



MODULE

Assemblage Thermique

par

SOUDAGE



Niveau: 1 ère Année Génie Mécanique
Enseignant : Mounir FRIJA



Accueil du module

«Assemblage Thermique par SOUDAGE»

Ce support présente les techniques de Soudage les plus utilisés dans l'industrie. Le contenu est destiné aux techniciens et ingénieurs intéressés par ces techniques. Pour chacune des techniques, une présentation des principes et méthodes d'utilisation est faite.

Buts et Objectifs

Le but de ce module est d'étudier les principales modes d'assemblage thermique par Soudage. Plus spécifiquement, au terme de ce module, l'étudiant ou l'étudiante sera en mesure de:

- ✓ Décrire les différentes méthodes utilisées pour l'assemblage thermique par soudage.
- ✓ Identifier les différentes techniques de Soudage les plus utilisés dans l'industrie.
- ✓ Identifier les différents outils et instruments utilisés par ces modes opératoires de soudage.
- ✓ Appliquer ces modes sur des exemples bien définis.
- ✓ Déterminer pour chaque champ les techniques de Soudage les plus appropriées

SOMMAIRE

Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 1 : Soudage Oxy-Acétylénique OA

Chapitre 2 : Soudage à Electrode Enrobé EE

Chapitre 3 : Soudure MIG

Chapitre 4 : Soudure TIG

Chapitre 5 : Soudure arc submergé

Chapitre 6 : Soudure par résistance

Chapitre 7 : Soudure par ultrason

Chapitre 8 : Soudure par laser

Chapitre 9: Soudure par friction

Chapitre 10: Symbolisation

Chapitre 11 : Calcul des paramètres de soudage

Chapitre 12 : La prévention des risques en soudage

Section N°2 : Métallurgie du soudage

Chapitre 1 : Rédiger un DMOS

Chapitre 2 : QMOS - Analyse de la norme EN15614

Chapitre 3 : Taux dilution

Chapitre 4 : Schaeffler

Chapitre 5 : Choisir un acier inox / Acier austéno-ferritique/ Aciers ferritiques/ Aciers austénitiques/ Aciers martensitiques

Chapitre 6 : Essai de traction / Essai de résilience/ Essai de dureté

Section N°3 : Soudage des tubes en acier

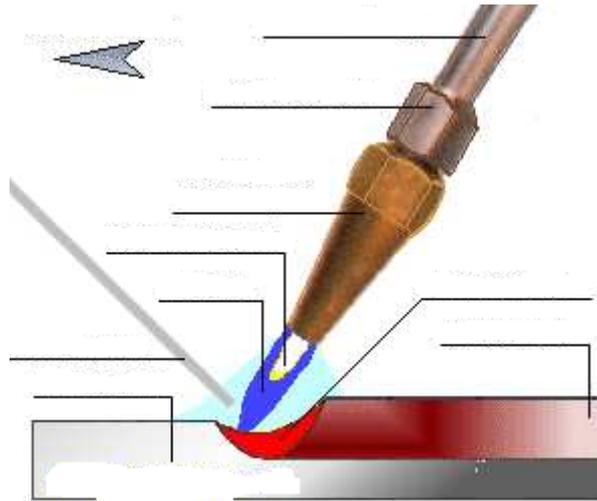
Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 1 : Soudage Oxyacétylénique (OA)

I) DEFINITION DU PROCEDE :

Le soudage Oxyacétylénique est un procédé de soudage **à la flamme**. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née du mélange et de la combustion d'un gaz **combustible d'acétylène** avec un gaz **comburant d'oxygène**. La température de la flamme peut atteindre les **3200° Celsius** lorsque le mélange d'acétylène et d'oxygène est correctement équilibré dans le chalumeau.

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de \varnothing 0,8 mm à \varnothing 4,0 mm) est amené **manuellement dans le bain de fusion**. L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le **bain de fusion** et après refroidissement le **cordon de soudure**.

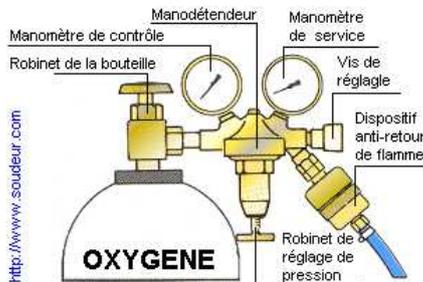


II) PRINCIPE :

Le chalumeau de soudage est relié par des boyaux d'amenée de gaz sur la bouteille de **gaz combustible d'acétylène** (pression de service 0,25 bar à 0,5 bar) et sur la bouteille de **gaz comburant d'oxygène** (pression de service 1,5 bar à 2,5 bar) par l'intermédiaire d'un **manodétendeur** placé sur chaque bouteille avec un dispositif de sécurité **d'anti-retour**. Le soudeur ouvre les robinets des bouteilles de gaz, puis ouvre en premier le robinet **de l'acétylène** du chalumeau, enflamme le gaz, ensuite ouvre le robinet **d'oxygène** et règle le mélange pour obtenir une flamme neutre.

III) LES BOUTEILLES :

L'acétylène et l'oxygène ainsi que tous les gaz sont codifiés par un système de couleur afin d'éviter tous mélange dangereux voici nos deux gaz pour le soudage OA :



<http://www.soudeur.com>



Couleur de l'ogive blanc

Couleur de l'ogive marron

IV) LE MATERIEL NECESSAIRE :

1. Un chalumeau
2. Un dispositif de sécurité anti-retour de l'oxygène vers l'acétylène
3. Un manodétendeur d'oxygène avec boyau d'alimentation couleur bleu suivant norme EN 559
4. Un manodétendeur d'acétylène avec boyau d'alimentation rouge suivant norme EN 559.
5. Un jeu de buses calibrées
6. Une paire de lunettes teintées
7. Un allume-gaz



V) CHOIX DU CHALUMEAU :

Le débit d'un chalumeau soudeur s'exprime en litres d'acétylène par heure. Le débit est réglé par un orifice calibré de sortie du mélange gazeux. Ce débit peut varier de 10 à 5000 litres par heure. Les chalumeaux sont classés en 4 tailles suivant leurs débits :

DÉFINITION DES TAILLES DE CHALUMEAUX

Taille de chalumeau	Débit du chalumeau
Numéro 00	10 à 40 litres / heure
Numéro 0	50 à 200 litres / heure
Numéro 1	250 à 1000 litres / heure
Numéro 2	250 à 5000 litres / heure

VI) REGLAGE DU CHALUMEAU :

- 1 Régler les pressions préconisées par le constructeur.
- 2 Ouvrir très légèrement le robinet d'oxygène.
- 3 Ouvrir largement le robinet d'acétylène.
- 4 Allumer le mélange en sortie de buse avec un allume gaz.
- 5 La flamme est carburante avec un excès important d'acétylène.
- 6 Régler progressivement la flamme en agissant sur le robinet d'oxygène.
- 7 baisser la pression d'acétylène si la flamme se décolle de la buse.
- 8 Pour éviter les flammèches noires à l'allumage, ouvrir d'abord légèrement l'oxygène, puis l'acétylène.
- 9 Fermer les bouteilles de gaz (oxygène et acétylène) lors d'un arrêt prolongé du brasage ou du soudage
- 10 Ne jamais laisser un chalumeau ouvert avec une flamme non allumée

VII) SECURITE :

Ne pas allumer un chalumeau avec le bout d'une cigarette

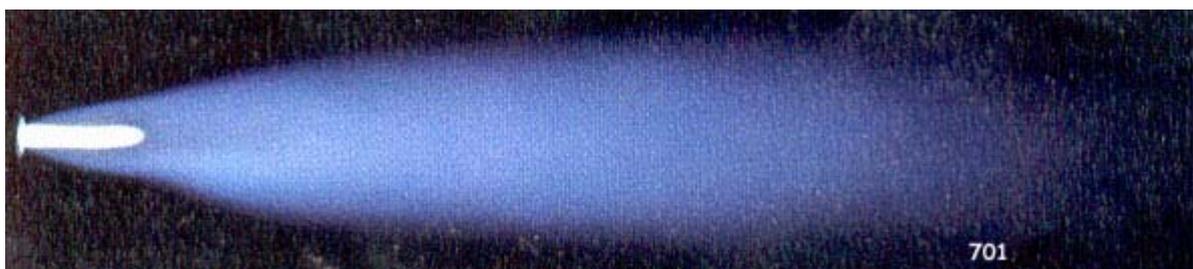
Ne jamais accrocher un chalumeau allumé près ou sur les bouteilles de gaz

Pour allumer un chalumeau, ouvrir l'oxygène puis l'acétylène

Pour éteindre un chalumeau, fermer l'acétylène puis l'oxygène

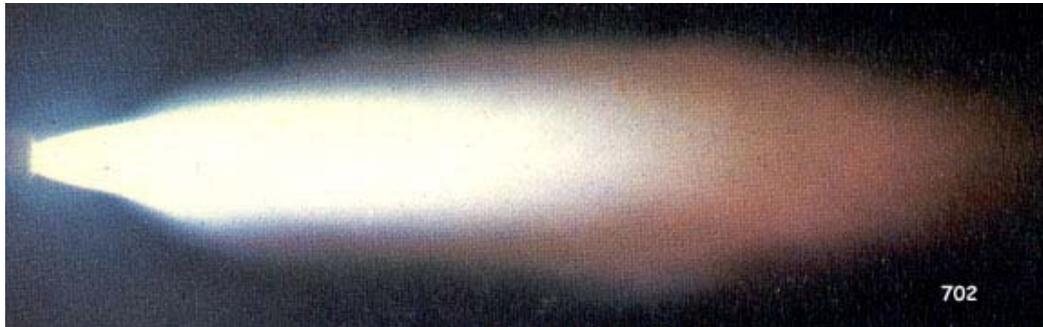
Ne jamais graisser les pièces en contact avec l'oxygène sous pression (inflammation spontanée ou coup de feu)

VIII) LES DIFFERENTES FLAMES :

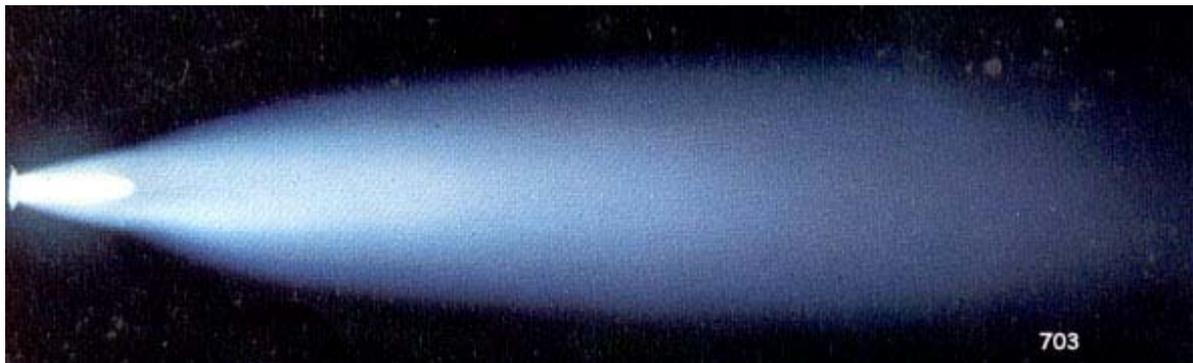


Flamme oxydante ou réductrice : c'est une flamme avec un excès d'oxygène. Le panache et le dard sont raccourcis. La flamme émet un sifflement.

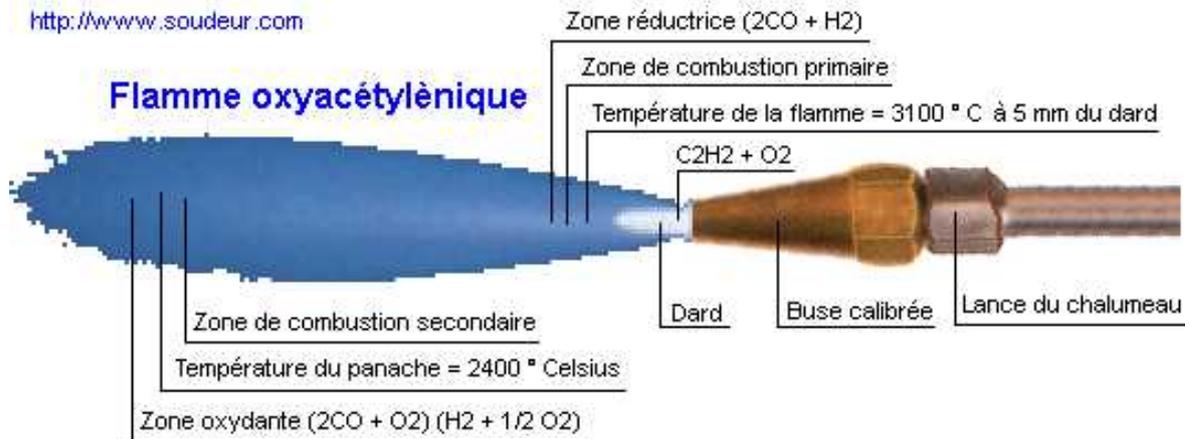
Le panache est plus lumineux. Cette flamme est utilisée pour le soudo-brasage, le soudage des laitons et du bronze.



Flamme carburante : c'est une flamme avec un excès d'acétylène. Le panache et le dard sont augmentés avec des formes irrégulières. Cette flamme légèrement carburante est utilisée pour le soudage des alliages d'aluminium, du plomb, du zinc et des fontes. Une flamme fortement carburante est utilisée pour le revêtement de stellite.



Flamme neutre ou normale : c'est la flamme normalement utilisée pour le soudage. Le dard est de couleur blanc brillant et de forme très nette en sortie de buse. Cette flamme est utilisée pour le soudage de l'acier et des cuivres.



IX) CHOIX DE LA BUSE :

QUELQUES PARAMÈTRES DE SOUDAGE PAR FLAMME	
Epaisseur d'acier	Débit de la buse de soudage
1,0 mm	50 litres / heure
2,0 mm	100 litres / heure
3,0 mm	200 litres / heure
4,0 mm	250 litres / heure
5,0 mm	300 litres / heure
6,0 mm	400 litres / heure
8,0 mm	600 litres / heure
10,0 mm	800 litres / heure

Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 2 : Soudage à l'électrode enrobée EE (Soudage à la baguette) (SMAW)

- 1) Définitions du soudage à l'arc (électrode enrobée) ! Procédé 111
- 2) Schéma du soudage à l'arc (électrode enrobée)
- 3) L'arc électrique
- 4) Installation de soudage à l'électrode enrobée
- 5) Amorçage en soudage à l'arc et stabilité de l'arc électrique
- 6) Influence de l'intensité en soudage à l'arc avec électrode enrobée
- 7) Nature du courant de soudage et polarité en soudage à l'arc
 - 7-1) Le courant continu (ou redressé)
 - 7-2) Le courant alternatif
- 8) Choix du courant de soudage et de la polarité en fonction des matériaux soudés
- 9) Les sources de courant ! Caractéristiques du transformateur de soudage

1) DEFINITIONS DU SOUDAGE A L'ARC (ELECTRODE ENROBEE) ! PROCEDE 111.

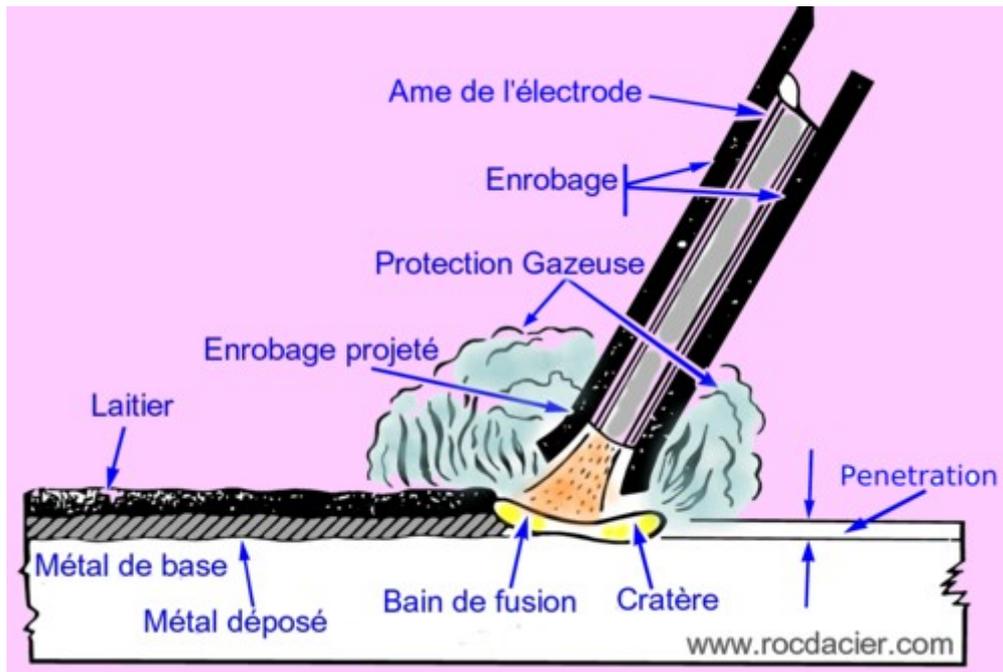
Le **soudage à l'électrode enrobée** est souvent appelé « **soudage à l'arc** », il utilise des baguettes comme métal d'apport. La soudure autogène à l'**électrode enrobée** consiste à mettre en fusion l'acier des pièces à souder et de les assembler grâce à un **métal d'apport** (l'âme de l'électrode).

Pour obtenir cette fusion, il faut une température très élevée, (3200°C) qui est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode) en créant un "**arc électrique**" qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois une lumière et une chaleur intense.



La **baguette** fond dans le **bain de fusion** formant ainsi la soudure, l'enrobage de l'électrode (laitier) fond à la température de l'arc et protège la soudure contre l'oxydation.

2) SCHEMA DU SOUDAGE A L'ARC (ELECTRODE ENROBEE)



3) L'ARC ELECTRIQUE

- ❖ Pour qu'il y a un **arc électrique**, il faut:
 - La présence d'une tension suffisante entre les électrodes
 - Le maintien d'une intensité minimale
 - Un milieu suffisamment ionisable.



4) INSTALLATION DE SOUDAGE A L'ELECTRODE ENROBEE

Schéma de l'installation

- 1) Prise de raccordement électrique de 380V, permet la mise sous tension du poste à souder.
- 2) Poste à souder, transformateur de courant.
- 3) Pince de masse, passage du courant électrique (le moins -). Se fixe sur un établi ou une pièce à souder
- 4) Support métallique (flan de tôle), permet le passage du courant de la masse vers l'élément à souder.
- 5) Porte électrode, porte électrode dans laquelle passe un courant positif (+).
- 6) Etabli, permet de travailler de façon idéale.

5) AMORÇAGE EN SOUDAGE A L'ARC ET STABILITE DE L'ARC ELECTRIQUE

L'**amorçage d'un arc électrique** est la création dans la veine d'air d'un **arc électrique** entre l'**électrode** (ou baguette) et la **pièce à souder**. Pour amorcer, il suffit de gratter la tôle. Il faut éviter de taper les électrodes. Parfois, lorsque l'on débute surtout, ou que les électrodes sont humides, ou que les intensités sont faibles, les électrodes collent à la

pièce.

La **stabilité de l'arc électrique** dépend de la facilité qu'a le soudeur à maintenir l'arc aussi régulier que possible. Pour réussir une soudure de qualité, la stabilité de l'arc est essentielle. Elle est influencée par la qualité du générateur de soudage utilisé, mais aussi par :

- Les caractéristiques du courant (nature, polarité, intensité, fréquence)
- La conductivité du milieu (selon la nature de l'enrobage)
- La longueur d'arc (le plus court possible)

6) INFLUENCE DE L'INTENSITE EN SOUDAGE A L'ARC AVEC ELECTRODE ENROBEE

En règle générale, si vous avez une **intensité élevée**, l'**amorçage** sera **facilité**, mais la **vitesse de fusion** de l'électrode est trop **rapide** et les **projections** sont plus **abondantes**.

En revanche, si vous avez une **intensité faible**, l'**amorçage** sera **difficile**. Il y'a un **risque de collage** de l'électrode à la pièce pendant le soudage. Il y'a un risque de défaut de collage (métal d'apport qui ne pénètre pas le métal de base) et un **manque de pénétration**.

Le réglage de l'intensité dépend du diamètre de l'électrode, et du type de cordon à réaliser.

- En soudage à plat : **$I=50x(\text{Diamètre électrode} - 1)$**
- En soudage en angle intérieur (Il faut 20% de plus qu'en soudage à plat, donc): **$I=60x(\text{Diamètre électrode} - 1)$**
- En soudage en angle extérieur (Il faut 20% de moins qu'en soudage à plat, donc): **$I=40x(\text{Diamètre électrode} - 1)$**

Ces réglages sont des valeurs approchées qui doivent être **ajustées en fonction des soudeurs**.

7) NATURE DU COURANT DE SOUDAGE ET POLARITE EN SOUDAGE A L'ARC

7-1) Le courant continu (ou redressé)

Ce courant produit un arc de grande stabilité. Il permet aussi de choisir la polarité de l'électrode. Il est recommandé dans la plupart des cas. Aux intensités élevées, il présente l'inconvénient de provoquer une déviation gênante de l'arc par un phénomène que l'on appelle soufflage magnétique.

Ensuite, la polarité a aussi une importance non négligeable. En polarité directe, l'électrode est reliée au pôle négatif (-). Elle est cathode. Le courant va de l'électrode vers la pièce. Le bain de fusion est étroit et profond. Cette polarité favorise la pénétration et c'est la plus utilisée.

En polarité inverse, l'électrode est reliée au pôle positif (+). Elle est anode. Le courant va de la pièce vers l'électrode. Le bain de fusion est large et peu profond. l'électrode est très chaude. On utilise cette polarité pour certains métaux ou pour limiter le taux de dilution.

7-2) Le courant alternatif.

Ce courant est produit par des transformateurs. Il présente l'inconvénient de produire un arc de stabilité moindre. Pour remédier à cela on utilise des électrodes à enrobage ionisant.

8) CHOIX DU COURANT DE SOUDAGE ET DE LA POLARITE EN FONCTION DES MATERIAUX SOUDES.

	Courant alternatif	Courant continu	
		Polarité directe	Polarité inverse
Aciers non alliés	+	++	
Aciers inoxydables	+	++	
Fontes	+	++	
Aluminium et alliages	++		+
Rechargements durs	+		++
Electrodes basiques			++

9) LES SOURCES DE COURANT ! CARACTERISTIQUES DU TRANSFORMATEUR DE SOUDAGE.

L'installation comporte toujours, un générateur de courant, une pince porte électrode et une prise de masse.

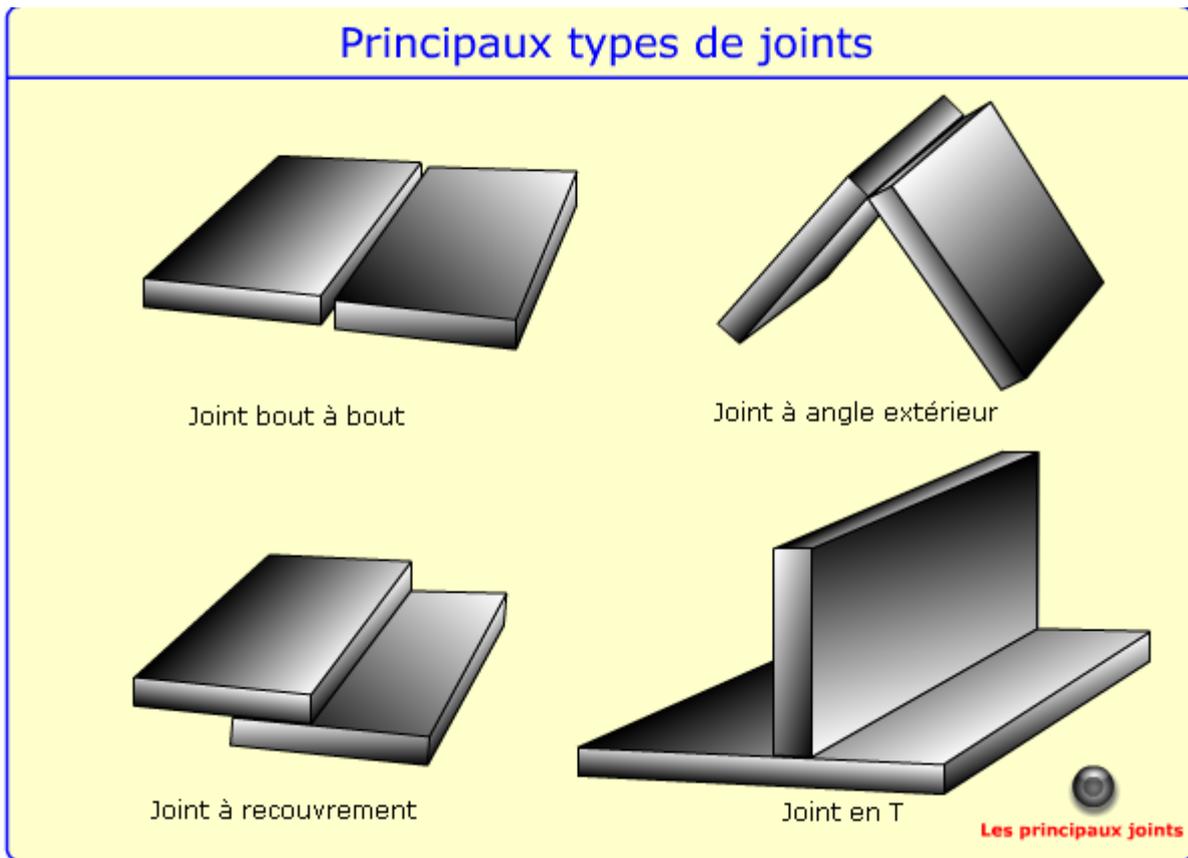
Suivant les techniques de soudage pour lesquelles sont construits les postes, les caractéristiques de la source changeront. Comme le soudage à l'arc avec électrodes enrobées est manuel, on a des variations importantes de la longueur d'arc. La tension varie, donc l'intensité varie. Pour améliorer la stabilité de l'arc, on utilisera des postes à caractéristiques tombantes.

Pour le soudeur, les caractéristiques les plus importantes sont: la **nature du courant** délivrée ; la **tension à vide U_0** ; la **plage de réglage des intensités** ; le **facteur de marche**

10) LES DIFFERENTS TYPES DES JOINTS SOUDES

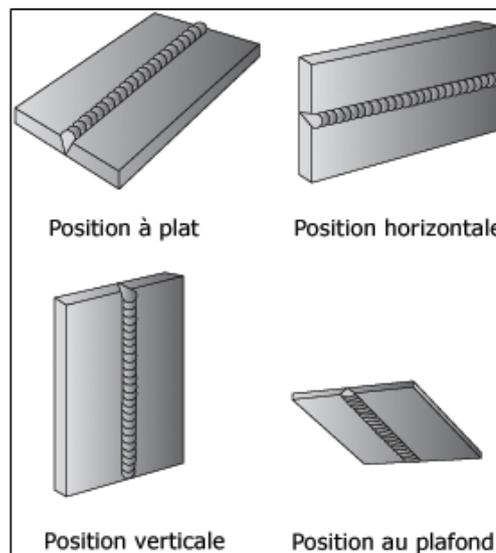
Les principaux types de joints soudés sont les suivants : le joint bout à bout ; le joint à recouvrement; le joint à angle extérieur; le joint à angle intérieur, en "T".

Ces joints sont montrés à la figure ci dessous.



Principaux types de joints.

Ils peuvent être exécutés dans diverses positions : à plat, horizontale, verticale; et au plafond. Ces positions sont représentées à la figure ci dessous.



Principales positions de soudage.

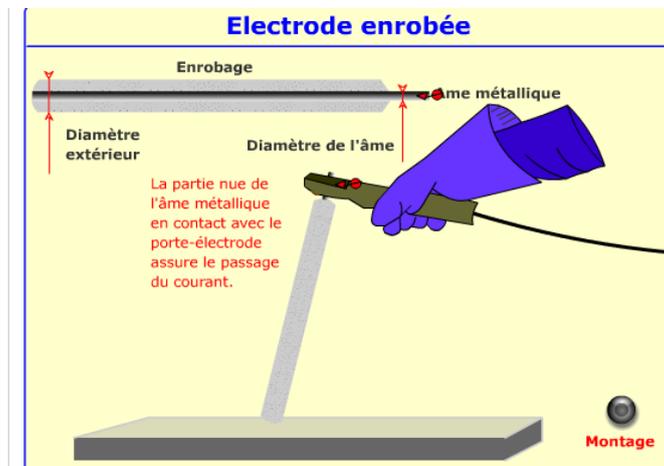
Finalement, pour rafraîchir votre mémoire, voyez, au tableau, un bref rappel des symboles de soudage de base les plus utilisés dans l'industrie.

Symbole	Soudure désirée	Symbole	Soudure désirée

Symboles de soudage.

11) ELECTRODES ENROBEE

L'électrode enrobée est constituée: d'une tige métallique appelée "âme" recouverte d'un enrobage. Ces deux parties, l'enrobage et la tige métallique, jouent plusieurs rôles: assurer la formation de l'arc; l'élaboration et la protection du bain de fusion, tout en donnant au cordon de soudure un bel aspect et des propriétés mécaniques intéressantes.



11.1) Rôles de l'âme métallique

L'âme métallique de l'électrode assure: le passage du courant, et la création de l'arc. Elle sert de métal d'apport qui, en se fondant, apporte les éléments d'alliage nécessaires à l'élaboration du bain de fusion afin de donner au joint soudé les propriétés mécaniques désirées.

11.2) Rôles de l'enrobage

L'enrobage est constitué d'un mélange de différentes substances chimiques qui jouent plusieurs rôles : électrique, métallurgique, mécanique.

❖ Rôle électrique

Les éléments chimiques de l'enrobage facilitent l'amorçage, la stabilité et le maintien de l'arc.

❖ Rôle métallurgique

En fondant, l'enrobage apporte des éléments d'alliage indispensables à la formation d'une soudure saine et de qualité.

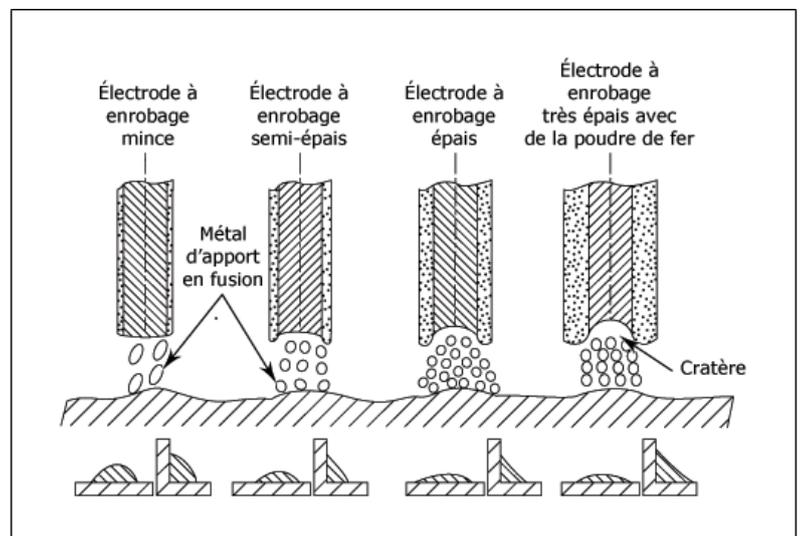
De plus, après sa fusion, l'enrobage forme un liquide plus léger que le métal en fusion ; il surnage, formant ainsi une couche protectrice qui isole le bain de fusion de l'air ambiant, tout en donnant au cordon de soudure un bel aspect. En se solidifiant, le liquide en question forme un dépôt vitreux et dur à la surface du cordon. Ce dépôt, qu'on appelle laitier, doit être enlevé à l'aide d'un marteau à piquer une fois la soudure achevée.

❖ Rôle mécanique

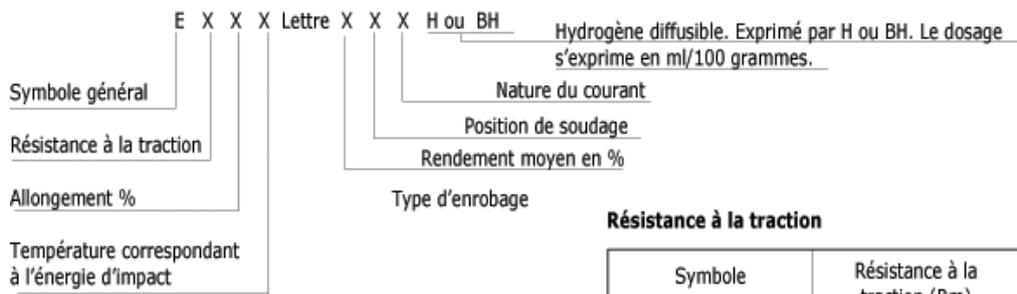
L'épaisseur de l'enrobage influence la forme du cordon de soudure, comme le montre la figure ;

Forme du cordon en fonction de l'épaisseur de l'enrobage.

Dans le cas d'une électrode à enrobage très épais, l'âme métallique fond plus rapidement que l'enrobage, formant ainsi un cratère relativement profond. La formation de ce cratère permet aux soudeurs d'appuyer le bout de l'électrode sur la pièce lors de l'exécution de la soudure et, par conséquent, d'améliorer l'aspect du cordon.



11.3) Classification des électrodes enrobées



Résistance à la traction

Symbole	Résistance à la traction (Rm)	Résistance à la traction (Rm)
43 classe 1	430 à 510 N/mm ²	mini 320 N/mm ²
51 classe 2	510 à 610 N/mm ²	mini 360 N/mm ²

Caractéristiques mécaniques du métal déposé

Symbole	Allongement minimal sur L = 5d		Température correspondant à l'énergie d'impact
	Electrode E43	Electrode E51	
0	Utilisé si aucune indication		
1	20	18	+ 20 °C
2	22	20	0 °C
3	24	22	- 20 °C
4	24	22	- 30 °C
5	24	22	- 40 °C

Type d'enrobage

Température	Enrobage
O	Oxydant
B	Basique
R	Rutile épaisseur Moyenne
RR	Rutile épais
A	Acide
AR	Acide rutile
C	Cellulosique
S	Autres types

Position de soudage

Symbole	Position
1	Toutes positions
2	Toutes positions exceptée la position verticale pour la méthode descendante
3	A plat, en gouttière, en angle à plat
4	A plat, en gouttière
5	Descendante

Une symbolisation abrégée est admise ; elle comprend les 5 premiers symboles.

Exemple :

E 43 3/2 R10
 43 : R = 430 à 510 N/mm²
 3 : A = 24 %
 2 : KCV = 5,875 daJ/cm² minimum à 0°

R : Enrobage rutile
 1 : Toutes positions de soudage
 0 : courant continu, électrode reliée au pôle positif du poste

Courant de soudage

Symbole	Courant continu Polarité recommandée	Courant alternatif Tension à vide nominale (V)
0	+	0
1	non spécifié	50
2	-	50
3	+	50
4	non spécifié	70
5	-	70
6	+	70
7	non spécifié	90
8	-	90
9	+	90

Le symbole 0 est réservé aux électrodes utilisées uniquement en courant continu.

