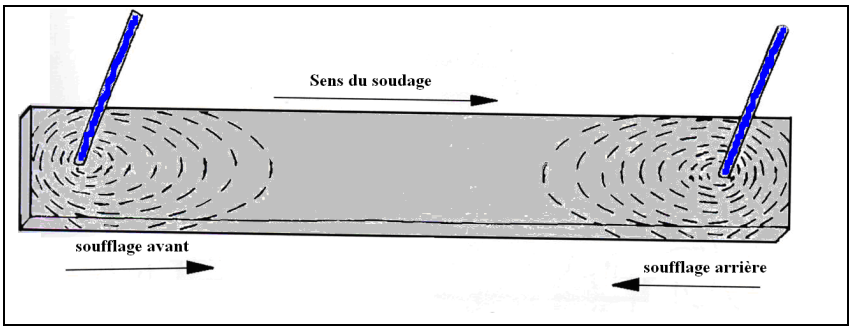


Problèmes de soudage

Soufflage magnétique

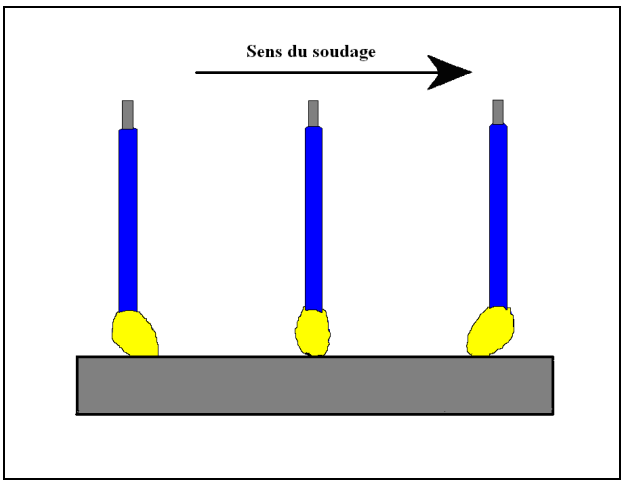
Le soufflage magnétique est caractérisé par une déviation incontrôlée de l'arc de soudage.
Cette déviation peut être latérale, ou vers l'arrière ou l'avant du sens de l'avancement.
Il est causé par les champs magnétiques créés par le passage du courant à travers l'âme de l'électrode.
Ce flux magnétique se présente sous la forme de cercles concentriques qui sont perpendiculaires à l'axe du passage de courant.
Tant que les lignes de flux magnétiques restent +/- circulaires, le risque de soufflage est insignifiant.
Par contre, le problème risque d'apparaître lorsque les lignes de flux deviennent distordues comme par exemple lorsque l'électrode se rapproche des extrémités de tôles.

Figure n° 35 : Distorsion des lignes de force



Si l'on prend l'exemple de la figure n° 35 on s'aperçoit que plus l'arc se rapproche de l'extrémité de la plaque, plus les lignes de flux sont déformées ce qui risque alors de provoquer une déviation de l'arc vers les lignes non déformées.

Figure n° 36 : Soufflage magnétique



D'autres phénomènes peuvent également apparaître tels que :

- L'éclatement du bain de fusion avec de fortes projections.
- Sifflet provoqué par un excentrement de l'enrobage.

Le soufflage magnétique est difficilement prévisible, mais il se rencontre essentiellement lors du soudage en courant continu et cela principalement lorsque l'intensité de soudage atteint les 250 ampères.
Ces problèmes de magnétisme peuvent apparaître lors du soudage d'aciers au carbone non ou faiblement allié, d'aciers ferritiques et d'aciers inoxydables, mais également suite à un meulage trop important des pièces à souder.
Le soudage à proximité d'un système de protection cathodique (anodes sacrificielles – courant induit) peut aussi être source d'ennui.
Enfin pour terminer, il est bon de rappeler que le champ magnétique terrestre peut varier en fonction de la position géographique du lieu de travail, ce qui risque alors de créer une polarisation de certaines structures métalliques avec comme conséquence une modification de la polarité du courant.
Dans ce cas (relativement rare) la polarité du soudage doit être changé (pince au +) de manière à obtenir une meilleure qualité de soudure.

Méthode de réduction du soufflage magnétique

Bien que l'élimination du soufflage magnétique est assez complexe diverses solutions peuvent être essayées telle que :

- Mise en place de deux pinces de masse positionnées de part et d'autre de la pièce à souder.
- Mise en place de la pince de masse entre 0,5 et 1 mètre maximum de la pince à souder.
- Pointage correct de la pièce de manière à fermer le champ magnétique et limiter la dispersion des lignes de force.
- Soudage par pas de pèlerin.
- Modification des angles d'inclinaison de l'électrode.
- Enroulement (si possible) du câble de masse autour de la pièce à souder de manière à créer un champ d'induction inverse.
- Changement du sens de soudage lorsqu'on atteint les extrémités de la tôle.
- Démagnétisation des pièces à souder.
- Utilisation de l'intensité minimale.
- Ne pas poser la pince de masse à proximité immédiate de la pince à souder.
- Martelage des pièces de faible épaisseur après le soudage de chaque électrode.

Lorsque le champ magnétique a été créé suite à un meulage par disqueuse, il peut en partie être éliminé en fraisant perpendiculairement au meulage initial.

LES RISQUES

Les risques électriques

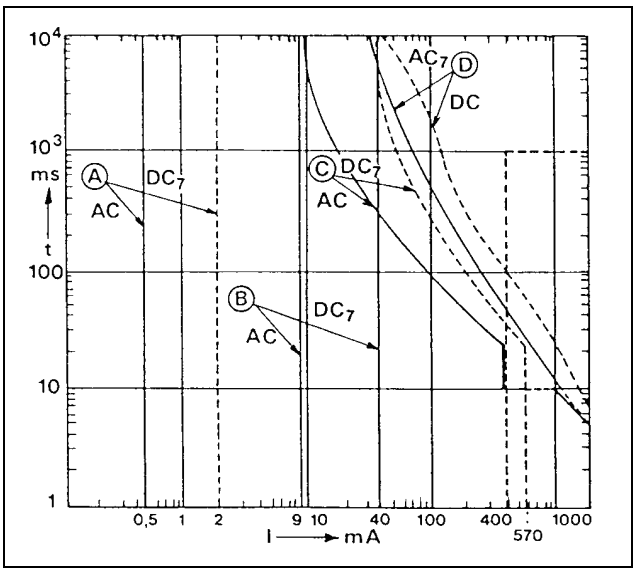
Très peu d'études ont été réalisées concernant les effets physiologiques du courant électrique sous eau.
Lorsqu'un plongeur entre en contact avec une source de courant, la dangerosité du choc électrique dépend de plusieurs facteurs tels que :

- La durée du contact.
- Le type de courant.
- L'intensité du courant.
- Le type d'isolement.

En surface dans un environnement sec, la résistance du corps humain varie de 3500 à 1000 Ohms en fonction des emplacements de mesure.
Dans l'eau, la résistance diminue très fortement et ne dépasse généralement pas 750 à 100 Ohms.
Quatre seuils différents ont été établis en fonction de la l'intensité et de la durée.

A : seuil de sensation du courant électrique
B : seuil de sensation douloureuse
C : courbe de sécurité au-delà de laquelle les risques sont importants
D : seuil au-delà duquel il y a risque de fibrillation

Figure n° 37 : Niveau de résistance du corps humain en fonction du type de courant



A la lecture de cet abaque, on constate que l'organisme tolère 3 fois mieux le courant continu que le courant alternatif.
Ceci est dû au fait que d'une part ce dernier provoque des contractions musculaires importantes et que d'autre part la fréquence du courant (50 ou 60 Hz) risque de provoquer la fibrillation du cœur.
C'est entre autre l'une des raisons pour laquelle le courant alternatif n'est pas utilisé sous eau.
Il est évident que sous eau le risque de subir un choc électrique est fortement lié au type de vêtement isolant que porte le plongeur.

Le Battelle Memorial Institute a classé la résistance des plongeurs en fonction de leur type d'équipement :

- 1000 Ohms pour un plongeur en vêtement étanche avec casque en matière synthétique mais sans gants.
- 450 Ohms pour plongeur en vêtement étanche avec masque facial et sans gants.
- 300 Ohms pour un plongeur en vêtement humide et sans gants.

Si l'on se réfère à la courbe de sécurité de l'abaque on s'aperçoit que pour éviter les risques d'accident grave, l'intensité maximale doit rester en dessous de 40 mA et ne pas dépasser 10 secondes.
Il est à noter, que dans le cas d'un contact prolongé, les effets du courant continu sont plus graves que ceux du courant alternatif car il produit une électrolyse des tissus tandis que le courant alternatif agit sur les muscles et le système nerveux.
Nous avons vu que durant le soudage, le plongeur soudeur est confronté à 2 types de tension.

1. La tension d'amorçage qui en fonction du groupe de soudure utilisé sera comprise entre 65 et 80 volts
2. La tension d'arc qui sera comprise entre 22 et 30 volts.

Si l'on applique la loi de Ohms :

$$R = E/I$$

On constate que pour éviter les risques d'électrocution, la résistance du plongeur soudeur doit au minimum être de :

$$80/0{,}04 = 2000 \text{ Ohms}$$

Pour sa part, le Det Norske Veritas estime que la résistance électrique de l'équipement du plongeur doit être au minimum de 1900 Ohms.

Quatre éléments doivent être réunis pour provoquer un choc électrique :

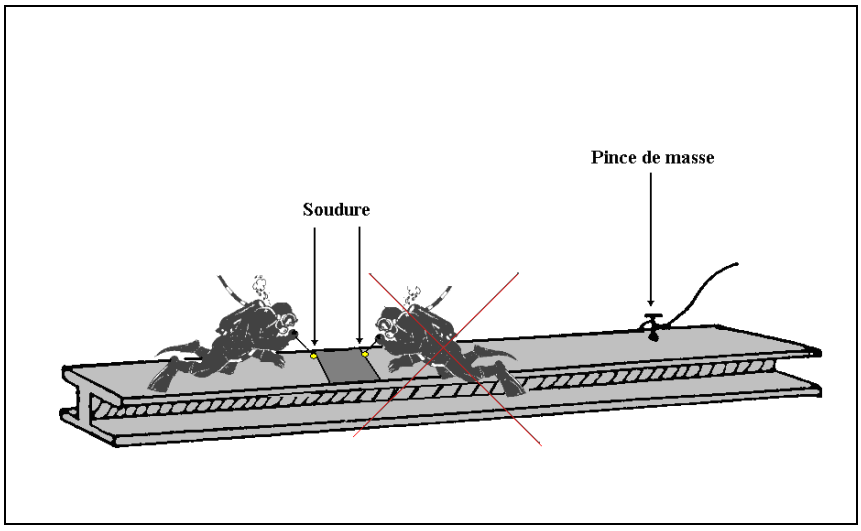
1. Le circuit électrique doit avoir une intensité supérieure à 40 ma pour le courant continu et 10 ma pour le courant alternatif.
2. La durée du contact doit être supérieure à 10 secondes.
3. Il doit y avoir un défaut d'isolation dans le circuit électrique.
4. Le plongeur soudeur doit être exposé au défaut d'isolation.

Dès lors, afin d'éviter les risques de choc électrique il importe que le plongeur soudeur :

- Utilise de préférence un vêtement étanche.
- Porte des gants.
- Evite de se trouver entre la pièce à souder et la masse.

Que cela soit en surface ou sous eau, nous savons que le courant électrique cherche toujours à suivre le chemin de la moindre résistance.
L'eau de mer a une résistance d'environ 30 Ohms / cm contre 1500 Ohms / cm pour l'eau douce et 25000 Ohms / cm pour l'eau déminéralisée.
Ceci signifie que pour un plongeur soudeur mal isolé travaillant en eau douce, le risque de recevoir un choc électrique est nettement plus grand puisque dans le cas présent, le chemin le plus facile sera de passer au travers l'organisme plutôt que par l'eau.
Le danger est également accentué lorsqu' une partie du corps n'est pas immergé.

Figure n° 38 : bon et mauvais positionnement du plongeur soudeur



Malgré les risques inhérents à ce type d'opération on ne recense depuis 1944 qu'un seul accident mortel.

Les risques d'explosion

Photo n° 31 : production de gaz explosifs (doc. Speciality welds)

Dès que l'électrode est mise en contact avec la pièce à souder, l'eau présente dans la région de l'arc électrique va commencer à se décomposer par électrolyse en oxygène et en hydrogène.
Les quantités de gaz produites vont dépendre de l'intensité du courant de soudage, de la durée de combustion de l'électrode et de la composition de l'enrobage.
On peut considérer que suite au phénomène d'électrolyse, chaque électrode va produire du gaz dont environ 1/3 sera de l'oxygène et les 2/3 restants de l'hydrogène.

(Le phénomène d'électrolyse est moins important dans l'eau douce qui est moins conductrice que l'eau salée).
A cela il faut encore ajouter les produits générés par la décomposition de l'enrobage et qui contiennent eux aussi des gaz explosifs tels que de l'hydrogène et du monoxyde de carbone plus quelques oxydes divers, soit un total d'environ 2 - 4 litres de gaz explosif par baguette.
Il est un fait bien connu que les mélanges oxygène / hydrogène et oxygène / monoxyde de carbone peuvent constituer un mélange extrêmement détonant dès que les proportions d'oxygène dans le mélange atteignent respectivement 4% et 15%.
Tant que les gaz produits peuvent remonter librement en surface, le risque d'explosion est insignifiant.
Par contre, il en sera tout autrement si les gaz peuvent s'accumuler dans une cavité quelconque située au-dessus de la zone de soudage.
Dans ce cas, il suffira d'une simple particule incandescente pour provoquer l'explosion du mélange.
L'intensité de l'explosion dépend du volume de gaz emprisonné dans la cavité.
Ainsi l'explosion de :

- quelques cm^3 de mélange est déjà fortement ressentis (coup sec sur les jointures, effet de coup de poing, œil au beurre noir)
- quelques litres de mélange est généralement à l'origine d'accident grave (rupture des tympans, décollement des sinus, problèmes pulmonaires)
- une centaine de litres de mélange est généralement mortel (idem que ci-dessus, fractures, hémorragie interne)

La gravité de ces accidents est due au fait que l'explosion du mélange oxygène / hydrogène / monoxyde de carbone provoque une onde de choc qui va se déplacer très rapidement dans l'eau et dont l'intensité peut atteindre plusieurs dizaines de bar.
Si l'organisme humain, n'était constitué que de liquide, cette onde de choc traverserait les différents tissus sans les affecter.
Malheureusement notre corps contient également bon nombre de cavités, ce qui va provoquer la réflexion de l'onde de choc avec comme conséquence un décollement de la paroi interne de la cavité concernée.
Différents tests ont démontré que dans l'eau l'organisme ne peut supporter sans risque qu'une surpression de maximum 3,5 bars, tandis que la pression létale se situe au environ de 21 bars.

Dès lors, afin d'éviter ce type d'accident, il est important que le plongeur soudeur s'assure et ce avant même de commencer une opération de soudage, que les gaz produits par la combustion de l'électrode puissent s'échapper librement jusqu'en surface.
A défaut, il faut prévoir un moyen pour empêcher la stagnation des poches de gaz.
Celles-ci pourront être évacuées soit en réalisant un certain nombre d'évents dans la structure située au-dessus de la zone de travail, soit par le soufflage en continu de celle-ci avec de l'air comprimé.

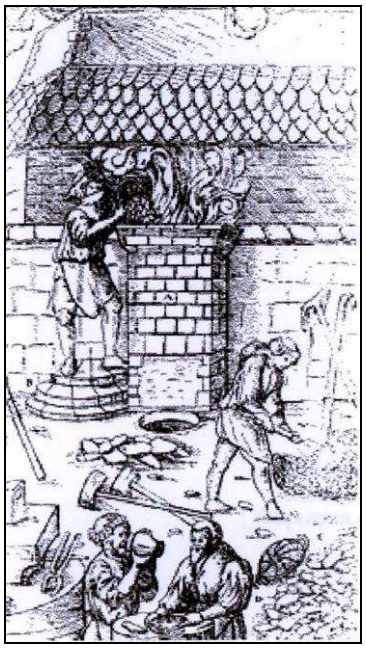
Les brûlures

Le risque de brûlure est généralement limité au niveau des mains et/ou au niveau du cou en cas de soudure au plafond suite à la coulée de métal incandescent.
Des gants et un mini tablier porté autour du cou suffisent généralement à se prémunir de ces dangers.

LA SIDERURGIE

Les métaux sont produits à partir de minerai que l'on extrait de la croûte terrestre.
Il existe deux types de minerai, les non ferreux (or, aluminium, cuivre, etc.) et les ferreux qui comme le nom l'indique, contiennent essentiellement du fer.
Le minerai ferreux a été utilisé dès 1700 avant J.C pour confectionner le fer.
A cette époque, la production était obtenue en chauffant simultanément du bois et du minerai de fer jusqu'à l'obtention d'une pâte métallique qui était ensuite martelée à chaud de manière à obtenir du fer à l'état brut.
Evidement, les quantités produites étaient relativement faible et le travail pénible.
Bien que l'apparition des premiers hauts fourneaux débute vers les années 1400 de notre ère, on considère généralement que c'est le français Ferchault de Réaumur comme étant le fondateur de la sidérurgie moderne.

Figure n° 39 : Un haut fourneau vers les années 1450 (doc. Internet)



L'acier, lui n'est apparu que vers 1786 suite aux travaux des français Berthollet, Monge et Vandermonde.
Ce n'est pourtant qu'une centaine d'années plus tard que l'acier allait être produit à grande échelle grâce à l'invention des fours Bessemer, Thomas et Martin.

Fabrication de l'acier

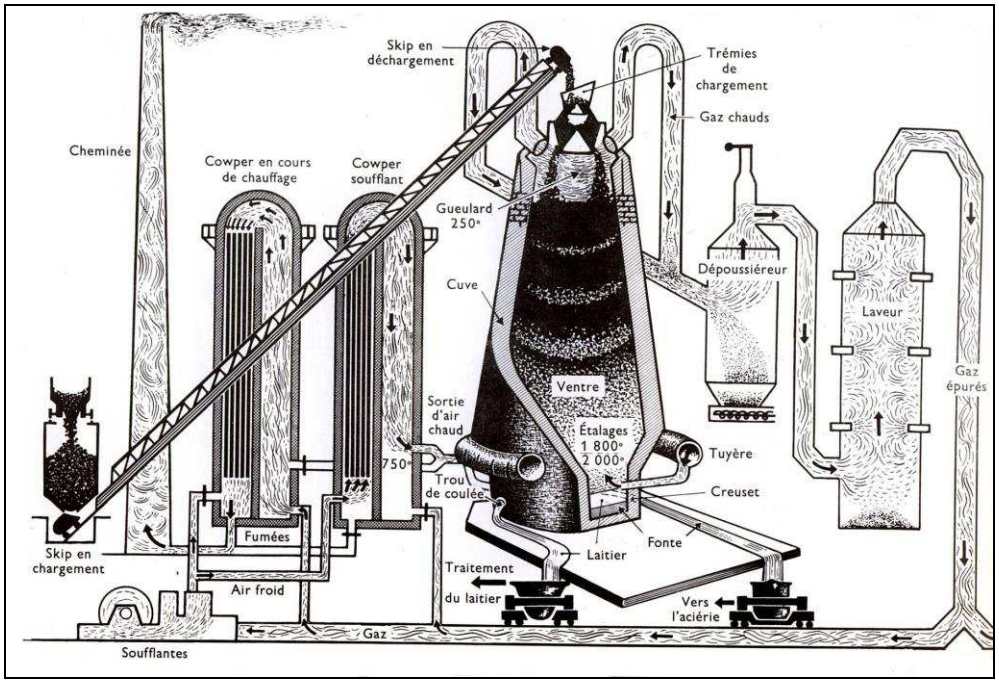
L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

1. Dans un haut fourneau, à partir de minerai de fer et de coke.
2. Dans un four convertisseur ou électrique, à partir d'acier de récupération.

Constitution et fonctionnement d'un haut fourneau

Un haut fourneau est constitué d'une cuve cylindrique de grande dimension dont la forme est étudiée afin de tenir compte des variations de volume des courants ascendants gazeux et des courants descendants solides puis liquides.
La coque du haut fourneau est réalisée en tôle épaisse dont la partie intérieure est garnie de briques réfractaires.
Le chargement des matières premières nécessaires à la confection de la fonte s'effectue par le haut.
Des couches successives de coke, minerai de fer et de castine sont déversées dans le ventre du haut fourneau.

Figure n°40 : Schéma d'une installation (doc. Encyclopédie des sciences industrielles Quillet)



De l'air comprimé ou de l'oxygène est ensuite insufflé via des tuyères à la base des produits ce qui a pour effet de faire brûler le coke qui à son tour génère une grande quantité de gaz carbonique qui vont être à l'origine d'une réaction en chaîne assez complexe.
En haut du haut fourneau, les températures sont peu élevées (+/- 200°C). Au milieu de la cuve, la température atteint les 850°C tandis que dans le ventre, elle atteint entre 1100°C et 2000°C et tous les produits entrent alors en fusion.
Les produits récupérés par cette transformation sont :

- Les gaz.

Qui sont récupérés par le sommet du haut fourneau et après dépoussiérage sont renvoyés dans les tuyères.

- Le laitier.

Qui est récupéré à la base par un premier trou de coulée. Par la suite, celui-ci servira à la fabrication du ciment.

- La fonte brute de première fusion.

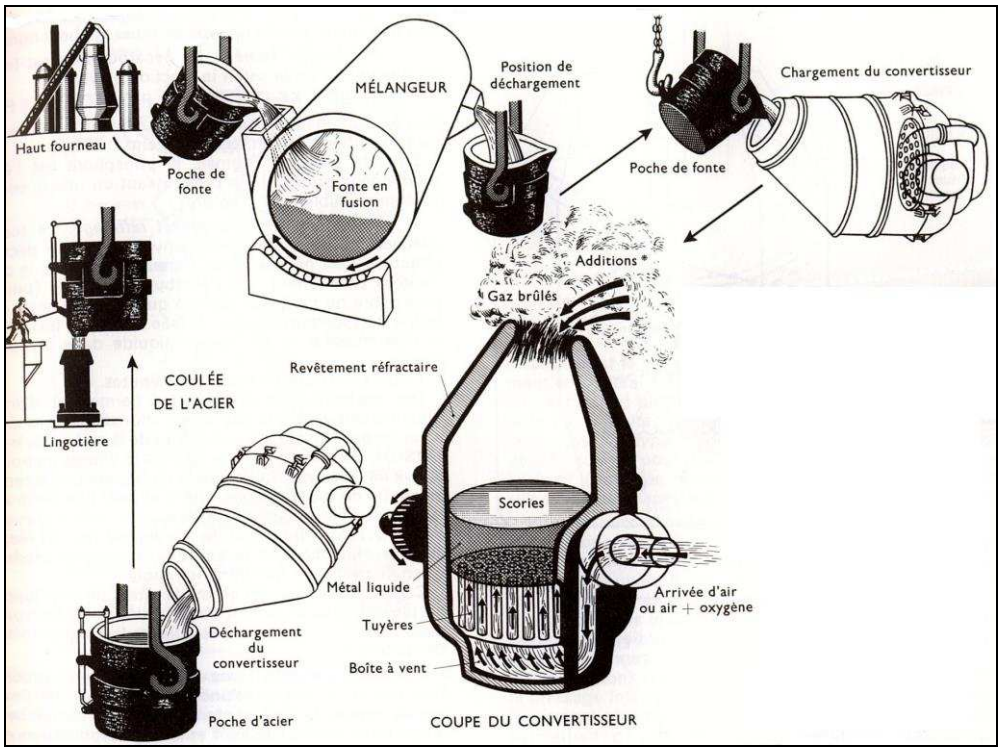
Qui elle aussi est récupérée à la base par un autre trou de coulée.
Grâce à ce procédé, environ 4500 tonnes de fonte sont produites par jour.