❖ Principaux types d'enrobages

Les enrobages des électrodes utilisées pour souder l'acier doux sont classés selon la nature chimique des substances constituant l'enrobage: enrobage cellulosique, enrobage rutile, enrobage basique, enrobage acide.

Enrobage cellulosique

Les électrodes à enrobage cellulosique produisent, après leur fusion: une soudure dont les propriétés mécaniques sont bonnes, un laitier qui se détache facilement, un cordon d'aspect grossier; une bonne pénétration. Ce type d'électrode est faiblement influencé par l'humidité.

Enrobage rutile

Les électrodes à enrobage rutile offre: une soudure de bel aspect, de bonnes propriétés mécaniques.

Enrobage basique

Les électrodes à enrobage basique produisent, après leur fusion: une soudure dont les propriétés mécaniques sont très bonnes, un laitier qui se détache facilement, un cordon de bel aspect, une pénétration moyenne.

Enrobage acide

L'introduction de poudre de fer dans l'enrobage des électrodes: Augmente la qualité du métal déposé, facilite le détachement du laitier, produit un arc plus stable.

❖ Conservation des électrodes

En raison de la composition chimique de l'enrobage et de sa structure poreuse, les enrobages d'électrodes absorbent plus ou moins l'humidité présente dans l'air ambiant. Cette humidité, sous l'action de la chaleur de l'arc: dégage des gaz causant des porosités dans le cordon de soudure, ce qui affaiblit la résistance mécanique du cordon, provoque la détérioration de l'enrobage.

Pour remédier à ce problème, les électrodes doivent être conservées dans un lieu sec ou dans des fours spécialement conçus pour entreposer les électrodes. Voyez, à la figure, un four à électrodes. Les enrobages sont affectés par l'humidité selon des degrés qui varient d'un type d'enrobage à l'autre, d'où la nécessité de les sécher ou de les entreposer à des températures différentes.





Les électrodes à enrobage cellulosique sont peu affectées par l'humidité et leur enrobage doit être à un degré d'humidité bien déterminé avant son utilisation. Elles ne doivent pas être utilisées quand elles sont très sèches ou trop humides. Dans ce dernier cas, il faut les sécher dans un four à une température n'excédant pas 80°C, parce qu'une température.

Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 3 : Soudure MIG (semi-automatique ou automatique)

Sommaire de la section sur la soudure MIG:

- 1) Définition du procédé de soudure MIG (131)
- 2) Principe du procédé de soudure MIG (135)
- 3) Avantages et inconvénients du procédé de soudure MIG
- 4) Les transferts d'arc
 - - 4-1) Le transfert par court-circuit (short-arc)
 - - 4-2) Le transfert globulaire (grosse-goutte)
 - - 4-3) Le transfert par pulvérisation axiale (spray-arc)
- 5) Installation d'une unité de soudage MAG
- 6) Dévidage du fil d'apport
- 7) Le Gaz de protection en soudage
 - - 7-1) Le CO² (Gaz pur)
 - - 7-2) L'Argon + CO² (Mélange binaire)
 - - 7-3) L'Argon + O² Mélange binaire)
 - - 7-4) Argon + CO²+O² (Mélange ternaire)
- 8) Choix du gaz et influence du gaz sur le cordon
- 9) Choix des diamètres du fil d'apport
- 10) Souder en poussant ou en tirant
 - 10-1) Souder en poussant (torche poussée)
 - 10-2) Souder en tirant (torche tirée)

1) DEFINITION DU PROCEDE DE SOUDURE MIG (131)

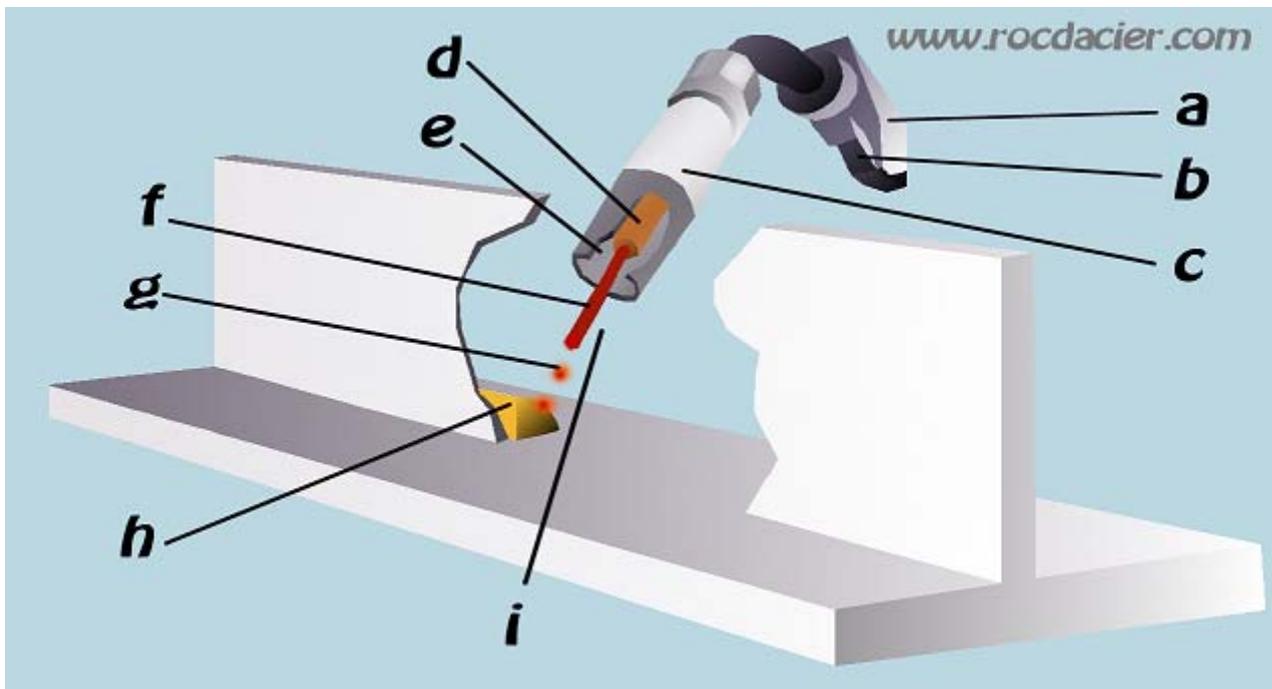
La soudure MIG sous protection de gaz inerte est un **procédé de soudage** très utilisé de nos jours. Pour ce procédé, on crée un **arc électrique entre la pièce à souder et le fil d'apport** (de Ø 0,6 à Ø 2,4 mm). Lorsque l'arc est obtenu, on dévide ce fil d'apport à vitesse constante et continu dans le bain de fusion généré par la puissante énergie de cet arc. On obtient un **cordon de soudure** par mélange du métal d'apport et du métal de base, en fusion pendant l'arc. Il est réalisé sous protection gazeuse (active pour le procédé de **soudure MAG** et inerte pour le procédé de **soudure MIG**). Les paramètres influant sur la réalisation du cordon sont :

- la vitesse de fil (l'intensité)
- le débit en gaz
- le diamètre du fil électrode
- la position de soudage
- la préparation
- la dimension et les matériaux à souder



2) PRINCIPE DU PROCEDE DE SOUDURE MIG (131)

Lorsque le soudeur actionne la gâchette, celui-ci actionne le dévidage du fil, la sortie du gaz et en même temps, il ferme le circuit électrique qui permet le passage du courant. Si le fil est suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il se crée un arc électrique d'une énergie suffisante pour fondre la matière. Le métal d'apport peut ainsi se mélanger à la matière et ainsi grossir la partie fondue. Le tout s'exécute sous protection gazeuse.



3) AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU PROCEDE DE SOUDAGE MAG

- Rentabilité du procédé
- Vitesse très élevée en soudage
- Taux de dépôt de métal élevé

- Longueur possible d'un cordon sans point d'arrêt très important
- Pas de décrassage du laitier
- Plage d'épaisseurs de soudage très importante
- Possibilité de soudage dans toutes les positions
- Contrôle relativement aisé de la pénétration en régime de court-circuit
- Aspect de cordon correct
- Procédé automatisable et utilisé en robotique

4) LES TRANSFERTS D'ARC

4-1) LE TRANSFERT PAR COURT-CIRCUIT (SHORT-ARC) :

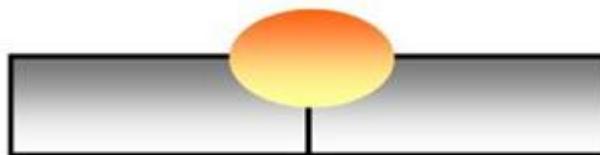
L'intensité et la tension sont basses ($I < 200$ A et U entre 14 et 20 V), la pénétration est bonne.

Le métal se dépose par gouttes dans le bain de fusion par une série de courts-circuits (50 à 200 environ par seconde) entre le fil d'apport et le métal à souder. **Cette méthode de transfert permet une bonne précision dans les passes de pénétration.** L'arc est cependant instable (peu régulier) et les projections de gouttes autour du cordon sont nombreuses. En passe de pénétration, le tube contact doit être sorti de 5 à 10 mm à l'extérieur de la buse. Il est placé au niveau de la buse pour les autres passes.



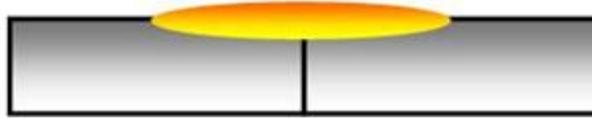
4-2) LE TRANSFERT GLOBULAIRE (GROSSE-GOUTTE)

Il s'agit d'un régime intermédiaire entre le régime par court-circuit et le régime par pulvérisation axiale. Les projections sont difficiles à éviter. **Les intensités et les tensions sont de valeurs moyennes. La pénétration est moins prononcée qu'en court-circuit.**



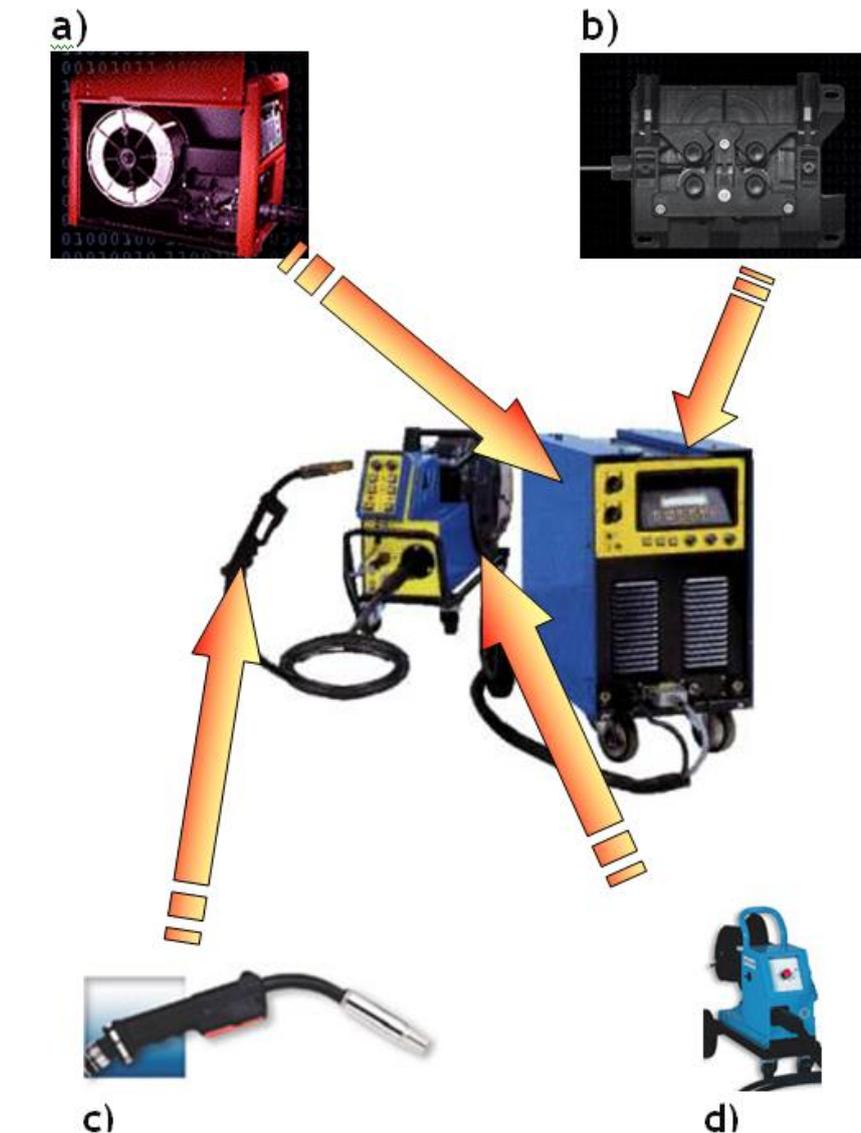
4-3) LE TRANSFERT PAR PULVERISATION AXIALE (SPRAY-ARC)

L'intensité et la tension sont élevées ($I > 200$ A et U entre 20 et 40 V). L'extrémité du fil fond en très fines gouttelettes projetées dans le bain de fusion. **L'arc est long et stable et le taux de dépôt est important. On constate peu de projections sur les bords du cordon.** Le tube contact est en retrait à l'intérieur de la buse.



5) INSTALLATION D'UNE UNITE DE SOUDAGE MIG:

- a) Bobine et système de dévidage
- b) Système de dévidage et les galets lisses ou crantés
- c) La torche
- d) L'unité de réglages



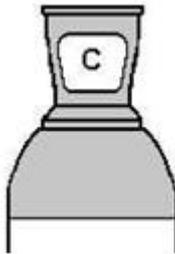
6) DEVIDAGE DU FIL D'APPORT:

En fonction des postes de soudage utilisés, nous pouvons avoir des systèmes de dévidage qui peuvent être : (fil poussé (le plus courant) ; fil tiré ; fil poussé et tiré)

L'entraînement du fil d'apport se fait par rotation de galets en général situés dans le poste à souder, à la sortie de la bobine. Les galets motorisés exercent une pression sur le fil et la rotation permet la circulation du fil dans le conduit de la torche. Une pression trop importante des galets peut écraser le fil.

7) LE GAZ DE PROTECTION EN SOUDAGE:

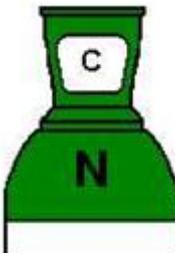
Le CO² (Gaz pur) :



Avantages et inconvénients:

- Bon marché.
- Faible sensibilité à l'oxydation, sauf en surface
 - .- Bonne soudabilité sur les tôles oxydées
 - .- Peu de projections en régime court-circuit.
- Pénétration importante.
- **Aspect de cordon médiocre.**
- **Réglages plus délicats qu'avec d'autres gaz**

L'Argon + CO²(Mélange binaire) :

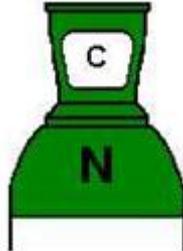


Avantages et inconvénients:

- Réglages assez simples.
- Bon mouillage du cordon.
 - Bain plus chaud.
- Mélange couramment employé.

- Prix de revient plus élevé que d'autres gaz.
- Sensibilité à l'humidité et à l'oxydation

L'Argon + O² Mélange binaire) :



Avantages et inconvénients:

- Amélioration du mouillage (O²)
- Peu de projections.
- Soudage en gouttière et à plat uniquement.

Argon + CO²+O² (Mélange ternaire) :

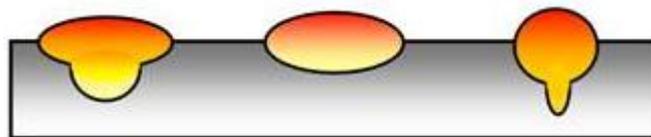


Avantages et inconvénients:

- Gaz polyvalent.
- Prix de revient plus élevé.

9) CHOIX DU GAZ ET INFLUENCE DU GAZ SUR LE CORDON :

Premier cordon : ARGON + O² Deuxième cordon : ARGON + CO² Troisième cordon : CO²



Le choix du gaz de soudage se fera en fonction du régime de soudage choisi. Par exemple :
 - pour un régime en court-circuit, on choisira de préférence **une protection gazeuse de CO² ou Argon + CO². mais on évitera l'Argon pur.**

- pour un régime par transfert globulaire, qui est un régime intermédiaire on pourra utiliser les 3 gaz.

- pour un régime à pulvérisation axiale, on **évitera le CO², en préférant l'Argon pur et le mélange Argon + CO²**

10) CHOIX DES DIAMETRES DU FIL D'APPORT

Le diamètre du fil s'effectue suivant les travaux de soudage à réaliser :

Exemples :

- **Carrosserie** : Ø 0,6 mm (40 à 100 A environ)
- **Tuyauterie de faible épaisseur et tôlerie fine** : Ø 0,8 mm (60 à 180 A environ)
- **Soudage courant et passes de pénétrations** : Ø 1,0 mm (100 à 300 A environ)
- **Soudage d'épaisseurs 6 – 8 mm** : Ø 1,2 mm (150 à 350 A environ)
- **Soudage d'épaisseurs de 10 mm environ**: Pour Ø 1,6 mm (200 à 700 A environ)

11) SOUDER EN POUSSANT OU EN TIRANT

En soudage MIG(ou MAG), on peut **souder** en poussant ou en tirant **la torche de soudage**. Bien que chacune des solutions présentent des avantages et des inconvénients, **souder en poussant** semble la méthode la mieux adaptée à un **soudage correct** si on en a la possibilité.

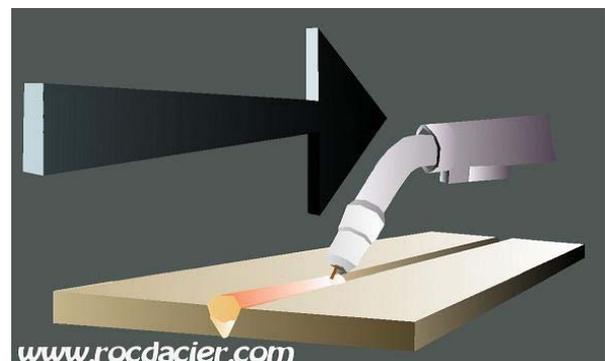
11-1) Souder en poussant (torche poussée) :

La pièce est bien préchauffée par l'arc, ce qui améliore le mouillage. Le bain de fusion est plus visible car il n'est pas caché par la torche. Le cordon est plus large et moins aplati (la pénétration est moins prononcée). En poussant, (angle de 70 à 80° environ), cordon plutôt aplati.



11-2) Souder en tirant (torche tirée) :

Dans cette configuration de soudage, le bain de fusion est très chaud, très liquide et difficile à maintenir. Le cordon sera bombé et la pénétration plus importante. On ne voit pas le bain de fusion facilement, car il est caché par la torche. En tirant, (angle de 70 à 80° environ), cordon plutôt bombé et pénétrant.



Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 4 : Soudure TIG (Soudage Tungsten Inert Gas)

Cette section sur la **soudure TIG**, procédé **141**, appelé aussi **GTAW**.

Voici le sommaire:

- 1) Principe et définition de la soudure TIG (141)
- 2) Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG
- 3) Applications pour le procédé TIG
- 4) Avantages et inconvénients
- 5) Description d'un poste de TIG
- 6) Alimentation électrique dans ce procédé de soudage
- 7) Gaz utilisés en procédé TIG
- 8) Buses utilisées en soudure TIG
- 9) Les électrodes non fusibles
- 10) Affutage des électrodes en tungstène
- 11) Récapitulatif simplifié

1) PRINCIPE ET DEFINITION DE LA SOUDURE TIG (141) :

Lorsque le **soudeur** actionne la gâchette, celui-ci actionne d'une part la sortie du gaz, et en même temps, il ferme le circuit électrique qui permet le passage du courant. Si le fil est suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il se crée un **arc électrique** d'une énergie suffisante pour fondre la matière. Le **soudeur apporte manuellement (ou automatiquement sur certaines installations) le métal d'apport (d'un diamètre d'environ 0,8 mm à 4 mm) pour le mélanger à la matière** et ainsi grossir la partie fondue en créant le **cordon de soudure**. Le tout **s'exécute sous protection gazeuse**. La **soudure TIG** à la particularité d'être exécutée sous protection de gaz inerte avec une électrode non fusible et réfractaire(en tungstène). Ce procédé s'appelle Tungsten Inert Gas (**TIG**) ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) aux USA.



2) PARAMETRES AYANT UNE INFLUENCE SUR LA SOUDURE TIG :

- la **vitesse de soudage** (avance **du soudeur**)
- le choix et le débit du **gaz**
- le choix et le débit du **métal d'apport**
- le choix, l'affutage et le diamètre de l'**électrode réfractaire**
- la **position de soudage**
- la **préparation**
- la dimension et la nature des **matériaux à souder**.

3) APPLICATIONS DE LA SOUDURE TIG :

- la réalisation d'ouvrages alimentaires
- la chaudronnerie d'acier inoxydable
- l'industrie aéronautique et spatiale
- la carrosserie
- plus généralement, les entreprises travaillant des matériaux à bases d'aciers inoxydables et d'alliages légers.

4) AVANTAGES ET INCONVENIENTS EN SOUDAGE TIG:

- **large gamme d'épaisseurs à souder**
- simple d'emploi
- travail précis et esthétique
- peu de fumées
- soudage dans toutes les positions
- procédé automatisable.

5) DESCRIPTION D'UN POSTE DE SOUDURE TIG:



6) ALIMENTATION ELECTRIQUE DANS CE PROCEDE DE SOUDAGE:

En fonction des matériaux, des dimensions et des épaisseurs à **souder**, on pourra **souder en courant continu à polarité directe**, **souder en courant pulsé**, ou encore **souder en courant alternatif** :

- le courant continu à polarité directe (pôle négatif à l'électrode) s'exécute pour le **soudage de tous les métaux**, y compris de l'aluminium (avec certaines précautions à prendre)
- le courant pulsé, qui consiste à développer des périodes de hautes et de basses intensités, pour réduire le volume de métal fondu. Ceci facilite le travail en position et le **soudage des faibles épaisseurs** avec une meilleure régularité, surtout au niveau des pénétrations.
- le courant alternatif est principalement utilisé pour le **soudage des alliages d'aluminium**. L'alternance de polarité craque ainsi la couche d'alumine réfractaire pour permettre ensuite la pénétration.

7) GAZ UTILISES EN PROCEDE TIG:

- l'argon pur est le plus couramment utilisé en **soudage TIG**.
- l'hélium utilisé en complément à l'argon, l'arc développe une énergie plus importante et donc des performances accrues du fait de la vitesse plus grande. Le coût du soudage est plus important cependant.
- l'hydrogène utilisé en addition avec l'argon permet lui aussi d'obtenir un arc plus énergétique, donc **une vitesse de soudage améliorée**. En outre, une pénétration plus importante est constatée ainsi qu'un aspect **plus esthétique du cordon de soudure**.
- l'azote peut aussi être utilisé en complément à l'argon et en très petite quantité pour souder des aciers duplex.

8) BUSES UTILISEES EN SOUDURE TIG:

Les buses utilisées seront soit en céramique (rose foncé), en aluminium (rose clair) ou en corindon (blanc) et auront un diamètre qui pourra varier de 6 mm à 20 mm suivant l'intensité de soudage. Le tableau ci-après donne les valeurs d'intensités et de débit de gaz correspondant aux différents diamètres de buses:



9) LES ELECTRODES NON FUSIBLES:

On peut considérer qu'il existe **4 types d'électrodes** non fusibles qui peuvent être utilisées en soudage TIG:

- **Tungstène pur** (extrémité verte) utilisée pour les courants alternatifs (alliages d'aluminium)
- **Tungstène avec oxyde de zirconium** utilisée aussi en courant alternatifs (alliages d'aluminium)
- **Tungstène thorié** (couleur d'extrémité rouge) utilisée pour les aciers de construction et

aciers inoxydables

- **Tungstène cérié** qui sont moins utilisés

Nota :

- L'oxyde de thorium augmente le pouvoir émissif de l'électrode infusible de tungstène. **Il facilite l'amorçage de l'arc et sa stabilité.**

- Lors du soudage, l'électrode de tungstène doit continuellement être protégée par un courant de gaz argon jusqu'à son refroidissement complet afin d'éviter son oxydation et sa détérioration. C'est le **post-gaz**.

- Le diamètre de l'électrode de tungstène doit être adapté à la plage d'intensité appliquée lors du soudage.

10) AFFUTAGE DES ELECTRODES EN TUNGSTENE:

Lors de la **soudure TIG**, l'affûtage des électrodes est un paramètre important puisque la qualité de votre cordon dépendra en partie de cette opération.. En effet, selon que vous soudez en courant continu ou en courant alternatif, la pointe de l'électrode sera affûtée de façon différente. Dans tous les cas **les stries dues au meulage doivent être dans le sens de l'électrode et devront respecter un angle de 30° à 60° avec un méplat** pour éviter les inclusions de tungstène dans le **cordon de soudure**, si vous soudez des aciers. Un affutage à 90° sera réalisé pour souder des alliages légers tels que l'aluminium.

11) RECAPITULATIF SIMPLIFIE:

Pour les aciers et aciers inoxydables :

- en bout à bout: **20 à 25 Ampères** par mm d'épaisseur
- en angle: **30 à 35 Ampères** par mm d'épaisseur

Pour les aluminiums et alliages :

- en bout à bout: **35 à 40 Ampères** par mm d'épaisseur
- en angle: **45 à 50 Ampères** par mm d'épaisseur

Réglages du pré-gaz de 3 secondes et du post-gaz de

- **8 secondes** à 50 A
- **10 secondes** à 100 A
- **15 secondes** à 200 A
- **25 secondes** à 250 A

Pour les aciers et aciers inoxydables :

- courant continu, polarité directe, électrode en tungstène thorié (rouge), affûtage de 30 à 60°.

Pour les aluminiums et alliages légers :

- courant alternatif, électrode en tungstène pur(vert), affûtage de 90°.

Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 5 : Soudure arc submergé

Soudure arc submergé -- Soudure sous flux solide !

LE SOUDAGE AUTOMATIQUE SOUS-FLUX ELECTROCONDUCTEUR SOLIDE (arc submergé)

1) PRINCIPE:

Un **arc électrique** libre, jaillit à l'intérieur du **flux en poudre** déversé en talus autour du fil électrode. Ceci assure la fusion simultanée des pièces à souder avec appui d'un ou plusieurs fils électrodes fournissant le métal d'apport. Le transfert du métal fondu dans l'arc de soudage se fait par **gouttelette enrobée de flux fondu protégé par sa gangue de laitier** (auto détachable), le métal déposé est lisse et brillant. L'excédent du **flux** qui n'a pas été fondu est aspiré.



2) FILS ELECTRODE:

Le procédé ne s'applique qu'au soudage des aciers. Les fils sont choisis en fonction de la nature de l'acier à souder, associé parfois à un **flux** aggloméré permettant l'amélioration de la quantité du métal déposé. Les diamètres les plus couramment utilisés vont de 1 à 6 mm, livrés en bobine de plusieurs centaines de mètre.

3) LE FLUX:

Le **flux** conducteur de courant électrique à chaud participe à la formation du bain de fusion et génère un dépôt important. Le **flux est en général du type basique** ou acide avec parfois des éléments d'addition qui permettent de modifier sensiblement la composition chimique du métal déposé et les caractéristiques mécaniques du joint soudé.

4) DOMAINE D'APPLICATION DU PROCEDE:

Le **soudage automatique sous flux solide** est utilisé par le soudage des aciers. Le soudage se fait à plat ou légèrement incliné (le flux protège l'arc). Le cordon de métal déposé doit avoir une certaine longueur pour être pleinement rentable.

Exemple : (soudage bout à bout de tôle d'acier, poutre en I reconstituées soudées, réservoir sous pression, PRS ...)

5) AVANTAGE DU PROCEDE:

Une **pénétration importante** due à une énergie de soudage très élevée (soudage de 2 tôles bout à bout $e \leq 20\text{mm}$ sans chanfrein, en 2 faces recto-verso). Une **très grande vitesse de soudage** supérieur à 2 m/min. Un dépôt de **cordons de soudure de très bel aspect** ne nécessitant aucun usinage et de très bonnes caractéristiques du joint soudé (physique, mécanique), l'arc invisible, le soudeur travaille sans masque de protection et sans gêner l'entourage. **Le prix de revient du mètre de soudure est bas** au regard de quelques autres procédés de soudure.

6) INCONVENIENTS:

En raison de l'importance du bain de fusion et du risque de fissuration à chaud, il faut respecter certaines règles : le rapport largeur par profondeur du bain ($L/P < 1,5$ ou $P/L > 0,7$). **Le procédé sous flux** ne s'applique pratiquement qu'aux soudures en position horizontale sauf un dispositif particulier, sur des aciers exclusivement. Le coût des équipements est assez élevé, d'où la nécessité des travaux en série pour assurer l'amortissement des matériels (machine de soudage, positionneur).

7) GENERATEUR DE COURANT DE SOUDAGE

Il débite un courant de soudage sous faible tension : $U_e = 50 \text{ à } 75\text{v}$; $U_s = 25 \text{ à } 40\text{v}$
A 1200 Ampère on utilise le courant continu. Le fil électrode est relié au pôle (+). Au-delà de 1200A, le courant alternatif est préféré au courant continu qui engendrerait des champs magnétiques pouvant gêner l'exécution des soudures (soufflages de l'arc).

Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 6 : Soudure par résistance

Le soudage par résistance utilise principalement comme phénomène physique l'échauffement dû à la résistance de passage à un courant déterminé pendant un certain temps. Les paramètres principaux de ce procédé sont la résistance (indirectement la pression), le courant et le temps de passage de ce courant.



Applications : Soudage de connecteurs électriques ; Automobile

1) PRINCIPE:

Définition succincte du **soudage par point** ou **par résistance**: Le **soudage par résistance** est un **soudage autogène** (deux pièces d'un même métal sont soudées sans utilisation d'un métal d'apport.)

Le métal est fondu par le passage d'un courant électrique qui traverse les pièces à assembler au moyen d'électrodes en cuivre.

Au moment où **l'énergie traverse les pièces à souder**, et que le métal est à température d'ignition, une pression de forgeage est exercée avec les électrodes, pour obtenir le "collage" du métal des deux pièces.

Une **soudure par résistance** se décompose en trois phases successives :

- 1) **l'accostage** (phase mécanique),
- 2) **le soudage** (phase électrique/thermique),
- 3) **le forgeage** (phase métallurgique).

Le soudage par résistance est aussi appelé soudage par point.

Il existe 3 types de poste à souder par résistance :

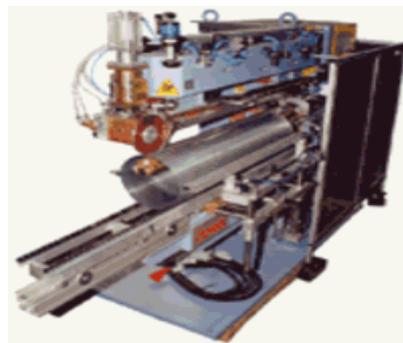
1) Machines à souder par point sur socle



2) Machine à souder par résistance avec pincettes



3) Machine à souder par résistance à la molette.



Nota: Ces photos sont empruntées au site Soudage 2000

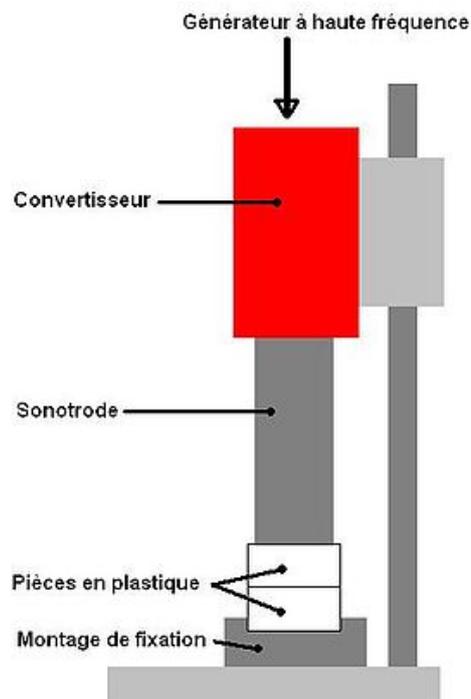
Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 7 : Soudure par ultrason

1) INTRODUCTION

Le soudage par Ultrason est une technique d'assemblage rapide et économique pour les matériaux thermo-fusibles comme le plastique. Ce procédé s'applique facilement aux polymères organiques à point de fusion bas $<200^{\circ}$ (polyéthylène, PA6, PA11, fibres mélangées avec +60% de synthétiques...). Et pour les polymères à point de fusion plus haut $>200^{\circ}$ (Acrylique, PE, fibres thermostables...) l'assemblage des pièces demande plus de paramètres techniques (temps de soudure plus long, Profil et type de sonotrode, puissance et gamme de fréquence d'utilisation).

2) LE PROCEDE



Des vibrations de haute fréquence sont envoyées aux deux pièces par le biais d'un outil vibrant appelé sonotrode ou tête de soudure. La soudure se fait grâce à la chaleur engendrée à l'interface des deux pièces.

L'équipement nécessaire comporte

- ❖ Un dispositif de fixation pour maintenir les pièces à souder

- ❖ Un transducteur électromagnétique ou convertisseur qui va générer les ondes haute fréquence
- ❖ Une sonotrode pour transmettre les ultrasons aux pièces à souder

Les fréquences typiquement utilisées sont 20, 30, 35, 40 et 70 kHz et les amplitudes des vibrations varient entre 10 et 120 micromètres, en fonction du type de matériel et de la forme des pièces à assembler.