La fonte ainsi élaborée peut varier fortement en fonction de sa composition, ainsi, on trouve des :

- Fontes blanches.
- Fontes grises.

En général, ces fontes ont une teneur en carbone supérieure à 2,1 % ce qui les rend difficilement usinables et il faut alors leur faire subir une série d'opérations métallurgiques pour qu'elles se transforment en acier.
A la sortie du haut fourneau, la fonte en fusion est envoyée vers un mélangeur où elle est débarrassée du souffre et du silicium.
De là, elle est envoyée vers un convertisseur où on va éliminer le phosphore et une grande partie du carbone, tandis que divers produits vont être ajoutés en fonction des besoins.

Figure n° 41 : Traitement de la fonte (doc. Encyclopédie des sciences industrielles Quillet)



Ce métal toujours en fusion est ensuite recueilli dans une poche de coulée qui va à son tour être envoyée vers une lingotière qui aura pour effet de donner une forme solide au métal.
Finalement, le métal encore chaud va être moulé selon une forme déterminée en passant par un laminoir.

Types d'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 1,7 % de carbone.
Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone. Un acier à haute teneur en carbone, sera employé pour sa grande dureté, tandis qu'un acier dont le pourcentage est plus faible permettra un travail plus facile et sera plus malléable.
On distingue différents types d'acier :

- Les aciers non alliés ou ordinaires (parfois appelé aciers au carbone)

Les aciers non alliés sont principalement composés de fer et de carbone.
Ces types d'aciers sont classés en 6 nuances en fonction de leur teneur en carbone.

Tableau n° 21 : Diverses nuances d'acier

Nuance	% de carbone (C)	Charge de rupture en hbar (P)	Emplois
Extra-doux	C < 0,15	33 < P < 42	feuillards, quincaillerie, tôle pour carrosserie
doux	0,15< C < 0,20	37 < P < 46	charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons
Demi-doux	0,20 < C < 0,30	48 < P < 55	pièces de machines pour application mécaniques, pièces forgées
Demi-dur	0,30 < C < 0,40	55 < P < 65	Petit outillage, organes de transmission
dur	0,40 < C < 0,60	65 < P < 75	Pièces d'outillage, d'armement, rails, coutellerie, pièces moulées
Extra-dur	0,60 < C	75 < P	Outils d'usinage et de découpe, câbles, ressorts

(Les nombres de nuance peuvent varier en fonction des normes propres à chaque pays.)
La majeure partie de l'acier produit dans le monde, tombe dans les nuances des aciers extra – doux et doux.
Ces deux nuances d'acier sont particulièrement appréciées grâce à leur relative résistance et soudabilité.
Au-delà de 0,5 % de carbone, l'acier devient difficile à souder

- Les aciers faiblement alliés

L'acier faiblement allié comme son nom l'indique, contient de faibles quantités (moins de 5 % en masse) d'éléments additifs tels que le manganèse, le silicone, le chrome, le nickel, le vanadium et le molybdène. Ils améliorent certaines propriétés du métal, tels qu'une résistance à la rupture et une limite apparente à l'élasticité plus élevée que les aciers extra – doux et doux, mais également une plus grande résistance à la corrosion et à la rouille.

- Les aciers fortement alliés

Les aciers fortement alliés contiennent différents éléments additifs dont un au moins dépasse 5 % en masse ce qui leurs donnent d'excellentes propriétés.
Dans la catégorie des aciers fortement alliés, on retrouve :

- Les aciers inoxydables qui sont particulièrement résistant à la corrosion.
  Cette caractéristique est due principalement au fort pourcentage de chrome présent dans l'alliage 10 % et plus.
  Le nickel peut également être présent dans des proportions plus ou moins élevées.
- Les aciers austénitiques qui contiennent une forte teneur de carbone et de manganèse, ce qui leurs donnent la propriété de pouvoir être aussi résistants que l'acier dur, tout en restant plus ductiles et plus malléables que l'acier extra – doux.

Différentes normes internationales tels que la :

- CR ISO 15608
- BS EN 10 113
- BS EN 10025

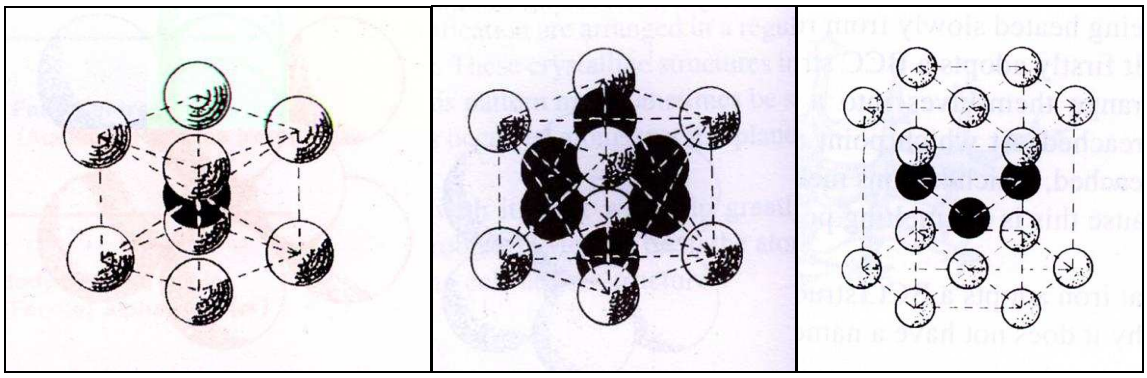
classent également les aciers en divers groupes et sous groupes, mais malheureusement ici également il n'y a aucune concordance entre les normes et c'est pourquoi elles ne seront pas développées dans ce guide.

METALLURGIE

Sans vouloir être trop complexe, il nous faut développer ici l'étude du comportement des matériaux métalliques afin de pouvoir comprendre le processus de refroidissement rapide qui se produit lors d'une opération de soudage en pleine eau.
Il faut savoir que tous les métaux sont constitués d'une structure cristalline de forme bien définie qui se modifie en fonction de la température.
Trois types de maille peuvent être rencontrés :

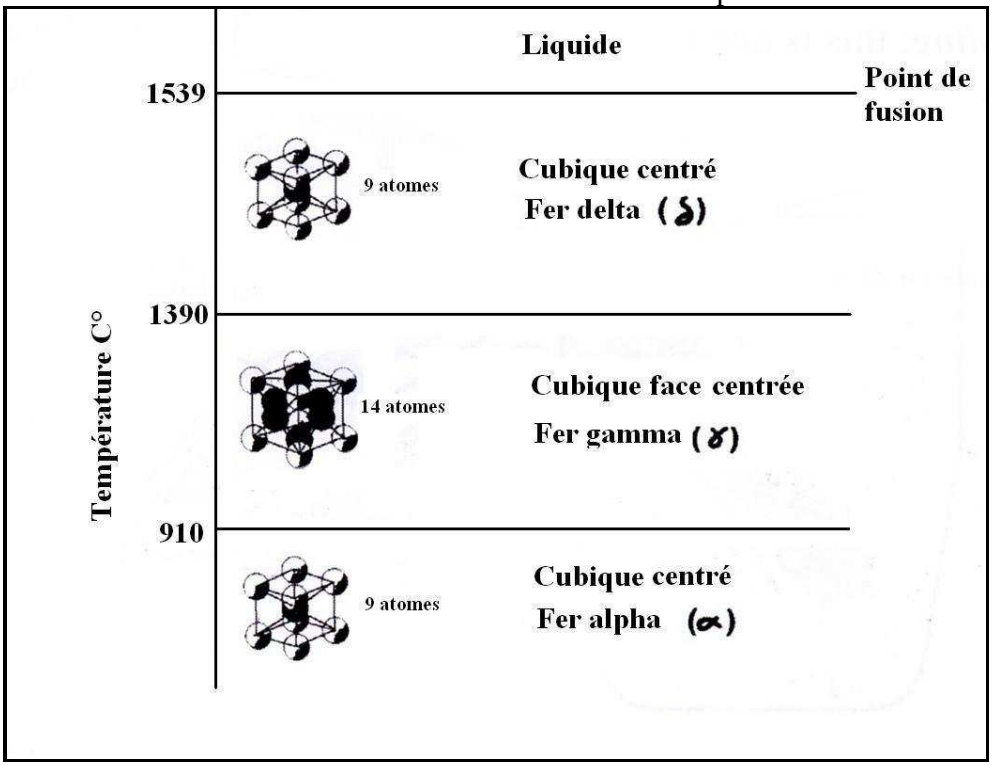
1. La maille cubique centrée (CC)
2. La maille cubique face centrée (CFC)
3. La maille hexagonale compacte (HC)

Figure n° 42 : Divers types des mailles



Si nous prenons l'exemple du fer, nous pouvons observer qu'il est constitué de deux formes cristallines différentes.

Figure n° 43 : Structures cristallines du fer en fonction de la température



De la température courante jusqu'à 910 °C les atomes du fer sont disposés suivant un réseau cubique centré, c'est-à-dire, qu'ils occupent les sommets du cube et son centre et on l'appelle alors *Fer alpha*.
Au dessus de 910 °C et jusqu'à 1390 °C, la forme cristalline change en une maille cubique face centrée, c'est-à-dire que les atomes du fer sont disposés aux sommets du cube, mais également au centre de chaque face et on l'appelle alors *Fer gamma*.
Au dessus de 1390 °C et jusqu'à son point de fusion situé à 1539 °C , le fer reprend une structure cubique centrée mais cette fois on l'appelle *Fer delta* pour le différencier du *Fer alpha*.
Une fois la température de fusion atteinte la structure cristalline disparaît.
La grande différence entre le Fer alpha et le Fer gamma réside dans le fait que dans ce premier, le carbone est extrêmement peu soluble alors que dans le Fer gamma il y a une solubilité d'environ 2 % à la température de 1145 °C.
Le pourcentage de carbone présent dans l'alliage entraîne des modifications de la température à laquelle se fait la transformation de la structure cristalline.
Pour faciliter la compréhension, imaginons un diagramme sur lequel nous retrouvons en abscisse le pourcentage du carbone présent dans l'alliage et en ordonnée la température.
Supposons également, qu'à chaque ligne de pourcentage nous avons installé une sonde thermique qui mesure le début ainsi que la fin de la transformation du Fer alpha en Fer gamma.
Sur la partie gauche du diagramme de la figure n° 44 on constate que pour le fer pur (0 % de C) le début de la transformation débute à 723 °C et se termine à 910 °C.
Par contre, plus le pourcentage de carbone augmente (du moins jusqu'à 0,83 %), plus les écarts de température diminuent. Ensuite, au-delà de 0,83% les écarts augmentent à nouveau.
Si nous rejoignons maintenant toutes ces températures entre elles, nous obtenons un diagramme de changement de phase simplifié.