PRESSE à SOUDER à ULTRASONS - MP

20 kHz et 35 kHz

Machine de soudage à ultrasons MP

Caractéristiques techniques :

Vérin : Diamètre 80 et 40 mm

Course : 100 mm + butée mécanique

Mesure de la côte : Codeur optique

Vitesse de descente : Réglable à 2 étages

Contrôle de force : Pressostat électronique

Modes de soudure : Temps

Générateur associé : SL/H de 3000 w à 400 w

Secteurs d'applications :

Types d'applications :

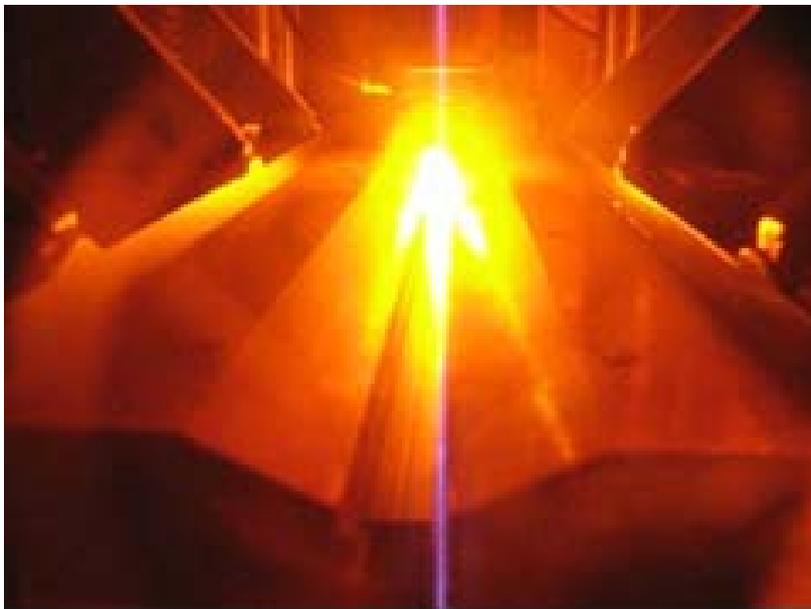
- # MEDICAL
- # TEXTILE
- # AUTOMOBILE
- # PACKAGING
- # Assemblage
- # Pose d'inserts
- # Rivetage
- # Soudure étanche
- # Coupe soudure textile



Section N°1 : Assemblage thermique

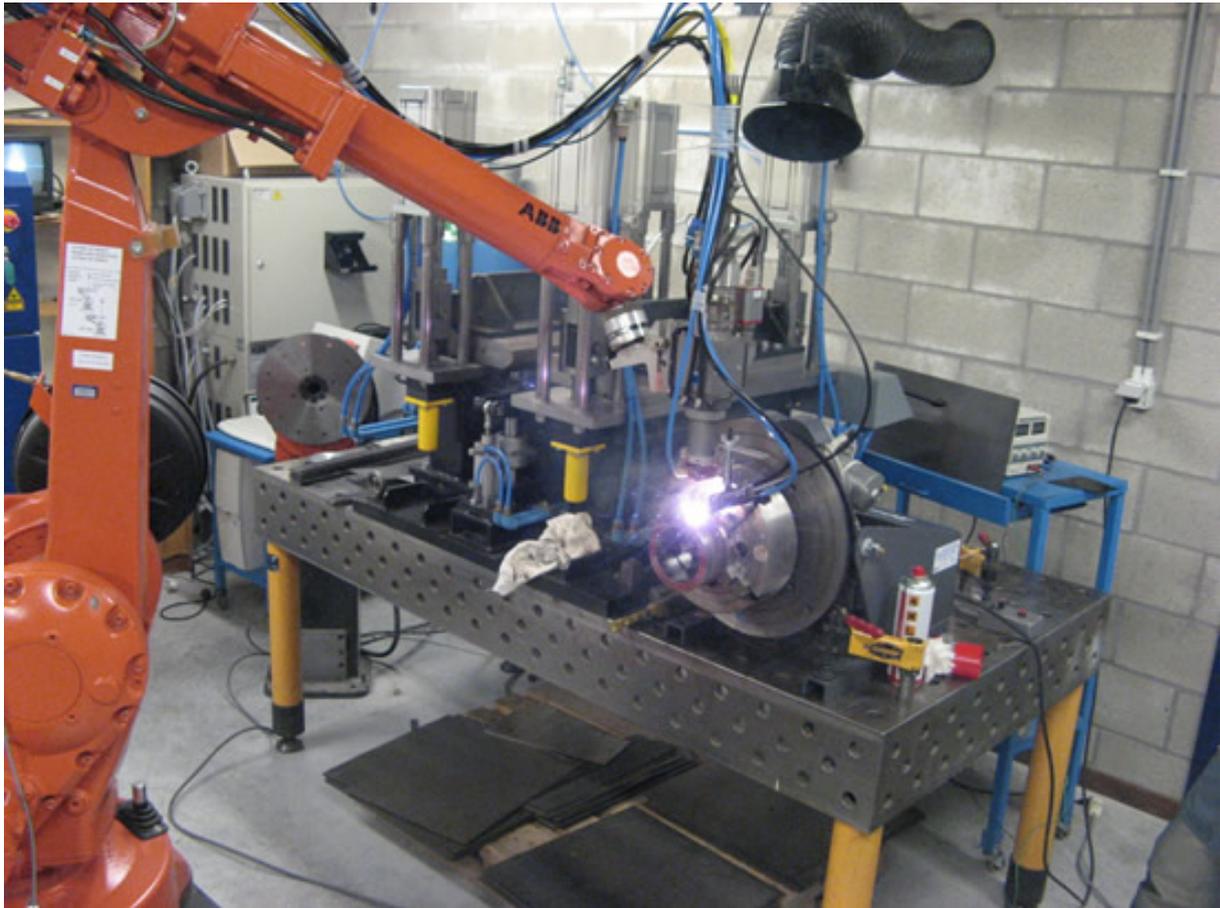
Chapitre 8 : Soudure par laser

Le soudage LASER est un procédé à haute densité d'énergie utilisant une source d'énergie lumineuse. Il s'agit d'une technique d'assemblage extrêmement fine et particulièrement bien adaptée au soudage de petits éléments avec peu de déformations. Applications : industries automobile, sidérurgique, de l'électroménager, pièces à usage médical,...



Laser YAG continu

Le soudage laser continu est utilisé dans des applications où la productivité est d'une importance capitale (automobile, sidérurgie...). Il délivre un faisceau en continu (d'où son nom), et la technologie YAG (fibre optique) permet de l'utiliser en combinaison avec un robot multiaxe....



Laser YAG pulsé

Le laser YAG pulsé est un laser de faible puissance où cette dernière est délivrée par pulsation et de manière extrêmement précise. Il est principalement utilisé pour les applications médicales, spatiales, et pour les pièces de petites dimensions où le contrôle de la pénétration doit être appliqué de manière très précise....

Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 9: Soudure par friction

Technologie de soudage FSW -- le soudage par friction-malaxage

Le Centre des technologies de l'aluminium du CNRC s'intéresse au soudage par friction-malaxage (**Friction Stir Welding – FSW**) afin de l'adapter aux besoins de l'industrie de la transformation de l'aluminium.



Agent technique réalisant une soudure par friction-malaxage.

1) Applications

Cette technologie tout à fait novatrice est particulièrement attrayante pour souder des pièces d'aluminium. Elle permet des réalisations qui étaient jusqu'ici délicates ou même infaisables. Avec ce procédé, il devient possible de souder des alliages sans passer par l'état liquide, ce qui augmente la qualité métallurgique des joints soudés, tout en offrant de multiples avantages.

Le CNRC croit au potentiel de ce procédé puisque de nombreux secteurs industriels s'y intéressent dont celui des transports (routier, ferroviaire, naval et aérien) ainsi que ceux de la construction et des infrastructures.



Outil de soudage par friction-malaxage à l'œuvre.

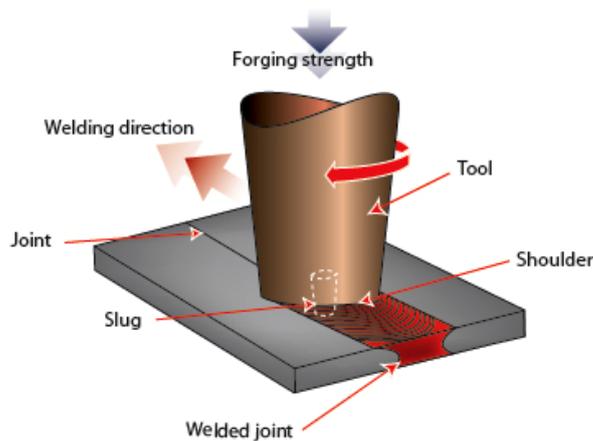
2) Procédé

Dans ce procédé, un pion tournant à grande vitesse pénètre à l'intérieur des deux pièces à souder. La friction de l'outil sur les pièces provoque, par échauffement, un amollissement de la matière qui entre dans une phase pâteuse. Les bordures des pièces à souder se déforment plastiquement et sont mélangées, d'où le nom de friction-malaxage. L'épaulement qui s'appuie avec une force importante sur les bords des plaques empêche le métal brassé de s'écarter de la zone de soudage. Ceci produit un effet de forgeage à l'arrière du matériel qui vient d'être déformé et mélangé.

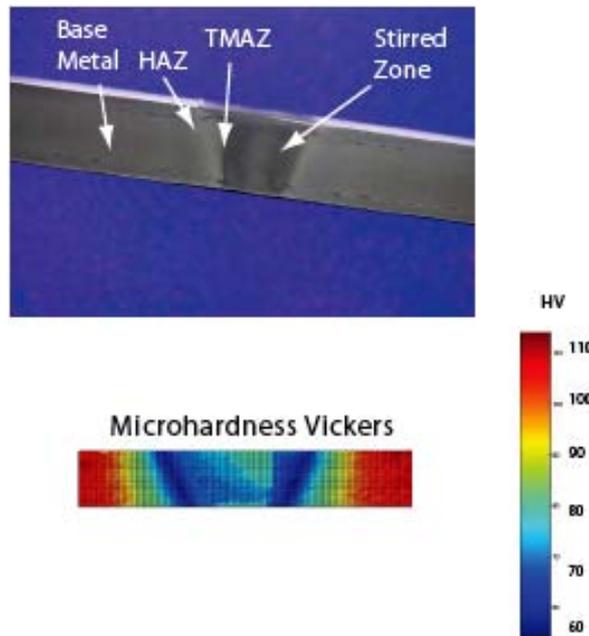


Soudure bout à bout d'aluminium de 8 mm d'épaisseur

Ce soudage à l'état pâteux de la matière est privilégié pour des applications où il est important de conserver les caractéristiques originelles du métal. Puisque l'outil chauffe les matériaux à souder de manière à les amener à un état pâteux, mais non liquide, les propriétés du métal sont moins détériorées que s'il y avait fusion.



Soudage par friction-malaxage d'un joint bout à bout



Profil 2D de micro dureté Vickers mesuré sur un échantillon d'aluminium de 19 mm d'épaisseur soudé par friction-malaxage

3) Avantages

Idéal pour souder des pièces structurales, le soudage par friction-malaxage possède des caractéristiques mécaniques d'assemblage supérieures au soudage traditionnel et permet: **d'assembler des alliages d'aluminium** réputés difficiles à souder ou très sensibles à la fissuration (séries 2xxx, 6xxx, 7xxx, soudage d'alliages d'aluminium de séries différentes ou de matériaux dissimilaires, soudage de composites à matrices métalliques, etc.); de souder de fortes épaisseurs en une seule passe et avec un minimum de distorsion; de fabriquer des structures minces; d'obtenir une microstructure à grains fins dans la zone de soudage; de minimiser les contraintes et déformations thermomécaniques lors du soudage. L'appareil utilisé pour le soudage par friction-malaxage est entièrement automatisé et facile d'utilisation pour ses opérateurs. La préparation de surface est minimale, ce qui est beaucoup plus rapide. Les pièces soudées offrent une bonne résistance mécanique et ne présentent pas de porosité. Le soudage par friction-malaxage est également considéré comme une technologie verte puisque cette méthode n'utilise pas de gaz, ne génère pas de fumée, n'a pas besoin de matériau d'apport et permet de réaliser des économies énergétiques considérables.

	Limite élastique	Limite ultime	Allongement
Matériau de base ¹	276 MPa	310 MPa	12 %
Soudure par friction-malaxage	177 MPa	280 MPa	7 %
Efficacité de joint	64 %	90 %	58 %

Propriétés mécaniques de l'alliage 6061 T6 soudé par friction-malaxage (Référence: Matweb)

4) Équipements et installations

Au cœur des activités de R-D, l'appareil de soudage par friction-malaxage « ISTIR PDS », de la compagnie MTS, permet de souder différents types de joints : joints bout à bout, joints en T, joints à recouvrement, etc.

Caractéristiques techniques de l'appareil :

- Épaisseur maximale soudable pour l'aluminium : 75 mm en soudant des deux côtés;
- Force de forgeage de 90 kN;
- Déplacement X-Y de 2 m x 1 m;
- Vitesse de rotation maximale de 2 000 rpm;
- Vitesse d'avance maximale de 6 m/min;
- Inclinaison maximale de l'outil : ± 15 degrés.

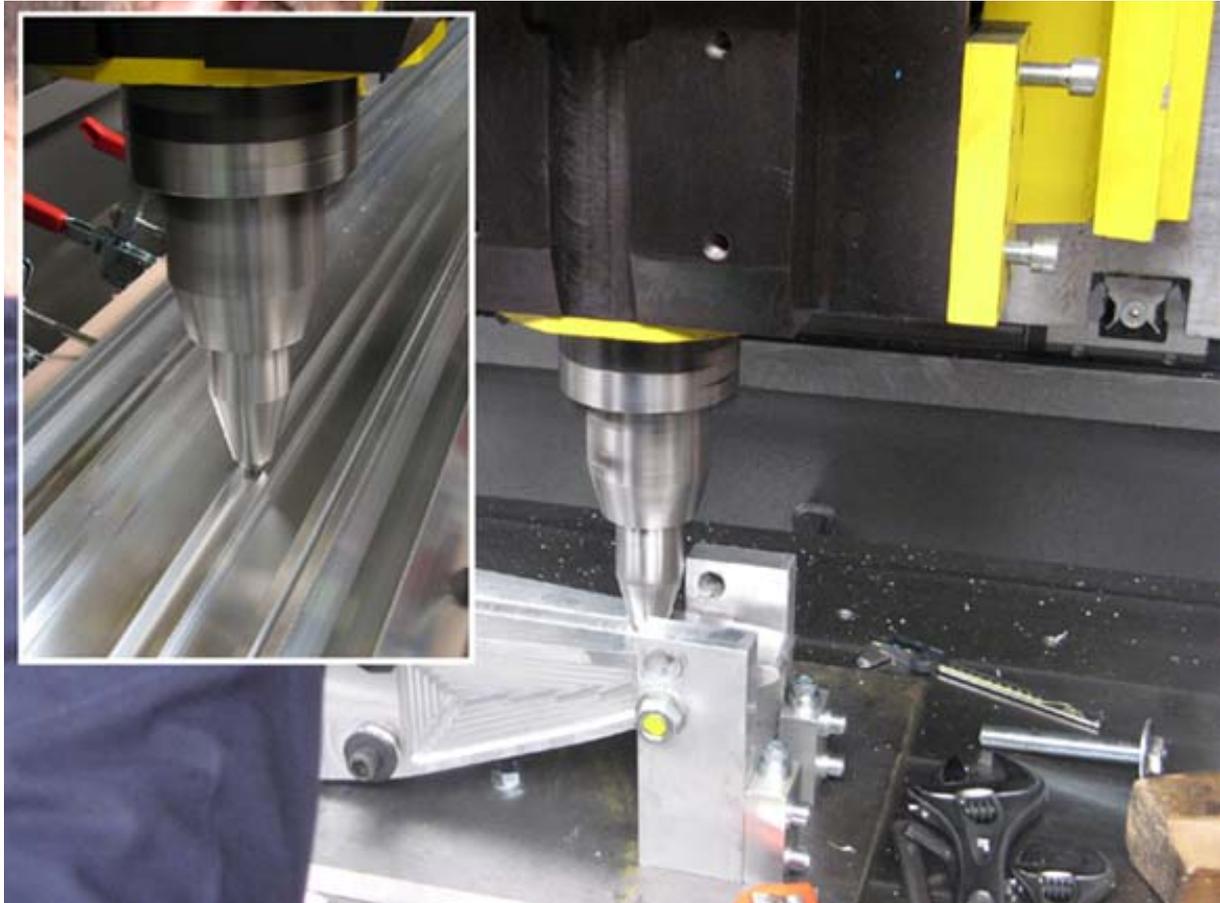
De plus, nos travaux de recherche sont supportés par un ensemble d'équipements d'analyse, de modélisation et de caractérisation de haute performance.



Appareil de soudage par friction-malaxage du CTA-CNRC

5) Soudage par friction stir

Le soudage **Friction Stir (FSW)** est un procédé de soudage à l'état solide. La friction entre un outil de soudage (non consommable) et les pièces à assembler, de même que l'opération de malaxage de cet outil dans la matière permettent de réaliser l'opération de soudage.



Applications :

Principalement sur alliages à bas point de fusion tels que les alliages d'aluminium, de Cuivre,... :

- ❖ **Industries du transport** (routier, ferroviaire, naval, aéronautique,...)
- ❖ **Spatial**
- ❖ **Nucléaire**
- ...

Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 10: Symbolisation

1) Définition :

Dans un but de simplification, il convient d'utiliser pour le dessin technique une représentation symbolique de la soudure. Celle-ci se constitue de huit informations sur le joint soudé. Grâce à quoi on pourra définir la soudure comme indiquée sur la figure ci-dessous.

Symbolisation d'une soudure	
Numéro	Désignation
1	Ligne de repère.
2	Ligne de référence.
3	Symbole de soudure.
4	Hauteur de la soudure.
5	Longueur de la soudure.
6	Procédé de soudage.
7	Indication complémentaire.
8	Ligne d'identification.
Représentation : Inclivée et terminée par une flèche qui touche la soudure	

Pour pouvoir remplir la symbolisation de la soudure, il faut tenir compte de plusieurs paramètres définis au préalable en bureaux d'étude.

2) le type de préparation de bord

Ce tableau nous donne la représentation simplifiée de tous les types de préparation de bords.

Désignation	Représentation simplifiée	Symbole
Soudure sur bords relevés		
Soudure sur bords droits		
Soudure en V		
Soudure en demi V		
Soudure en demi Y		
Soudure en U (ou en tulipe)		
Soudure en demi U		
Soudure en double V (ou en X)		
Soudure en K		
Soudure en ou en X avec méplat		

Soudure en K avec méplat		
Soudure en double U		
Soudure d'angle		

3) le type de soudure

Ce tableau nous donne le type de soudure, si elle est à plat, concave ou convexe .ce symbole est à rajouter sur celui de la soudure.

	Forme de la surface de la soudure	Symbole
Symboles supplémentaires	Plate	
	Convexe	
	Concave	

Une fois additionnée voila ce que peut donner le symbole de la soudure.

Désignation	Représentation simplifiée	Symbole
Soudure en V plate		
Soudure en double V (ou en X) convexe		

<p>Soudure d'angle concave</p>		
--	--	--

Pour les soudures d'angle, il est aussi nécessaire de connaître la profondeur du cordon afin de pouvoir le coter sur le dessin d'ensemble. La profondeur du cordon est appelé (gorge).

	<p>a : gorge</p>
--	------------------

Voila un exemple de cordon coté suivant la règle de l'art.

<p>Cotation conventionnelle</p>	<p>Schéma</p>	
	6	Gorge de 6 mm
		Soudure d'angle
	50	Longueur de la soudure

4) Type de procédé utilisé pour réaliser l'assemblage

	Représentation	Désignation
Procédés	21	Par point
	111	Electrode enrobée
	131	Métal Inerte Gaz
	135	Métal Actif Gaz
	136	Fil Fourré
	141	Tungstène Inerte Gaz
	311	Oxyacétylénique
Cas de Soudure d'angle	a	Gorge
	z	Coté
Symboles	Petit drapeau	Sur chantier
	 300	Longueur de la soudure
	O	Périphérique

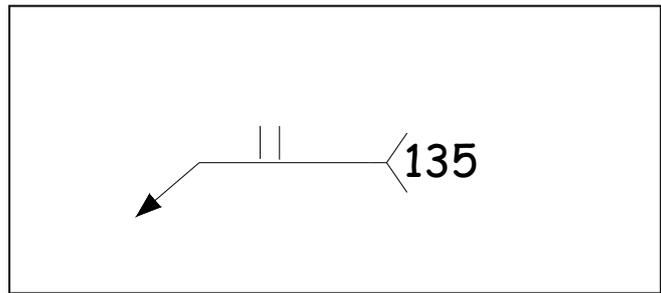
5) Position des symboles sur le dessin

Positions des symboles sur le dessin		NF EN 225553 ISO 2553
	Soudure du côté de la ligne de repère (le symbole élémentaire est sur la ligne de référence)	
	Soudure du côté opposé à la ligne de repère (le symbole est tracé sur la ligne d'identification : trait interrompu)	
	Tôle à préparer	

La flèche doit être dirigée vers la tôle préparer	

6) faire les différents exercices

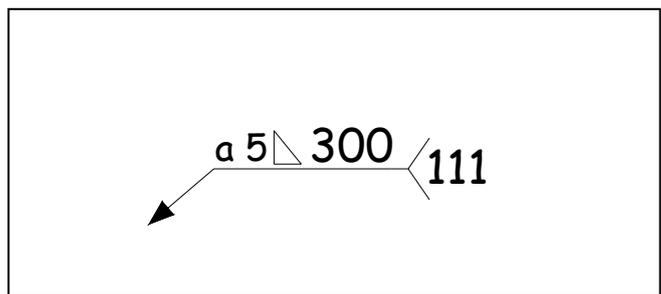
Exercice n 1 :



II : soudure bout à bout

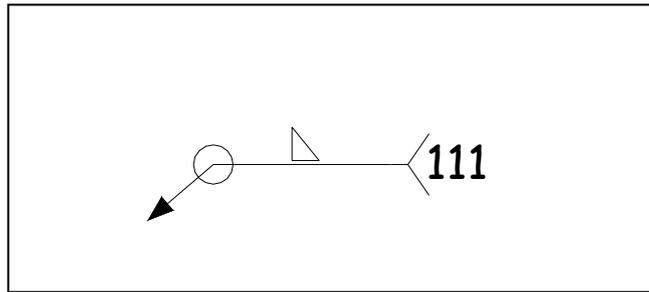
135 :MAG

Exercice n 2 :



a : gorge ; 5 : section de la gorge ; : soudure d'angle
 300 : longueur du cordon : 111 : électrode enrobée

Exercice n 3:

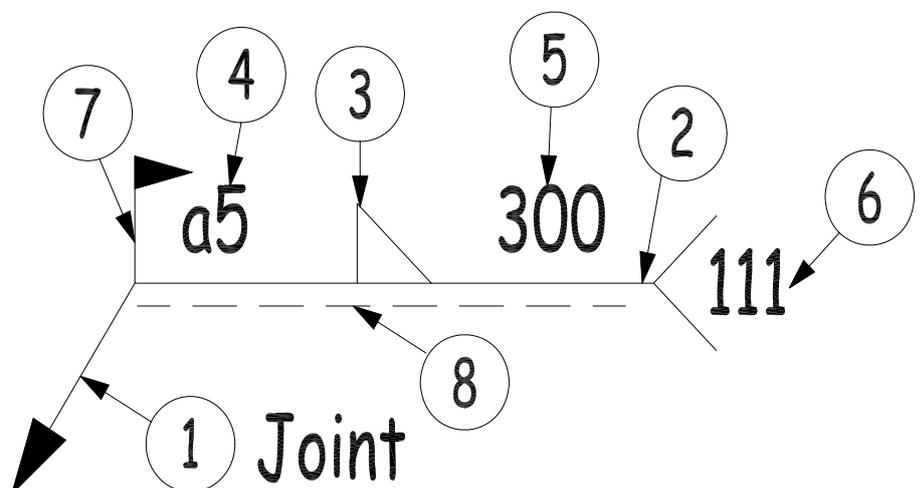


O : Soudage sur la périphérie de la pièce

111 : Soudage à l'arc électrode enrobée.

: Soudage en angle

Exercice n 4 :



Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 11 : Calcul des paramètres de soudage

Calcul de l'intensité de soudage :

L'intensité de soudage est donnée par la formule suivante :

$$I = 50 \times (e-1) \text{ avec } e : \varnothing \text{ de l'électrode}$$

Electrode Ø2.5 :

$$I = 50 \times (2.5-1) \\ = \underline{75A}$$

Electrode Ø3.15:

$$I = 50 \times (3.15-1) \\ = \underline{107.5A}$$

La SAF elle, conseil une intensité de soudage de 85A et de 115A.

Calcul de la tension de soudage :

La tension de soudage est donnée par la formule suivante :

$$U = 20 + (0.04 \times I)$$

Electrode Ø2.5 :

$$U = 20 + (0.04 \times 75) \\ = \underline{23V}$$

Electrode Ø3.15 :

$$U = 20 + (0.04 \times 107.5) \\ = \underline{24.3V}$$

Calcul de l'énergie de soudage :

L'énergie de soudage est donnée par la formule suivante :

$$E = (60 \times U \times I) / (1000 \times V_s) \quad \text{avec } V_s \text{ la vitesse d'avance}$$

Pour un soudage à l'arc avec électrode enrobée $V_s = 20 \text{ cm/min}$

Electrode Ø 2.5 :

$$E = (60 \times 23 \times 75) / (1000 \times 20) \\ = \underline{5.175kJ}$$

Electrode Ø 3.15 :

$$E = (60 \times 24.3 \times 107.5) / (1000 \times 20) \\ = \underline{7.84kJ}$$

Section N°1 : Assemblage thermique

Chapitre 12 : LA PREVENTION DES RISQUES EN SOUDAGE



ACCIDENTS ET PROTECTIONS SUCEPTIBLES LORS DU SOUDAGE

1) les accidents au cours d'une opération de soudage

Conventionnellement, les accidents au cours d'une opération de soudage sont les mêmes pour presque tous les types de procédés de soudure (OA, MIG, TIG, EE). De ce fait, il existe certains risques à ne pas négliger :

- les émanations gazeuses,
- les coups d'arc
- les brûlures
- les blessures par projection,
- les explosions
- et les incendies.

Les émanations gazeuses : La chaleur et les rayonnements de l'arc provoquent un dégagement de gaz et de fumées métalliques plus ou moins nocifs pour l'homme et l'environnement.

- Combustion des enrobages (fluorures, vapeurs nitreuses)
- Volatilisation des métaux d'apports et de base
- Volatilisation des revêtements de protection (zinc, peinture)
- Décomposition des gaz de protection ou des produits de dégraissage (ozone, chlore)

Les brûlures et blessures par projection :

Lors du soudage, des brûlures sont provoquées par la projection de gouttelettes de laitier et

de métal. Après le soudage par les particules de laitier solide et les projections de meulage. Les pièces restent très chaudes encore après soudage. Des brûlures aux yeux peuvent intervenir et s'appellent coup d'arc.

- **Les explosions et incendies** : Ces risques sont liés aux projections, à des appareillages électriques non-conformes ou en mauvais état, à l'échauffement des pièces et à la présence de gaz inflammables.

2) PROTECTIONS – PREVENTIONS

Les émanations gazeuses

- Les postes de travail devront être équipés de systèmes d'aspiration adaptés aux modes de soudage et compatibles avec les techniques de soudages sous protection gazeuse
- Le port d'un masque individuel peut être indispensable selon les conditions de travail
- Une ventilation forcée (air uniquement) est obligatoire pour le soudage à l'intérieur de réservoirs, ainsi que la présence d'une personne pouvant intervenir en cas d'incident

Les brûlures et blessures par projection

- Masque de soudage ou cagoule de soudage
- Vêtement épais, tablier de cuir, gants, guêtres
- Lunettes de protection avec œillères (verres blanches) pour le meulage ou le brossage des pièces

Les explosions et incendies

- Travailler dans un lieu propre (éliminer les papiers, chiffons, ...)
- Mettre en place des panneaux de protection
- Dans les « zones à risques » ne jamais intervenir sans le permis de feu (service sécurité)
- Les réservoirs ayant contenu des produits inflammables doivent être soigneusement purgés et nettoyés
- Il peut être nécessaire de les remplir de gaz neutres (azote,...)
- Assurer une ventilation efficace pour éviter les mélanges explosifs
- Avoir, à proximité des moyens de lutte contre l'incendie adapté aux différents types de feux (extincteurs)

3) CONCLUSION

A condition de mettre en œuvre des moyens adaptés et de respecter certaines règles élémentaires de sécurité, il est possible de se protéger efficacement contre les risques inhérents au soudage à l'arc électrique, soudage à l'arc par gravité avec électrode enrobée, soudage par explosion, soudage oxyacétylénique, etc.

Remarque : Quel que soit le type chantier, il faut toujours s'assurer de la collaboration du service sécurité. En définitif, ces précautions sont valables aux maîtres soudeurs, aux apprentis soudeurs ; bref à toute personne qui pratiquera la soudure.

Section N°2 : Métallurgie du soudage

Chapitre 1 : Rédiger un DMOS

Sommaire:

- 1) Définition du DMOS (Descriptif de Mode opératoire de soudage(1))
- 2) Qui est concerné par le DMOS(1) et est-il obligatoire :
- 3) Quelques DMOS(1) selon le procédé de soudage choisi:
 - 3-1) Procédé de soudage à l'électrode enrobée (EE) (111) Dans ce procédé de soudage, on vérifiera:
 - 3-2) Procédé de soudage semi-automatique ou automatique et fil fourré(MIG MAG)(131, 135 et 136) Dans ce procédé de soudage, on vérifiera:
 - 3-3) Procédé de soudage TIG manuel ou automatique (141) Dans ce procédé de soudage, on vérifiera:
- 4) Rédiger un DMOS(1) :
- 5) Les paramètres et indications du DMOS (1) :
 - 5-1) Valeurs à titre d'information :
 - 5-2) Valeurs et paramètres concernant les matériaux et la préparation :
 - 5-3) Valeurs et paramètres concernant les matériaux et la préparation (suite):
 - 5-4) Informations relatives au joint soudé:
 - 5-5) Informations relatives au gaz, métal d'apport et électrodes:
 - 5-7) Informations particulières au TIG et PLASMA:
 - 5-8) Autres informations:
 - 5-9) Schémas du DMOS (1) :
 - 5-9-1) Dispositions des passes :
 - 5-9-2) Schéma de la préparation avant soudage :
- 6) Conclusion
- 7) Applications
 - 7-1) Proposer le DMOS pour une tôle épaisseur 5 mm en Acier S235, par procédé MAG.
 - 7-2) Proposer le DMOS pour une tôle épaisseur 12 mm en Acier S355, par procédé MAG.

3) QUELQUES DMOS(1) SELON LE PROCÉDE DE SOUDAGE CHOISI:

3-1) Procédé de soudage à l'électrode enrobée (EE) (111)

Dans ce procédé de soudage, on vérifiera:

- Intensité de soudage (en ampères),
- la tension de soudage (en Volts),
- la vitesse d'avance du soudeur (en cm/min),
- la nuance du métal d'apport et son diamètre,
- la nature du courant (continu ou alternatif)
- et sa polarité.



3-2) Procédé de soudage semi-automatique ou automatique et fil fourré (MIG MAG)(131, 135 et 136)

Dans ce procédé de soudage, on vérifiera:

- Intensité de soudage (en ampères),
- la tension de soudage (en Volts),
- la vitesse d'avance du soudeur (en cm/min),
- la nuance du métal d'apport et son diamètre,
- la nature du courant (continu ou alternatif)
- sa polarité,
- la vitesse de dévidage du fil,
- la nature et le débit du gaz.



3-3) Procédé de soudage TIG manuel ou automatique (141)

Dans ce procédé de soudage, on vérifiera:

- Intensité de soudage (en ampères),
- la tension de soudage (en Volts),
- la vitesse d'avance du soudeur (en cm/min),
- la nuance du métal d'apport et son diamètre,
- la nature du courant (continu ou alternatif)
- sa polarité
- la vitesse de dévidage du fil,
- la nature et le débit du gaz,
- le type d'électrode non fusible



4) REDIGER UN DMOS(1) :

La rédaction du **DMOS(1)** est guidée par la norme **NF EN 288-2** de 1997 et par l'amendement A1 de 1997. Il est possible de rédiger un **DMOS(1)** après avoir réalisé des essais de soudage dans les mêmes conditions que celles des futures soudures envisagées. Il est aussi possible de reprendre une ancienne qualification de mode opératoire de soudage déjà obtenue et de l'adapter.

5) LES PARAMETRES ET INDICATIONS DU DMOS (1) :

5-1) Valeurs à titre d'information :

- **Lieu** : Il s'agit du centre où est réalisé la qualification du mode opératoire de soudage.
- **Référence** : C'est un numéro de référence fourni par l'entreprise.
- **Numéro de QMOS(2)**
- **Constructeur/Fabricant** : Entreprise cliente de la QMOS(2)
- **Nom du soudeur**.

- **Examineur ou organisme d'inspection** : Personne qui validera la QMOS(2) (APAVE, VERITAS, SOCOTEC...)

5-2) Valeurs et paramètres concernant les matériaux et la préparation :

- **Mode de préparation du joint soudé et de nettoyage du joint soudé** :

Pour la préparation, on utilisera le meulage, le chanfreinage (avec chanfreineuse portative par exemple), le cisailage, l'usinage, le fraisage les procédés de découpe thermique (plasma, oxycoupage, laser) ou non-thermique (jet d'eau, poinçonnage grignotage)

- **Mode de nettoyage du joint soudé** :

On peut utiliser le meulage, le brossage, le ponçage, le sablage, le grenailage, le dégraissage ou le décapage chimique.

- **Spécifications du matériau de base** (exemples courants) :

W01 : Aciers non alliés à basse teneur en carbone, aciers faiblement alliés et aciers à grains fins de limite à l'élasticité Re inférieure ou égale à 355 N/mm^2 (3)

W02 : Aciers résistant au fluage au Chrome et Molybdène (Cr/Mo) et Chrome, Molybdène et Vanadium (Cr/Mo/V) (3)

W03 : Aciers de construction à grains fins, normalisés, trempés et revenus et aciers à traitements thermomécaniques, de limite d'élasticité $Re > 355 \text{ N/mm}^2$ ainsi que les aciers aux conditions de soudage similaires contenant 2 à 5 % de Nickel. (3)

W04 : Aciers ferritiques ou martensitiques contenant 12 à 20 % de Chrome. (3)

W11 : Aciers inoxydables austéno-ferritiques et aciers inoxydables austénitiques (Cr/Ni)(3)

Définitions selon la norme EN 287-1-A1(3)

5-3) Valeurs et paramètres concernant les matériaux et la préparation :

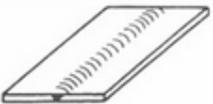
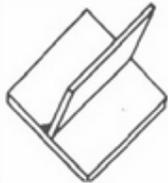
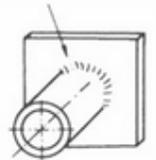
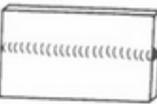
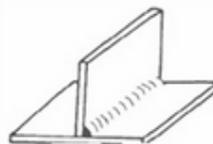
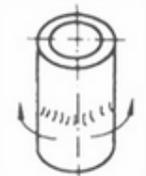
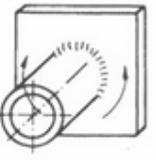
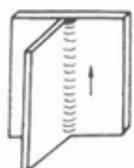
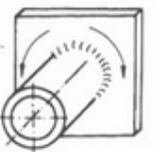
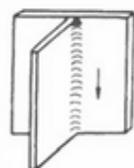
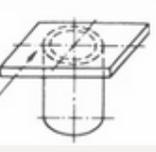
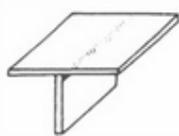
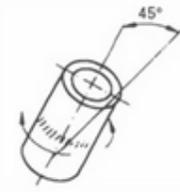
- **Epaisseur du matériau de base** : épaisseur en mm du matériau à souder.

- **Diamètre du matériau de base** : pour une pièce circulaire, rond ou tube , on indique le diamètre en mm à souder.

5-4) Informations relatives au joint soudé:

- **Procédé de soudage** : Numéro du procédé de soudage utilisé (ex : 135, 111, 141...)

- **Position de soudage de l'assemblage** :

a) Soudures bout à bout (tôles)	b) Soudures d'angles (tôles) :	c) Soudures bout à bout (tubes)	d) Soudures en angle (tôles)
 PA Plat	 PA Gouttière	 PA (tube en rotation, axe horizontal, soudage à plat)	 PB (tube en rotation, axe horizontal, soudage à plat)
 PC Corniche	 PB Angle à plat	 PC (tube fixe, axe vertical, soudage en corniche)	 PF (tube fixe, axe horizontal, soudage vertical montant)
 PF Verticale en montant	 PF Verticale en montant	 PF (tube fixe, axe horizontal, soudage vertical montant)	 PG (tube fixe, axe horizontal, soudage vertical descendant)
 PG Verticale en descendant	 PG Verticale en descendant	 PG (tube fixe, axe horizontal, soudage vertical descendant)	 PD (tube fixe, axe vertical, soudage angle au plafond)
 PE Plafond	 PD angle au Plafond	 H-L045 (tube fixe, axe incliné, soudage vertical montant)	 PB (tube fixe, axe vertical, soudage angle à plat)
		 J-L045 (tube fixe, axe incliné, soudage vertical montant)	PA (tube en rotation, axe incliné, soudage angle plat)

- **Type du joint soudé** : - Il s'agit d'une suite de symbolisations qui déterminent avec précision, le type de joint réalisé.
Les variables suivantes seront utilisées:

Codifications pour le type d'assemblage de soudage :

- **P** : Essai de soudage sur tôle(Plate)
- **T** : Essai de soudage sur tube(Pipe)
- **BW** : Essai de soudage bout à bout (Butt Weld)
- **FW** : Essai de soudage en angle (Fillet Weld)
- **P-BW** : Essai de soudage sur tôle en bout à bout
- **T-BW** : Essai de soudage sur tube en bout à bout
- **P-FW** : Essai de soudage sur tôle en angle
- **T-FW** : Essai de soudage sur tube en angle

Codifications pour le mode d'assemblage:

- **ss** : Essai de soudage d'un seul coté (single side welding)
- **bs** : Essai de soudage de deux cotés (both sides)
- **ng** : Sans gougeage par meulage (no back gouging/ no back grinding)
- **gg** : Avec gougeage par meulage (back gouging/ back grinding)
- **nb** : Essai de soudage sans support envers (welding with no backing)
- **mb** : Essai de soudage avec support envers (welding with material backing)

- **Détail de gougeage ou support envers** :A indiquer si existant.

5-5) Informations relatives au gaz, métal d'apport et électrodes:

- **Métal d'apport** : Suivant codification, indiquer le métal d'apport utilisé
- **Marque et type du métal d'apport**
- **Reprise spéciale ou séchage** : selon besoin, à indiquer
- **Gaz de protection ou flux** : Par exemple Ar+CO² (envers et/ou endroit)

- **Débit de gaz de protection:** Indiquer en litres/min les débits pour la soudure envers et/ou endroit
- **Dimension et type d'électrode non fusible (TIG) - Angle de la torche**

5-6) Informations relatives au préchauffage, traitement thermique:

- **Température de préchauffage :** A indiquer si nécessaire
- **Traitement thermique après soudage :** A indiquer si nécessaire
- **Temps, température et méthode :** selon besoin, à indiquer
- **Vitesse de montée en température et de refroidissement :** selon besoin
- **Température entre passes :** selon besoin

5-7) Informations particulières au TIG et PLASMA:

- **Fréquence, temporisation - Détail du soudage pulsé - Distance de maintien :** hauteur de l'arc
- **Détails du plasma :** réglages supplémentaires dans le cas du soudage plasma

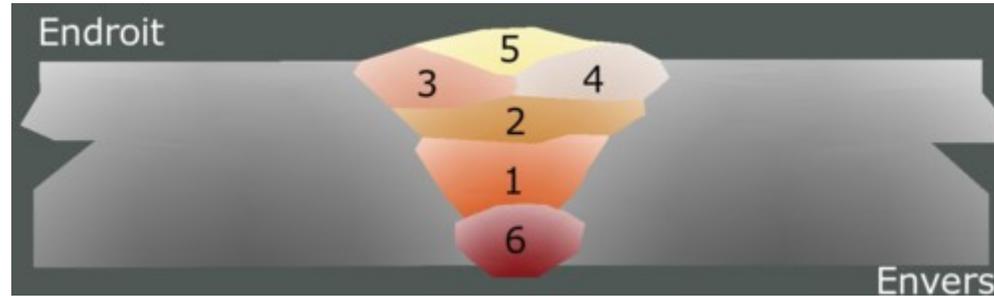
5-8) Autres informations:

- **Par exemple,** informations sur un éventuel balayage pendant le soudage. Ou des informations concernant d'éventuels contrôles de soudures.

5-9) Schémas du DMOS (1) :

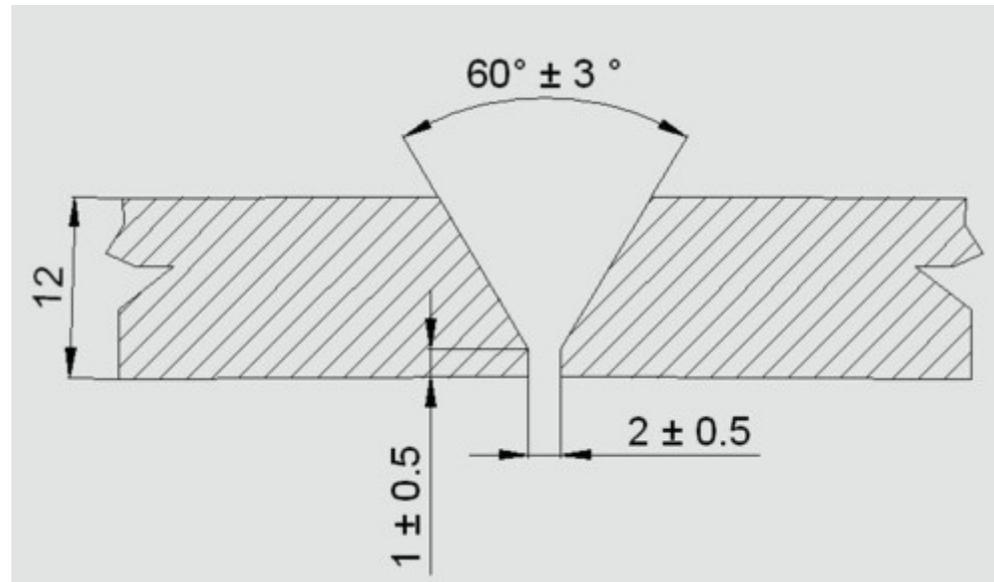
5-9-1) Dispositions des passes :

Ce schéma représentera facilement le nombre de passes, le numéro de la passe, l'empilement, éventuellement la dimension de la pièce soudée et la gorge de la soudure :



5-9-2) Schéma de la préparation avant soudage :

Ce schéma représentera la préparation avant soudure. On notera les dimensions importantes tolérances. Il peut s'agir des épaisseurs des éléments à souder, jeu de soudage, talon, angle du chanfrein.



6) CONCLUSION

Pour conclure, la rédaction des DMOS ou Descriptifs de modes opératoires de soudages sont des documents très prisés par les entreprises de chaudronnerie, tuyauterie, et nucléaire.

Elle nécessite des connaissances et une importante expérience du soudage et de ses procédés. Les techniciens ayant ces connaissances sont de ce fait très prisés par les entreprises.

Des écoles spécialisées comme l'Institut de soudure permet d'acquérir ces connaissances.

7) APPLICATIONS

7-1) Proposer le DMOS pour une tôle épaisseur 5 mm en Acier S235, par procédé MAG.

Le Gaz sera Argon + CO².

Le fil d'apport sera de diamètre 1.2 mm.

Tension de soudage de 17.5 V.

Intensité de soudage de 120 A.

7-2) Proposer le DMOS pour une tôle épaisseur 12 mm en Acier S355, par procédé MAG.

Le Gaz sera Argon + CO².

Le fil d'apport sera de diamètre 1.2 mm.

Tension de soudage de 19V.

Intensité de soudage de 150 A.

Section N°2 : Métallurgie du soudage

Chapitre 2 : QMOS - Analyse de la norme EN15614

Les écrits sont quelque peu modifiés ne présentent aucune valeur normative. Pour obtenir les normes vous pouvez les acheter sur le site de l'AFNOR: Cette norme remplace la NF EN 288-3. Dans ce cours sont repris les points les plus importants.
En voici le sommaire tel qu'il est dans la norme:

Sommaire de la Norme NF EN ISO 15614-1 :2005

Avant-propos

Introduction

1 Domaine d'application

2 Références normatives

3 Termes et définitions

4 Descriptif de mode opératoire de soudage préliminaire (DMOS-P)

5 Épreuve de qualif du mode opératoire de soudage

6 Assemblage de qualification

---6.1 Généralités

---6.2 Forme et dimensions des assemblages de qualif.

---6.3 Soudage des assemblages de qualification

7 Contrôles, examens et essais

---7.1 Étendue des contrôles, examens et essais

---7.2 Positionnement et prélèvement des éprouvettes

---7.3 Essais non destructifs

---7.4 Essais destructifs

---7.5 Niveaux d'acceptation

---7.6 Contre-essais

8 Domaine de validité

- 8.1 Généralités
 - 8.2 Par rapport au fabricant
 - 8.3 Par rapport au matériau de base
 - 8.4 Commun à tous les modes opératoires de soudage
 - 8.5 Spécifique aux procédés
- 9 Procès-verbal de Qualification du Mode Opérateur de Soudage (PV-QMOS)**

1) QU'EST-CE QUE LA NORME NF EN ISO 15614-1:2005 ?

La norme **NF EN 15614-1:2005** remplace la norme **NF EN 288-3** de juin 1992 et son amendement 1 d'août 1997. La norme **NF EN 15614-1:2005** définit les conditions d'exécution des **épreuves de qualification de mode opératoire de soudage** et le domaine de validité du mode opératoire de soudage, pour toutes les opérations pratiques de soudage dans les procédés 111, 135, 136, etc. Les contrôles, examens et essais doivent être réalisés conformément à cette norme. Des contrôles, examens et essais complémentaires peuvent être exigés par d'autres normes d'application.

2) QUALIFICATION DU SOUDEUR : [5]

La réalisation et les essais des assemblages de qualification doivent être en conformes avec les articles 6 et 7 de cette norme. Le soudeur ou l'opérateur soudeur qui a réalisé l'assemblage conduisant à la qualification du mode opératoire de soudage en conformité avec la présente norme est **qualifié pour le domaine de validité approprié** selon EN ISO 9606-1 ou l'EN ISO 9606-4 ou l'EN 1418, dans la mesure où les exigences d'essais correspondantes sont satisfaites.

3) DIMENSIONS ET FORMES DES ASSEMBLAGES DE QUALIFICATION : [6-2]

Pour tous les assemblages de qualification à l'exception des piquages (Figure 4) et des soudures d'angle (Figure 3), l'épaisseur du matériau, **t**, doit être la même à la fois pour les tôles/tubes à souder.

3-1) Assemblage bout à bout de tôles à pleine pénétration [6-2-1]

L'assemblage de qualification doit être conforme à ceci :

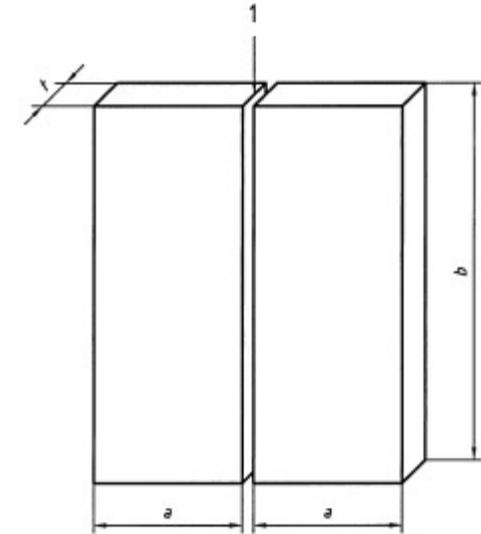
Légende :

1 Préparation et accostage des bords suivant le Descriptif du Mode Opérateur de Soudage Préliminaire (DMOS-P)

a Valeur minimale 150 mm

b Valeur minimale 350 mm

t Épaisseur du matériau



3-2) Assemblage bout à bout de tubes à pleine pénétration [6-2-2]

L'assemblage de qualification doit être conforme à ceci :

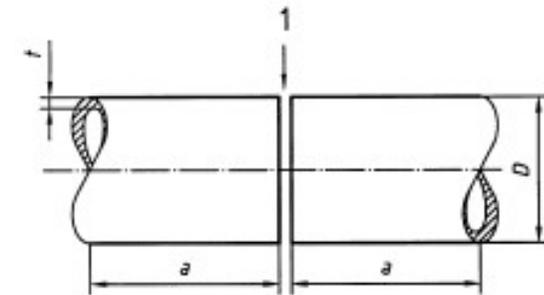
Légende

1 Préparation et accostage des bords suivant le Descriptif du Mode Opérateur de Soudage Préliminaire (DMOS-P)

a Valeur minimale 150 mm

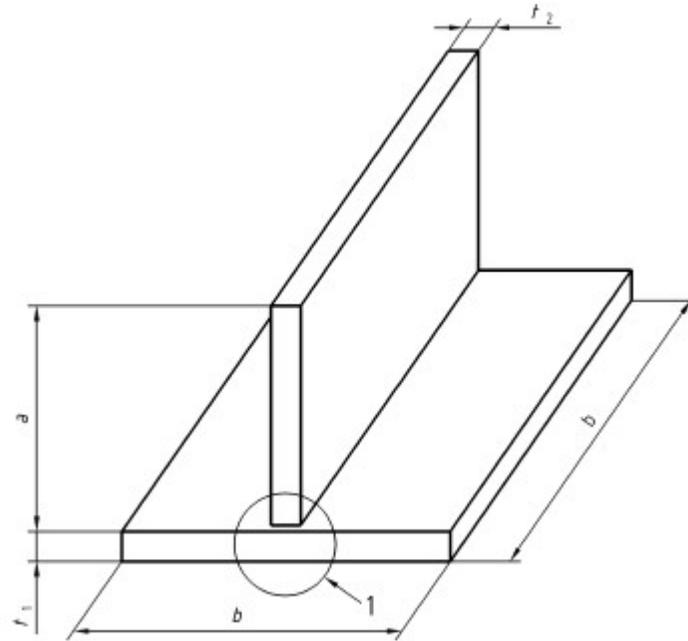
D Diamètre extérieur du tube

t Épaisseur du matériau



3-3) Assemblage en T [6-2-3]

L'assemblage de qualification doit être préparé conformément à ceci et peut être utilisé pour les soudures bout à bout à pleine pénétration ou pour les soudures d'angle.



Légende

1 Préparation et accostage des bords sui-vant le Descriptif du Mode Opératoire de Soudage Prélimi-naire (DMOS-P)

a Valeur minimale 150 mm

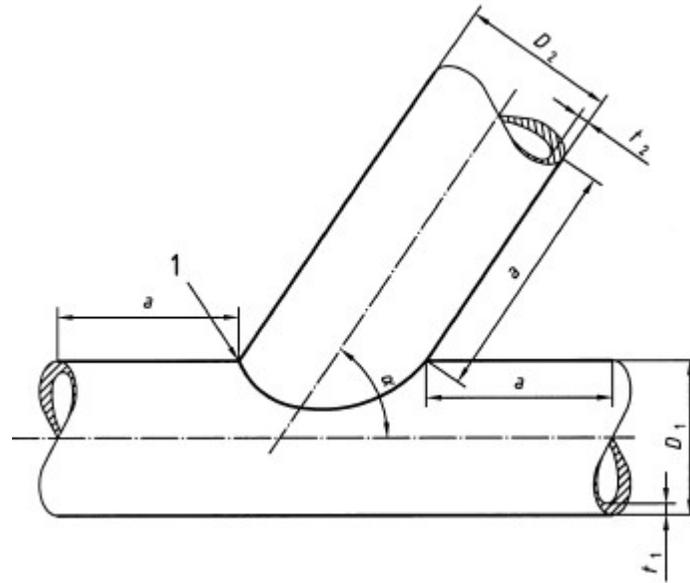
b Valeur minimale 350 mm

t Épaisseur du matériau

3-4) Assemblage pour un piquage [6-2-4]

L'assemblage de qualification doit être conforme à ceci. L'angle α est le minimum à utiliser en fabrication.

Il peut être utilisé pour les assemblages à pleine pénétration (assemblage posé, pénétrant ou traversant) et pour les soudures d'angle.



Légende

1 Préparation et accostage des bords suivant le (DMOS-P)

α Angle de piquage

a Valeur minimale 150 mm

D1 Diamètre extérieur du tube principal

t1 Épaisseur de paroi du tube principal

D2 Diamètre extérieur du piquage

t2 Épaisseur de paroi du piquage

4) CONTROLES, EXAMENS ET ESSAIS : [7]

4-1) Les essais comportent à la fois des essais non destructifs (END) et des essais destructifs qui doivent être en conformité avec les exigences du Tableau ci-après :

Une norme d'application peut spécifier des essais complémentaires, par exemple :

- un essai de traction longitudinal prélevé dans le métal déposé ;
- un essai de pliage dans le métal fondu hors dilution ;
- des essais de corrosion ;
- une analyse chimique ;
- un examen micrographique ;
- une détermination de la teneur en ferrite delta ;
- un essai en croix.

Assemblage de qualification	Type d'essais	Étendue des essais	Note
Assemblage bout à bout à pleine pénétration (Figure 1 et Figure 2)	Contrôle visuel	100 %	—
	Contrôle par radiographie ou ultrasons	100 %	a)
	Contrôle de surface	100 %	b)
	Essai de traction transversale	2 éprouvettes	—
	Essai de pliage transversal	4 éprouvettes	c)
	Essai de flexion par choc	2 jeux d'éprouvettes	d)
	Essai de dureté		d)

	Examen macroscopique	Exigé 1 coupe	e)
Assemblage en T à pleine pénétration (Figure 3) Piquage à pleine pénétration (Figure 4)	Contrôle visuel	100 %	f)
	Contrôle de surface	100 %	b) et f)
	Contrôle par radiographie ou ultrasons	100 %	a), f) et g)
	Essai de dureté	Exigé	e) et f) f)
	Examen macroscopique	2 coupes	
Soudures d'angle (Figure 3 et Figure 4)	Contrôle visuel	100 %	f)
	Contrôle de surface	100 %	b) et f)
	Essai de dureté	Exigé	e) et f) f)
	Examen macroscopique	2 coupes	

- a) Le contrôle par ultrasons ne doit pas être utilisé pour $t < 8$ mm et pour les groupes de matériaux 8, 10, 41 à 48.
 b) Contrôle par ressuage ou par magnétoscopie. Contrôle par ressuage pour les matériaux non magnétiques.
 c) Pour les essais de pliage, voir 7.4.3.

d) Un jeu dans le métal fondu et un jeu dans la ZAT pour les matériaux d'épaisseur ≥ 12 mm et dont la résistance à la flexion par choc est spécifiée. Les normes d'application peuvent exiger un essai de flexion par choc pour une épaisseur inférieure à 12 mm. La température d'essai

doit être choisie par le fabricant, en fonction de l'application ou de la norme d'application mais ne doit pas être inférieure à celle spécifiée pour le métal de base. Pour les essais complémentaires, voir 7.4.5.

e) Non exigé pour les métaux de base : — sous groupe 1.1 et groupes 8, 41 à 48.

f) Les essais ainsi détaillés ne fournissent pas d'informations sur les propriétés mécaniques de l'assemblage. Lorsque ces propriétés correspondent à l'application une qualification supplémentaire doit être aussi réalisée, par exemple une qualification sur une soudure bout à bout.

g) Pour un diamètre extérieur ≤ 50 mm, aucun contrôle par ultrasons n'est exigé.

Pour un diamètre extérieur > 50 mm et lorsque le contrôle par ultrasons n'est pas techniquement possible, le contrôle par radiographie doit être réalisé à condition que la configuration de l'assemblage permette d'obtenir des résultats significatifs.

5) OU PRELEVER LES EPROUVETTES ?

Les éprouvettes doivent être prélevées après que tous les essais non destructifs (END) aient été effectués et qu'ils aient donné des résultats satisfaisants.

5-1) Positionnement des éprouvettes bout à bout tôles pleine pénétration [7-2]

Légende

1 Extrémité à chuter 25 mm

2 Sens de soudage

3 Aire pour :

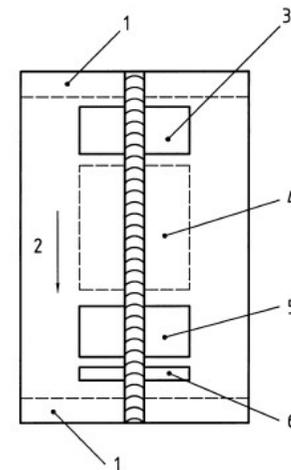
- 1 éprouvette de traction ;
- éprouvettes de pliage.

4 Aire pour :

- éprouvettes de flexion par choc et éprouvettes complémentaires si exigées.

5 Aire pour :

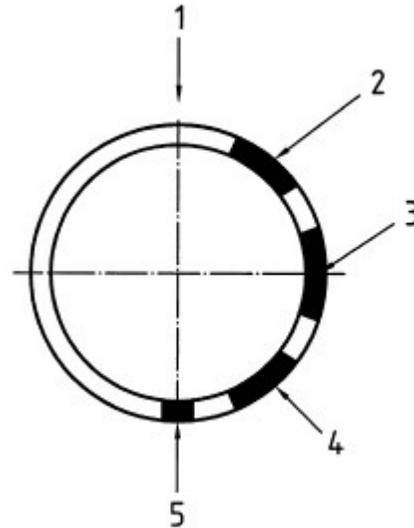
- 1 éprouvette de traction ;
- éprouvettes de pliage.



6 Aire pour :

- 1 coupe macro ;
- 1 éprouvette pour essai de dureté.

5-2) Positionnement des éprouvettes bout à bout tubes pleine pénétration



Légende

1 Partie supérieure pour un tube en position fixe

2 Aire pour :

- 1 éprouvette de traction ;
- éprouvettes de pliage.

3 Aire pour :

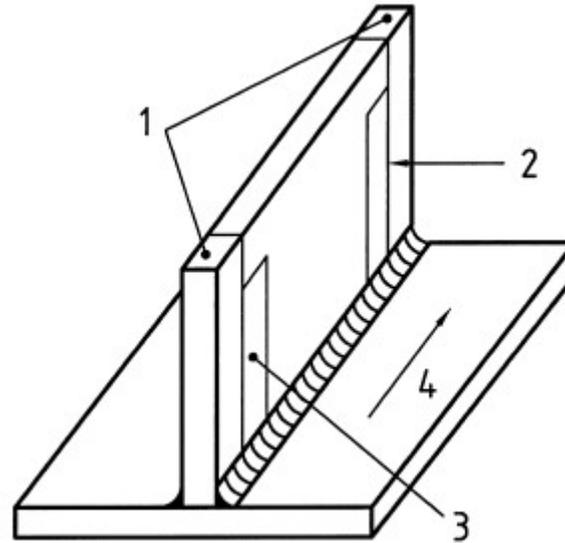
- éprouvettes de flexion par choc et éprouvettes complémentaires si exigé.

4 Aire pour :

- 1 éprouvette de traction ;

- échantillons de pliage.
- 5 Aire pour :
 - 1 coupe macro ;
 - 1 échantillon pour essai de dureté

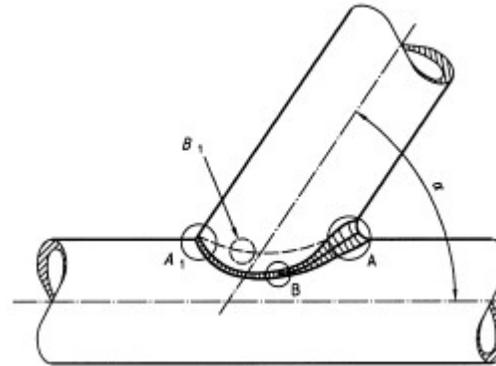
5-3) Positionnement des échantillons assemblage en té



Légende

- 1 Extrémité à chuter 25 mm
- 2 Coupe macro
- 3 Coupe macro et échantillon pour essai de dureté
- 4 Sens de soudage

5-4) Positionnement des échantillons piquage ou douvure angle sur tubes



Légende

1 Partie supérieure pour un tube en position fixe

2 Aire pour :

- 1 éprouvette de traction ;
- éprouvettes de pliage.

3 Aire pour :

- éprouvettes de flexion par choc et éprouvettes complémentaires si exi-gé.

4 Aire pour :

- 1 éprouvette de traction ;
- éprouvettes de pliage.

5 Aire pour :

- 1 coupe macro ;
- 1 éprouvette pour essai de dureté.

6) ESSAIS NON DESTRUCTIFS : [7-3]

Les **essais non destructifs** doivent être exécutés **avant le prélèvement des éprouvettes**.

Les **traitements thermiques** éventuels sont **exécutés avant les essais non destructifs**.

Pour les matériaux sensibles à la fissuration par l'hydrogène et pour lesquels aucun post chauffage ou traitement thermique après soudage n'est spécifié, on retardera les essais non destructifs. On se référera au tableau n°1 du paragraphe 7.1 de la norme.

7) ESSAIS DESTRUCTIFS: [7-4]

On se référera toujours au Tableau n°1 du paragraphe 7.1 de la norme.

7-1) Essai de traction transversale: [7-4-2]

Les éprouvettes seront conformes à l'EN 895. Si le diamètre extérieur est supérieur à 50 mm, la surépaisseur de métal fondu devra être éliminée des deux faces pour obtenir une épaisseur d'éprouvette égale à celle de la paroi du tube. La résistance à la traction de l'éprouvette ne doit pas être inférieure à la valeur minimale spécifiée du métal de base (sauf spécification contraire...)

Si les assemblages sont mixtes (métal de base non identique pour les deux éprouvettes), la résistance à la traction ne doit pas être inférieure à la valeur minimale du matériau de base de plus faible résistance à la traction.

7-2) Essai de pliage [7-4-3]

Les éprouvettes et la conduite de l'essai sera conforme à la norme EN 910.

Pour des épaisseurs inférieures à 12 mm, on utilisera 2 éprouvettes de pliage endroit et deux éprouvettes de pliage envers.

Pour les épaisseurs supérieures ou égales à 12 mm, 4 éprouvettes de pliage coté sont recommandées.

Pour des assemblages mixtes ou hétérogènes pour tôles (bout à bout), on peut réaliser une éprouvette de pliage longitudinale endroit et une envers à la place de 4 éprouvettes de pliage transversales. Le diamètre du rond (mandrin ou rouleau), sera égal à 4 fois l'épaisseur. Et l'angle de pliage devra être de 180° pour un métal de base ayant un allongement % A% supérieur ou égal à 20%. Sinon on applique la formule :

$$d = ((100 \times t_s) / A) - t_s$$

Avec **d** : diamètre du rond

t_s : épaisseur de l'éprouvette de pliage

A : Allongement à la traction minimal exigé par la spécification du matériau.

7-3) Examens macroscopiques [7-4-4]

On se référera à la norme EN 1321 concernant les essais macrographiques. On doit faire apparaître clairement la zone de liaison, la ZAT et la distribution des passes.

L'examen sera représenté avec une partie de métal de base non affecté thermiquement.

7-5) Essai de flexion par choc (résilience) [7-4-5]

La norme à laquelle on se réfère est la norme EN 875.

Pour le métal fondu, on aura une éprouvette avec entaille CHARPY V, une entaille dans le métal fondu, et une entaille dans l'épaisseur. Pour la ZAT, on aura une éprouvette avec entaille CHARPY V, une entaille dans la ZAT, et une entaille au travers de l'épaisseur. Chaque jeu comportera trois éprouvettes. On les prélèvera à une distance maxi de 2 mm sous la surface du métal de base et transversalement à la soudure. Dans la ZAT, l'entaille est placée entre 1 à 2 mm de la zone de liaison et dans l'axe de la soudure pour les éprouvettes prélevées dans le métal fondu.

Pour les éprouvettes dont l'épaisseur est supérieure à 50 mm, la norme impose deux jeux d'éprouvettes supplémentaires (prélevées dans le métal fondu et dans la ZAT (à mi-épaisseur), ou dans la racine de la soudure)

L'énergie absorbée devra être conforme avec la norme du matériau de base qui correspond (sauf modification spécifiée). La valeur moyenne des trois éprouvettes doit être conforme aux exigences en vigueur. Une valeur individuelle peut être inférieure à la valeur moyenne minimale spécifiée à condition qu'elle n'excède pas 70% de cette valeur.

Pour des assemblages mixtes, l'essai est réalisé dans les ZAT de chaque métal de base.

Pour des procédés multiples, les éprouvettes seront prélevées dans le métal fondu et la ZAT de chaque procédé.

7-6) Essais de dureté : [7-4-6]

L'essai de dureté VICKERS sous charge HV10 est réalisé en conformité de la norme EN 1043-1. On pratique les mesures dans la soudure, la ZAT et le métal de base. Pour les épaisseurs inférieures à 5 mm, une seule ligne de filiation est réalisée à une profondeur de 2 mm maximum sous la surface supérieure de l'assemblage soudé. Si les épaisseurs sont supérieures à 5 mm, on réalisera 2 lignes de filiation. Elles seront à une profondeur de 2 mm maximum sous les surfaces supérieures et inférieures de l'assemblage soudé. Si la soudure présente une reprise envers, ou s'il s'agit d'une soudure en angle, ou un assemblage en té, une ligne de filiation supplémentaire est réalisée en racine.

Consulter la norme EN 1043-1 pour des exemples schématisés

7-7) Valeurs maximales de dureté admissibles [Tableau 2]

Les exigences pour les groupes 6 non traités thermiquement, pour les groupes 7, 10, 11 et tout assemblage mixte devra être spécifié avant l'essai.

7-8) Niveau d'acceptation : [7-5]

Un mode opératoire de soudage est qualifié si les défauts dans l'assemblage de qualification sont dans les limites du niveau de qualité B spécifiées dans l'EN 25817 sauf pour les défauts :

- surépaisseurs excessives
- convexités excessives
- gorges excessives
- pénétrations excessives.

Dans ce cas là, on appliquera le niveau C d'acceptation.

Groupes d'aciers CR ISO/TR 15608	Non-traité thermiquement	Traité thermiquement
1 ^{a)} , 2	380	320
3 ^{b)}	450	380
4, 5	380	320
6	—	350
9.1	350	300
9.2	450	350
9.3	450	350

a) Si l'essai de dureté est exigé.
 b) Pour les aciers à limite d'élasticité minimale $R_{eH} > 890 \text{ N/mm}^2$ des valeurs spéciales doivent être spécifiées.

8) DOMAINE DE VALIDITE : [8]

Une qualification d'un DMOS-P obtenue par un fabricant au moyen d'une épreuve de QMOS est valable pour l'ensemble des soudages dans les ateliers ou chantiers du fabricant. Celui-ci conserve la responsabilité de toutes les opérations de soudage réalisées correspondant à cette QMOS.

Certains matériaux différents de la QMOS peuvent cependant être validés par cette même QMOS. Suivant le tableau.

8-1) Domaines de validité des groupes d'aciers et sous-groupes d'acier [Tableau 3]

(Sous-)groupe du matériau de l'assemblage de qualification	Domaine de validité
1 – 1	1 ^{a)} – 1
2 – 2	2 ^{a)} – 2, 1 – 1, 2 ^{a)} – 1
3 – 3	3 ^{a)} – 3, 1 – 1, 2 – 1, 2 – 2, 3 ^{a)} – 1, 3 ^{a)} – 2
4 – 4	4 ^{b)} – 4, 4 ^{b)} – 1, 4 ^{b)} – 2
5 – 5	5 ^{b)} – 5, 5 ^{b)} – 1, 5 ^{b)} – 2
6 – 6	6 ^{b)} – 6, 6 ^{b)} – 1, 6 ^{b)} – 2
7 – 7	7 ^{c)} – 7
7 – 3	7 ^{c)} – 3, 7 ^{c)} – 1, 7 ^{c)} – 2
7 – 2	7 ^{c)} – 2 ^{a)} , 7 ^{c)} – 1
8 – 8	8 ^{c)} – 8
8 – 6	8 ^{c)} – 6 ^{b)} , 8 ^{c)} – 1, 8 ^{c)} – 2, 8 ^{c)} – 4
8 – 5	8 ^{c)} – 5 ^{b)} , 8 ^{c)} – 1, 8 ^{c)} – 2, 8 ^{c)} – 4, 8 ^{c)} – 6.1, 8 ^{c)} – 6.2
8 – 3	8 ^{c)} – 3 ^{a)} , 8 ^{c)} – 1, 8 ^{c)} – 2
8 – 2	8 ^{c)} – 2 ^{a)} , 8 ^{c)} – 1
9 – 9	9 ^{b)} – 9
10 – 10	10 ^{b)} – 10
10 – 8	10 ^{b)} – 8 ^{c)}
10 – 6	10 ^{b)} – 6 ^{b)} , 10 ^{b)} – 1, 10 ^{b)} – 2, 10 ^{b)} – 4
10 – 5	10 ^{b)} – 5 ^{b)} , 10 ^{b)} – 1, 10 ^{b)} – 2, 10 ^{b)} – 4, 10 ^{b)} – 6.1, 10 ^{b)} – 6.2
10 – 3	10 ^{b)} – 3 ^{a)} , 10 ^{b)} – 1, 10 ^{b)} – 2
10 – 2	10 ^{b)} – 2 ^{a)} , 10 ^{b)} – 1
11 – 11	11 ^{b)} – 11, 11 ^{b)} – 1
a) Couvre les aciers à limite d'élasticité spécifiée égale ou inférieure du même groupe. b) Couvre les aciers du même sous-groupe et tout sous-groupe inférieur du même groupe. c) Couvre les aciers du même sous-groupe	

8-2) Domaines de validité des groupes d'alliages de nickel et alliages nickel/acier [Tableau 4]

Groupe du matériau de l'assemblage de qualification	Domaine de validité
41 — 41	41 ^{c)} — 41
42 — 42	42 ^{c)} — 42
43 — 43	43 ^{c)} — 43, 45 ^{c)} — 45, 47 ^{c)} — 47
44 — 44	44 ^{c)} — 44
45 — 45	45 ^{c)} — 45, 43 ^{c)} — 43 ^{c)}
46 — 46	46 ^{c)} — 46
47 — 47	47 ^{c)} — 47, 43 ^{c)} — 43 ^{c)} , 45 ^{c)} — 45 ^{c)}
48 — 48	48 ^{c)} — 48
41 à 48 — 2	41 à 48 ^{c)} — 2 ^{a)} , 41 à 48 ^{c)} — 1
41 à 48 — 3	41 à 48 ^{c)} — 3 ^{a)} , 41 à 48 ^{c)} — 2 ou 1
41 à 48 — 5	41 à 48 ^{c)} — 5 ^{b)} , 41 à 48 ^{c)} — 6.2 ou 6.1 ou 4 ou 2 ou 1
41 à 48 — 6	41 à 48 ^{b)} — 6 ^{b)} , 41 à 48 ^{c)} — 4 ou 2 ou 1
NOTE Pour les groupes 41 à 48, une épreuve de qualification réalisée sur un alliage à durcissement structural d'un groupe couvre tous les alliages à durcissement structural de ce groupe soudés à tous les alliages à solution solide du même groupe.	
a) Couvre les aciers à limite d'élasticité spécifiée égale ou inférieure du même groupe.	
b) Couvre les aciers du même sous-groupe et tout sous-groupe inférieur du même groupe.	
c) Pour les groupes 41 à 48, une épreuve de qualification réalisée sur un alliage à solution solide ou à durcissement structural d'un groupe couvre tous les alliages respectivement à solution solide ou à durcissement structural du même groupe.	