Figure n° 44 : Température du changement de phase en fonction du % de carbone

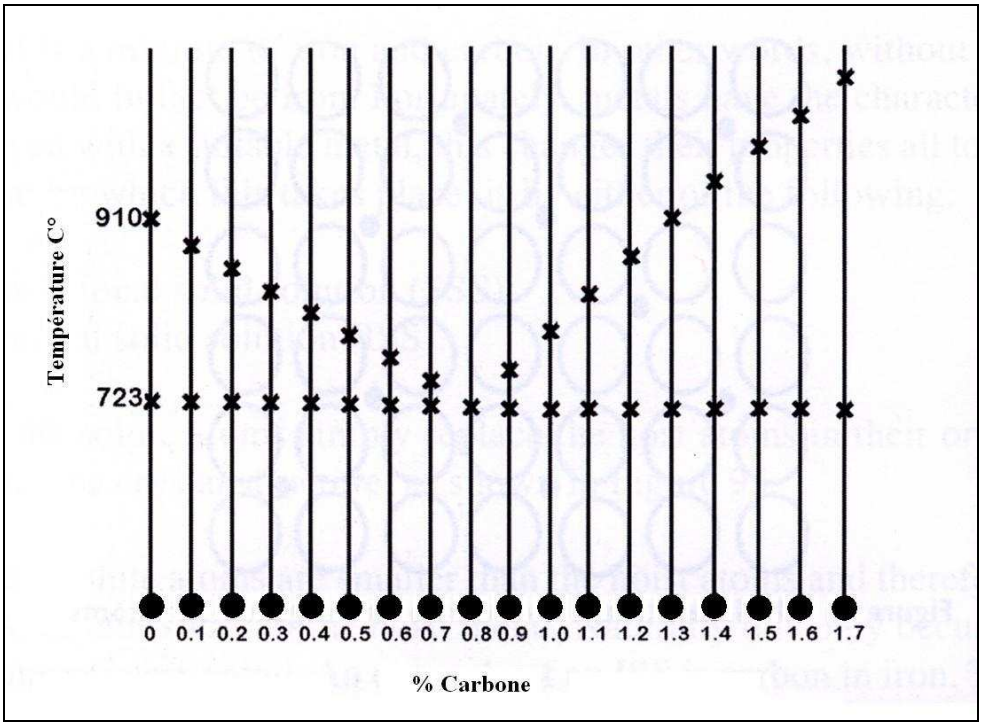
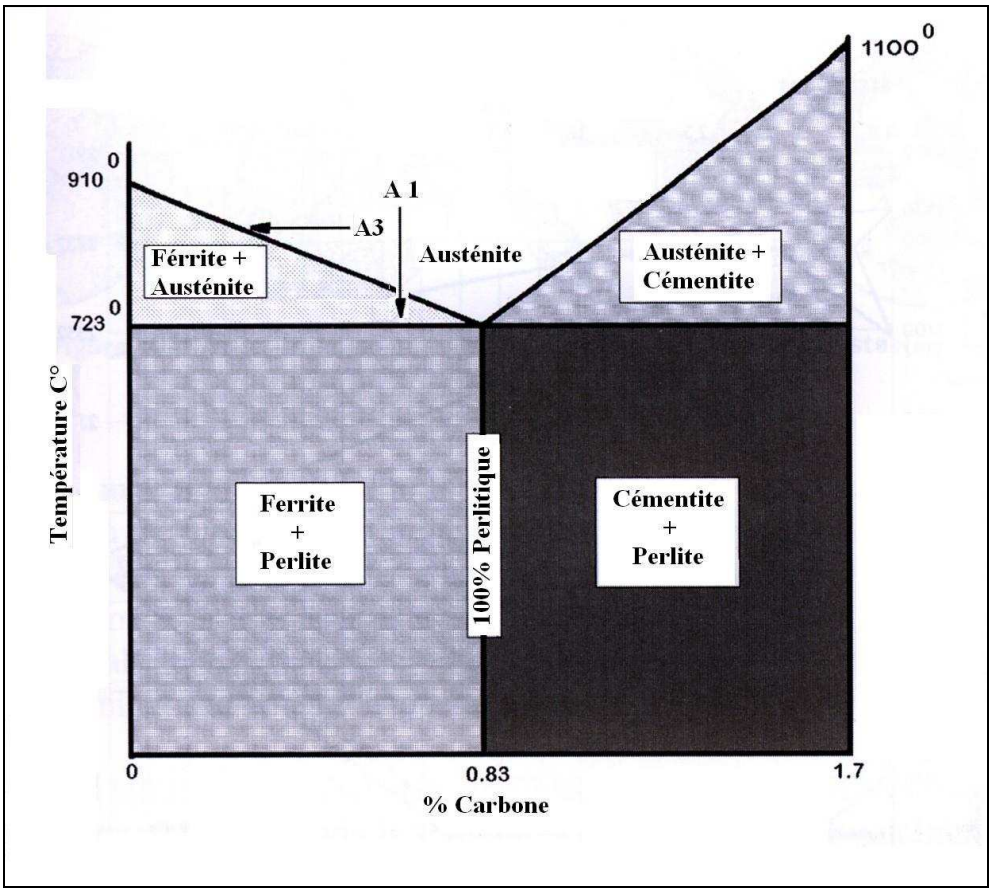
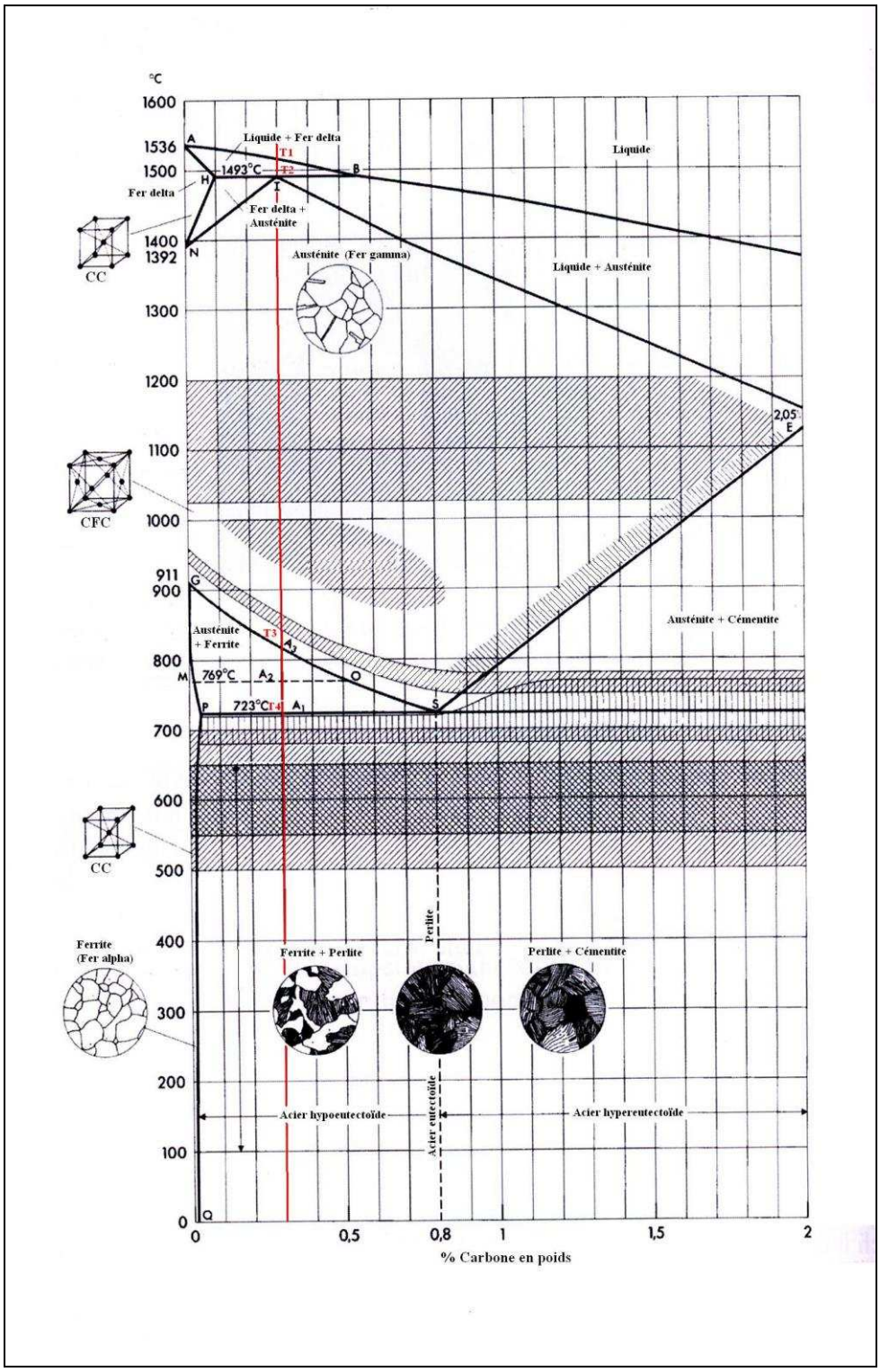


Figure n° 45 : Changement de phase en fonction de la température et du % de carbone



A l'aide de ce diagramme, il est possible de prévoir les différentes transformations qui prennent place lorsque l'acier est chauffé progressivement.
Si l'on observe le réchauffement d'un acier contenant moins de 0,83 % de carbone, on peut voir qu'à la température ordinaire la structure est constituée de *ferrite* plus un mélange de *cémentite* et de *ferrite* appelé *perlite*.
Si le réchauffement se poursuit, dès l'arrivée à 723 °C la *perlite* va commencer à se transformer en *austénite*. Ensuite, cette *austénite* va progressivement absorber toute la *ferrite* jusqu'à l'arrivé à la ligne **A3**
Une fois passé cette température, la structure est entièrement *austénitique*.
Si maintenant nous prenons un acier qui comporte plus de 0,83 % de carbone, nous voyons qu'à la température ordinaire, la structure est composée de *cémentite* et à nouveau de *perlite.*
Une fois chauffée jusqu'à 723 °C la *perlite* se transforme en *austénite* qui va elle à son tour progressivement absorber la *cémentite*.
Avec un acier contenant 0,83 % de carbone, la réaction devient *eutectoïde* mais pour des raisons de simplicité, cette réaction ne sera pas expliquée ici, car le soudage sous eau n'est réalisable que sur des aciers contenant tout au plus 0,3 % de carbone et donc les réactions dans les aciers supérieurs ne nous concernent pas.
Le diagramme de la figure n° 45, est en fait une version simplifiée d'un diagramme Fer – Carbone classique utilisé par les métallurgistes et qui leur donne des informations concernant la microstructure de l'acier en fonction de la température et de la teneur en carbone.

Figure n° 46 : Diagramme Fer – Carbone



A l'aide de ce nouveau diagramme, voyons quels sont les divers changements de phase pour un acier contenant 0,3 % de carbone qui se refroidit très lentement.

- Au-delà de 1530 °C le métal est en fusion.
- A partir de T1 le métal commence à se solidifier.
- A T2, la solidification est terminée.
- Entre T2 et T3 l'austénite se refroidit sans modifier sa structure.

- Entre T3 et T4 des grains de ferrite commencent à être rejetés de l'austénite et les proportions de ces deux éléments vont varier jusqu'à ce que la température de 723 °C soit atteinte.

Lorsque l'alliage atteint finalement cette température, l'austénite restante va se transformer en un agrégat constitué de *ferrite* et de *cémentite* appelé *perlite*.

Un autre type de diagramme utilisé par les métallurgistes permet de prédire la structure de l'alliage en fonction de la vitesse de refroidissement.

Au cours d'un processus de refroidissement très lent (courbe 5 °C / sec), très peu de *grains* vont *germer*, ce qui va avoir comme conséquence que la structure finale sera constitué de grains de *ferrite* et de *perlite* assez large.

Si maintenant le même alliage est refroidit à l'air libre, la vitesse de refroidissement va être bien plus élevée, ce qui fera alors germer un plus grand nombre de grains.