8-3) Epaisseur du matériau de base et diamètre du tube [8-3-2-1]

Pour la qualification mono-procédée, l'épaisseur t doit avoir les significations suivantes :

Pour un assemblage bout à bout pleine pénétration, soudure d'angle, un piquage posé, piquage emboité ou traversant, ou un assemblage en T sur des tôles à pleine pénétration t signifie : épaisseur du matériau de base. Pour les soudures d'angle, pour chaque domaine d'épaisseur qualifiée comme indiqué dans le Tableau 6, on a un domaine de validité pour les épaisseurs de gorge(a), des soudures d'angles mono passes (Paragraphe 8-3-2-2 de la Norme.)

Dans le cas d'une qualification multi-procédé, l'épaisseur consignée propre à chacun des procédés doit servir de base au domaine de validité pour les procédés de soudage individuels.

8-3-1) Domaine de validité pour les assemblages bout à bout à pleine pénétration, les assemblages en T, les piquages et les soudures d'angle [8-3-2-2]

Pour la qualification d'un mode opératoire de soudage dans une épaisseur t , on peut associer une plage d'épaisseurs dans le domaine de validité en se référant aux tableaux 5 et 6 de la norme.

[Tableau 5] (Domaine de validité pour l'épaisseur de matériau et l'épaisseur de métal déposé pour les soudures bout à bout à pleine pénétration) :

Épaisseur de l'assemblage de qualification t	Domaine de validité	
	Monopasse	Multipasse
$t \leq 3$	0,7 t à 1,3 t	0,7 t à 2 t
$3 < t \leq 12$	0,5 t (3 min.) à 1,3 t ^{a)}	3 à 2 t ^{a)}
$12 < t \leq 100$	0,5 t à 1,1 t	0,5 t à 2 t
$t > 100$	Non applicable	50 à 2 t

a) Si des exigences sur la résistance à la flexion par choc sont spécifiées, la limite supérieure de qualification est de 12 mm sauf si des essais de flexion par choc ont été réalisés.

[Tableau 6] (Domaine de validité pour l'épaisseur du matériau et l'épaisseur de gorge pour les soudures d'angle) :

Épaisseur de l'assemblage de qualification t	Domaine de validité		
	Épaisseur du matériau	Épaisseur de gorge	
		Monopasse	Multipasse
$t \leq 3$	0,7 t à 2 t	0,75 a à 1,5 a	Aucune restriction
$3 < t < 30$	0,5 t (3 min.) à 1,2 t	0,75 a à 1,5 a	Aucune restriction
$t \geq 30$	≥ 5	a)	Aucune restriction

NOTE 1 a est la gorge telle qu'utilisée pour l'assemblage de qualification.

NOTE 2 Si une soudure d'angle est qualifiée au moyen d'une soudure bout à bout à pleine pénétration, le domaine de validité de l'épaisseur de gorge qualifiée doit être basé sur l'épaisseur du métal déposé.

a) Pour application spéciale uniquement. Chaque épaisseur de gorge est à vérifier séparément au moyen d'une épreuve de qualification de mode opératoire de soudage.

8-3-3) Domaine de validité relatif au diamètre des tubes et des piquages

La qualification d'un mode opératoire de soudage par épreuve sur un tube de diamètre D valide aussi les diamètres compris dans le domaine de validité donnés dans le tableau 7 de la norme :

On considère aussi que les qualifications obtenues pour des tôles qualifie aussi les tubes de diamètre extérieurs supérieurs à 500 mm de diamètre ou de diamètres supérieurs à 150 mm soudés en rotation en position PA ou PC.

Domaine de validité relatif au diamètre des tubes et des piquages [Tableau 7]

Diamètre de l'assemblage de qualification D ^{a)} mm	Domaine de validité
$D \leq 25$	$0,5D$ à $2D$
$D > 25$	$\geq 0,5D$ (25 mm min.)
NOTE Dans le cas de profils creux pour la construction métallique, D est la dimension du plus petit côté.	
a) D est le diamètre extérieur du tube ou le diamètre extérieur du piquage.	

8-3-4) Angle d'inclinaison de piquage

La norme explique qu'une épreuve de qualification de mode opératoire de soudage obtenue sur un piquage incliné d'un angle α qualifie tous les angles d'inclinaison α_1 , situés dans le domaine $\alpha \leq \alpha_1 \leq 90^\circ$.

8-4) Domaines de validité communs à tous les procédés de soudage

8-4-1) Pour les procédés de soudage :

Une qualification est réalisée pour chaque degré de mécanisation. On entend par là, une épreuve de QMOS pour le soudage manuel sera différente du soudage automatisé qui est différent du soudage semi-automatisé. La qualification est aussi unique à chaque procédé de soudage. Dans le cas de soudage multi-procédé, différentes QMOS seront à réalisées par des épreuves séparées.

8-4-2) Pour les positions de soudage:

Une épreuve pour une QMOS qualifie toutes les positions de soudage (pour les tubes et les tôles) sauf pour les positions PG et J-L045. Dans ces 2 cas, une épreuve séparée est nécessaire. Pour qualifier un maximum de positions, si des exigences concernant la résistance par choc ou de dureté sont imposées, on effectuera le test de flexion par choc pour la position qui apportera le plus de chaleur dans la pièce, et pour la dureté, dans la position qui aura l'apport de chaleur le plus faible.

8-4-3) Pour les types d'assemblages et types de soudures

Le domaine de validité du type d'assemblage est celui utilisé pendant l'épreuve pour la QMOS, avec les domaines de validité relatifs aux épaisseurs, diamètres, etc., et aussi :

- a) Les soudures bout à bout pleines pénétrations qualifient aussi les soudures à pénétrations partielles et soudures d'angles. Des épreuves de soudures d'angles sont exigées s'il s'agit du type d'assemblage prédominant.
- b) Les assemblages bout à bout sur tubes qualifient les piquages ayant un angle supérieur à 60°
- c) Les assemblages bout à bout en T ne qualifient que les assemblages bout à bout en T et les soudures d'angle
- d) Les soudures réalisées d'un seul côté sans support envers qualifient les soudures réalisées des deux côtés ainsi que les soudures avec support envers ;
- e) Les soudures réalisées avec support envers qualifient les soudures réalisées des deux côtés ;
- f) Les soudures réalisées des deux côtés sans gougeage qualifient les soudures réalisées des deux côtés avec gougeage ;
- g) Le soudage avec cordon d'angle ne qualifie que le soudage avec cordon d'angle ;
- h) Pour un procédé donné, il n'est pas permis de passer d'un dépôt multi passe à un dépôt mono-passe (ou mono passe de chaque côté) ou vice-versa.

8-4-4) Métal d'apport et désignation

La norme indique qu'on peut étendre la qualification à d'autres métaux d'apport à condition d'avoir les propriétés mécaniques équivalentes, le même type d'enrobage ou de flux, la même composition nominale, et une teneur en hydrogène inférieure ou égale, selon la norme correspondant au produit d'apport.

8-4-5) Métal d'apport et marque

Si un essai de flexion par choc est exigé, pour les procédés 11, 114, 12, 136, 137, le domaine de validité est limité à la marque spécifique utilisé dans l'épreuve de qualification. Il est toutefois admis de changer la marque du matériau d'apport pour une autre marque ayant la même partie désignation obligatoire lorsqu'un assemblage de qualification supplémentaire est soudé. Les mêmes paramètres et les mêmes conditions sont bien entendus reproduits.

Toutefois, cette condition ne s'applique pas aux fils électrodes pleins et aux baguettes de même désignation et de même composition chimique nominale.

8-4-6) Dimensions du matériau d'apport

Il est permis de modifier les dimensions du matériau d'apport à condition de satisfaire aux exigences du paragraphe 8-4-8.

8-4-7) Type de courant

La qualification obtenue est limitée au type de courant (alternatif (CA), courant continu (CC) ou pulsé), et à la polarité utilisés pendant l'épreuve de qualification du mode opératoire de soudage. Pour le procédé 111, le courant alternatif qualifie également le courant continu (les deux polarités) si l'essai de flexion par choc n'est pas exigé.

8-4-8) Apport de chaleur

Lorsque des exigences sur la résistance à la flexion par choc s'appliquent, la limite supérieure de l'apport de chaleur qualifié est de 25 % supérieure à celui utilisé pour le soudage de l'assemblage de qualification.

Lorsque des exigences concernant la dureté s'appliquent, la limite inférieure de l'apport de chaleur qualifié est de 25 % inférieure à celui

utilisé pour le soudage de l'assemblage de qualification.

L'apport de chaleur est calculé conformément à l'EN 1011-1. Si les épreuves de qualification de mode opératoire de soudage ont été réalisées à la fois à des niveaux d'apport de chaleur élevés et faibles, tous les niveaux d'apport de chaleur intermédiaires sont alors également qualifiés.

8-4-9) Température de préchauffage

Lorsqu'un préchauffage est exigé, la limite inférieure de qualification est la température nominale de préchauffage appliquée au début de l'épreuve de qualification du mode opératoire de soudage.

8-4-10 Température entre passes

La limite supérieure de qualification est la température entre passes la plus élevée atteinte pendant l'épreuve de qualification du mode opératoire de soudage.

8-4-11 Post chauffage pour dégazage de l'hydrogène

La température et le temps de maintien d'un post chauffage ne doivent pas être diminués. Le post chauffage ne doit pas être omis, mais il peut être ajouté.

8-4-12 Traitement thermique après soudage

L'ajout ou la suppression d'un traitement thermique après soudage n'est pas autorisé(e).

La plage de températures qualifiée correspond à la température de maintien utilisée pendant l'épreuve de qualification du mode opératoire de soudage à plus ou moins 20 °C, sauf spécification contraire. Lorsqu'elles sont exigées, les vitesses de montée, de refroidissement et le temps de maintien doivent être en rapport avec le produit.

8-4-13 Traitement thermique initial

Un changement de condition de traitement thermique initial avant le soudage de matériaux à durcissement structural n'est pas autorisé.

8-5) Domaines de validité spécifique aux procédés

8-5-1) Pour le procédé de soudage 12

8-5-1-1) Chaque variante du procédé 12 (121 à 125) doit être qualifiée indépendamment.

8-5-1-2) La qualification obtenue pour un flux est limitée à la marque et la désignation utilisées pendant l'épreuve de

qualification du mode opératoire de soudage.

8-5-2) Procédés 131, 135, 136 et 137

8-5-2-1) La qualification obtenue pour un gaz de protection est limitée au symbole du gaz selon l'EN 439. Cependant la teneur en CO₂ ne doit pas dépasser de 10 % celle utilisée pour qualifier l'épreuve de qualification du mode opératoire de soudage. Les gaz de protection non couverts par l'EN 439 sont limités à la composition nominale utilisée pendant l'épreuve.

8-5-2-2) La qualification obtenue est limitée au système de fil utilisé pendant l'épreuve de qualification du mode opératoire de soudage (exemple : système à fil unique ou fils multiples).

8-5-2-3) Pour les fils pleins et les fils fourrés de métal, la qualification utilisant un transfert par court-circuit ne qualifie que le transfert par court-circuit. La qualification utilisant un transfert par pulvérisation ou un transfert globulaire qualifie à la fois le transfert par pulvérisation et le transfert globulaire.

9) PROCES VERBAL DE QUALIFICATION DE MODE OPERATOIRE DE SOUDAGE (PV-QMOS)

Il s'agit d'un document qui révèle la situation de l'épreuve, la mise en œuvre de cette épreuve, le DMOS de l'épreuve, et le résultat des contrôles et des examens.

Prenez bien en compte que ces écrits ne peuvent en aucun cas être appliqués comme la norme originale. Il ne s'agit que d'extraits qui ont été résumés, réécrits pour les formations.

Section N°2 : Métallurgie du soudage

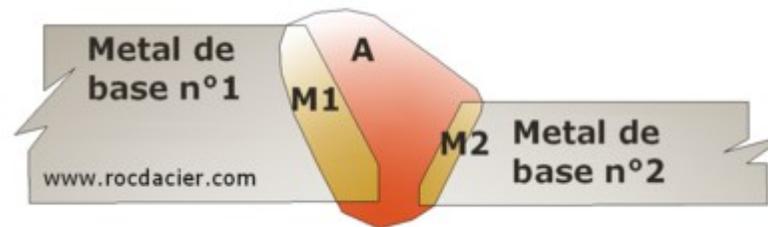
Chapitre 3 : Taux dilution

Comment calculer le taux de dilution en soudage ?

1) Comment calculer le taux de dilution.

Le **taux de dilution** pendant une opération de soudage est le mélange du métal d'apport avec le ou les métaux de base. Ce **taux de dilution** sera exprimé en pourcentage. C'est le rapport entre les volumes des métaux de bases fondus et celui de la totalité de la zone fondue.

$$\text{Le taux de dilution} = (M1+M2)/(A+M1+M2)$$



Le taux de dilution se calcule à l'aide d'une coupe macrographique.

2) Taux de dilution en fonction des procédés de soudage

Selon le procédé de soudage qui sera choisi, le taux de dilution sera différent.

On adopte généralement les valeurs suivantes :

- Pour le procédé **Arc électrode enrobée** (111) : On adopte un taux de dilution compris entre **10 à 35%**
- Pour le procédé **MIG/MAG** (131/135) : On adopte un taux de dilution compris entre **20 à 40%**
- Pour le procédé **TIG** (141) : On adopte un taux de dilution compris entre **15 à 30%**
- Pour le procédé **Sous Flux en poudre** (121) : On adopte un taux de dilution compris entre **60 à 80%**

Le taux de dilution permet d'aider à prévoir les risques métallurgiques dans certaines situations.

Section N°2 : Métallurgie du soudage

Chapitre 4: Schaeffler (Le diagramme de Schaeffler)

La composition chimique d'un cordon de soudure dépend des compositions chimiques des métaux d'apport et des métaux de base, ainsi que de la proportion de chacun de ces métaux.

La structure cristalline dépend de la forme des cristaux dans le cordon de soudure, des conditions de refroidissement, d'un traitement thermique éventuel après soudage.

Le diagramme de Schaeffler permet de choisir un métal d'apport et de garantir de bonnes qualités métallurgiques. Le diagramme de Schaeffler permet aussi de prévoir les risques métallurgiques pour l'assemblage soudé.

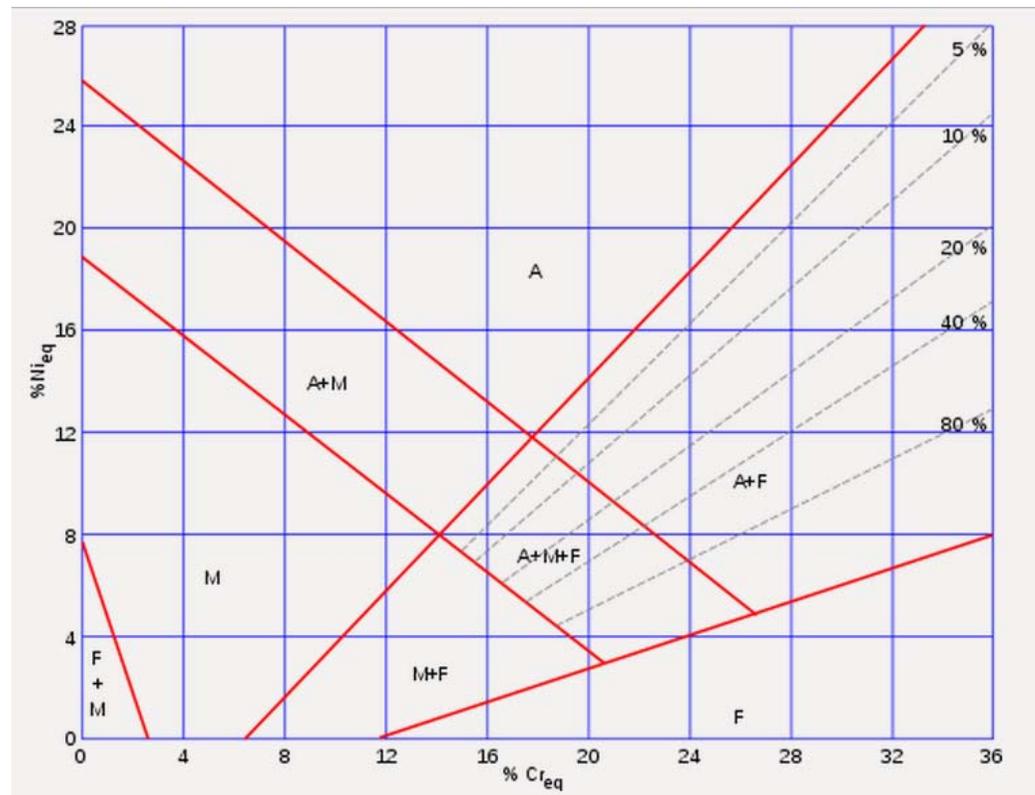
Il est présenté avec en abscisses l'équivalent Chrome (EqCr), et en ordonnées l'équivalent Nickel (EqNi).

Le diagramme de Schaeffer est divisé en 4 zones qui représentent les différentes structures rencontrées pour le soudage des aciers inoxydables.

Ces différentes structures sont :

- 1) La martensite (M)
- 2) L'austénite (A)
- 3) La ferrite (F)
- 4) L'austéno-ferrite (A+F)

Les zones à risque sur le diagramme de



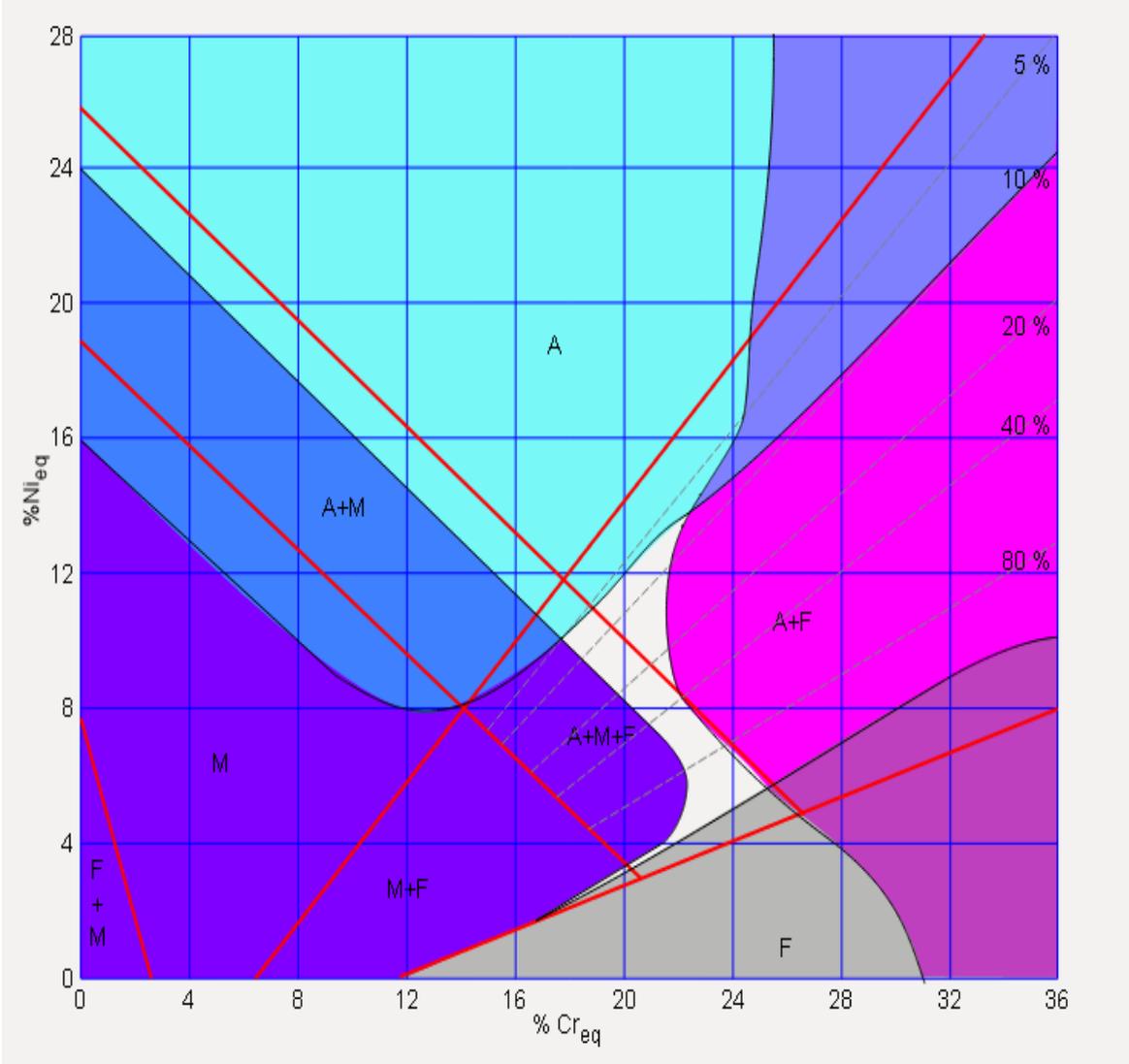
Schaeffler

Légende:

A : austénite γ ;
 F : ferrite α ;
 M : martensite ;
 5-80% : pourcentage en masse de la ferrite dans l'austénite

zones de risques :
 bleu clair : fissuration à chaud,
 violet : fissuration à froid,
 rose: fragilisation par transformation $\alpha \rightarrow \sigma$,
 gris : fragilisation par croissance des grains α ,
 blanc : zone idéale.

Source (wikibooks.org)



Section N°2 : Métallurgie du soudage

Chapitre 5: Choisir un acier inox / Acier austéno-ferritique/ Aciers ferritiques/ Aciers austénitiques/ Aciers martensitiques

1) Choisir un acier inox

Tableau qui vous explique comment choisir un acier inoxydable en fonction de sa teneur en ses principaux composants. Le tableau présente la soudabilité, la résistance à la corrosion et la facilité de mise en œuvre. Des exemples d'applications sont associés.

Critères de choix des aciers inoxydables à partir de leurs caractéristiques principales (Source: Memotech Structures Métalliques)							
Désignation européenne selon NF EN 10088-2	Désignation numérique	Aptitude à la conformation à froid (pliage, emboutissage, profilage)	Soudabilité	Résistance à la corrosion	Particularités		Exemples d'applications
ACIERS INOXYDABLES MARTENSITIQUES							
X20Cr13	1.4021	Mise en œuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne			<ul style="list-style-type: none"> - Outils tranchants - Coutellerie - Pièces mécaniques - Outils de bâtiment
X30Cr13	1.4028	Mise en œuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne	Bonne aptitude à la trempe	Livraison possible à l'état trempé	<ul style="list-style-type: none"> - Feuillards de rechargement - Coutellerie - Outils tranchants - Pièces d'usure

X46Cr13	1.4034	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne		<ul style="list-style-type: none"> - Coutellerie - Instruments de chirurgie
ACIERS INOXYDABLES FERRITIQUES						
X2CrTi12	1.4512	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Résistance à la corrosion moyenne	Bonne résistance à l'oxydation à chaud	- Système d'échappements automobiles
X6CrNiTi12	1.4516	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Bonne soudabilité	Résistance à la corrosion moyenne	Nuance pour construction soudée	<ul style="list-style-type: none"> - Conteneurs - Matériels ferroviaires - Trémies - Equipements industriels.
X6Cr17	1.4016	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Soudabilité moyenne	Résistance à la corrosion moyenne	<ul style="list-style-type: none"> - En recuit brillant pour pièces d'aspect - Flans monétaires 	<ul style="list-style-type: none"> - Articles ménagers - Pièces décoratives - Electroménager - Platerie
X3CrTi17	1.4510	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Bonne résistance à la corrosion	- Le Titane améliore la soudabilité et la déformation à froid	<ul style="list-style-type: none"> - Electroménager - Eviers - Tubes - Bruleurs
X6CrNi17-1	1.4017	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne	- Caractéristiques mécaniques élevées après trempe et écrouissage	-Chaines transporteuses
X2CrMoTi18-2	1.4512	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Résistance à la corrosion par piqures identiques à celles du 18-11 ML (316L)	<ul style="list-style-type: none"> - Ballons d'eau chaude - Chaudières de fumées - Echangeurs divers.
ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES						
X10CrNi18-8	1.4310	Facile à mettre en oeuvre par	Bonne soudabilité	Bonne résistance à la corrosion	- Nuance écrouissage	<ul style="list-style-type: none"> - Ressorts - Pièces mécaniques

		conformation				
X2CrNi18-7	1.4318	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Caractéristiques améliorées à l'état écroui	- Matériel ferroviaire
X5CrNi 18-10	1.4301	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Très bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance conforme à toutes les normes	- Chaudronnerie - Tubes - Cuves - Platerie - Ustensiles de cuisson
X2CrNi18-9	1.4307	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance très bas carbone. - Bonne aptitude au soudage	- Chaudronnerie - Nucléaire - Métal déployé - Echangeurs
X2CrNi19-11	1.4306	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance très bas carbone - Affecté au nucléaire - Carbone <0,2	- Chaudronnerie - Nucléaire
X6CrNiTi18-10	1.4541	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	-Stabilisé Titane - Résistance à la corrosion des zones soudées - Résistance au fluage	- Tubes - Résistances chauffantes - Aéronautique
ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES AU MOLYBDENE						
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Très bonne soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Chaudronnerie	- Cuverie vinivole
X2CrNiMo 17-12-2	1.4404	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Nuance Molybdène à très bas carbone	- Tubes - Citernes routières - Chaudronnerie - Ballons d'eau chaude
X2CrNiMo 18-14-3	1.4435	Très facile à mettre en oeuvre par	Excellente soudabilité	Excellente résistance à la	- Nuance haut Molybdène à très bas carbone	- Cuves pour produits chimiques et alimentaires

		conformation		corrosion		- Applications marines
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Nuance stabilisée Titane pour soudage	- Industrie chimique et pétrolière
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Très bonne soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Super austénitique - Excellente tenue à la corrosion	- Echangeurs - Chimie
X18CrNi23-13	1.4833	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Très bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Résistance à l'oxydation à chaud jusqu'à 1050°C	-Gaines de résistances
X8CrNi 25-21	1.4845	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Très bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Résistance à l'oxydation à chaud jusqu'à 1100°C	Equipements de fours

2) Les aciers inoxydables austéno-ferritiques

Les **aciers inoxydables austéno-ferritiques**, le plus souvent appelés **aciers inoxydables duplex** sont utilisés pour leur ténacité et leur résistance à la corrosion. Ces aciers sont en pleine expansion.

Ces nuances **austéno-ferritiques** présentent après un traitement d'hypertrempe une structure formée moitié de ferrite et moitié d'austénite. La principale source d'austénite est due à l'azote.

On **divise les aciers inoxydables austéno ferritiques en 4 groupes** :

-faiblement alliés : type 23Cr4Ni0,1N2

-alliés au Molybdène: type 22Cr5Ni3Mo0,17N2

-duplex à 25% de Cr : type 25Cr7Ni3Mo0,2N2 (+Cu)

-super duplex : type 23Cr7Ni3,5Mo0,25N2(+Cu +W)

Ces aciers ont une soudabilité différente.

a) Les structures austéno-ferritique

On peut comparer leur soudabilité à celle des aciers austénitiques avec quelques particularités.

Les produits d'apport devront être choisis de manière à obtenir un métal fondu austéno-ferritique dont la proportion de ferrite/austénite reste la même que celle du métal de base.

Les produits d'apport auront **la même composition que le métal de base avec en plus 2 à 3% de Nickel ou de l'Azote** pour reformer l'austénite.

Le métal d'apport le plus courant est composé de 22% de Chrome, 9% de Nickel et 3% de Molybdène. Ce métal d'apport contient de l'azote qui est gamma gnisant, ou austénisant.

Le préchauffage est formellement déconseillé, car cela entraînerait une formation de criques ou un phénomène de précipitation de carbures de chrome aux joints des grains.

On utilise des **électrodes de petits diamètres**, sous faible intensité pour réduire l'échauffement du métal de base. La **température entre les passes aux abords du joint ne devra pas excéder 150°C**. Un traitement de détensionnement ou de relaxation peut être exécuté à une température de 475 à 525°C

b) Quelques nuances d'aciers inox austéno-ferritiques:

Désignation européenne selon NF EN 10088-2	Désignation numérique	Aptitude à la conformation à froid (pliage, emboutissage, profilage)	Soudabilité	Résistance à la corrosion	Particularités	Exemples d'applications
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Très bonne soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Chaudronnerie	- Cuverie vinicole
X2CrNiMo 17-12-2	1.4404	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Nuance Molybdène à très bas carbone	- Tubes - Citernes routières - Chaudronnerie - Ballons d'eau chaude
X2CrNiMo 18-14-3	1.4435	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Nuance haut Molybdène à très bas carbone	- Cuves pour produits chimiques et alimentaires - Applications marines
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Nuance stabilisée Titane pour soudage	- Industrie chimique et pétrolière
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Très bonne soudabilité	Excellente résistance à la corrosion	- Super austénitique - Excellente tenue à la corrosion	- Echangeurs - Chimie
X18CrNi23-13	1.4833	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Très bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Résistance à l'oxydation à chaud jusqu'à	- Gaines de résistances

					1050°C	
X8CrNi 25-21	1.4845	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Très bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Résistance à l'oxydation à chaud jusqu'à 1100°C	Equipements de fours

3) Les aciers inoxydables ferritiques

Par exemple :X6CrTi12, X8CrTi17,etc.

Ils contiennent entre **11 à 30% de Chrome** et **jusqu'à 0,8% de Carbone**, certains types jusqu'à **4,5% de Mo** et **1,6% de Nickel** et du**Titane** et **Niobium** pour stabilisation.

La structure de ces aciers est delta ferritique, lors du cycle de soudage, ils ne subissent aucune transformation structurale.

Le grossissement des grains dans la ZAT est possible vers 950°C **ce qui diminue la ductilité**.

Le traitement thermique n'est pas possible. La structure de ces aciers est peu tenace (la tenacité est la valeur critique conduisant à la rupture), mais offre à température ambiante une bonne résilience, une grande ductilité, et présente une bonne résistance à la fissuration.

On déconseille l'emploi de ces aciers **à chaud** car ils sont sensibles à la formation de diverses phases (phase Sigma). Le Chrome entre 800 et 900°C se précipite en carbure de Chrome et se loge au joints des grains.

a) La structure ferritique :

Les aciers à 13% de Chrome présentent une teneur en carbone de 0,05% maximum. Leur aptitude au soudage est bonne car elle peut se comparer à celle des aciers au carbone "soudables". On les soude de préférence à l'arc électrique avec soit des électrodes déposant un acier de même composition chimique ou soit pour une utilisation à une température inférieure à 500°C, des électrodes au nickel chrome-molybdène 18-12-3, pour l'assemblage de pièces de fortes masses ou particulièrement bridées.

Pour les aciers dont la composition chimique est de 16 à 30% de Chrome, il y a un fort grossissement des grains de ferrite dans la ZAT (Zone affectée thermiquement). Leur **soudabilité est médiocre**. Ils ne subissent pas de transformation de leur structure et ne peuvent pas être régénéré par un quelconque traitement thermique. Le préchauffage est à proscrire, ainsi que les procédés de soudage à forte énergie.

On emploie alors pour les souder, une méthode de soudage par multi-passe, des électrodes de petit diamètre et une faible énergie de soudage.

Le choix d'une électrode ferritique ou austénitique est délicat, car pour l'emploi d'une électrode ferritique (sans nickel), quand la température de service est supérieure à 700°C, que l'atmosphère est réductrice (la quantité d'air réellement utilisée est inférieure à celle théoriquement nécessaire.) et chargée en soufre, il y a un risque de corrosion.

L'emploi d'une électrode ferritique coté corrosion et d'une électrode austénitique pour le remplissage peut s'envisager.

On peut utiliser des fils d'apport de même nuance pour le soudage TIG et MIG.

b) Nuances d'aciers inoxydables ferritiques:

Désignation européenne selon NF EN 10088-2	Désignation numérique	Aptitude à la conformation à froid (pliage, emboutissage, profilage)	Soudabilité	Résistance à la corrosion	Particularités	Exemples d'applications
X2CrTi12	1.4512	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Résistance à la corrosion moyenne	Bonne résistance à l'oxydation à chaud	- Système d'échappements automobiles
X6CrNiTi12	1.4516	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Bonne soudabilité	Résistance à la corrosion moyenne	Nuance pour construction soudée	- Conteneurs - Matériels ferroviaires - Trémies - Equipements industriels.
X6Cr17	1.4016	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Soudabilité moyenne	Résistance à la corrosion moyenne	- En recuit brillant pour pièces d'aspect	- Articles ménagers - Pièces décoratives - Electroménager

					- Flans monétaires	- Platerie
X3CrTi17	1.4510	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Bonne résistance à la corrosion	- Le Titane améliore la soudabilité et la déformation à froid	- Electroménager - Eviers - Tubes - Bruleurs
X6CrNi17-1	1.4017	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne	- Caractéristiques mécaniques élevées après trempe et écrouissage	-Chaines transporteuses
X2CrMoTi18-2	1.4512	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Résistance à la corrosion par piqures identiques à celles du 18-11 ML (316L)	- Ballons d'eau chaude - Chaudières de fumées - Echangeurs divers.

4) Soudage des aciers inoxydables austénitiques- Acier inox austénitique

a) **Les aciers inoxydables austénitiques :**

Par exemple, X2CrNi18-09, X6CrMoNi17-12...

Ils sont les plus employés et contiennent au **minimum 10% de Chrome** et **7% de Nickel** et fréquemment d'autres éléments d'alliages tels que molybdène, titane, cuivre, niobium, et silicium.

La plupart des **aciers austénitiques** ont une composition chimique équilibrée pour contenir de 5 à 8% de ferrite delta. Cet équilibre permet d'éviter le risque de fissuration lors de la solidification durant le soudage.

b) **Le soudage des aciers austénitiques :**

Les **aciers inoxydables austénitiques** subissent la transformation **Austénite==>Ferrite** à haute température.