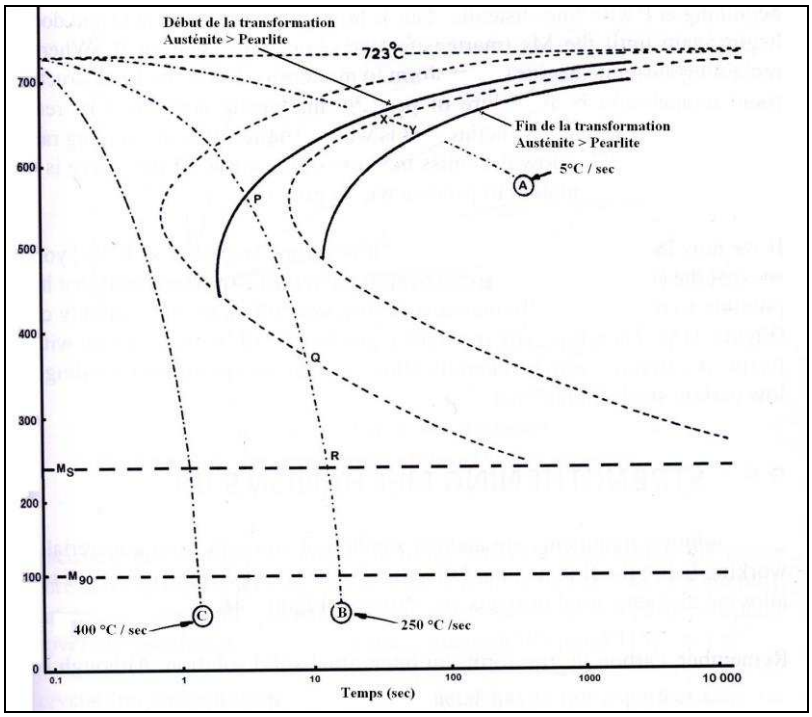
Comme l'espace disponible reste le même, la taille des grains ainsi que la dimension des joints serait réduites en conséquence.

Maintenant, augmentons encore la vitesse de refroidissement en insufflant par exemple de l'air comprimé contre la pièce (courbe 250 °C / sec).

A cause du manque de temps, les atomes de carbone ne vont plus pouvoir diffuser hors de l'austénite avant d'arriver à la température P.

A la place, l'austénite va entièrement se transformer en ferrite tandis que le carbone en excès va lui être *précipité* en bainite qui est elle même constituée de ferrite entourée de fine globule de cémentite.

Figure n° 47 : Diagramme TTT d'un acier eutectoïde (0,8 % de C)



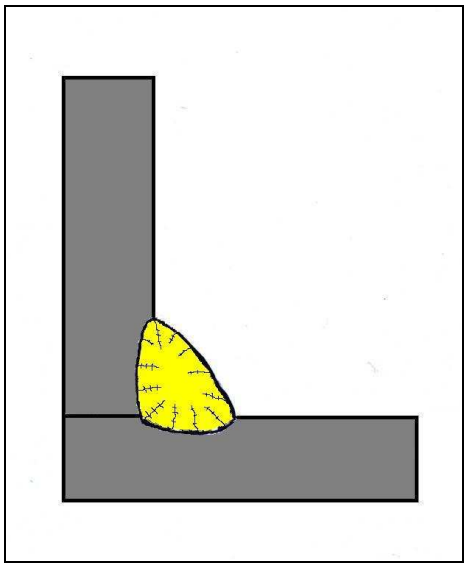
Enfin pour terminer, voyons ce qui se passe maintenant lorsque nous trempons la pièce dans l'eau (courbe 400 °C / sec)

Dans le cas présent, nous voyons que la courbe de refroidissement passe devant le nez de l'isotherme ce qui va avoir pour effet de provoquer un *effet de trempe.*

Ici également, les atomes de carbone vont rester figés dans l'austénite jusqu'à l'arrivée à la température de 250 °C.

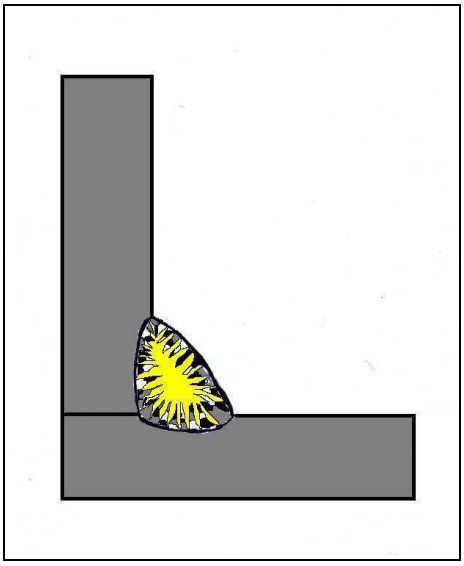
Puis à partir de cette température l'austénite va être transformée très rapidement en une nouvelle structure cristalline hexagonale compacte appelée *martensite.*
La *trempe* est un procédé énormément utilisé avec certaine catégorie d'acier, car le refroidissement rapide qu'il génère permet d'obtenir des aciers très durs grâce à la bainite et la martensite.
Voyons maintenant comment va se comporter une soudure refroidie sous eau.

Figure n° 48 : Germination du cordon de soudure



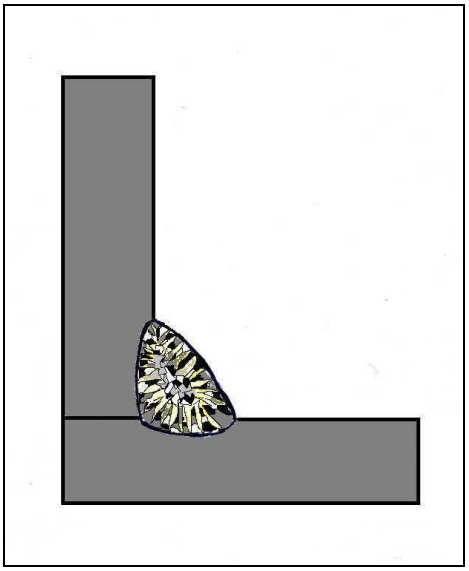
Tout d'abord, le métal encore en fusion à la périphérie de l'arc électrique va rapidement se solidifier par effet de conduction au niveau de l'interface avec l'eau mais également par radiation au niveau de l'interface avec le métal de base.
Une fois que cette phase de solidification du joint soudé a débuté, les grains situés à la périphérie vont très rapidement se figer tandis que ceux présents dans la partie centrale pourront encore *germer* pendant quelques millisecondes à cause du fait que la vitesse de refroidissement n'est pas homogène.

Figure n° 49 : Solidification de la périphérie du cordon de soudure



Ceci va avoir pour effet de générer des grains de formes diverses propres à la structure du métal.

Figure n° 50 : Fin de la phase de solidification du cordon de soudure



Sous eau, la vitesse de refroidissement est liée à la forme de l'assemblage ainsi qu'à l'épaisseur des pièces.
Celle-ci est d'autant plus rapide que le volume de matière est important.
Comme nous l'avons vu plus haut, le refroidissement rapide a un effet sur la structure du joint soudé, mais également sur la structure de la zone environnante appelée zone affectée thermiquement (ZAT).
Dans cette dernière, le métal est chauffé au-delà de sa température de transition critique, ce qui va avoir pour effet de provoquer une remise en solution du carbone. Mais suite au refroidissement rapide, celui-ci va rester figé et être *précipité* en bainite.
Au-delà de la ZAT, la dureté diminue à mesure que l'on s'éloigne.
Nous avons vu que la trempe permet de durcir le métal, mais cela se fait au détriment de la ductilité et de ce fait le métal devient plus fragile.
Heureusement, une trempe complète ne peut avoir lieu que sur des alliages comprenant au minimum 0,4 % de carbone, donc dans une catégorie d'alliage qui n'est pratiquement pas utilisée sous eau.
Rappelons que pour le soudage sous eau, il faut de préférence choisir un acier ayant une teneur en carbone inférieur à 0,3 %. Cela permet alors d'obtenir une structure finale composée d'un mélange de martensite, de bainite et de ferrite.
Il est à noter, que la ductilité peut être légèrement récupérée en pratiquant un soudage en plusieurs passes puisque dans ce cas la (les) passe(s) de fond subiront une sorte de *revenu* qui diminuera quelque peu le caractère trempé de la soudure.

Figure n° 51 : Revenu de la passe de fond

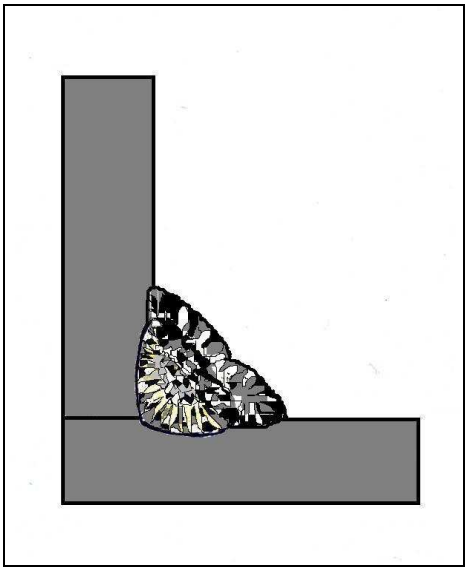


Photo n° 32 : Observation de la ZAT

Carbone Equivalent

Nous venons de voir ci-dessus, qu'un soudage de qualité ne peut être réalisé en pleine eau qu'à condition que la teneur en carbone dans alliage fer-carbone, ne dépasse 0,3 %.
Evidemment, la plupart des alliages d'acier comporte encore d'autres éléments qui peuvent avoir une influence sur la soudabilité.
Afin de mieux cerner l'influence conjuguée de ces divers éléments, une relation d'équivalence a été établie sous le nom de CE.
Pour les aciers dont la teneur en carbone est proche de la limite de soudabilité il est indispensable de calculer le CE car celui-ci prend en compte les divers autres éléments tels que le manganèse, le chrome, le molybdène etc, et dans ce cas la formule suivante est utilisée :

$$CE\ \% = C + (Mn/6) + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Si seul le manganèse est connu on utilise alors :

$$CE\ \% = C + (Mn/6)$$

Exemple : Acier du groupe 1 /C : 0,2 / Mn : 0,6

$$CE = 0,2 + (0,6/6) = 0,3$$

Pour le soudage en surface, il faut s'assurer que le CE reste inférieur à 0,42 %. Par contre pour le soudage en pleine eau, le CE ne doit pas à cause du refroidissement rapide dépasser 0,38 %.
Au dessus de cette valeur, le risque serait grand de voir apparaître des fissures à froid causées par la formation d'hydrogène.
Pour le soudage sous eau des pièces ayant un CE supérieur à la valeur limite, il faut mieux et à condition que l'épaisseur du joint ne dépasse pas 10 mm, utiliser des électrodes inox austénitique.
Au-delà de cette épaisseur le plongeur soudeur sélectionnera plutôt des électrodes Duplex contenant un fort pourcentage de nickel.

Les qualifications

Comme nous l'avons vu au début de ce guide, on constate un intérêt de plus en plus croissant pour la technique du soudage sous eau car elle permet d'apporter des solutions rapides, efficaces et relativement bon marché à bon nombre de problèmes.
Dans de nombreux cas, l'opération de soudage consiste à réaliser des assemblages sans qu'aucune spécification ou critère de qualité soit demandés.
Par contre, on remarque que de plus en plus cette technique est également sollicitée pour accomplir d'importants travaux de réparation ou un facteur de qualité est requis.
Dans ce cas, l'opération de soudage ne peut débuter qu'après avoir préalablement réalisé un certain nombre de démarche telle que :

- Le descriptif du mode opératoire de soudage
- La qualification du mode opératoire de soudage
- La qualification du plongeur soudeur

Ces diverses qualifications qui permettront de garantir la qualité des assemblages doivent être réalisées en présence d'un organisme de contrôle indépendant et habilité par les ministères.