Il y a **risque de fissuration à chaud**. On utilise alors des aciers à très faible teneur en Carbone (C= 0,03%) ou des aciers dits stabilisés .

Souder des aciers inoxydables austénitiques à l'électrode enrobée ou par le procédé TIG et MIG ne présente pas de difficultés particulières si on observe quelques règles simples. Dans la majorité des cas, réaliser un joint soudé dans ces conditions permet d'obtenir une **bonne résistance à la corrosion**.

Les règles à adopter pour garantir ces bonne résistance à la corrosion sont :

- Adopter un **métal d'apport de composition chimique analogue à celle du métal de base**. Les fabricants de produits d'apports proposent pour chaque nuance d'acier un vaste choix d'électrodes, de fils d'apports dont la composition chimique est en principe équilibrée de façon à obtenir une structure après soudage qui comporte **moins de 5% de ferrite**. On **évite ainsi la fissuration à chaud**.
- **Eviter toute pollution des bords à souder** qui pourrait être préjudiciable à la tenue à la corrosion de l'assemblage ou encore provoquer une fissuration à chaud de la soudure.
- Effectuer si nécessaire une **passivation de la soudure** qui reconstitue la pellicule d'oxydes de chrome réduite par l'opération de soudage.
- **Tout préchauffage et post-chauffage est inutile, voire nuisible.**

En conclusion, la structure austénitique est sensible à la fissuration à chaud se manifestant à des températures > 1250°C, elle a une bonne résistance à la corrosion intergranulaire pour les nuances stabilisées ou à bas carbone. Elle propose une très bonne ténacité et ductilité.

c) Quelques nuances d'aciers inox austénitiques:

X10CrNi18-8	1.4310	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Bonne résistance à la corrosion	- Nuance écrouissage	- Ressorts - Pièces mécaniques
X2CrNi18-7	1.4318	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Caractéristiques améliorées à l'état écroui	- Matériel ferroviaire
X5CrNi 18-10	1.4301	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Très bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance conforme à toutes les normes	- Chaudronnerie - Tubes - Cuves - Platerie - Ustensiles de cuisson
X2CrNi18-9	1.4307	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance très bas carbone. - Bonne aptitude au soudage	- Chaudronnerie - Nucléaire - Métal déployé - Echangeurs
X2CrNi19-11	1.4306	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance très bas carbone - Affecté au nucléaire - Carbone <0,2	- Chaudronnerie - Nucléaire
X6CrNiTi18-10	1.4541	Facile à mettre en	Excellente	Très bonne résistance à	-Stabilisé	- Tubes

		oeuvre par conformation	soudabilité	la corrosion	Titane - Résistance à la corrosion des zones soudées - Résistance au fluage	- Résistances chauffantes - Aéronautique
X8CrNi 25-21	1.4845	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Très bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Résistance à l'oxydation à chaud jusqu'à 1100°C	Equipements de fours

5) Soudage des aciers inoxydables martensitiques - Acier inox martensitique

a) Les aciers inoxydables martensitiques :

Par exemple X40Cr13, X70Cr15, X60CrMoNi13-4...

Ils contiennent de **13 à 17% de Chrome**, de **0,1 à 1% de Carbone** et éventuellement de **1 à 4% de Nickel**. On peut augmenter les caractéristiques mécaniques avec une addition d'éléments d'alliages tels que le cuivre, titane, niobium, aluminium, molybdène, ce qui provoque des précipitations durcissant l'alliage. On les **recommande pour leur excellente résistance à l'oxydation à chaud** et ils sont parfaitement inoxydables après trempe.

b) La structure martensitique :

Ces aciers prennent la trempe par refroidissement rapide. **Leur soudage implique des précautions particulières.**

A l'échauffement et au refroidissement, les aciers subissent des transformations :

Etat Ferritique==>Austénitique==>Ferrite==>Austénique==>Ferritique

Cette transformation peut se comparer aux aciers soudables d'usage général avec :

- risques de ségrégation importante à la solidification
- précipitation de carbure de chrome dans la ferrite.

Le risque de fissuration à froid croît avec la teneur en carbone. Si la teneur en carbone est supérieure à 0,1%, un préchauffage de 250°C est nécessaire. Au-delà de 0,2% et pour un soudage de pièces de forte épaisseur, un préchauffage de 400°C est nécessaire. Celui-ci est complété par un post-chauffage et un traitement thermique de revenu.

Dans le cas où un traitement thermique après soudage s'avère impossible, on peut employer des électrodes austénitiques au Chrome et Nickel. On utilisera alors des électrodes de faible diamètre, avec une faible intensité pour réduire l'échauffement du métal de base.

La structure martensitique est sensible à la fissuration en dessous de 400°C d'où :

- préchauffage nécessaire (200 - 300°C)
- choix des produits d'apport à **faible teneur en hydrogène**
- **postchauffage à 300°C**
- **traitement thermique après soudage** recommandé (~750 °C)

c) Exemples de nuances d'aciers inoxydables martensitiques:

Désignation européenne selon NF EN 10088-2	Désignation numérique	Aptitude à la conformation à froid (pliage, emboutissage, profilage)	Soudabilité	Résistance à la corrosion	Particularités		Exemples d'applications
X20Cr13	1.4021	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne	Bonne aptitude à la trempe	Livraison possible à l'état trempé	- Outils tranchants - Coutellerie - Pièces mécaniques - Outils de bâtiment
X30Cr13	1.4028	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne			- Feuillards de rechargement - Coutellerie - Outils tranchants - Pièces d'usure
X46Cr13	1.4034	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne			- Coutellerie - Instruments de chirurgie

Section N°2 : Métallurgie du soudage

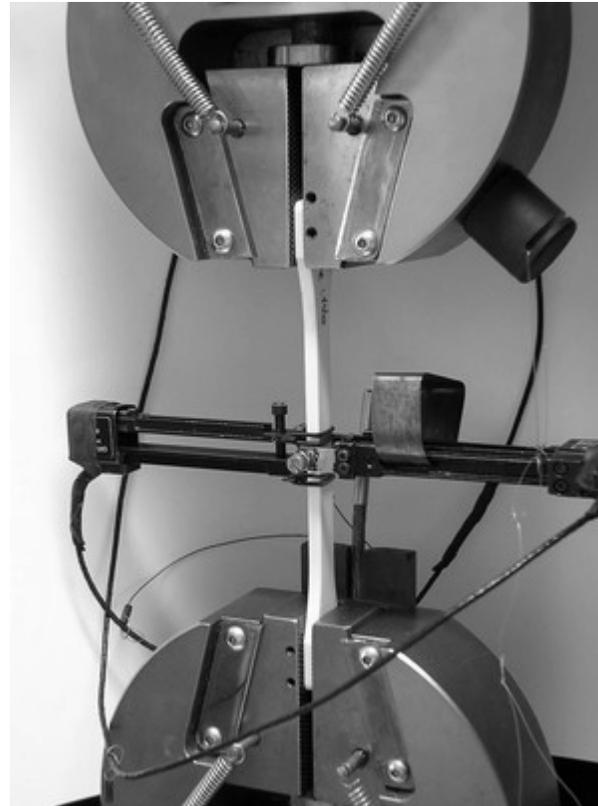
Chapitre 6 : Essai de traction / Essai de résilience/ Essai de dureté

Sommaire:

- 1) Principe de l'essai de traction(+Vidéos)
- 2) Déformation plastique
- 3) Terminologie pour l'essai de traction
- 4) Les éprouvettes de traction normalisées
- 5) Déroulement d'un essai de traction
- 6) Comportement du matériau en cours d'essai, formules
- 7) Limite apparente d'élasticité, ($R_p 0,2 - R_e 0,2$)
- 8) Diagrammes ou courbes de traction
 - 8-1) Diagramme conventionnel
 - 8-2) Diagramme rationnel
- 9) Eprouvettes normalisées
 - 9-1) Eprouvette prismatique
 - 9-2) Eprouvettes cylindriques
 - 9-3) Eprouvettes sans rayon
- 10) Influence de l'écrouissage (Effet Bauschinger)

1) PRINCIPE DE L'ESSAI DE TRACTION

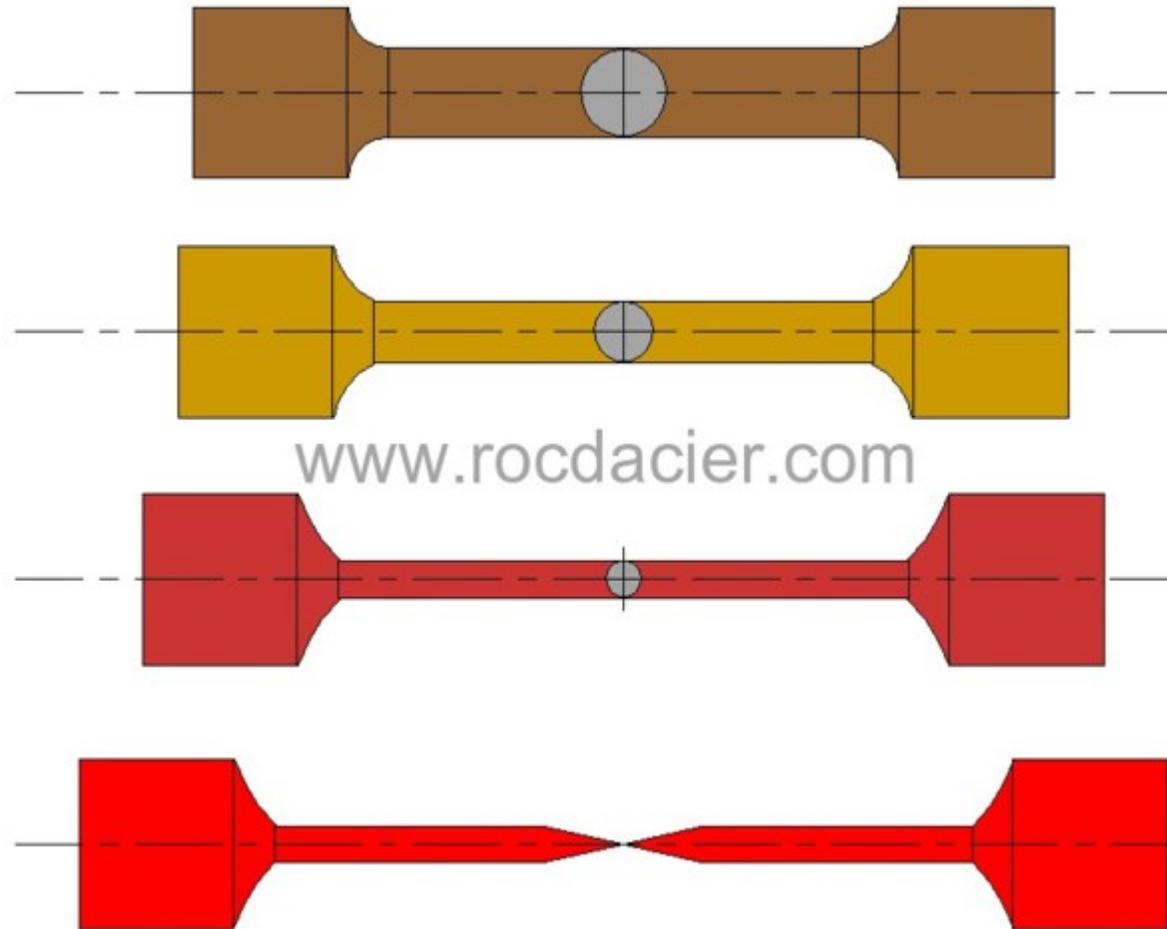
L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette normalisée à un effort de traction et généralement jusqu'à sa rupture. Sauf indications contraire, l'essai est réalisé à température ambiante (20°C). L'essai est réalisé sur une machine qui enregistre simultanément les efforts(F) et les allongements (L-Lo).



L'essai de traction est régi par la norme NF EN 10002-1 d'Octobre 2001 (ou NF A 03-151)

2) DEFORMATION PLASTIQUE

La déformation plastique est la plus courante. C'est une déformation hétérogène qui conduit au phénomène de striction*.

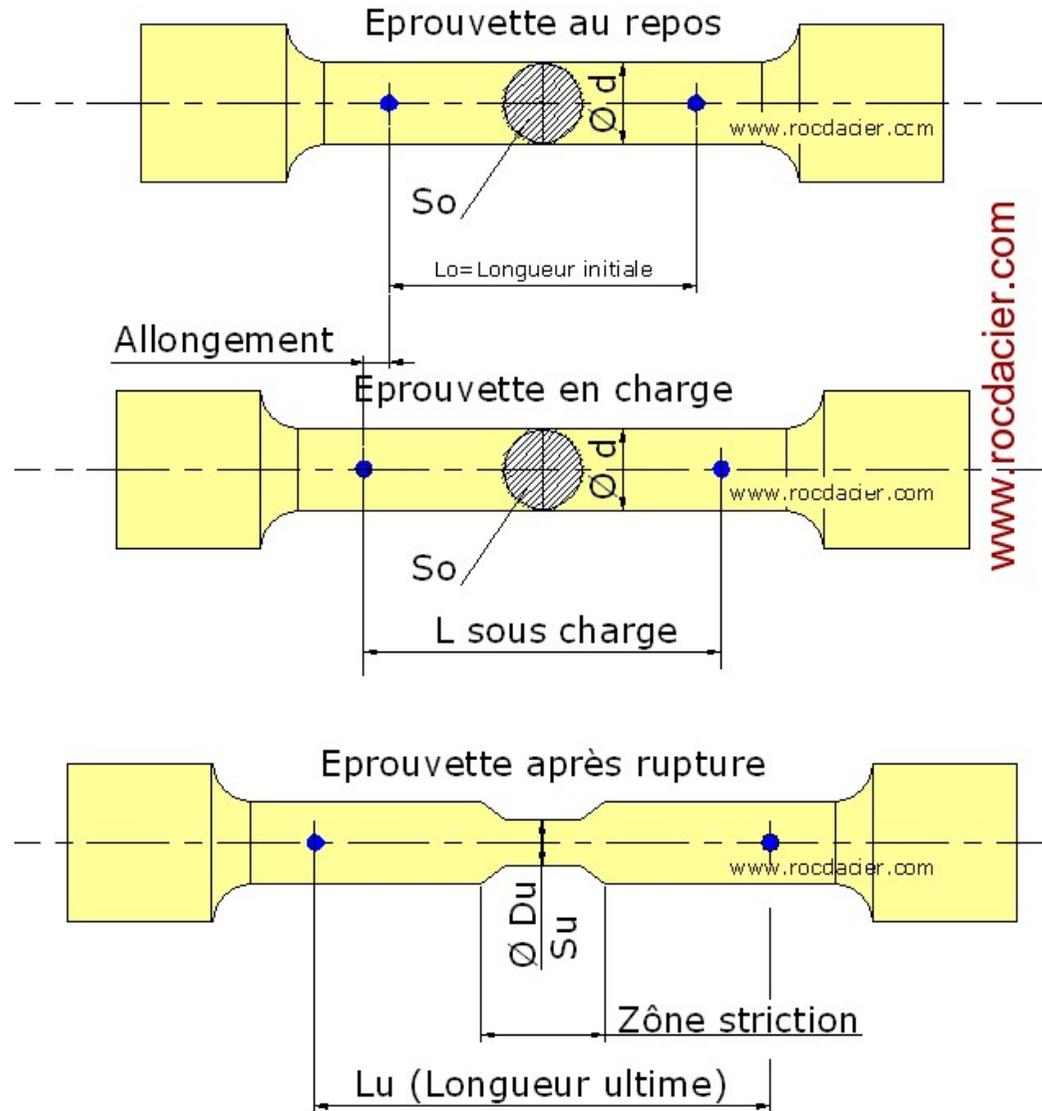


*coefficient de striction (Z)

variation maximale de l'aire de la section transversale produite par l'essai ($S_0 - S_u$) exprimée en pourcentage de l'aire de la section initiale (S_0)

En déformation plastique sous un effet de traction, le diamètre de l'éprouvette se réduit (striction)

3) TERMINOLOGIE POUR L'ESSAI DE TRACTION



L_0 : Longueur initiale entre repères

L_u : Longueur ultime entre repères (après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci en rapprochant soigneusement les deux fragments)

S : Section initiale, c'est l'aire de la section droite de l'éprouvette avant la rupture.

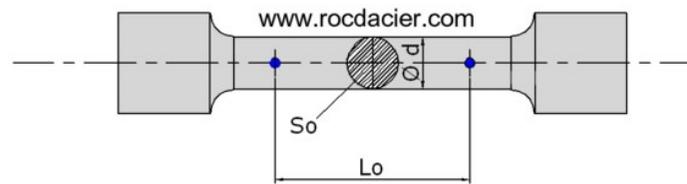
S_u : Section ultime, c'est l'aire de la section minimale après la rupture de l'éprouvette.

F_m : C'est la charge maximale supportée pendant l'essai.

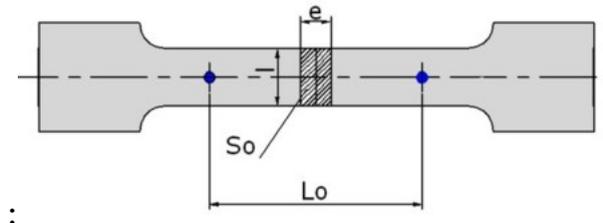
F_u : C'est la charge ultime à l'instant de la rupture.

4) LES EPROUVETTES DE TRACTION NORMALISEES

Eprouvettes cylindriques : $S_0 = \pi d^2 / 4$ avec $d > 4$



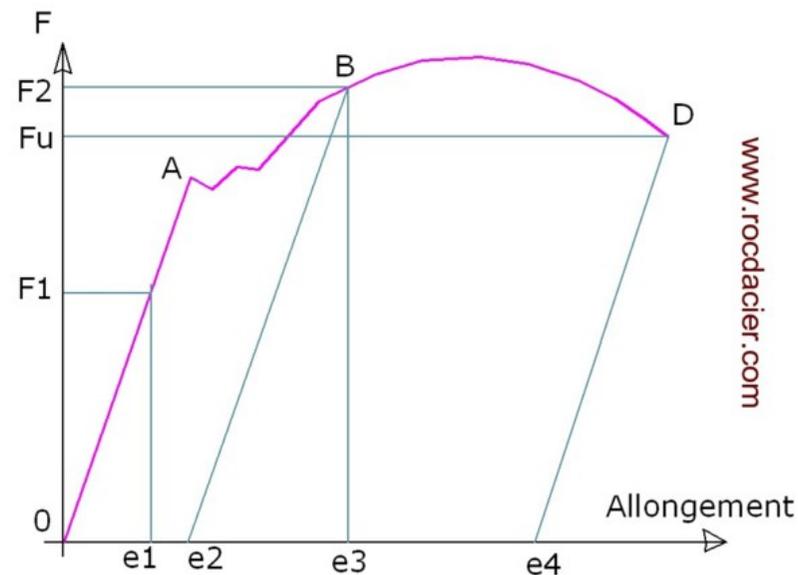
Eprouvettes prismatiques ; $S_0 = l \cdot e$ avec $l/e < 8$

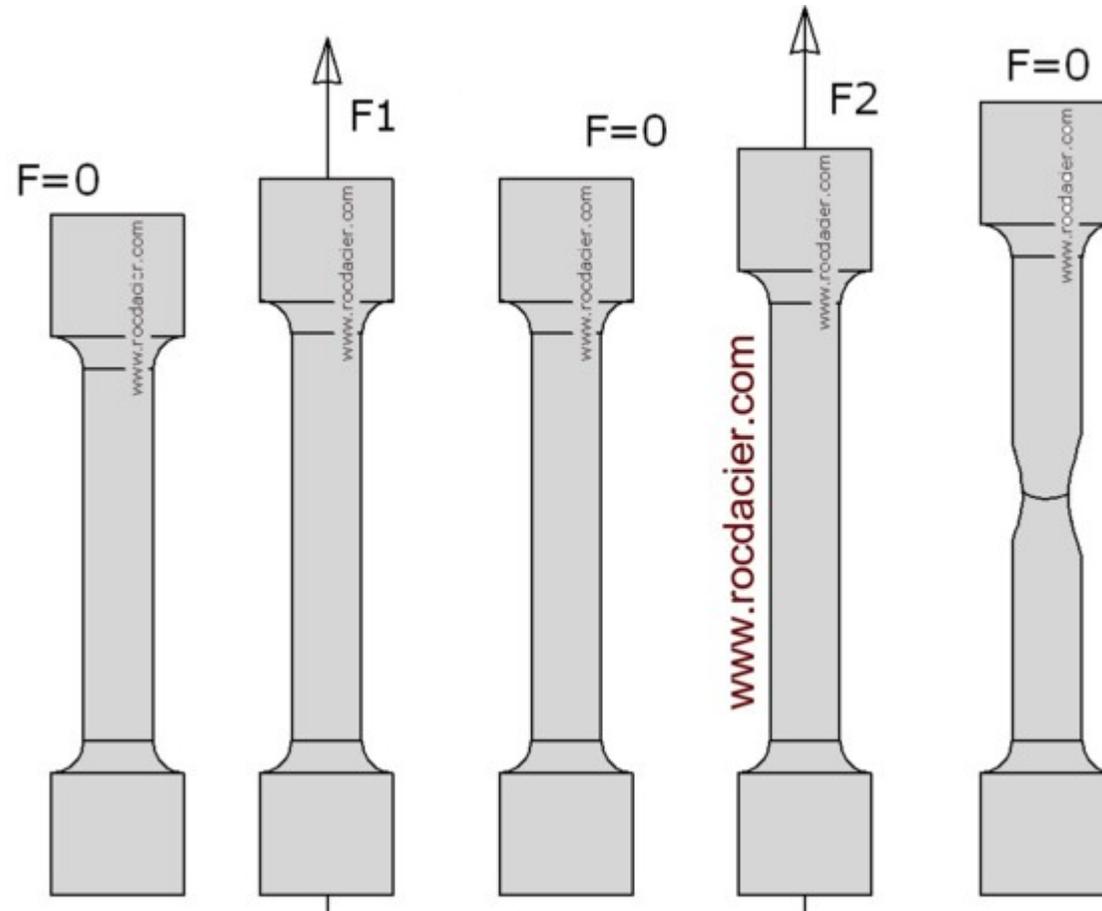


La longueur calibrée L_0 (en mm) de l'éprouvette est liée à sa section S_0 (en mm^2) par la relation :
 $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$

5) DEROULEMENT D'UN ESSAI DE TRACTION

- 1) Eprouvette au repos, $F=0$, allongement=0.
- 2) On tire sur l'éprouvette avec une force F_1 qui entraîne un allongement e_1 .
- 3) On supprime l'effort et l'allongement disparaît (cas où nous sommes encore dans le domaine élastique du matériau)
- 4) On tire avec une force plus importante F_2 qui entraîne un allongement e_3
- 5) On supprime la force F_2 , mais l'éprouvette ne retrouve pas son état initial. (nous avons dépassé le seuil d'élasticité et sommes entrés dans le domaine plastique.). Il reste un allongement e_2
- 6) On exerce à nouveau un effort de traction supplémentaire plus important que l'effort F_2 . Après avoir atteint un maximum, la force décroît et l'éprouvette s'amincit en un endroit (zone de striction), puis il y a rupture. Après cette rupture, on mesure $e_4 = L_u - L_0$





6) COMPORTEMENT DU MATERIAU EN COURS D'ESSAI, FORMULES

Limite apparente d'élasticité (Mpa) : R_e ou $R_{e0,2} = F_e/S_0$

Résistance à la rupture (Mpa) : R_r ou $R_m = F_m/S_0$

Allongement (%) : $A\% = (L_u - L_0) \times 100 / L_0$

Coefficient de striction (%) : $Z\% = (S_u - S_0) \times 100 / S_0$

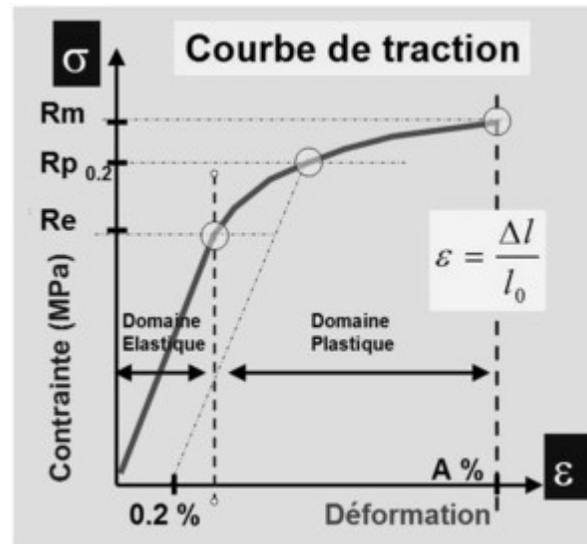
Module d'élasticité longitudinale (%) : $E = F_0 \times L_0 / S_0 \times \Delta L$ (avec $\Delta L = L - L_0$)

(Module d'Young)

Loi de Hooke : Dans la zône élastique, l'effort F de traction est proportionnel à l'allongement ΔL

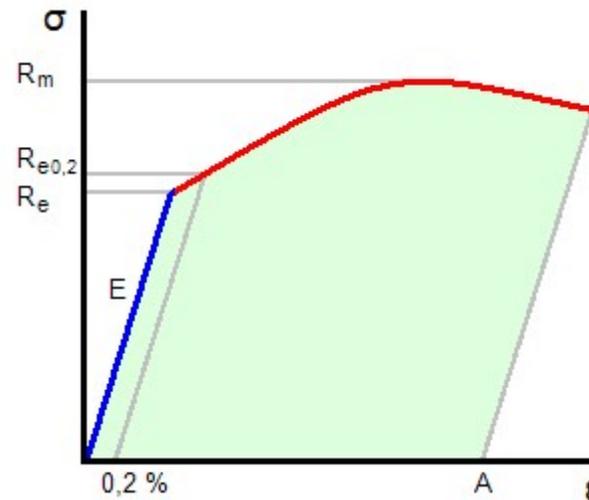
La contrainte normale σ est proportionnelle à ϵ

$\sigma = E \cdot \epsilon$ avec $\epsilon = \Delta L / L$



7) LIMITE APPARENTE D'ELASTICITE, (Rp 0,2 - Re 0,2)

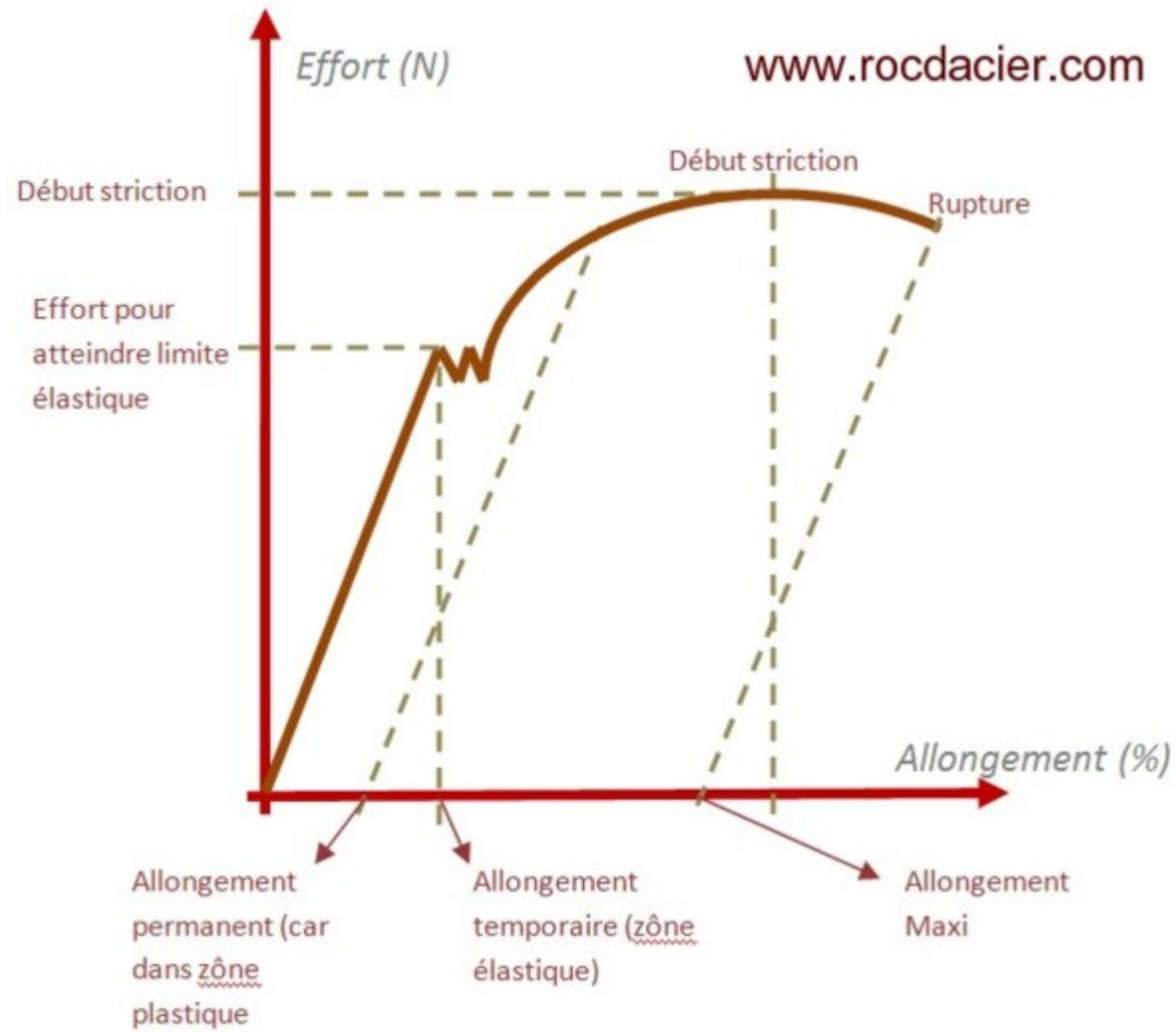
Dans certains cas, la limite d'élasticité n'est pas apparente. C'est le cas pour des matériaux tels que les aciers austénitiques, l'aluminium,...On applique une légère déformation permanente égale à 0,2% de L0 pour définir Rp 0,2.(ou Re 0,2)



8) DIAGRAMMES OU COURBES DE TRACTION

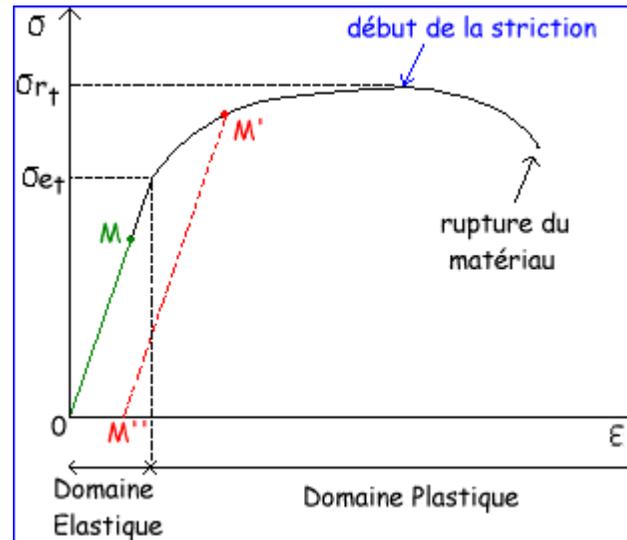
8-1) Diagramme conventionnel :

Le diagramme conventionnel de traction présente en abscisses et en ordonnées, la résistance unitaire et l'allongement provoqué par la charge, aux valeurs S0 et L0 de l'éprouvette.



8-2) Diagramme rationnel :

Le diagramme rationnel porte en abscisses la déformation rationnelle et en ordonnées la contrainte vraie (qui tient compte de la variation de la section au cours de l'essai)

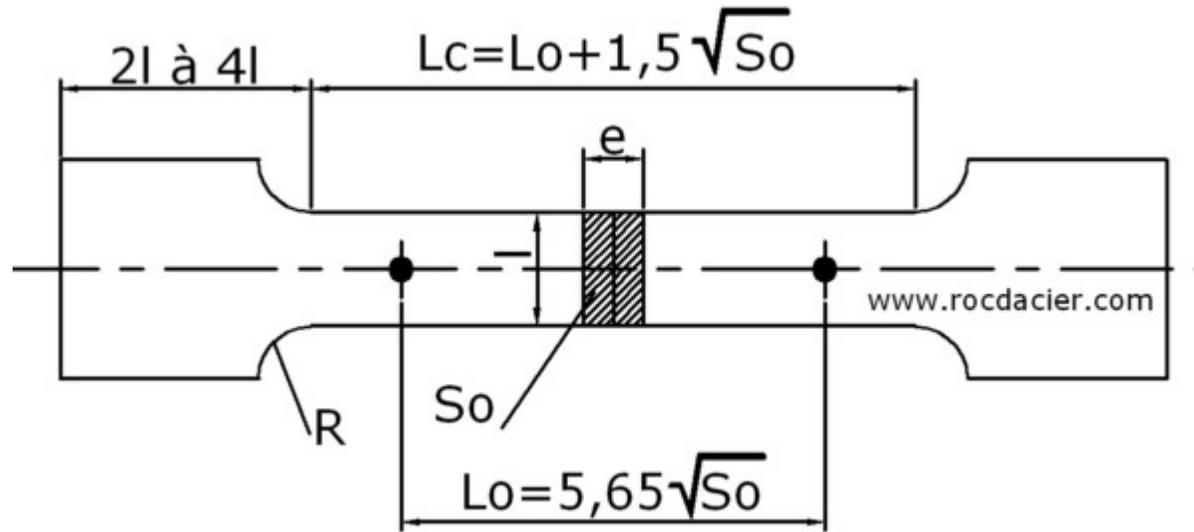


9) ÉPROUVETTES NORMALISEES

9-1) Eprouvette prismatique :

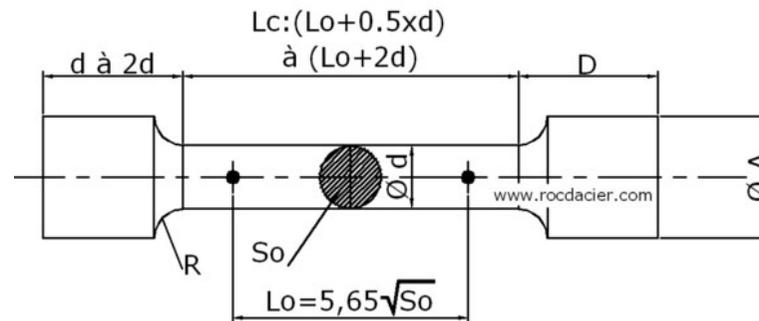
Elles sont usinées dans le sens longitudinal du cordon de soudure pour définir les caractéristiques mécaniques du métal de base (CCPU).

Elles sont aussi usinées dans le sens transversal des soudures pour tester si le cordon résiste aux charges. Dans ce cas là, le cordon devra être au moins aussi résistant que le métal de base.



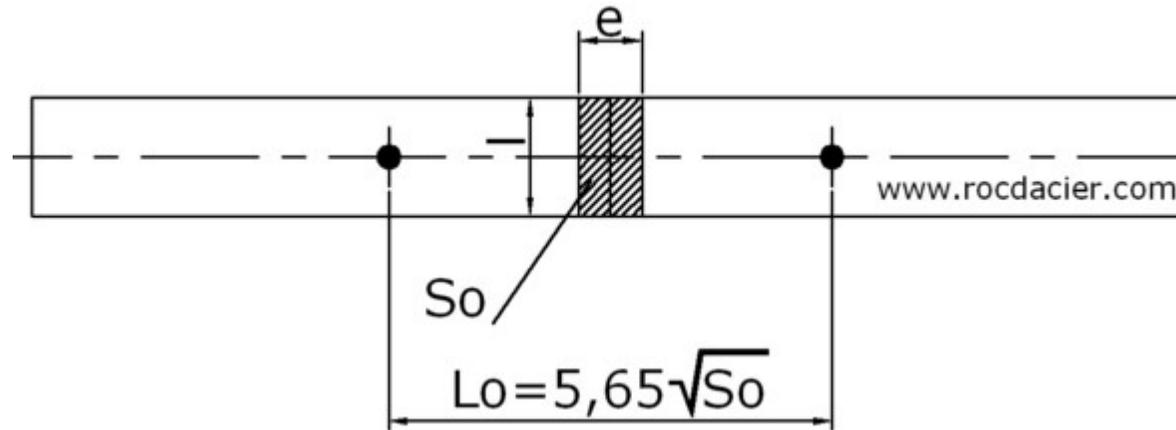
9-2) Epruvettes cylindriques :

Elles sont usinées dans le sens longitudinal du cordon de soudure pour définir les caractéristiques mécaniques du métal d'apport.



9-3) Eprouvettes sans rayon :

Si le banc de traction utilise les épreuves dans des mors de serrage, dans ce cas, les épreuves ne nécessitent pas d'usinage ou de fraisage pour les rayons. Les épreuves sont alors totalement rectangulaires.



Elles sont utilisées dans les mêmes fins que les épreuves prismatiques.

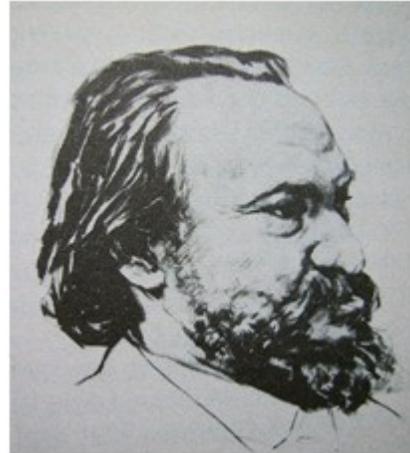
10) INFLUENCE DE L'ECROUISSAGE (EFFET BAUSCHINGER*)

En règle générale, un matériau métallique soumis à une déformation plastique de traction, consécutive à une déformation plastique de compression, présente une limite d'élasticité inférieure et réciproquement. Ce phénomène est appelé l'effet Bauschinger et se manifeste dans tous les procédés de formage à température ambiante.

Il dépend :

- du taux de déformation
- de la composition chimique du matériau
- de l'hétérogénéité du matériau

Johann Bauschinger (11 juin 1834 à Nuremberg - 25 novembre 1893 à Munich) était un mathématicien, constructeur et professeur de mécanique à l'université technique de Munich de 1868 jusqu'à sa mort. L'effet Bauschinger en sciences des matériaux est nommé d'après lui. Il était aussi le père de l'astronome Julius Bauschinger (1860-1934).



COURS TECHNOLOGIE : Essai de résilience - Résistance au choc !

Dans la suite de notre lancée sur les essais destructifs, voici un cours sur les essais de résilience. Inspiré du Memotech Structures Métalliques, d'infos glanés sur le site www.soudeur.com, d'un cours d'un collègue et du précis de Construction mécanique, voici la synthèse que l'on obtient.

Au sommaire:

- 1) Définition du principe de l'essai
- 2) Les éprouvettes pour la résilience
 - 2-1) Eprouvettes CHARPY U
 - 2-2) Eprouvettes CHARPY V
- 3) Schématisation de l'essai de résilience
- 4) Calcul de la résistance K_{cv}
- 5) Différents types d'éprouvettes CHARPY V
- 6) Positionnement d'une éprouvette sur une machine
- 7) Températures pour les essais de résilience
- 8) Evolution de la résilience en fonction des températures.

1) DEFINITION DU PRINCIPE DE L'ESSAI

L'**essai de résilience** (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. La **résilience** est définie par la lettre K (Joules/cm²). L'**essai** se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la **résistance au choc** du matériau. **Normes** : EN 10045 :1990 et EN 875

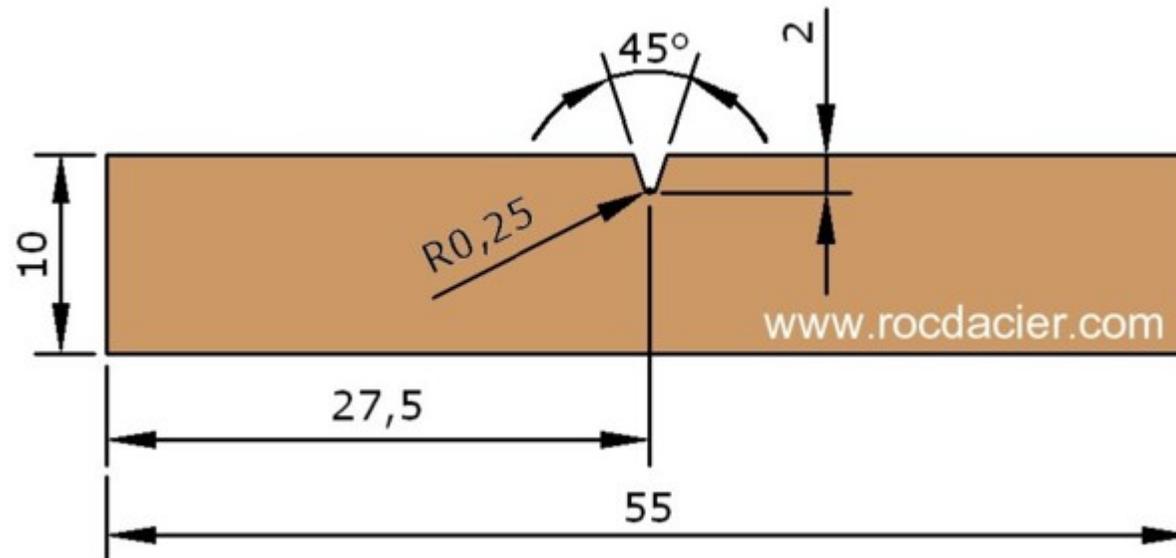
2) LES EPROUVETTES POUR LA RESILIENCE

2-1) Eprouvettes CHARPY U

Une **éprouvette** est un barreau usiné de section carrée de 10 mm de coté et dont la longueur est 55 mm. L'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La **résilience** est alors mesurée et précisée selon le **symbole** Kcu

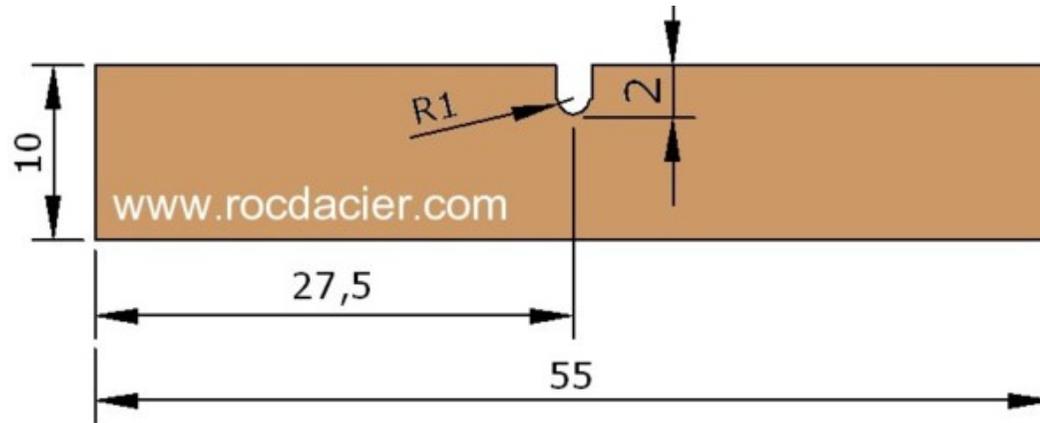
2-2) Eprouvettes CHARPY V

Pour un essai avec une **éprouvette Charpy V**, l'**éprouvette** sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les **éprouvettes Charpy U**. On précise par le symbole Kcv l'**essai de résilience en V**.

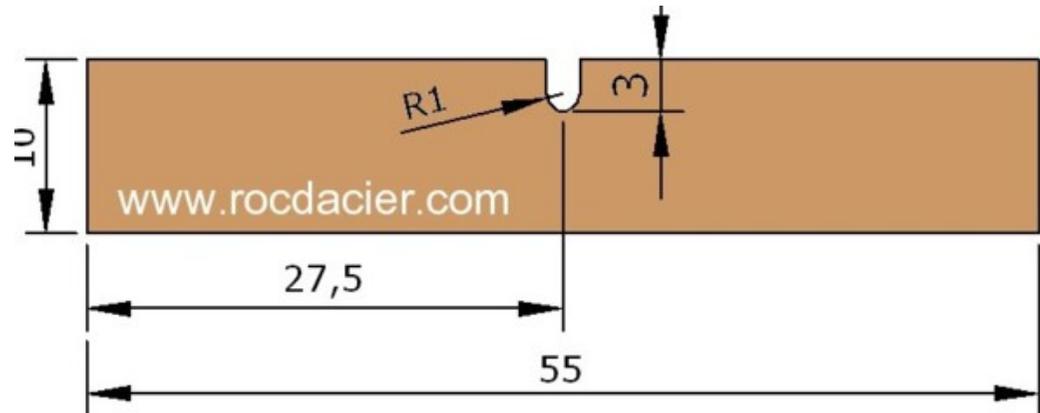


Les éprouvettes **Mesnager** et **DVM** sont identiques avec pour seule variante la profondeur de l'entaille (3mm et 2mm)

Eprouvette **Mesnager**:



Eprouvette **DVM**:



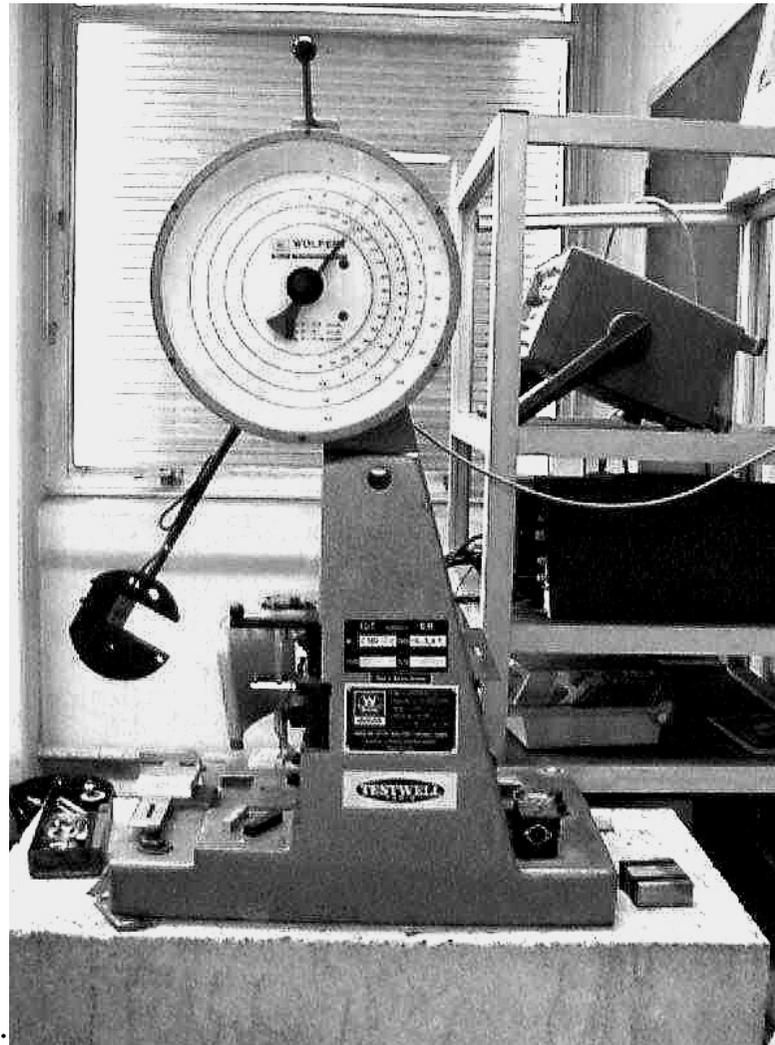
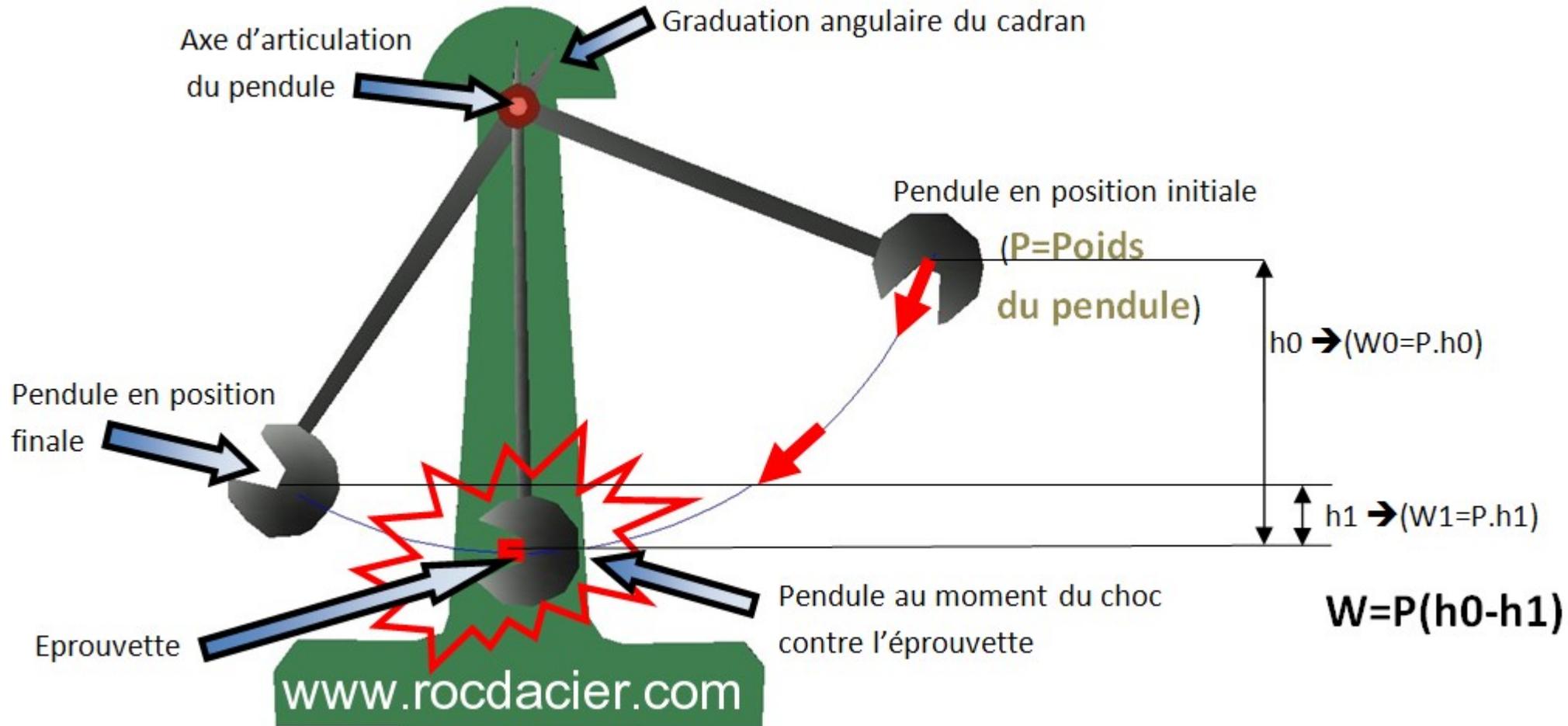


Photo d'un mouton pendule Charpy :

3) SCHEMATISATION DE L'ESSAI DE RESILIENCE



- Au départ, le **pendule** est placé à une hauteur paramétrée qui devra délivrer une **énergie normalisée** de 294 Joules (si l'on tient compte de la gravité de $9,81 \text{ m/s}^2$)
- Le **pendule est libéré**, ce qui grâce à son propre poids, provoquera un **choc**.
L'**éprouvette encaissera une partie du choc, mais sera brisée**.
- Le **pendule** continuera dans son élan jusqu'à une certaine hauteur, ce qui permettra de mesurer l'**énergie absorbée** par l'**éprouvette**.
- L'**énergie absorbée** est calculée grâce à $W=P (h_0-h_1)$ (P en N)

4) CALCUL DE LA RESISTANCE KcV

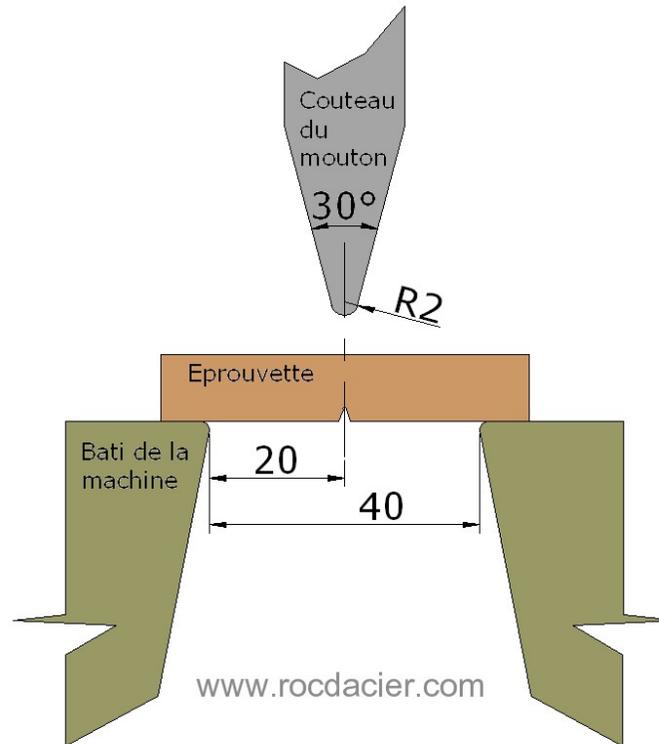
$$KcV (\text{J/cm}^2) = W/S$$

Avec :W en Joules et S en cm^2

5) DIFFERENTS TYPES D'ÉPROUVETTES CHARPY V

- Normales (55x10x10) :Surface de rupture :0,8 cm^2
- Réduites (55x7,5x10) :Surface de rupture :0,6 cm^2
- Réduites (55x5x10) : Surface de rupture :0,4 cm^2

6) POSITIONNEMENT D'UNE EPROUVETTE SUR UNE MACHINE

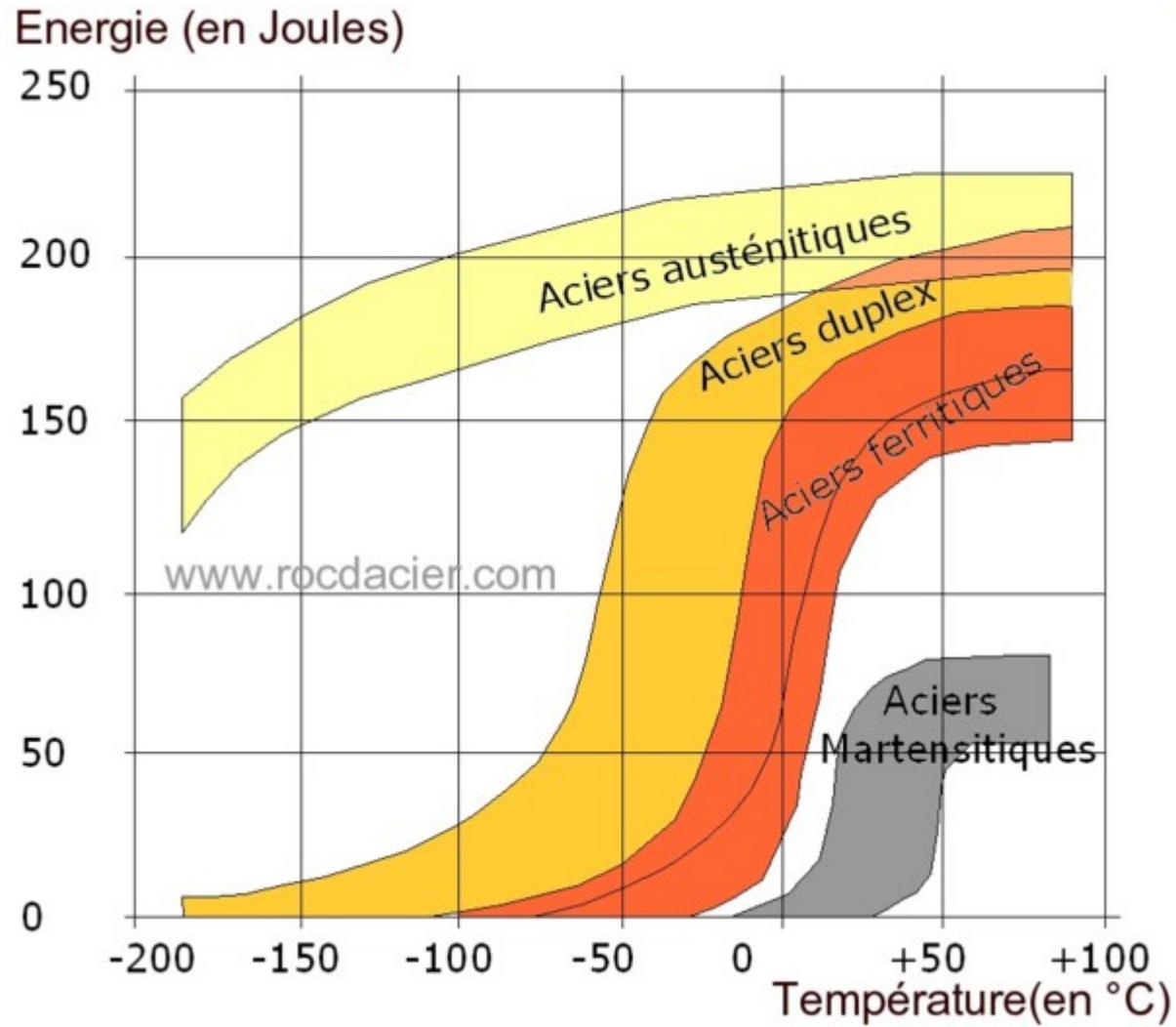


7) TEMPERATURES POUR LES ESSAIS DE RESILIENCE

Généralement les essais sont réalisés à température ambiante (20°C) et à des températures inférieures à 0°C . Des gaz ou liquides sont utilisés pour abaisser les températures des éprouvettes si nécessaire (alcool, fréon, azote liquide)

Pour la résilience Charpy V(KcV), plutôt utilisée pour des températures inférieures à 0°C , aujourd'hui tends à se développer même à température ambiante.

8) ÉVOLUTION DE LA RESILIENCE EN FONCTION DES TEMPERATURES.



COURS TECHNOLOGIE : Essai de dureté - Brinell - Vickers -Rockwell !

Dans la suite des essais destructifs, voici le cours sur les essais de dureté. Nous aborderons, les essais **BRINELL**, **ROCKWELL** et **VICKERS**.

Sommaire:

- 1) Principe de l'essai de dureté
- 2) A quoi sert l'essai de dureté ?
- 3) Normes à utiliser
- 4) Essai de dureté - Essai BRINELL (HB)
- 5) Essai de dureté - Essai ROCKWELL (HR)
- 6) Essai de dureté - Essai VICKERS (HV)
- 7) L'essai de dureté sur les assemblages soudés
- 8) Que dit la norme EN 288-3, qui régit l'essai de dureté ?
- 9) Valeurs HV10 maximales admissibles (selon NF EN 288-3:1992/A1:1997)
- 10) Positionnement type de l'essai (selon NF EN 288-3:1992/A1:1997)
- 11) Tableau de conversion (selon NF EN 288-3:1992/A1:1997)

1) PRINCIPE DE L'ESSAI DE DURETE :

L'essai de dureté a pour but de déterminer la dureté superficielle des métaux. Il consiste à enfoncer un pénétrateur, dont les formes et les dimensions varient en fonction du type d'essai, dans le métal à tester. La charge est constante et on mesure la surface ou la profondeur de l'empreinte laissée dans le matériau.

L'empreinte sera d'autant plus importante que le matériau sera mou.

2) A QUOI SERT L'ESSAI DE DURETE ?

L'essai de dureté est relativement économique (pas d'éprouvettes à réaliser). On peut mesurer la dureté sur la pièce elle-même. Cet essai peut renseigner sur la résistance à l'usure par frottement, la capacité à s'usiner, l'homogénéité du matériau, l'efficacité des traitements thermiques.

En soudage, les duretés sont mesurées dans des zones précises :

- dans la soudure,
- dans les zones de liaison,
- les zones thermiquement affectées (ZAT)
- les métaux de base.

Machine pour essai de dureté :



3) NORMES A UTILISER :

Essai de dureté BRINELL : NF EN ISO 6506-1

Essai de dureté VICKERS : NF EN ISO 6507-1

Essai de dureté ROCKWELL : NF EN ISO 6508-1

Conversions de dureté de l'acier : NF A 03-172

Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques : EN 288-3

4) ESSAI DE DURETE - ESSAI BRINELL (HB) :

Sous une charge F, le pénétrateur, qui est une bille d'acier (HBS) ou de carbure de tungstène (HBW), fait une empreinte de diamètre d dans le matériau testé. Cet essai convient pour des épaisseurs supérieures à 10mm et les produits plats. La charge F est maintenue 15 secondes.

La dureté BRINELL se mesure selon la formule suivante :

$$HB = (0,102 \times 2F) / (\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}))$$

Avec :

- $F = K \times 9.81 \times D^2$

K=30 pour les aciers,

K=2,5, 5, ou 10 pour les aluminiums et ses alliages,

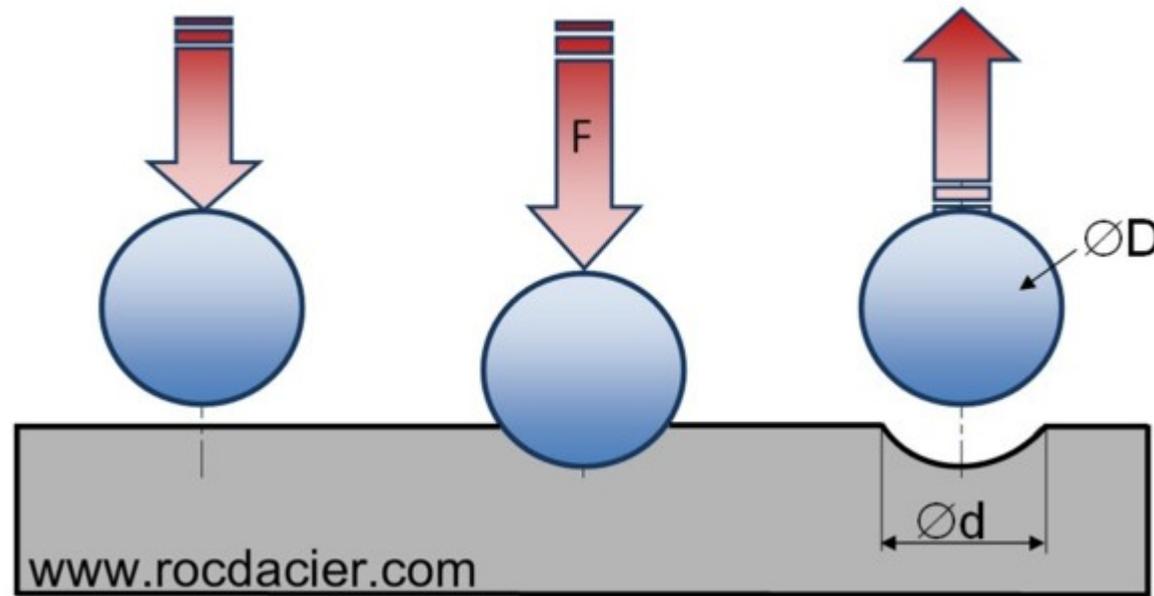
K=5, 10, ou 30 pour le cuivre et ses alliages

- D= Diamètre de la bille en mm

- F = Charge d'essai en Newtons

- d = Diamètre de l'empreinte

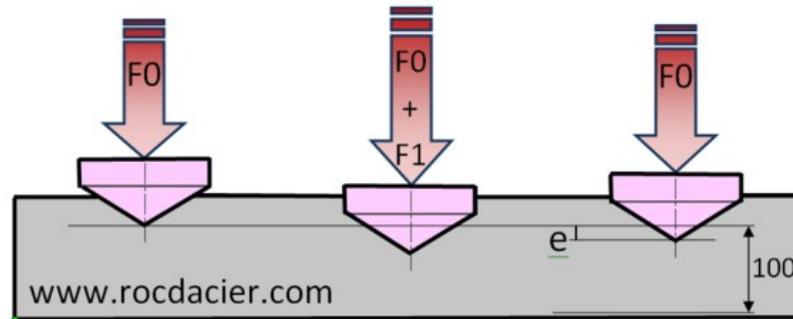
En utilisation normale, le diamètre D de la bille sera de $10 \pm 0,0045$, et la charge sera de 29420 N pour l'acier. On mesurera que d soit compris entre 0,2 à 0,5D.



5) ESSAI DE DURETE - ESSAI ROCKWELL (HR) :

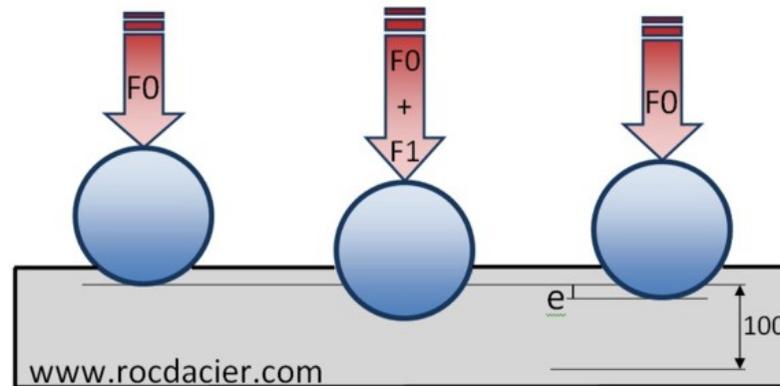
L'essai de dureté ROCKWELL consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur qui peut être un cône ou une bille et mesurer l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration. Cet essai permet une lecture directe mais ne convient pas aux pièces moulées ou à gros grains.

Il existe plusieurs essais de dureté ROCKWELL, les plus courants sont l'essai ROCKWELL HRC et l'essai ROCKWELL HRB : L'essai ROCKWELL HRC se réalise avec un cône de diamant d'angle de 120° et un arrondi de 0,2mm. La charge à appliquer est de 1373N.



$$HRC = 100 - (e_2 - e_0) / (0,002)$$

L'essai ROCKWELL HRB se réalise avec une bille en acier trempé. La charge appliquée est de 883 N. La bille à un diamètre de 1,5875 mm.



$$HRB = 130 - (e_2 - e_0) / (0,002)$$

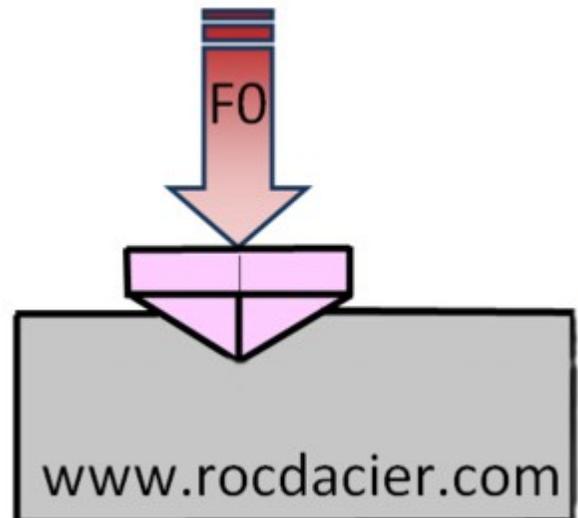
L'essai de dureté ROCKWELL superficielle se réalise avec un cône de diamant ou une bille.

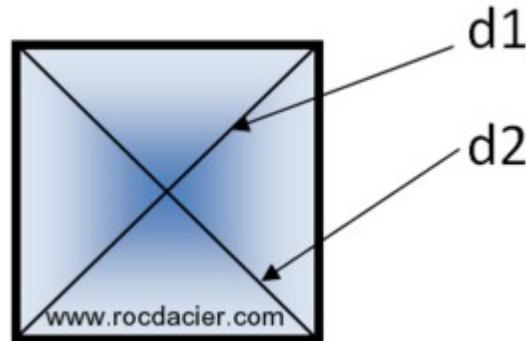
$$HR(N,T,W)=100-(e2-e0)/(0,001)$$

Avec : $e = e2 - e0$ et $e2$ et $e0$ en mm

6) ESSAI DE DURETE - ESSAI VICKERS (HV) :

L'essai de dureté VICKERS consiste à imprimer sur la surface de la pièce un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée d'angle au sommet de 136° sous une charge F et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée après suppression de la charge. Cet essai est le plus précis et permet de tester des pièces fines. La surface doit être rectifiée ou polie.





$$HV = (0,189 \times F) / d^2$$

Avec $d = (d1 + d2) / 2$

7) L'ESSAI DE DURETE SUR LES ASSEMBLAGES SOUDES. :

L'essai de dureté sur les soudures se pratique a température ambiante (20°C) et avec VICKERS. L'essai est réalisé sur une coupe de la soudure. Un polissage et une attaque auront été réalisés au préalable de façon à faire apparaitre clairement la morphologie du cordon (soudure, zones de liaisons, ZAT, etc.).

Pour HV5, la charge appliquée sera de 49,2 N et pour HV10, la charge sera de 98,07 N. La charge est maintenue entre 10 et 15 secondes.

8) QUE DIT LA NORME EN 288-3, QUI REGIT L'ESSAI DE DURETE ?

La méthode Vickers HV10 est utilisée. Des empreintes sont exécutées dans la zone fondue, les ZAT et le métal de base avec pour objectif de mesurer et d'enregistrer les plages de valeurs relevées sur l'assemblage soudé. L'essai comporte des lignes de filiations dont l'une d'entre elle doit être au maximum à 2 mm sous la surface. Par ligne de filiation il doit y avoir un minimum de trois empreintes pour chacune des zones rencontrées : le métal fondu, les deux zones affectées thermiquement et les deux côtés du métal de base. La première empreinte de

la ZAT doit être placée au plus près de la zone de liaison.