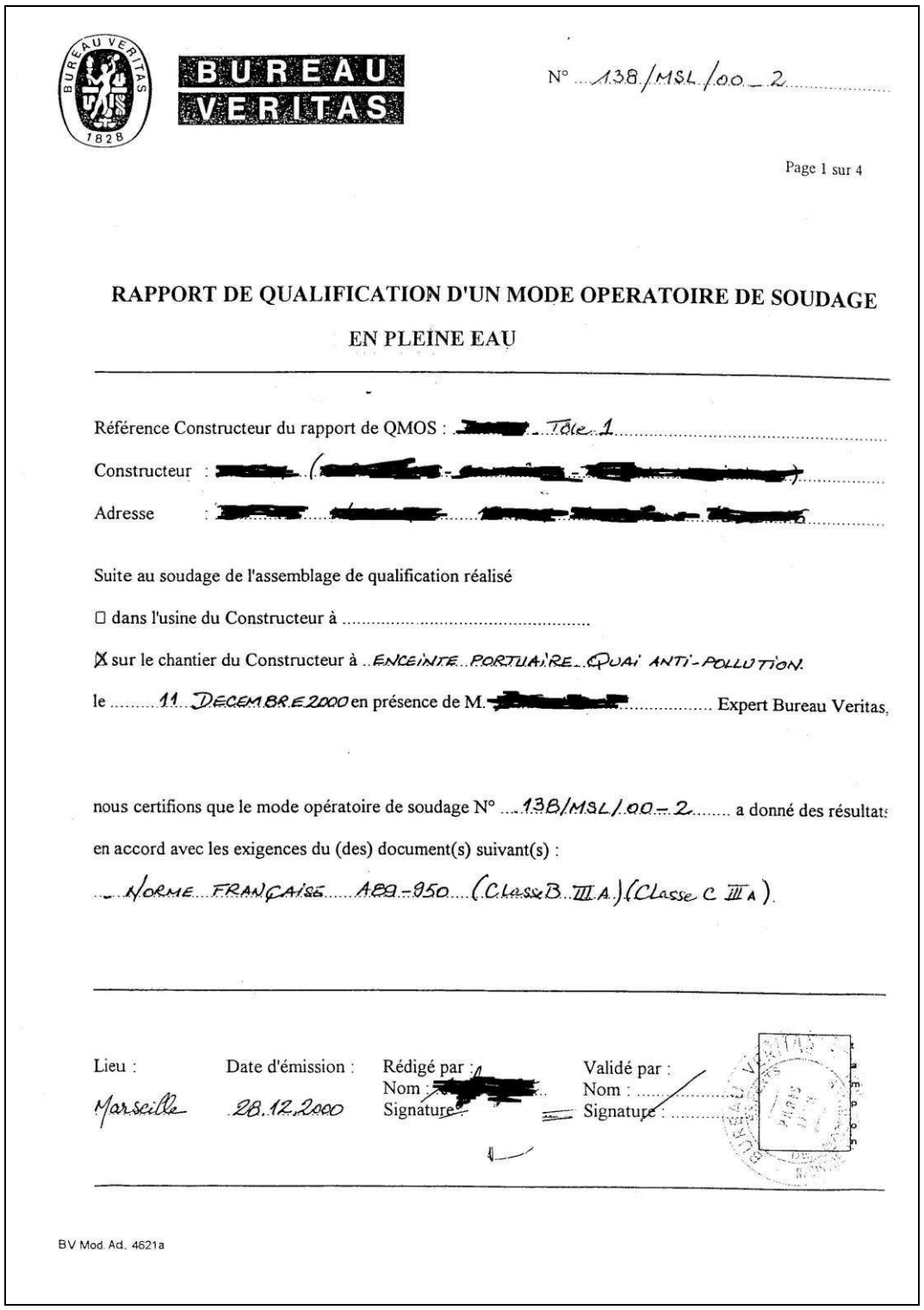
Le descriptif du mode opératoire de soudage (DMOS) :

Lorsqu'un nouveau chantier démarre, le cahier des charges impose de plus en plus la rédaction d'un tel document.
Le DMOS est en fait une procédure de soudage qui décrit en détail toutes les opérations, les instructions et les informations techniques nécessaires pour assurer la répétitivité des paramètres, obtenir un assemblage de qualité et réussir dans les meilleures conditions l'exécution d'un travail précis de soudage.
Le DMOS est le document de référence du coordonnateur de soudage, du plongeur soudeur, de l'inspecteur et du contrôleur lors de l'exécution, du suivi et du contrôle d'un joint soudé.
Ce document est obligatoire et doit être présenté lors d'une qualification de mode opératoire de soudage et de l'épreuve de convenance du plongeur soudeur pour obtenir une qualification.
Sans être exhaustive, le DMOS doit au minimum inclure les points suivants :

- Un croquis de la préparation du joint soudé
- Un croquis de la répartition des passes de soudage
- Le nombre de passe
- Le procédé de soudage
- Les positions de soudage
- Le produit d'apport
- La désignation normalisée du produit d'apport
- La marque du produit d'apport
- Le diamètre de l'électrode
- La nature du courant
- La polarité de l'électrode
- L'intensité
- La tension d'arc
- L'énergie de soudage
- La vitesse d'exécution d'une passe
- Le type de poste de soudage

Une fois que cette procédure est rédigée, il faut la faire approuver afin d'obtenir un document appelé « Qualification du mode opératoire de soudage » (QMOS).

Fig. n° 52 Exemple de QMOS



BUREAU VERITAS

N° 138/MSL/00_2

Page 1 sur 4

RAPPORT DE QUALIFICATION D'UN MODE OPERATOIRE DE SOUDAGE

EN PLEINE EAU

Référence Constructeur du rapport de QMOS : [redacted] Tôle 1

Constructeur : [redacted]

Adresse : [redacted]

Suite au soudage de l'assemblage de qualification réalisé

☐ dans l'usine du Constructeur à .....

☒ sur le chantier du Constructeur à ENCEINTE PORTUAIRE QUAI ANTI-POLLUTION

le 11 DECEMBRE 2000 en présence de M. [redacted] Expert Bureau Veritas,

nous certifions que le mode opératoire de soudage N° 138/MSL/00-2 a donné des résultats

en accord avec les exigences du (des) document(s) suivant(s) :

NORME FRANÇAISE A89-850 (Classe B III A) (Classe C III A)

Lieu :	Date d'émission :	Rédigé par :	Validé par :
Marseille	28.12.2000	Nom : [redacted]	Nom :
		Signature :	Signature :

BV Mod. Ad. 4621a

Fig. n° 53 : Exemple suite

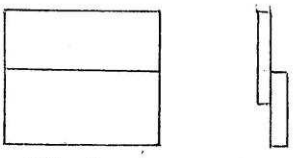
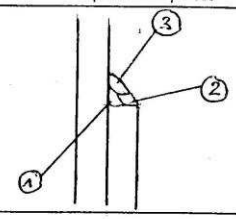
BUREAU VERITAS

QMOS N° : 138/MSL/00-2 Page 2 sur 4

1 RELEVE DES PARAMETRES DU MODE OPERATOIRE DE SOUDAGE

DMOS N° : [redacted] - Plaque 1
Méthode de préparation : Usine (rainurée)
Nettoyage : Meulage
Autres informations : Profondeur : 4 m. Technique de plongée : Narguilé. Eau de Mer, visibilité 3 m, T° eau 14°C. Assemblage à clin.

	Partie 1	Partie 2
Spec. matériau de base :	E 24	E 24
N° de coulée :		
Groupe de matériau :	1	1
Epaisseur :	6	6
Diamètre extérieur :	/	/

Schéma de préparation	Disposition des passes
 Tôles 400×400 - ep. 6.	

N° des passes		1 à 3					
Procédé de soudage		111					
Position de soudage		2F					
Soudage auto.	.nb. de têtes	NA					
	.balayage	↓					
	.amplitude/fréquence						
	.temporisation						
Produit d'apport : fil (F) ou électrode (E)		E					
. Désignation normalisée		ASME II C, SFA 5,1 E 6013					
. Marque		HYDROWELD / CARBONARC					
. Diamètre		4					
. N° de lot		/					
Gaz de protection (G) ou Flux (F)		NA					
. Flux en poudre	. Désignation normalisée	↓					
	. Type et marque commerciale						
. Gaz	. Type						
	. Marque commerciale						
. Prot. envers	. Débit (l/mn)						
. Prot. endroit	. Débit (l/mn)						
. Plasma		↓					
Electrode réfractaire : type/diamètre							
Nature du courant		D.C					
Polarité de l'électrode ou du fil		+					
Intensité I (A)		138 A ± 8					
Tension U (V)		64 V					
Soudage pulsé		/					
Vitesse d'exécution V d'une passe (cm/mn)		≈ 22 mm					
Vitesse de déroulement du fil (cm/mn)		/					
Energie (J/cm) = [U x I x 60] / V		/					
Température de préchauffage en °C		/					
Température entre passes en °C		/					
Matériel de soudage	. Machine	/					
	. Poste	SAFARC M210					

Post-Chauffage : Non ☒ Oui ☐ Température °C : ..... Durée du maintien : .....
Traitement thermique après soudage : Non ☒ Oui ☐ Température °C : ..... Durée du maintien : .....
Soudeur ou opérateur : M. [redacted]

BV Mod Ad. 4621a

Fig. n° 54 : Exemple suite

BUREAU VERITAS

QMOS N° : 138/MSL/00-2 Page 3 sur 4

2 RESULTATS DES ESSAIS

2.1

ESSAIS NON DESTRUCTIFS	EXECUTES PAR	RAPPORT N° / DATE	RESULTAT
Examen visuel	[redacted]	138/MSL/00.2 11/12/00.	Satisfaisant (Début Acceptable)
Ressuage / Magnétoscopie			(Surépaisseur local)
Radiographie			
Ultrasons			

2.2 ESSAIS DE TRACTION

Exécutés par CETE APAVE SUD Rapport N° / Date 0055.LM.3516du 22/12

Valeurs requises : 5.5.1.2.6 AB9950 = 60% Rm acier de base soit 340x0.6 = 204

TYPE / N°	Re (N/mm²)	Rm (N/mm²)	A %	Z %	LOCALISATION DE LA CASSURE	REMARQUES
TRACTION D'ANGLE (1)		242			Dans la Soudure	

2.3 ESSAIS DE PLIAGE

Exécutés par ..... Rapport N° / Date .....

TYPE / N°	DIAMETRE DE POINCON	DIMENSIONS DE LA SECTION	RESULTAT

2.4 ESSAIS DE RESILIENCE

Exécutés par ..... Rapport N° / Date .....

Type : ..... Dimensions : ..... Valeurs requises : .....

POSITION DE L'EPROUVETTE/DE L'ENTAILLE	TEMPERATURE	VALEURS INDIVIDUELLES 1 2 3	MOYENNE	REMARQUES

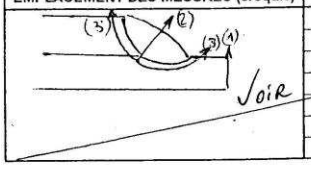
BV Mod. Ad. 4621a

Fig. n° 55 : Exemple suite

BUREAU VERITAS

QMOS N° : 138/MSL/00-2 Page 4 sur 4

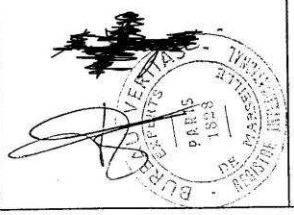
2.5 ESSAI DE DURETE
Exécuté par : CETE APAVE SUD. Rapport N° / Date : N°00.55LM.3516 du 22/12/00
Valeurs requises : Sans exigence pour les aciers du groupe 1 (DONNÉ POUR INFORMATION)

EMPLACEMENT DES MESURES (croquis)	N° FILIATION	RESULTATS
	(1) MB	Moy = 106 HV 10
	(2) MF	Moy = 200 HV 10
	(3) Sous cordon	Moy = 163 HV 5
	(3')	Moy = 164 HV 5

2.6 EXAMEN MACROGRAPHIQUE
Exécuté par : CETE APAVE SUD Rapport N° / Date N°00.55LM.3516 du 22/12/00
Observations : Défauts acceptables - Aux trois des procès-Verbaux
Défaut hors tolérance : Défaut géométrique accepté au visuel compte tenu de son caractère ponctuel -

2.7 EXAMEN MICROGRAPHIQUE
Exécuté par ..... Rapport N° / Date .....
Observations : .....

2.8 AUTRES EXAMENS OU ESSAIS
CETE APAVE SUD - PV N° 00.55.LM.3516 du 22/12/00
essai de Texture : Rupture dans le cordon de soudure laissant apparaître quelques porosités - Défauts dans les tolérances

Désignation des annexes	Nom et Signature de l'Expert Bureau Veritas	Nom et Signature du Représentant du Constructeur
Rapport APAVE 0055 LM 3516 Certificat matière de base		

BV Mod. Ad. 4621a

Les essais de qualification du mode opératoire sont réalisés sur un assemblage unique dont les caractéristiques doivent être identiques à celles rencontrées sur le futur chantier.
Il est évident que pour faire approuver une nouvelle procédure de soudage, l'entrepreneur aura tout intérêt à sélectionner un de ses meilleurs plongeurs soudeurs car une fois l'assemblage terminé, celui-ci sera soumis à deux séries d'examen :

1. Les examens non destructifs
2. Les examens destructifs

Les examens non destructifs consistent à faire un contrôle visuel, un ressuage et une radiographie sur la longueur totale des cordons.
Les examens destructifs consistent faire une macrographie et à vérifier la résistance à la traction, la résilience et la dureté.
Ces tests se font sur diverses éprouvettes découpées dans la pièce d'épreuve.
Les résultats à obtenir diffèrent quelques peu en fonction des standards de normalisation utilisés.
En ce qui concerne le soudage sous eau, le standard le plus utilisé dans le monde est le AWS D3.6 99 (American Welding Society).
Ce standard qui fut le premier à être rédigé (1983) pour des soudures en pleine eau est divisé en quatre catégories de qualité :

1. Type A : concerne les constructions pour lesquelles les contraintes de calculs des assemblages soudés sont identiques à celles obtenues hors d'eau.
2. Type B : concerne les constructions pour lesquelles les contraintes de calculs des assemblages soudés sont inférieures à celles obtenues hors d'eau, avec des applications moins critiques, où l'on peut accepter une ductilité inférieure, davantage de soufflures et autre discontinuités plus grandes.
3. Type C : concerne les constructions pour lesquelles les soudures n'ont besoin de satisfaire qu'à des exigences inférieures au type B et qui sont prévues pour des applications ou la capacité de charge n'est pas une considération essentielle (soudure d'étanchéité par exemple).
4. Type O : concerne les constructions soumises à d'autres types d'exigences.

En ce qui nous concerne seul les assemblages de type B et C sont en général d'application.
Actuellement, seul quelques spécialistes sont capables de respecter les critères imposés par les assemblages de type A.
En France la norme utilisée pour la QMOS est la A89-950 qui ne comprend que les deux classes de qualité B et C.
Une fois que la QMOS est approuvé, il reste encore à qualifier les différents plongeurs soudeurs qui participeront au chantier.
Ici également, le standard le plus utilisé était le AWS D3.6 99, mais depuis 2001 il existe maintenant un standard Européen dénommé EN ISO 15618-1.
Cette norme qui remplace également la norme Française A88 -950 de 1989 reprend à quelques exceptions près, les normes du standard américain.
Pour obtenir la qualification pour le soudage sous eau selon les normes européennes, le plongeur soudeur devra non seulement prouver son habileté manuelle pour réaliser un assemblage selon un mode opératoire pré-établi, mais il devra également faire la preuve de ses connaissances théoriques concernant les procédés de soudage, les matériaux et les exigences de sécurité applicables à la qualification en cours.
Ici également, l'épreuve de convenance doit avoir lieu en présence d'un examinateur agréé, qui poinçonne les pièces à souder avant le début du soudage.

En règle générale, l'assemblage de qualification, qualifie le plongeur soudeur non seulement pour les conditions utilisées pendant l'épreuve, mais également pour tous les autres assemblages considérés comme étant plus faciles.
Ici également, chaque assemblage terminé est soumis à une série de contrôles destructifs ou non.
La validité de la qualification est valable durant deux ans à condition de respecter les critères suivants :

- Le plongeur soudeur doit effectuer régulièrement des travaux de soudage équivalent à sa qualification.
- Une interruption de trois mois maximum est autorisée.

A l'issue de la qualification, toutes les conditions de l'épreuve sont consignées sur un formulaire identique au modèle présenté en fig. 56

Fig. n° 56 : Exemple de certificat de qualification

EN ISO 15618-1:2001

Qualification fictive

Certificat de qualification de scaphandrier soudeur pour le soudage hyperbare en pleine eau

Désignation EN ISO 15618-1 111 P FW 1 RR t09 PG ss mb wd6 sa ..... Examinateur ou organisme d'examen

N° Référence du descriptif de mode opératoire de soudage établi par le constructeur (le cas échéant) : ..BDC tôle 1.....

N° Référence : .....xxx.....

Nom du scaphandrier soudeur : ....Papy One.....

Identification : .....

Méthode d'identification : .....

Date et lieu de naissance : .....

Employeur : .....

Code/norme d'épreuve : ....EN ISO 15618-1:2001 classe B / C.....

Photographie (si exigée)

Compétence technologique : acceptée/~~non vérifiée~~ (rayer la mention inutile)

	Détails de l'épreuve	Domaine de validité
Profondeur d'eau	wd6	0 m jusqu'à 20 m
Visibilité	0,5 m	
Salinité	sa	sa / fr
Procédé de soudage	111	111
Tôle ou tube	P	
Type d'assemblage	FW	
Groupe(s) de matériaux de base	1	
Type de métaux d'apport / désignation	Hydro - weld ASME IIC SFA 5.1 : E6013	
Revêtement étanche	RR / P	
Matériels de soudage	POWCON 300	
Épaisseur de l'assemblage de qualification (mm)	t09	0,5 t à 2 t (6 mm min.)
Diamètre extérieur du tube (mm)		
Position de soudage	PG	PG
Gougeage / Support envers		

Des informations supplémentaires sont disponibles sur la fiche jointe et/ou dans le DMOS n° : xxx

Fig. n° 57 : Exemple suite

EN ISO 15618-1:2001

Type d'essai	Effectué et accepté	Non exigé
Contrôle visuel		
Contrôle par radiographie		
Contrôle par magnétoscopie		
Contrôle par ressuage		
Examen macroscopique		
Essai de texture		
Essai de pliage		
Contrôle par ultrasons		
Essais supplémentaires [a)]		
a) Annexer les fiches de résultats (si exigé).		

Nom, date et signature : .....

Examinateur ou organisme d'examen : .....

Date de délivrance : .....

Lieu : .....

Date d'expiration de la validité : .....

Prolongation de la qualification par l'examinateur ou l'organisme d'examen pour les deux prochaines années (voir 10.2)

Date	Signature	Fonction/titre

Questionnaire

Pour approuver la qualification ISO 15618-1 certains pays peuvent exiger que le plongeur soudeur subisse un examen de compétence technologique.
Cette vérification des connaissances théoriques peut se faire par soit par :

1. Une épreuve écrite (questionnaires à choix multiples).
2. Une épreuve orale après une série de questions écrites.
3. Une épreuve sur ordinateur.
4. Une démonstration à la suite d'un exposé écrit des critères.

Les thèmes abordés concernent :

- Le matériel de soudage à l'arc
- Les procédés de soudage
- Les produits consommables
- Les métaux de base
- Les défauts de soudage
- La sécurité et la prévention des accidents
- La qualification du plongeur soudeur

Ci - après, le plongeur soudeur trouvera en exemple une série de questions à choix multiples qui lui permettront de tester ses connaissances théoriques.
Les réponses aux questions pourront être retrouvées dans les divers chapitres de ce guide.

Test de connaissance générale

1. En quelle année les premiers essais de soudage ont-ils eut lieu ?
   - 1802
   - 1889
   - 1917

2. Quelle méthode de soudage permet la réalisation d'assemblage à grande profondeur ?
   - Le soudage en pleine eau
   - Le soudage en caisson
   - Le soudage hyperbare

3. Actuellement le soudage en pleine eau permet de réaliser des soudures de qualité jusqu'à :
   - 10 m
   - 50 m
   - 200 m

4. Quelle est la température de l'arc électrique ?
   - Environ 3500 °C
   - Environ 5000 °C
   - Environ 9000 °C

5. Quel est le procédé de soudage utilisé pour le soudage en pleine eau ?
   - Le soudage à l'électrode enrobée
   - Le soudage à l'arc
   - Le T.I.G

6. Les postes de soudage peuvent être classé en diverses catégories, cocher celle qui ne convient pas :
   - Les postes rotatifs
   - Les postes thermiques
   - Les postes statiques

7. Un poste statique est toujours alimenté par une source de courant alternatif :
   - Vrai
   - Faux
   - N'a pas d'importance

8. Un inverteur est un poste de soudage :
   - Statique
   - Rotatif
   - Transformateur monophasé

9. Le courant délivré par un poste rotatif est :
   - Toujours du courant continu
   - Toujours du courant alternatif
   - Peut être continu ou alternatif en fonction du modèle.

10. Pour le soudage en pleine eau la tension à vide de poste de soudage doit au minimum être comprise entre :
    - 110 – 90 volts
    - 85 – 65 volts
    - 50 – 40 volts

11. Lorsqu'on dit qu'un poste de soudage a un facteur de marche de 60%, cela signifie :
    - Que l'intensité délivrée ne sera égale qu'à 60 % de l'intensité affichée
    - Que l'on ne peut souder que 6 minutes par tranche de 10 minutes
    - Que l'on ne peut utiliser que 60 % de l'électrode

12. La section des câbles de soudage doit être de :
    - 50 mm²
    - 90 mm²
    - En rapport avec la longueur du câble et de l'intensité utilisée

13. Les câbles de soudage ont également un facteur de marche :
    - Vrai
    - Faux

14. Afin d'éviter la formation d'un champ d'induction magnétique qui pourrait avoir un effet sur le soudage, les câbles de soudage doivent :
    - Toujours être lové sur eux même
    - Toujours être lové en long
    - N'a pas d'importance

15. La section de la pince de masse en contact avec la pièce à souder doit :
    - Au minimum être aussi grande que la section du câble de masse
    - Etre plus petite que la section du câble de masse
    - N'a pas d'importance

16. Concernant les coupes – circuit, laquelle de ces affirmations est fausse ?
    - Doit au minimum supporter un courant de 400 Ampères
    - Doit être monté au plus près du poste de surveillance
    - N'est pas obligatoire pour les travaux de soudage en eau douce

17. En eau claire, les verres teintés sont sélectionnés en fonction :
    - de l'intensité du courant
    - De la couleur et sensibilité des yeux
    - En fonction du type d'électrode

18. Les verres teintés identifiés par les lettres GW sont destinés au soudage :
    - Au chalumeau
    - A l'arc
    - En pleine eau

19. Une soudure de qualité ne peut être réalisée en pleine eau qu'à l'aide d'une électrode à :
    - Enrobage basique
    - Enrobage cellulosique
    - Enrobage rutile

20. Le rôle de l'enrobage est multiple, laquelle de ces affirmations est fausses ?
    - Il facilite l'amorçage de l'arc électrique
    - Il permet de réduire l'intensité du courant
    - Il protège le bain de fusion de l'air (ou de l'eau)
    - Tout est exact

21. Les électrodes de surface peuvent être utilisées telles quelles sous eau :
    - Vrai
    - Faux
    - Doivent au minimum subir un traitement de protection les rendant étanches

22. Pour quelle raison ne peut-on pas utiliser des électrodes basiques sous eau ?
    - Elles produisent trop de gaz
    - Elles sont trop sensibles à l'humidité
    - Elles ne fonctionnent qu'en courant alternatif

23. Dans le système d'identification des électrodes AWS A5.1 quel type d'électrode permet le soudage en toutes positions ?
    - E7014
    - E7024
    - E6034

24. Dans le système d'indentification des électrodes EN 499 quel type d'électrode permet le soudage en toutes positions sauf verticale descendante ?
    - E46 3 1Ni B 52 H5
    - E46 3 1Ni B 51 H5
    - E46 3 1Ni B 54 H5

25. A l'exception de l'essai de résilience, à quelle température sont réalisés les autres essais permettant de déterminer les propriétés du métal déposé ?
    - Température ambiante
    - – 196 °C
    - Entre 40 °C – 75 °C

26. Quelles sont les différentes caractéristiques mécaniques enregistrées lors du test de traction ?
    - La limite d'élasticité
    - La résilience
    - La dureté

27. Un métal ductile à la propriété de pouvoir se déformer avant de rompre :
    - Vrai
    - Faux

28. En ce qui concerne l'allongement obtenu lors du test de traction, laquelle de ces valeurs indique une plus grande élasticité et donc une meilleure qualité de l'assemblage soudé ?
    - 10 %
    - 14 %
    - 20 %

29. Plus le % de carbone dans un alliage augmente (laquelle de ces affirmations est exacte) ?
    - Plus la ductilité diminue
    - Plus la résistance à la rupture diminue
    - Plus la dureté diminue

30. Le soudage sous eau devient problématique dès que le pourcentage de carbone dans l'alliage dépasse :
    - 0,2 %
    - 0,3 %
    - 0,8 %

31. Le terme anglais DCSP (Direct Current Straight Polarity) signifie :
    - Courant alternatif avec électrode au +
    - Courant continu avec électrode au –
    - Courant continu avec électrode au +

32. Pour réussir une soudure de qualité, le degré de propreté de la structure de base au niveau du joint à souder doit au minimum correspondre au degré de préparation :
    - SA 1
    - SA 2,5
    - ISO 3

33. En soudage sous eau, l'angle de guidage de l'électrode est généralement comprit entre :
    - 45° - 60°
    - 35° - 45°
    - 20° - 35°

34. L'augmentation de l'angle de guidage permet :
    - Une meilleure évacuation des bulles de gaz
    - De refroidir la soudure plus rapidement et donc d'avoir une soudure de meilleure qualité
    - D'utiliser des électrodes cellulosiques

35. Pour obtenir une gorge de 3 mm il vaut mieux utiliser :
    - Une électrode de 5 mm et ne faire qu'une seule passe
    - Faire deux passes avec une électrode de 3 et 4 mm
    - Faire trois passes, une de pénétration avec une électrode de 3,2 mm et deux passes de remplissage avec une électrode de 4 mm

36. L'utilisation d'une électrode de 5 mm en passe de fond (laquelle de ces affirmations est fausse):
    - Permet de réduire le nombre de passe
    - Risque de provoquer un soufflage latéral
    - Diminue la pénétration

37. En soudage sous eau, l'intensité du courant est augmenté d'environ 10% - 20% afin :
    - De compenser la résistance électrique et la perte de chaleur du bain de fusion
    - D'avoir une meilleure visibilité du bain de fusion
    - D'éviter que l'eau ne se mélange au bain de fusion

38. Sous eau, il est recommandé de souder en polarité directe. Ce choix est dicté par le fait que (laquelle de ces affirmations est fausse) :
    - Moins d'usure par électrolyse
    - Risque de choc électrique moins élevé
    - Plus bel aspect du cordon de soudure

39. Les positions de soudage sont définies selon les normes (laquelle de ces affirmations est fausse) :
    - DIN 3525
    - EN ISO 6947
    - AWS A3.0

40. Le soudage en position F3 signifie :
    - Soudage d'angle à plat
    - Soudage vertical
    - Soudage en plafond

41. Le soudage en position PG signifie :
    - Soudage à plat
    - Soudage vertical descendant
    - Soudage vertical montant

42. Lequel des défauts suivants peut être causé par la présence d'hydrogène dissous dans le bain de fusion ?
    - Fissuration à chaud
    - Fissuration à froid
    - Porosité

43. Un manque de fusion et de pénétration peut être provoqué par une électrode trop large :
    - Vrai
    - Faux

44. Le soufflage magnétique se rencontre essentiellement :
    - Lors du soudage en courant continu
    - Avec des électrodes non protégées
    - Lors du soudage en courant alternatif

45. Le soufflage magnétique peut être réduit ou éliminé par (laquelle de ces affirmations est fausse) :
    - La mise en place de deux pinces de masse
    - Le soudage par pas de pèlerin
    - L'utilisation d'électrodes protégées par un vernis amagnétique

46. Le soudage sous eau ne peut se faire qu'avec du courant continu :
    - Vrai
    - Faux
    - N'a pas d'importance

47. Sous eau, le courant continu est 3 fois moins dangereux que le courant alternatif :
    - Vrai
    - Faux
    - C'est identique

48. La combustion sous eau d'une électrode de soudage génère environ :
    - 10 litres de gaz explosifs
    - 1 litre de gaz explosif
    - 2 – 4 litres de gaz explosifs

49. L'explosion d'une dizaine de litres de gaz explosifs occasionne généralement :
    - Un accident bénin
    - Un accident grave
    - Un accident mortel

50. Les gaz explosifs générés lors du soudage en pleine eau sont un mélange de :
    - Azote / Hydrogène / Propane
    - Oxygène / Hydrogène / monoxyde de carbone
    - Hydrogène / Acétylène / oxydes divers

51. De quelle manière s'élabore l'acier ?
    - Dans un haut fourneau au départ de minerai de fer et de coke
    - Dans un haut fourneau au départ de minerai de carbone et de coke
    - Dans un four convertisseur au départ de minerai de fer

52. Un acier contenant moins de 0,15 % de carbone est un acier :
    - Extra doux
    - Dur
    - Inox

53. La température de fusion du fer est de :
    - 910 °C
    - 1350 °C
    - 1539 °C

54. La vitesse de refroidissement de la soudure en pleine eau est d'environ :
    - 250 °C / sec
    - 400 °C / sec
    - 800 °C / sec

55. La structure cristalline d'une soudure en pleine eau est composée d'un mélange de :
    - Martensite – bainite – ferrite
    - Perlite – cémentite
    - Austénite – fer alpha

56. Pour le soudage en pleine eau, le CE ne doit pas dépasser :
    - 0,38 %
    - 0,5 %
    - 3 %

57. Le terme ZAT signifie :
    - Zone à température
    - Zone affectée thermiquement
    - Zone à transformer

58. Une procédure de soudage est rédigée sous la forme d'un :
    - DMOS
    - QMOS
    - Certificat de qualification

59. La qualification NE ISO 15618 – 1 est valable :
    - A vie
    - Deux ans à condition de respecter certains critères
    - Six mois

60. L'assemblage de qualification, qualifie le plongeur soudeur :
    - Pour tous les assemblages de même types
    - Pour tous les assemblages de mêmes types mais également pour tous les autres assemblages jugés comme étant plus faciles
    - Pour toutes les positions de soudage

Bibliographie

Livres

E.Cayford - *Underwater work* p. 110 – 118 Cornell Maritime Press 1966
E. Thompson - *Diving Cutting and Welding in Underwater Salvage Operations* Cornell Maritime Press 1977
M. Brady – *Marine Salvage Operations* Cornell Maritime Press 1960
Underwater Welding Cutting and Hand Tools – BATELLE 1967
J. Bevan – *The Professional Diver's Handbook* – p. 122 – 127 SUBMEX 2005
N. Zinkowski – *Commercial Oil-field Diving* – 169 – 172 Cornell Maritime Press 1966
A. Hampton – *The Master Diver and Underwater Sportsman* – p. 137 – 138 David & Charles 1970
O.P.P.B.T.P – *La plongée professionnelle dans les travaux publics* – p. 73 – 76 O.P.P.B.T.P 1976
David.J.Keats – *Professional diver's manual on wet welding* –Abington publishing 1990
David J Keats – *Underwater wet welding ' A welder's mate'* The Cromwell Press Ltd 2004
Librairie Aristide Quillet - *Encyclopédie des sciences industrielles Quillet* M1 p.665 – 695 Quillet 1973
L.Mendel – *Manuel pratique de soudage à l'arc* – Dunod 1970
Michael A.Pett – *A pratical guide to wet welding* – Hydroweld 1996
SAF – *Soudage des aciers inoxydables* - SAF 1995
SAF – *Soudage à l'électrode enrobée* – SAF 1994
SAF – *Métallurgie du soudage* – SAF 1994
SAF – *Les aciers Duplex : Propriétés,applications et soudage* – SAF 1994
US NAVY – *U.S.Navy Underwater Cutting & Welding Manual* – S0300-BB-MAN-010 1989
NAVSEA – *Wet and Dry Chamber Welding*
ESAB – *Basics of Arc Welding* – ESAB 1999
Shell – *Evaluation Report of Swordfish Iron Oxide Cutting Electrode* – Shell 2004

Articles

J.Doyen TRAVOCEAN – *Soudage sous-marin en pleine eau* – Souder 1989
H.G. Delauze COMEX – *Le soudage en milieu hostile pour l'industrie offshore et le nucléaire* – Souder 1989
C. Renaud – *Le soudage sous l'eau* – Souder 1989
J.Doyen TRAVOCEAN – *Tenue à la fatigue d'assemblages réalises par soudage hyperbare et en pleine eau* – Soudage et Techniques Connexes 1991
M.Sauvage – *Une conduite sous-marine 18 '' en acier inoxydable duplex 22-05* – Soudage et Techniques Connexes 1996
A. Combe –J.F.Juglar – B.Le Bourgeois – *Soudage pleine eau Normalisation* – Souder 1989
Michael Pett – *Fire Down Below* – CDI 2004
R. Murray – *Underwater Electrical Safety for Divers* – Underwater Magazine 2004
R. Blackledge – *Case Studies : Underwater Welding Projects* – Underwater Magazine 1998
?? – *Come on in and Weld, the Water's Fine* – Underwater Magazine 2000
D.Ogden – G.M.Cain – *The Truth about Underwater Burning Safety* – Underwater Magazine 2003

Internet

Colorado School of Mines – *A predictive Electrochemical Model for Weld Metal Hydrogen Pickup in underwater Wet Welding* – 2005
Soudeur.Com – *Comment calculer l'énergie de soudage*
Soudeur.Com – *Le soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées sous eau*
Soudeur.Com – *Le soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage*
Soudeur.Com – *Comment rédiger un D.M.O.S*
Soudeur.Com – *combien coûte une qualification de mode opératoire de soudage*
Soudeur.Com – *Essais mécaniques : les résiliences ou essais de flexion par choc*
Aussieweld.com – *Introduction to Arc Welding*
Wikipédia – *Acier*
Wikipédia – *Haut-fourneau*
ARBED – *Nuances d'acier*
Info Comm – *Minerai de fer / Acier*
Cybel.fr – *Acier (steel)*

Normes

AFNOR - NF EN ISO 15618 b-1 - *Epreuve de qualification des soudeurs pour le soudage sous l'eau* – 2002
ISO 857-1 – *Welding and allied processes vocabulary* – 1998
NBN EN ISO 6520-1 – Soudage et techniques connexes – *Classification des défauts géométriques dans les soudures des matières métalliques* – 1999
CR ISO 15608 – *Soudage – Lignes directrices pour un système de groupement des matériaux métalliques* – 2000
A89-950 Norme expérimentale – *Qualification d'un mode opératoire de soudage – Travaux sous-marins – Soudage pleine eau* – 1989
NBN EN 970 – *Contrôle non destructif des assemblages soudés par fusion – contrôle visuel* – 1997
NBN EN ISO 6947 – *Soudures - Position de travail – Définitions des angles d'inclinaison et de rotation* – 1997
A81-950 Norme expérimentale – *Soudage à l'arc – Electrodes enrobées pour soudage en pleine eau déposant un acier non allié* – 1991
NBN EN 499 – *Produits consommables pour le soudage – électrodes enrobées pour le soudage manuel à l'arc des aciers non alliés et des aciers à grain fin – classification* - 1995