Les résultats de l'essai de dureté doivent satisfaire au tableau suivant :

9) VALEURS HV10 MAXIMALES ADMISSIBLES (SELON NF EN 288-3:1992/A1:1997)

Groupes d'acier	Soudure monopasse bout à bout ou d'angle		Soudures multipasses bout à bout ou d'angle	
	Non traité thermiquement	Traité thermiquement	Non traité thermiquement	Traité thermiquement
1 ⁽¹⁾ , 2	380	320	350	320
3 ⁽²⁾	450	(3)	420	(3)
4, 5	(3)	320	(3)	320
6	(3)	350	(3)	350
7 – Ni ≤ 4 %	(3)	300	320	300
Ni > 4 %	(3)	(3)	400	(3)
8	(3)	(3)	(3)	(3)

NOTE 1 : Si l'essai de dureté est requis.
 NOTE 2 : Pour les aciers dont la limite élastique minimale $R_e > 885 \text{ N/mm}^2$, une valeur spéciale doit être déterminée par agrément entre les parties.
 NOTE 3 : Valeur à déterminer par agrément entre les parties.

10) POSITIONNEMENT TYPE DE L'ESSAI (SELON NF EN 288-3:1992/A1:1997)

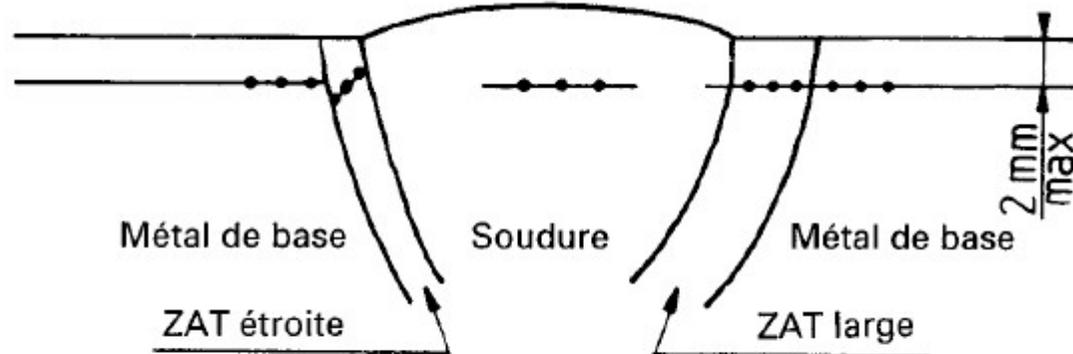


Figure 10 : Exemple type pour l'essai de dureté

11) TABLEAU DE CONVERSION (SELON NF EN 288-3:1992/A1:1997)

Section N°3 : Soudage des tubes en acier

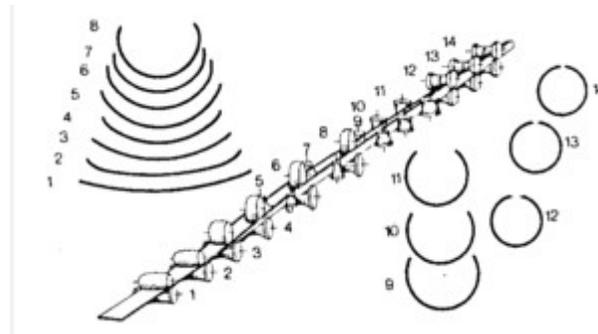
Elaboration des tubes en acier ! Caractéristiques des tubes ! Assemblage des tubes !

- 1) Elaboration des tubes avec ou sans soudure:
- 2) Caractéristiques de résistance des tubes:
- 3) Pourquoi employer le tube:
- 4) Préparation des tubes pour l'assemblage:
- 5) Assemblages des tubes aplatis et renforcement des tubes
- 6) Assemblage des tubes carrés et rectangulaires, croisement de barres, assemblage bout à bout soudés ou démontables.

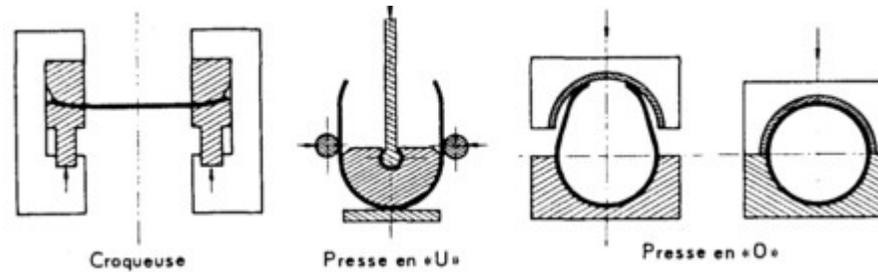
1) ELABORATION DES TUBES AVEC OU SANS SOUDURE:

1-1) Tubes soudés :

Il existe deux manières d'élaborer les tubes soudés: - par procédé continu pour des tubes de diamètres inférieurs ou égaux à 406,4 mm. La bande de tôle passe dans une série de cages de galet qui la déforme progressivement de façon à obtenir un tube fermé. Ce tube est ensuite soudé sans apport de métal (par résistance, par rapprochement, etc. ...).



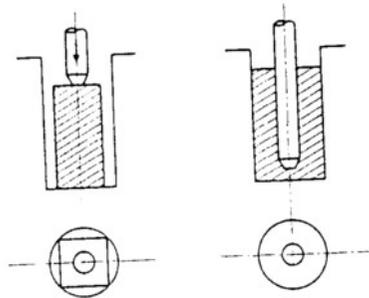
-par procédé discontinu pour les tubes de diamètres supérieurs ou égaux à 406,4 mm. Après grenailage, rabotage et croquage de ses rives, la tôle est mise en forme par des presses puissantes. Le tube est ensuite soudé avec apport de métal par arc immergé sous flux protecteur à l'intérieur et à l'extérieur.



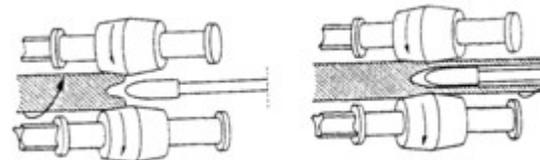
1-2) Les tubes sans soudures:

On utilise comme produit de départ un produit plein qui peut être un lingot, un rond, un bloom ou une billette. Des opérations successives permettent de rendre malléable l'acier (chauffage), de faire un trou (perçage), de réduire l'épaisseur (laminage). Le perçage et le laminage s'effectuant par déformation et sans enlèvement de matière les demi produits sont préalablement portés à une température de 1250°C environ.

Perçage à la presse:



Perçage au laminoir oblique:

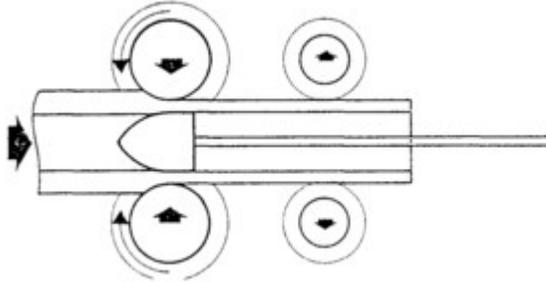


Les tubes sans soudures réalisés au laminoir à pas de pèlerin:

L'ébauche, enfilée sur une tige métallique pleine, est écrasée par des cylindres en formes de cames.

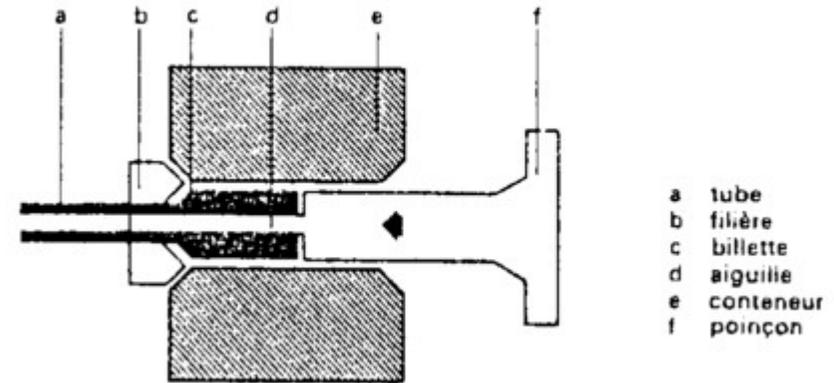
Tubes sans soudures réalisés à la presse à filer:

L'ébauche enfermée dans un «conteneur» est poussée par un poinçon terminé par une aiguille, actionné par une presse très puissante. Le métal est forcé de sortir du «conteneur» en «filant» entre l'aiguille et une filière lubrifiée avec de la poudre de verre.



Les tubes sans soudures réalisés au laminoir automatique Stiefel:

Le métal est laminé entre une poire placée à l'intérieur de l'ébauche et des cylindres à gorge torique.



2) CARACTERISTIQUES DE RESISTANCE DES TUBES:

2-1) Résistance à la torsion des tubes :

Les tubes résistent assez bien en torsion, d'ailleurs, les formules théoriques démontrent que, pour un même poids, la résistance à la torsion d'un tube rond courant est de 100 à 150 fois plus élevée que celle d'un autre profil, quel qu'il soit. Cette qualité donne une grande rigidité transversale aux poutres ou ouvrages en tubes. L'utilisation de tubes à aussi pour conséquence d'augmenter la résistance au déversement des charpentes, ce qui permet la réalisation d'ossatures en forme de voûtes ou de coupôles par exemple. Les tubes carrés sont légèrement moins résistants que les tubes ronds mais leur résistance est cependant de 60 à 100 fois celle d'un autre profilé de même masse au mètre.

2-2) Résistance au flambement et à la compression des tubes:

Les tubes lorsqu'ils sont soumis à des efforts de compression, s'ils sont de grande longueur, et s'ils ne sont pas maintenus latéralement, fléchissent dans le plan dans lequel la résistance est la plus faible. C'est ce phénomène que l'on appelle flambement.

2-3) Résistance à la flexion des tubes:

Les tubes ronds de diamètre < 80 mm, résistent mieux à la flexion que tous les autres profilés de même masse au mètre. Au-dessus de 80 mm de diamètre, le tube rond est moins résistant que les poutrelles en I ou en H, par exemple. Les tubes rectangulaires ont une excellente résistance, comparable à celle des poutrelles de même masse au mètre. Les tubes se prêtent très bien à la confection de poutres en treillis et spécialement de poutres triangulaires qui résistent admirablement à la flexion et au déversement (flexion dans le plan horizontal). Les tubes permettent également l'emploi de tirants ou de câbles de précontraintes (placés axialement à l'intérieur des tubes). Dans le cas d'efforts de flexion pouvant provenir de plusieurs directions (cas du vent), il est fortement conseillé de prendre du tube, sa résistance étant la même dans toutes les directions.

2-4) Résistance générale des assemblages de tubes:

Les assemblages soudés réalisés avec des tubes ronds découpés en 'gueule de loup' ont une grande rigidité.

3) POURQUOI EMPLOYER LE TUBE:

3-1) Intérêt des tubes pour l'aérodynamisme:

Le profil rond est aérodynamique car l'air glisse le long de son enveloppe et la pression exercée par le vent est ainsi réduite par rapport aux surfaces planes. D'après les règlements, le coefficient d'action du vent sur un prisme à 4 côtés est de 1,30 (efforts majorés de 30%) alors que pour les tubes ronds il est de 0,4 à 0,75. (Selon la vitesse du vent et le diamètre du tube).

3-2) Intérêt des tubes pour la corrosion:

Le tube rond a une forme telle que les poussières ont plus de difficulté à stagner que des tubes plats. La condensation et les liquides projetés ne peuvent pas stagner à leur surface, ni dans les nœuds d'assemblage. Cela facilite également les nettoyages et la mise en peinture.

3-3) Intérêt des tubes pour l'esthétique:

Le tube peut être utilisé de plusieurs façons et reste généralement esthétique, qu'il soit rond, carré ou rectangulaire, droit ou cintré, utilisé seul ou en treillis, ou utilisé avec d'autres profilés.

Les poutres triangulées, les structures tridimensionnelles, les ossatures en voûte, sont plus faciles à réaliser en tube qu'avec des profilés traditionnels. Utilisés par des architectes en quête d'inspiration, ou par des charpentiers, les tubes minces soudés et les profilés à ailettes, permettent de très belles réalisations.

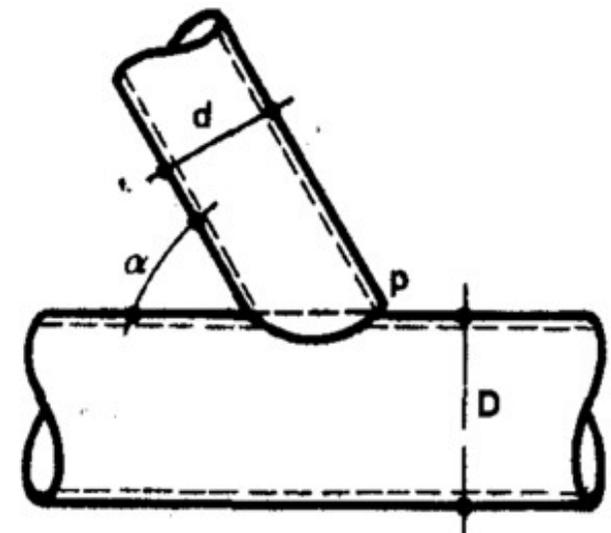
4) PREPARATION DES TUBES POUR L'ASSEMBLAGE:

4-1) Coupes planes, biaises ou d'équerre:

Quand le tube doit être découpé en forme (en gueule de loup), il faut faire une coupe droite préalable pour le mettre à une longueur convenable. Les moyens habituels utilisés pour les profilés peuvent être employés pour les tubes: scies circulaires, scies à ruban, scies meules, chalumeau oxyacétylénique, plasma, laser, etc. Le tube étant creux, l'utilisation des cisailles n'est pas préconisée, sinon la lame aplatit le tube en même temps qu'elle le coupe. Cet aplatissement total peut produire des criques sur les bords de l'aplatissement. Ce procédé ne peut être utilisé que si l'opération ne risque pas de nuire à l'emploi envisagé.

4-2) Coupes en forme:

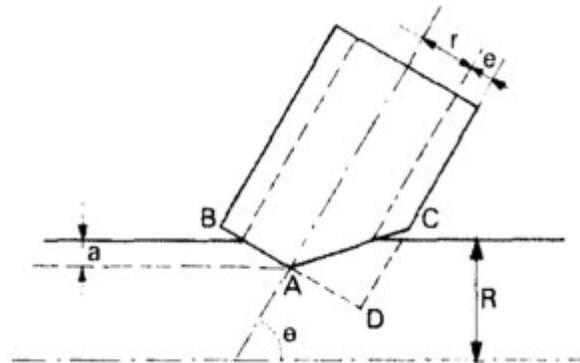
Cette opération peut être faite par moyens mécaniques, par meulage, par sciage, par perçage, au chalumeau oxyacétylénique, au plasma, par laser. Les solutions ne seront pas les mêmes s'il s'agit de quantités importantes ou de découpes unitaires, de petits tubes, de tubes moyens ou gros, de travail à l'atelier ou sur chantier. Chaque procédé présente avantages et inconvénients du point de vue de ses possibilités, et de l'importance de l'outillage à approvisionner, du temps nécessaire à la coupe. Il faut, en particulier, signaler que le tracé de l'intersection dépend du diamètre D du tube principal, des diamètres d intérieurs et extérieurs, du tube secondaire, de l'angle des deux tubes. Les combinaisons de ces divers facteurs donnent un grand nombre de formes d'intersections.



4-3) Coupes à la scie :

Les coupes peuvent être préparées par le traceur, être générées directement par une machine automatique (poste plasma ou laser) ou encore réalisées à la scie. Cette dernière méthode consiste à faire une découpe approchée au moyen de deux coupes planes, suivie d'un léger meulage. Elle repose sur le fait que la courbe d'intersection des deux cylindres (Surface intérieure du tube adjacent et surface extérieure du tube porteur) est, dans sa plus grande partie, très voisine de l'intersection de ces cylindres par deux plans judicieusement choisis. On utilisera une scie ou une tronçonneuse à disque avec étau orientable si possible. Au préalable, on fera au bureau de méthodes ou au traçage un croquis suivant indications ci-contre pour déterminer les longueurs, les angles de coupe et le positionnement. Ce dessin est d'ailleurs toujours utile, quelle que soit la méthode utilisée pour faire la découpe. Faire ce dessin en portant la cote **a** quelque soit l'angle **B**. Cela donne les tracés des deux plans de coupe que l'on positionne facilement en prenant quelques repères sur le dessin. Mesurer notamment la longueur CD afin de positionner la deuxième coupe AC. Ces coupes se font en série.

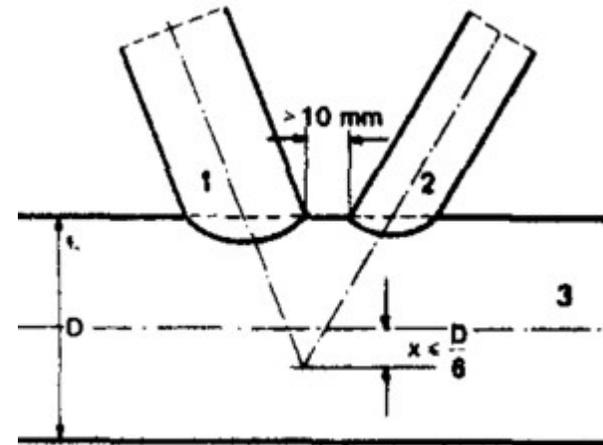
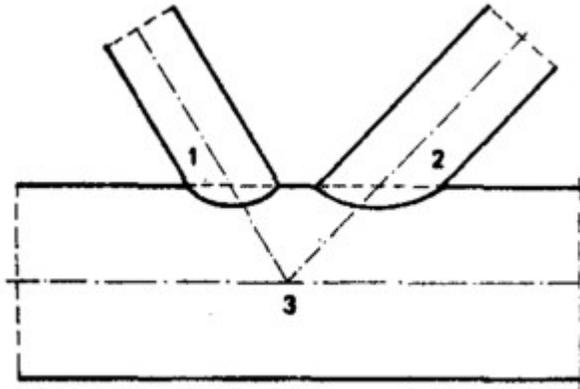
$$a = \frac{r^2}{2R - r}$$



5) ASSEMBLAGES DES TUBES APLATIS ET RENFORCEMENT DES TUBES

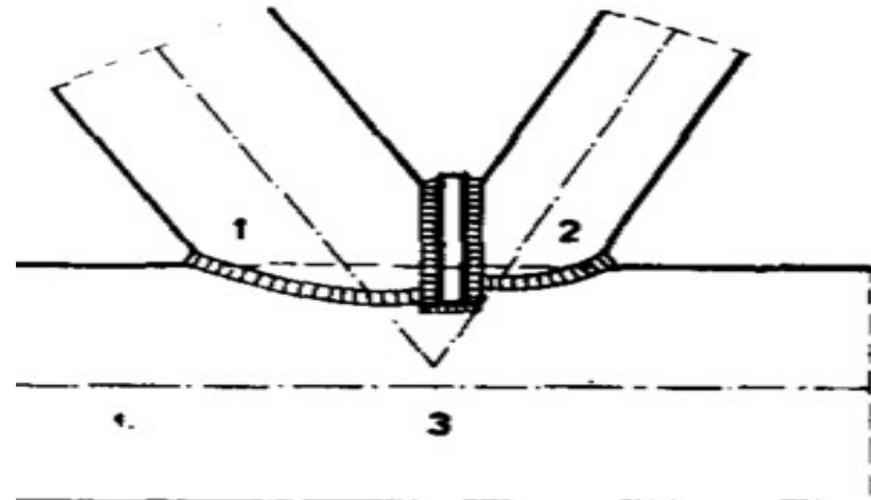
5-1) Découpe en forme: L'assemblage le plus recommandé consiste à découper en gueule de loup, c'est à dire, l'intersection des deux cylindres. L'angle d'intersection des axes ne doit pas être inférieur à 30°. Un chanfreinage en X et Y est recommandé quand l'épaisseur e du

petit tube est $> 3,2$ mm. Il est impératif quand cette épaisseur e est $> 6,3$ mm. Les axes des cylindres 1 et 2 (barres de treillis) doivent si possible se recouper sur l'axe de la barre principale 3.



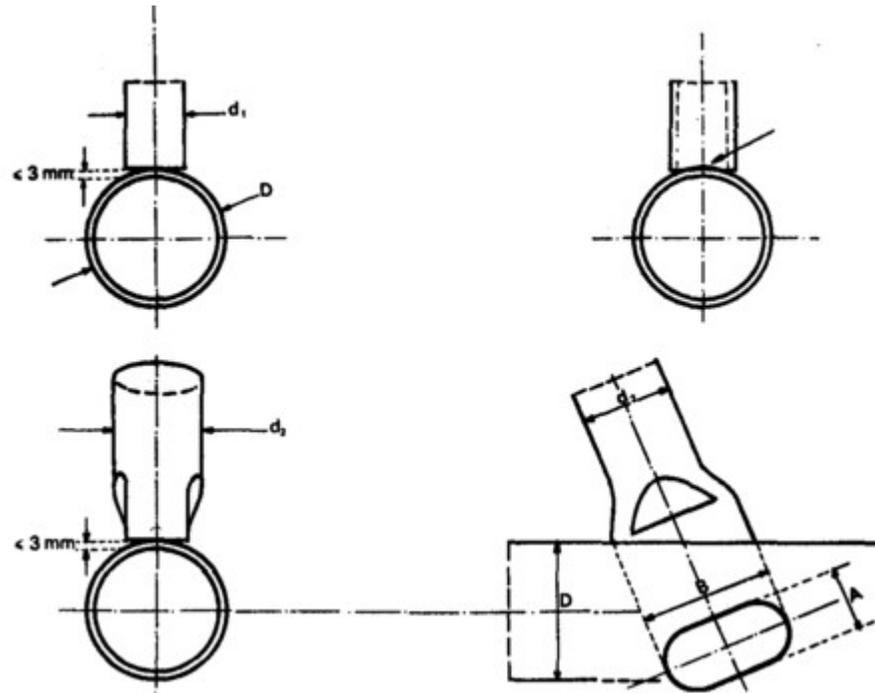
Dans le cas de tubes rapprochés, l'assemblage peut être réalisé de diverses manières.

- le tube 1 comprimé, est soudé normalement sur le tube 3.
 - le tube 2, tendu, est découpé suivant l'intersection avec le tube 1.
- Les tubes 1 et 2 ont des diamètres sensiblement différents ils sont soudés sur une plaque qui raidit l'assemblage et le rend plus facile.



5-2) Découpage plan:

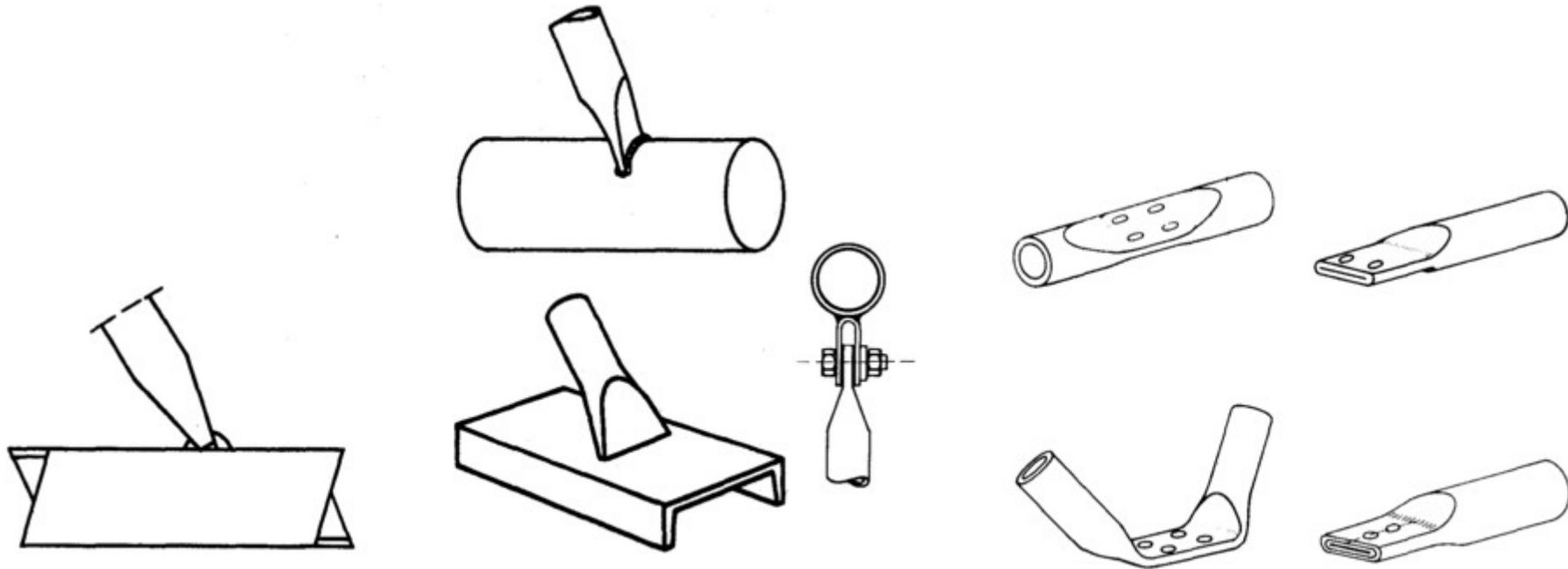
Au lieu de faire une coupe en forme, on peut couper le tube de treillis suivant une coupe plane. La soudure sera acceptable si l'écart entre les deux tubes ne dépasse pas 3 mm. Cet écart est aussi valable pour les tubes carrés et rectangulaires que l'on assemble sur les tubes ronds.



5-3) Tubes aplatis:

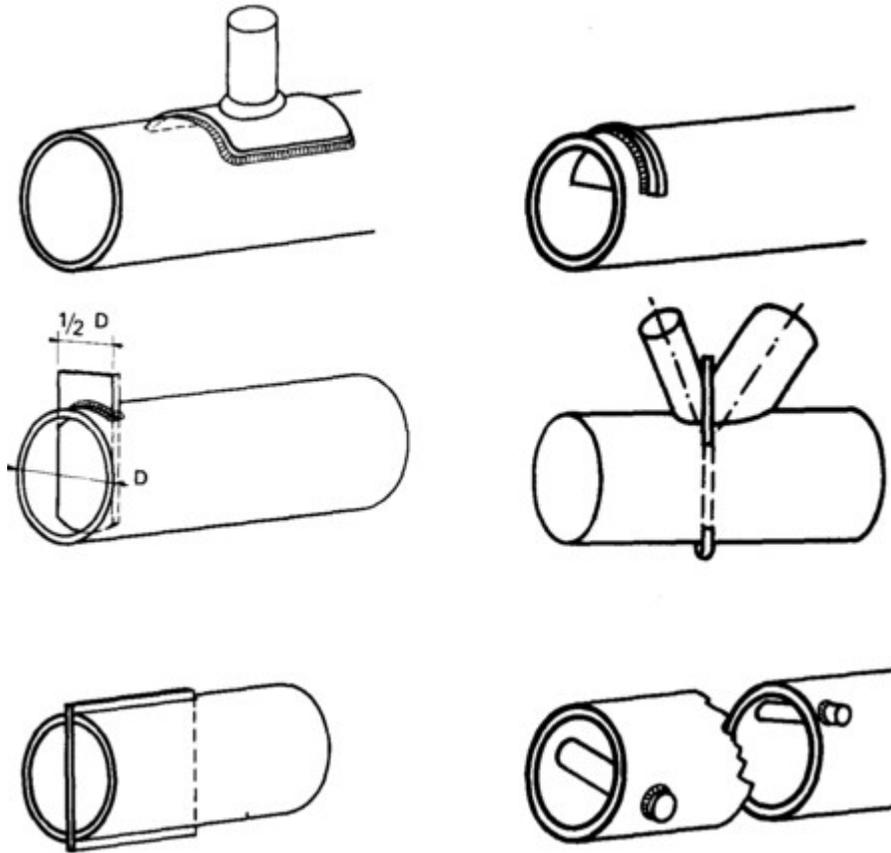
L'aplatissement est fait à la presse ou en même temps que la coupe, à la cisaille. La coupe peut être d'équerre ou biaise. Le

tube peut être aplati à bloc ou partiellement. Dans ce cas, l'aplatissement se fait à la presse en mettant une cale entre les plateaux de la presse.



5-4) Renforcement des assemblages:

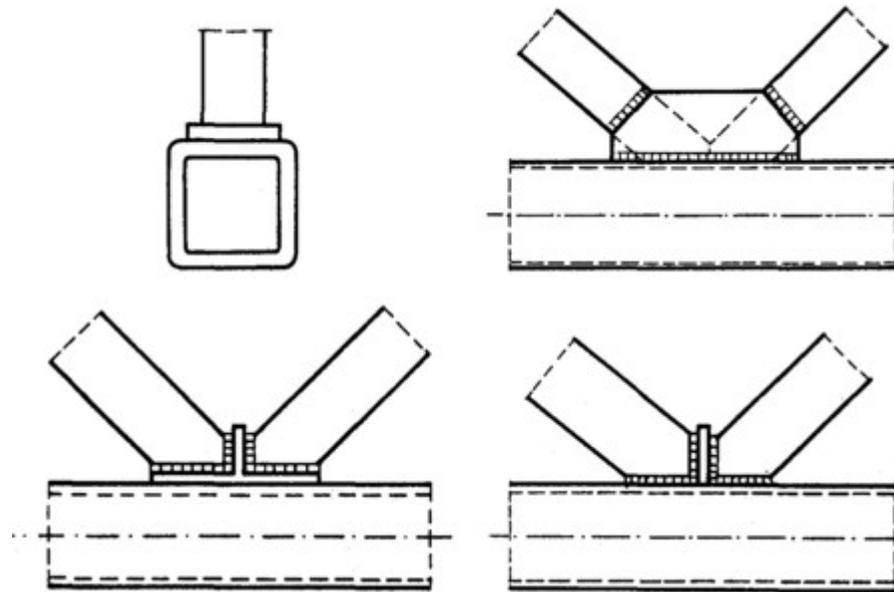
Dans les cas très rares où l'on emploiera une membrure de grand diamètre et de faible épaisseur, ou bien quand on craindra l'ovalisation ou l'enfoncement d'un tube, on pourra employer plusieurs procédés pour renforcer comme ci-dessous:



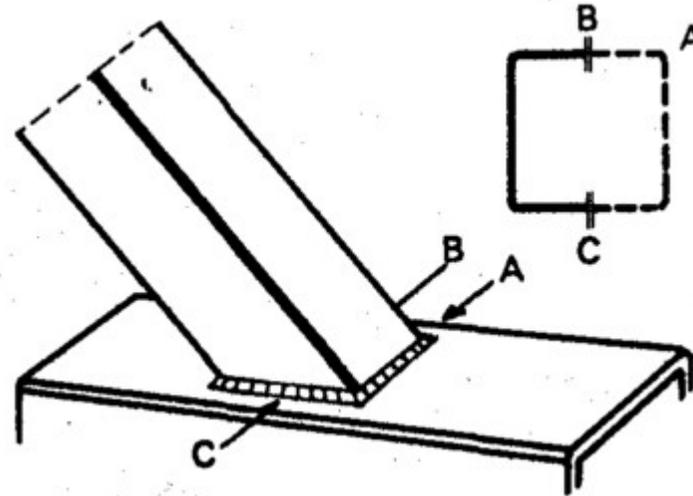
6) ASSEMBLAGE DES TUBES CARRÉS ET RECTANGULAIRES, CROISEMENT DE BARRES, ASSEMBLAGE BOUT A BOUT SOUDES OU DEMONTABLES.

6-1) Tubes carrés et rectangulaires:

Avec des tubes carrés ou rectangulaires, les coupes sont planes et il n'y a pas de difficultés d'assemblage. Ce qui a été dit pour les tubes ronds, concernant la position du point de rencontre des axes, est valable pour les tubes de forme.

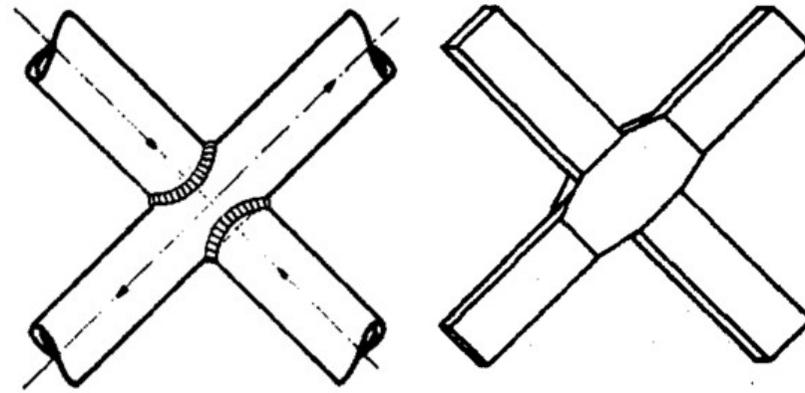


Pour la soudure des tubes carrés, il est préférable de commencer en B ou en C plutôt que dans un angle A. Le point de départ de soudure en A crée en effet une amorce de fissure en cas de fatigue alternée. Mais c'est également dans les angles qu'on rencontre le maximum d'efforts. En B ou en C, il y a bien amorce de fissure au départ de la soudure, mais les efforts étant plus faibles, les risques sont moindres



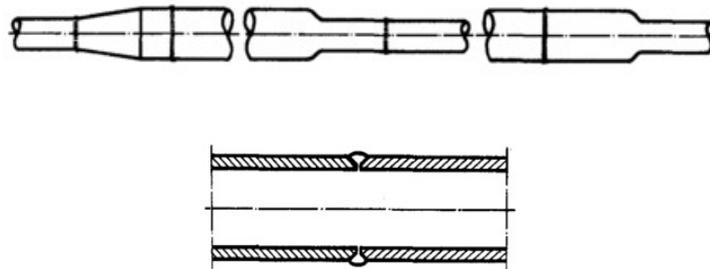
6-2) Croisements de barres:

Les croisements ne sont admis qu'entre barres de même diamètre ou, éventuellement, entre barres dont le rapport des diamètres est supérieur à 3/4. Il est préférable de découper les bouts de la barre comprimée et de la souder sur la barre tendue plutôt que d'aplatir les tubes à leur croisement. Dans le cas de tubes carrés et d'efforts importants, renforcer le croisement par des goussets.



6-3) Bout à bout soudé:

Les croisements ne sont admis qu'entre barres de même diamètre ou, éventuellement, entre barres dont le rapport des diamètres est supérieur à $3/4$. Il est préférable de découper les bouts de la barre comprimée et de la souder sur la barre tendue plutôt que d'aplatir les tubes à leur croisement.



Dans le cas de tubes carrés et d'efforts importants, renforcer le croisement par des goussets.

6-4) Bout à bout démontables:

