

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblages soudés et matériaux

Par :

BEKK Ismail

Sujet

Influence de la température sur les propriétés mécaniques des joints soudés des aciers faiblement alliés par procédé SMAW

Soutenu le .../.../ 2020 devant le jury composé de :

President :	Mr SEBAA Fethi	Grade : MC	UABT
Encadreur :	Mr ACHOUI Mohammed	Grade : MA " A "	UABT
Examineur :	Mr KARA-ALI Djamel	Grade : MC	UABT

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah de m'avoir donnée le courage, la foi et la sagesse d'accomplir ce modeste travail.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadreur de mémoire M.ACHOUI Mohammed, , pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury Mr SEBAA Fethi ,Mr KARA-ALI Djamel pour leur présence, pour leur lecture attentive de mon mémoire ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer mon travail.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de département mécanique université Tlemcen et les intervenants professionnels responsables de ma formation.

En fin, un très grand merci pour mes collègues de formation sans exception pour leurs encouragements, leur soutien et les bons moments qu'on a passé ensemble et à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce travail de près ou de loin.

DEDICACE

C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail. Je le dédie à :

Mes très chers parents pour leur soutien et leur aide durant toute ma période 'étude, dont je leurs doit toute ma reconnaissances et mon respect

Toute la famille BEKK

A mes chers Frères

A mes amis et tous ceux qui mon aidés de loin et de prés, Amine, Ziani, Salah, Mohammed.

Tous mes enseignants

A toute la promotion ASM 2020 plus particulièrement la chacun par son nom.

BEKK Ismail

Résumé

Le soudage des métaux est une technique d'assemblage permanent qui établit la continuité métallique entre les pièces soudées. La soudure est le nom donné au joint formé par la fusion des bords des pièces à souder entre elles, avec ou sans adjonction d'un métal d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des métaux de base (les métaux à souder) ou du mélange des métaux de base et d'un métal d'apport.

Différents paramètres affectent la tenue en fatigue des joints soudés:

- facteurs géométriques
- facteurs métallurgiques
- facteurs liés à la sollicitation

En soudage, la vitesse de refroidissement de la ZAT est élevée et dépend des conditions de soudage. Par conséquent, une approche intuitive des phénomènes métallurgiques dans la zone thermiquement affectée ne permettent pas d'appréhender correctement les phénomènes métallurgiques.

Afin d'atteindre cet objectif ; trois parties ont été développées :

- ❖ La première consiste à définir les procédés de soudage à l'arc utilisés, et donner une vue générale sur les propriétés mécaniques des aciers, et des assemblages soudés.
- ❖ La deuxième partie présente une recherche bibliographique sur Etude mécanique et thermique de soudage, température de soudage, Les zones des joints soudés
- ❖ La troisième partie présente l'étude sur les transformations métallurgiques ainsi que le refroidissement de la soudure, l'étude de la zone affectée thermiquement (ZAT)

ملخص

اللحام المعدني هو تقنية ربط دائمة تؤسس استمرارية معدنية بين الأجزاء الملحومة. اللحام هو الاسم الذي يطلق على المفصل المتكون من اندماج حواف الأجزاء المراد لحامها مع أو بدون إضافة معدن حشو. لذلك يمكن أن يكون اللحام نتيجة خلط المعادن الأساسية (المعادن المراد لحامها) أو خلط المعادن الأساسية مع معدن حشو.

تؤثر المعلمات المختلفة على قوة التعب للمفاصل الملحومة

- ❖ العوامل الهندسية
- ❖ العوامل المعدني
- ❖ العوامل المتعلقة بالتماس

مرتفعًا ويعتمد على ظروف اللحام. وبالتالي ، فإن النهج البديهي للظواهر المعدنية في ZAT في اللحام، يكون معدل تبريد المنطقة المتأثرة حراريًا لا يسمح بفهم الظواهر المعدنية بشكل صحيح

من أجل تحقيق هذا الهدف؛ تم تطوير ثلاثة أجزاء

الأول هو تحديد عمليات اللحام بالقوس الكهربائي المستخدمة ، وإعطاء نظرة عامة للخصائص الميكانيكية للفلو لاذ ، والتركيبات الملحومة

الجزء الثاني يعرض بحث ببيولوجرافي حول الدراسة الميكانيكية والحرارية للحام ودرجة حرارة اللحام ومجالات الوصلات الملحومة

(ZAT) الجزء الثالث يعرض دراسة التحولات المعدنية وتبريد اللحام ودراسة المنطقة المتأثرة بالحرارة

Abstract

Metal welding is a permanent joining technique that establishes metallic continuity between welded parts. Welding is the name given to the joint formed by the fusion of the edges of the parts to be welded together, with or without the addition of a filler metal. Welding can therefore be the result of just mixing base metals (the metals to be welded) or mixing base metals and a filler metal.

Different parameters affect the fatigue strength of welded joints:

- geometric factors
- metallurgical factors
- factors related to solicitation

In welding, the ZAT cooling rate is high and depends on the welding conditions. Consequently, an intuitive approach of the metallurgical phenomena in the thermally affected zone does not allow to correctly apprehend the metallurgical phenomena.

In order to achieve this goal; three parts have been developed:

- ❖ The first is to define the arc welding processes used, and give a general view of the mechanical properties of steels, and welded assemblies.
- ❖ The second part presents a bibliographic research on Mechanical and thermal study of welding, welding temperature, The areas of welded joints
- ❖ The third part presents the study on metallurgical transformations as well as the cooling of the weld, the study of the heat affected zone (ZAT)

Liste des abréviations

SMAW : soudage à l'arc à l'électrode enrobée.
TIG : soudage tungstène Inert Gas.
HF : haute fréquence.
E1 : l'énergie linéaire de soudage (J/mm).
I : intensité de soudage en ampères (A).
U : tension de soudage en volts (V).
v : vitesse d'avance de l'arc électrique (mm/s).
ZF : zone de fusion.
ZL : zone de liaison.
ZAT : zone affectée thermiquement.
MB : métal de base.
ZFP : zone de fusion partielle.
tr : température de refroidissement.
Vr : vitesse de refroidissement.
I.I.S : l'Institut International de Soudure.
IRSID : l'Institut de Recherches de la Sidérurgie Française.
Re : La limite d'élasticité en (MPa).
gdf ReL : La limite d'élasticité inférieure en (MPa).
Ap : l'allongement en %.
 σ_{max} : Contrainte maximale.
 σ_{min} : Contrainte minimale.
TTT : Température, Transformation, Temps.
CFC : Cubique Face Centrée.
FC : Face Centrée
E : Module de Young du matériau.
Rm : La contrainte maximale à la rupture.
Re : La contrainte élastique.
Z : la résistance à la striction.
K : résilience.
A : ductilité.
H : dureté.
 γ : Phase austénitique.
 α : Phase ferritiques.
 ε : Phase martensitique.
ASME: American Society of Mechanical Engineers.
EE : soudage à l'électrode enrobé.
Tt : température de trempe.
Tr : température de revenu.
RE : refroidissement à l'eau.
RA : refroidissement à l'air.
RH : refroidissement à l'huile.
HRC : dureté Rockwell type C.
A% : l'allongement.

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur le soudage à l'arc

Figure1.1 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....	4
Figure1.2 : Composant de l'électrode enrobée.....	5
Figure1.3: Principe du procédé TIG (GTAW).....	6
Figure1.4 : Principe du procédé (RW).....	8
Figure1.5 : Décalage des rives [11].....	12
Figure1.6 : Fissures [11].....	13
Figure1.7 : Pénétration incomplète [11].....	14
Figure1.8 : Manque de fusion.....	14
Figure1.9 : Caniveau [11].....	15
Figure1.10 : Manque d'épaisseur [11].....	16
Figure1.11 : Bulles / porosité [11].....	16
Figure1.12 : Inclusions de laitier [11].....	17

Chapitre 2 Etude mécanique Et thermique de soudage

Figure2.1:Métaux: du plus fragile au plus ductile. [14].....	21
Figure2.2 :Trois modes de sollicitation de la fissure [15].....	22
Figure2.3: $\theta=f(t)$ cycle thermique Figure2.4: $\theta=f(x)$ cycle thermique.....	23
Figure 2.5: Présentation schématique des différentes parties soudées d'un acier [16]...	25
Figure2.6: Courbe dureté-critère de refroidissement (HV - ΔT)[16].....	27
Figure2.7 : Géométries communes Butt. [18].....	32

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

Figure3.1: Vitesse de refroidissement [21].....	42
---	----

Figure 3.2: Traitement thermique de 25CrMo [21].....	44
Figure 3.4 Transformation de l'acier dans la zone réchauffée [23].....	47
Figure 3.5 Influence de la température sur les grains [25].....	48
Fig.6: Section polie d'une brasure tendre entre des connections conductrices de cuivre dans un circuit imprimé. Fond clair, 100x. [26].....	50
Fig 7: Section polie à travers une brasure forte fissurée dans un acier inoxydable austénitique. Contraste interférentiel différentiel, 100x. [26].....	51
Fig. 8: Interface de fusion sur un alliage d'acier faiblement allié soudé par friction linéaire sous pression, montrant une zone affectée thermiquement et une déformation plastique associée. Fond clair, 25x. [26].....	52
Fig. 9:Schéma illustrant les différentes régions de la zone affectée thermiquement (ZAT) dans une soudure à passe unique et les défauts éventuels. [26].....	53

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés. [6].....	11
Tableau 3.1 : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés [23].....	45
Tableau 3.2 : Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier [25].....	48

SOMMAIRE

i. Remerciements

ii. Dédicaces

iii. Résumé

iv. ملخص

v. Abstract

vi. Liste des figures

vii. Liste des tableaux

viii. Liste des abréviations

ix. Introduction générale

Chapitre1 : Généralités sur le soudage

1. Introduction	1
2. Histoire de soudage	1
3. Définition de soudage	2
4. Types de procédés de soudure.....	3
4.1. Soudage oxy-acétylénique	3
4.2. Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée	3
4.2.1. Principe de soudage a l'arc E.E (SMAW)	5
4.3. Soudage T.I.G. (tungsten inert gas)	6
4.4. Soudage M.I.G. (métal inert gas).....	7
4.5. Soudage par points	7
5. Autres procédés de soudage.....	8
5.1. Les innovations du soudage hydride.....	8
5.2. La fabrication additive par soudage.....	9
5.3. Facilité de soudage selon les procédés de fonderie.....	9
5.4. Le soudage de pièces métalliques de natures différentes.....	9
5.5. La simulation numérique du soudage.....	9
5.6. Le choix d'une technologie de soudage.....	10
6. Les gaz de protection.....	10
7. Les aciers.....	11

8. Défauts de soudures.....	12
8.1. Décalage des rives.....	12
8.2. Hauteur des cordons de soudure à l'extérieur et à l'intérieur.....	12
8.3. Fissures.....	13
8.4. Pénétration incomplète.....	13
8.5. Manque de fusion (collage).....	14
8.5.1.Causes possibles.....	15
8.6. Caniveaux (sillons).....	15
8.6.1.Causes possibles.....	15
8.7. Manque d'épaisseur.....	16
8.7.1 Causes possibles.....	16
8.8.Bulles / porosité.....	16
8.8.1.Causes possibles.....	17
8.9. Inclusions de laitier.....	17
8.9.1.Causes possibles.....	17
9.conclusion.....	18
Chapitre2 : Etude mécanique Et thermique de soudage	
1. 1. Propriétés mécaniques.....	19
1.1. Introduction	19
1.2.1. L'élasticité.....	19
1.2.2. La dureté.....	20
1.2.2.1. Processus de mesure de la dureté.....	20
1.2.3. La ductilité	20
1.2.3.1. Condition de ductilité.....	21
1.2.4. Malléabilité	21
1.2.5. La ténacité	22
1.2.5.1. Définition.....	22
1.4.2. Détermination expérimentale	22
2. température de soudage.....	23
2.1. Cycle thermique du rechargement	23
2.2. Modifications microstructurales en zone affectée thermiquement.....	24

2.2.1. Transformations dans la ZAT lors du chauffage	24
2.2.2. Transformations dans la ZAT lors du refroidissement.....	25
2.2.3. Influence des cycles thermiques sur les propriétés mécaniques de la ZAT lors du rechargement.....	28
3. Le joint soudé.....	29
2. 3.1. Les zones des joints soudés.....	29
3.2. Soudure bout a bout.....	30
3.2.1. Les types	30
3.2.1.1. Carrés joints bout à bout.....	30
3.2.1.2. V-joints.....	31
3.2.1.3. J-joints	31
3.2.1.4. U-joints.....	31
3.2.1.5. Tee-Joints.....	32
4. Différentes classifications.....	32
4.1. Aciers non alliés.....	33
4.1.1. Aciers non alliés d'usage général.....	33
4.1.2. Aciers non alliés spéciaux (type C)	34
4.2. Aciers faiblement alliés.....	34
4.3. Aciers fortement alliés.....	34
4.4. Aciers inoxydables.....	35
4.5. Aciers multiphasés.....	35
5-conclusion	36
Chapitre3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)	
1. Introduction	37
2. 2. Solidification.....	37
2.1. Diffusion.....	37
2.2. - SURFUSION CONSTITUTIONNELLE.....	38
2.3. SÉGRÉGATION DES ÉLÉMENTS.....	49
3. TRANSFORMATIONS MÉTALLURGIQUES AU REFROIDISSEMENT.....	40
3.1. Données générales.....	40

3.1.1 Cas d'un acier 25CrMo, à l'état recuit soudé en une passe par fusion de proche en proche.....	40
3.2. –UTILISATION, EN SOUDAGE, DES COURBES T.R.C. POUR TRAITEMENT THERMIQUE.....	43
3.2.1. - Données générales.....	43
3.2.2. – Cas d'un acier 25CrMo, à l'état recuit soudé en une passe par fusion de proche en proche.....	43
4. Classification des aciers.....	44
4.1.Les aciers ordinaires ou aciers au carbone.....	45
4.2. Le soudage des aciers au carbone.....	46
4.3. Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés.....	47
4.4 Les aciers à haute limite élastique.....	49
5. Procédés d'assemblage nécessitant de la chaleur.....	49
5. conclusion.....	54
Conclusion Générale	55
Bibliographie.....	56

Introduction

L'assemblage des tôles en aciers par soudure occupe une place très importante dans l'industrie de construction mécanique. Ses principaux domaines d'application dans le domaine de l'acier sont la mécanique au sens large et la construction, pour lesquels il constitue de loin le moyen d'assemblage prioritaire. En construction métallique, lors de la préfabrication des éléments en atelier, on assemble systématiquement par soudage. Sur les chantiers on aura plutôt recours au boulonnage des éléments préfabriqués.

L'objectif de cette étude Influence de la température sur les propriétés mécaniques des joints soudés des aciers faiblement alliés par procédé SMAW

Après refroidissement, les structures obtenues en zone affectée thermiquement varient entre l'état recuit (quand une diffusion suffisante permet d'obtenir l'état d'équilibre au refroidissement), et l'état trempé (quand une diffusion insuffisante ne permet pas d'obtenir l'état d'équilibre au refroidissement).

Cela dépend :

- de la trempabilité de l'austénite formée au chauffage,
- de la vitesse de refroidissement de cette austénite consécutive aux cycles thermiques.

Sur le plan thermique, le soudage est caractérisé par un apport important et localisé de chaleur sur la pièce soudée.

Chapitre 1

Généralités sur le soudage

Chapitre 01 : Généralités sur le soudage

1. Introduction

Le soudage des métaux est une technique d'assemblage permanent qui établit la continuité métallique entre les pièces soudées. La soudure est le nom donné au joint formé par la fusion des bords des pièces à souder entre elles, avec ou sans adjonction d'un métal d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des métaux de base (les métaux à souder) ou du mélange des métaux de base et d'un métal d'apport. Beaucoup de métaux sont soudables moyennant des études préalables et la mise au point de modes opératoires spécifiques ; citons les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages.

Lors du soudage, il y a fusion locale des éléments à assembler, contrairement à ce qui se passe dans le cas du brasage où il n'y a jamais fusion des métaux à assembler.

On distingue trois types de soudures :

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature,
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature, et
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous de natures différentes. [1]

2. Histoire du soudage

Avant la naissance du soudage au 19^{ème} siècle et son passage rapide aux mains des techniciens, l'assemblage des matériaux s'est fait par forgeage. Les premières techniques utilisaient l'électricité comme source d'énergie tel que le soudage à l'arc en acier jusqu'à l'invention d'arc enrobé en 1904 ou soudage par résistance. Dans la même période, l'arrivée de l'oxyacétylénique utilisant l'acétylène et l'oxygène (soudage au gaz) pour produire une flamme allant jusqu'à 3100°C permet de constituer un joint entre les parties à souder après la solidification du bain de fusion.

En 1930, l'arrivée du soudage à électrode fusible facilite l'automatisation de dévidage,

surtout ce qui concerne le soudage à l'arc submergé. Dès 1940, les scientifiques d'États-Unis ont essayé de protéger l'arc par un gaz inerte dont ils sont réusis à amorcer l'arc sans fusion de l'électrode de tungstène (sans matériau d'apport), le procédé est appelé TIG (Tungstène Inert Gas). Le procédé MIG (Métal Inert Gas) est apparu quelques années plus tard en 1950, il utilise comme électrode un fil de métal d'apport fusible à dévidage continue et l'argon ou l'hélium comme gaz de protection, dont leur remplacement par CO₂ donne la naissance du procédé MAG (Métal Active Gas). L'invention du soudage par faisceau d'électrons en 1958, permet de réaliser une pénétration étroite et profonde, vient associer avec le procédé laser en 1980, le soudage devenu majoritaire à côté du rivetage. [2]

3. Définition du soudage

Le soudage consiste à assembler deux pièces en réalisant la continuité de la matière qui les compose. Le joint qui en résulte est la soudure.

Le soudage est dit autogène lorsque les bords adjacents des pièces sont portés à fusion et participent à la formation du joint. Il est souvent nécessaire, pour former le joint soudé, d'ajouter au métal de base un métal d'apport, identique au précédent ou différent, mais de toute façon étranger au métal de base. Le métal d'apport et le métal de base doivent pouvoir former un alliage.

Lorsque le métal de base n'est pas porté à fusion et que le métal d'apport constitue seul le joint, on est en présence d'une brasure. En soudage autogène, la continuité de la matière est obtenue par fusion, par pression ou par ces deux moyens combinés. Le soudage fait donc appel à une source d'énergie qui, selon le procédé considéré peut-être de différente nature :

- Thermochimique (soudage au chalumeau, soudage par aluminothermique).
- Électrothermique (soudage à l'arc et ses nombreuses variantes, soudage par résistance, soudage par bombardement électronique).
- Mécanique (soudages par pression à froid, par explosion, par friction, par ultrasons)
- Lumineuse (laser).

Certains procédés de soudage ont donné naissance à des techniques connexes fortes importantes telles que le coupage thermique (coupage aux gaz ou oxycoupage, coupage à l'arc au plasma), le soudobrasage et la métallisation (aux gaz, à l'arc, au plasma). Ces techniques utilisent les mêmes sources d'énergie que le procédé de soudage dont elles dérivent et nécessitent l'usage de matériels analogues.[3]

4. Types de procédés de soudure :

4.1. Soudage oxy-acétylénique

L'utilisation d'une flamme par combustion d'un mélange d'oxygène et d'acétylène stockés dans des bouteilles séparées à pressions différentes est nécessaire (principe du chalumeau à gaz). Le réglage du mélange se fait à l'aide d'un manodétendeur qui équilibre les pressions. Le métal d'apport (baguettes ou fils) est introduit manuellement dans la flamme pour obtenir sa fusion.

4.2 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée

La fusion est réalisée au moyen d'un arc électrique jaillissant entre la pièce à souder et une électrode. On utilise une électrode enrobée composée d'une partie métallique (métal d'apport) et un enrobage (mélange d'éléments minéraux, métalliques et organiques) qui fondent simultanément sous l'effet de la chaleur provoquée par l'arc électrique au contact de la pièce à souder. Ce procédé, essentiellement manuel, convient à tous les matériaux courants.

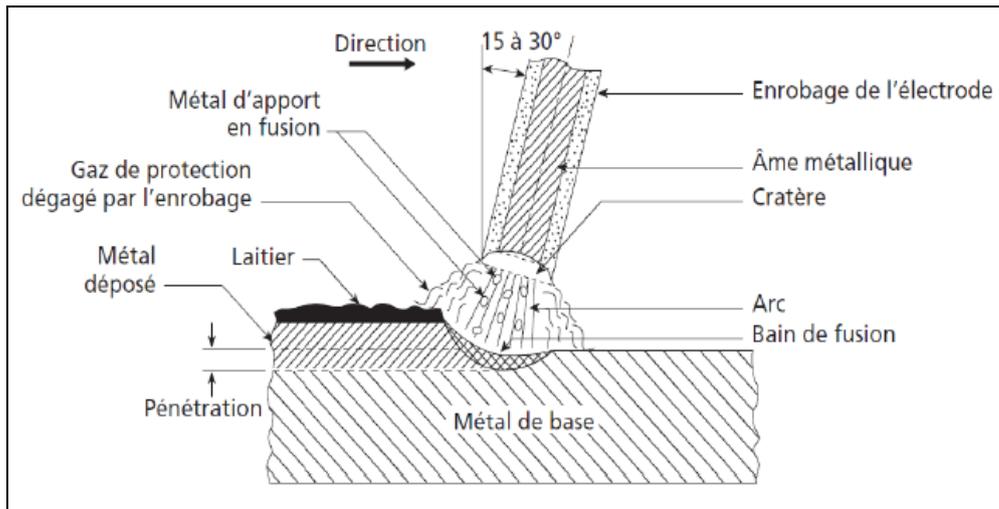


Figure1.1 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).[5]

- Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est un procédé de soudage autogène qui consiste à unir deux pièces de métal de même nature en fusionnant leurs bords.
- Le soudage à l'arc avec électrode enrobée n'est pas utilisé pour souder les métaux et alliages qui possèdent une faible température de fusion, tels que l'étain, le plomb et le zinc.
- Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est déconseillé pour souder des tôles dont l'épaisseur est inférieure à 2 mm à cause des risques d'effondrement du bain de fusion.
- Le facteur de marche indique le temps durant lequel une machine de soudage peut fonctionner sans interruption et sans risque de surchauffe.
- Quand une personne touche un fil conducteur sous tension, elle reçoit une décharge électrique qui se traduit par une commotion. Cette dernière peut se révéler dangereuse et même fatale.
- Les rayons ultraviolets de l'arc causent la conjonctivite.
- Une exposition répétée aux rayons infrarouges provoque la cataracte, qui peut rendre le soudeur aveugle.
- L'intensité du courant de soudage dépend du type d'électrode et de son diamètre, c'est-à-dire du diamètre de l'âme métallique.
- Les principaux types d'électrodes enrobées utilisées pour souder l'acier doux sont les suivants : électrode cellulosique, électrode rutile et électrode basique.
- Les électrodes à enrobage basique sont fortement affectées par l'humidité. [4]

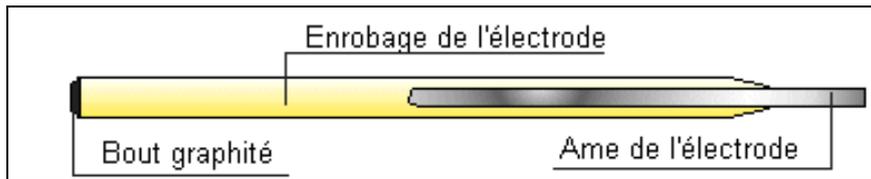


Figure1.2 : Composant de l'électrode enrobée

4.2.1. Principe de soudage a l'arc E.E (SMAW) :

Le procédé de soudage à l'arc (SMAW = SHIELDED METAL ARC WELDING) est un procédé de soudage manuel qui utilise des baguettes enrobées appelées électrodes ou encore baguettes qui sont enduites d'un enrobage (Flux) pour déposer du métal en fusion sur des pièces métalliques.

Le concept de ce procédé consiste à amorcer la fusion entre deux métaux à l'aide de la chaleur générée par un arc électrique qui passe par l'électrode (baguette) et le métal de base. L'électrode fournit le métal d'apport et le bain de fusion est protégé de la contamination atmosphérique (Air ambiant, oxygène et azote, oxydes de surface légères etc.)

C'est grâce à son enrobage qui se décompose au travers de l'arc à température très élevée que la contamination du métal en fusion est évitée.

Étant donné sa facilité d'utilisation, l'équipement est relativement simple. Il y a plusieurs possibilités d'applications pratiques. Le procédé SMAW est encore l'un des procédés les plus populaires dans le monde aujourd'hui. Il permet de souder et réparer un grand nombre d'alliages. On doit alors faire des choix judicieux pour que l'électrode (métal d'apport) puisse s'agencer avec le métal à souder en tenant compte de plusieurs facteurs. C'est encore l'un des procédés les plus utilisés sur les chantiers comme les "Pipelines". Le procédé SMAW est surtout utilisé pour souder des assemblages d'acier, d'acier inoxydable et de fontes. Il peut également souder d'autres types d'alliages.

Le poste de soudage produit un puissant courant électrique qui circule entre l'extrémité de l'électrode et le métal de base à souder. Le courant électrique produit un arc d'une chaleur si intense (environ de 3900 degrés à 5500 degrés Celsius) que l'extrémité de la baguette de métal d'apport ainsi que la surface du métal de base sont portées à la fusion.

La force de l'arc dirige le métal d'apport fondu vers le bain de fusion de façon à former le cordon de soudure.

4.3. Soudage T.I.G. (tungsten inert gas) :

Le procédé T.I.G. utilise une électrode (dite non fusible ou encore réfractaire) en tungstène et un gaz inerte (argon ou hélium) qui protège le bain de fusion et l'électrode de l'oxydation. Le métal d'apport est fourni manuellement (baguette) ou automatiquement par apport continu d'un fil. Il peut-être utilisé avec la majorité des métaux et alliages, en particulier pour le soudage de métaux nobles. [7]

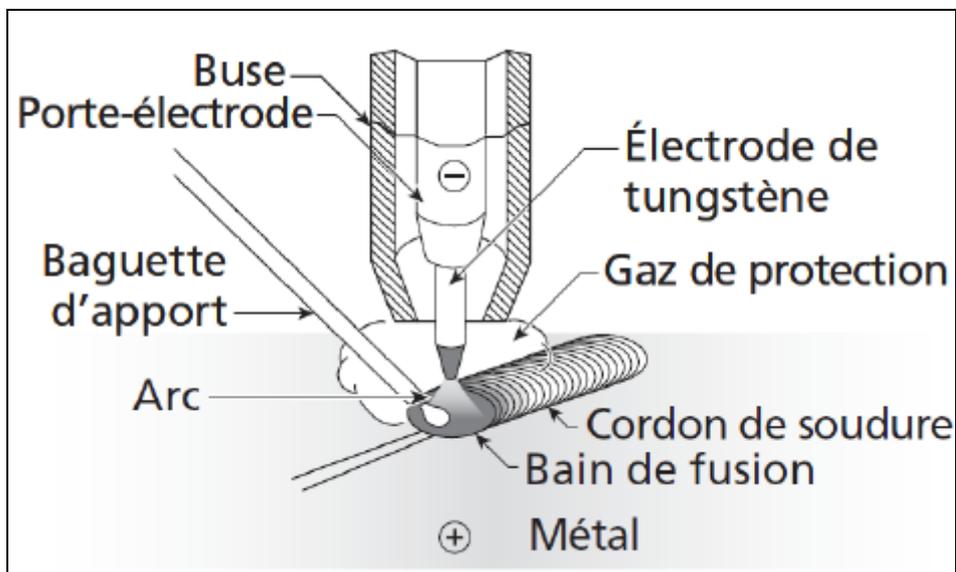


Figure1.3: Principe du procédé TIG (GTAW) [6]

4.4. Soudage M.I.G. (métal inert gas) :

Le soudage est également réalisé en milieu gazeux inerte, mais l'électrode en tungstène est remplacée par un fil électrode fusible dévidé automatiquement. Il s'applique au soudage des métaux ferreux et non ferreux.

Il existe de nombreux autres procédés (au plasma, par faisceau laser, par pression, par frictions, par résistance, par haute fréquence, par électrons...) qui concernent les métaux ainsi que les matériaux thermoplastiques. [8]

4.5. Soudage par points :

Cas du soudage classique de deux tôles (celles-ci pouvant être de nature et d'épaisseur différente).

Les deux tôles sont placées l'une sur l'autre, puis fortement maintenues sous pression par la machine de soudage, entre deux électrodes, avant qu'un fort courant ne les traverse permettant après une brève pause, afin de refroidir le point de fusion, le relâchement des deux tôles unies pour toujours par soudure.

Il n'y a donc pour ce mode de soudage aucun métal d'apport (soudage autogène), il est exécuté sous pression avec comme chauffage un fort courant électrique.

La loi qui explique ce phénomène est l'effet Joule: $W=RI^2 t$

Dégagement de chaleur W en joules, résistance électrique R en ohms, intensité du courant I en ampères et temps t en secondes. Le point de fusion a lieu entre les deux tôles car c'est le contact qui offre le plus de résistance au passage électrique, la résistance du circuit de soudage étant négligeable. [9]

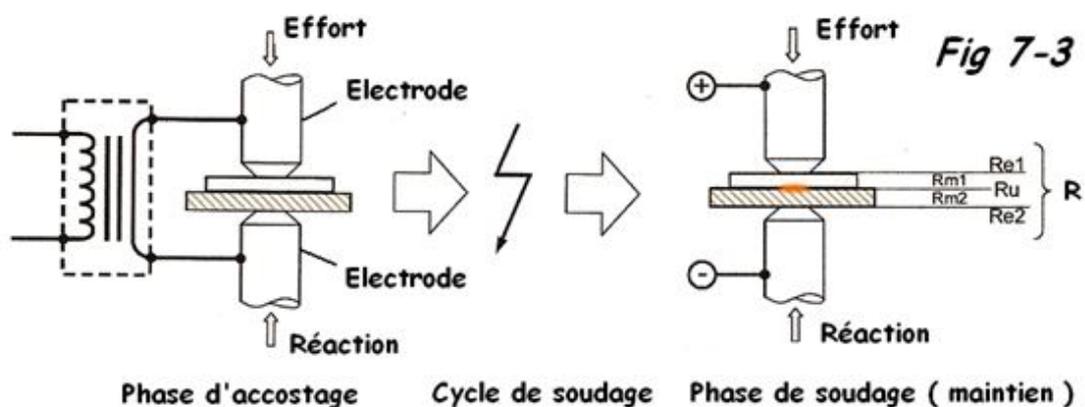


Figure1.4 : Principe du procédé (RW) [10]

5. Autres procédés de soudage

Il existe de très nombreux autres procédés de soudage, dérivés pour certains des procédés traditionnels : le soudage linéaire (LFW pour Linear Friction Welding), le soudage par faisceau d'électrons (sous vide), le soudage par explosion, le soudage par ultrasons, le soudage par impulsion magnétique, Le soudage plasma (PAW ou Plasma Arc Welding), considéré comme une évolution du soudage TIG, s'en distingue néanmoins par le fait que l'arc est contraint mécaniquement (constriction mécanique) ou pneumatiquement, générant ainsi une densité d'énergie supérieure.

5.1. Les innovations du soudage hybride

Le soudage hybride est la combinaison de deux procédés de soudage. Ont été étudiés en particulier le laser + TIG (Tungsten Inert Gaz), le laser + plasma ou le laser + GMAW (Gaz Metal Arc Welding). Le fait de combiner deux procédés permet de conserver certains de leurs avantages et à contrario d'éliminer leurs inconvénients tout en augmentant la productivité. Ces procédés hybrides sont cependant encore au stade de développement et sont peu matures industriellement.

5.2. La fabrication additive par soudage

Certains procédés de fabrication additive métallique utilisent le soudage pour la réalisation de pièces avec le principe de fabrication couche par couche. C'est en particulier le cas du WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) qui est basé sur le soudage TIG + robot 6 axes ou le laser cladding (laser + poudre). Ces nouvelles technologies additive sont en pleine évolution et offrent un fort potentiel d'innovations.

5.3.Facilité de soudage selon les procédés de fonderie

Le passage à l'état liquide dans la ZAT du cordon de soudure nécessite de ne pas avoir de porosités gazeuses dans la pièce. Si la soudure de pièces issues de moulage en sable, en coquille ou en cire perdue ne pose pas de problème particulier, la fonderie sous pression limite la soudabilité des pièces. Les pièces injectées ne seront soudables qu'avec l'apport de technologies de sous vide qui limitent très fortement la quantité de porosités internes. Seuls le soudage par résistance et le FSW, où il n'a pas passage à l'état liquide sont compatibles avec l'ensemble des process de fonderie.

5.4.Le soudage de pièces métalliques de natures différentes

On peut être amené à vouloir souder une pièce en aluminium sur une pièce métallique d'une autre nature (acier, fonte, ...). Le mélange des 2 nuances d'alliages (aluminium / acier) dans la zone liquide de la ZAT va créer des phases intermétalliques qui rendront l'assemblage fragile. En évitant le passage à l'état liquide, le FSW et le soudage par friction permettent de souder des alliages de nature hétérogènes.

5.5.La simulation numérique du soudage

Les procédés de soudage peuvent être optimisés par simulation numérique, en amont de la fabrication par de nombreux codes de simulation. La simulation numérique vise à prédire les contraintes et déformations dans les joints soudés et les risques de défauts (craques, ...).

5.6. Le choix d'une technologie de soudage

S'il existe de nombreuses techniques de soudage, elles sont utilisées dans l'industrie automobile de manière très diverses qui peuvent dépendre de leurs performances intrinsèques, mais aussi de la possibilité de réaliser des assemblages multi matériaux (acier/aluminium) ou de leur coût par pièce (prix des installations, automatisation, temps de cycle, consommable, ...). Le soudage laser est de ce point de vue assez

onéreux, même s'il permet une forte automatisation en production automobile alors que le soudage par résistance est sans doute le moins coûteux (pas de consommable, ...). Le MIG et le TIG sont deux procédés matures de loin les plus répandus. Enfin, le FSW est en forte croissance et offre de nombreux avantages (pas de passage en phase liquide, assemblage bi-matière). [19]

6. Les gaz de protection :

- **Argon** : Gaz inerte monoatomique, lourd, neutre, incolore et indolore, le plus utilisé, bon amorçage de l'arc électrique.
- **Hélium** : Gaz inerte monoatomique, neutre, incolore et indolore, plus léger que l'air pour les alliages légers de fortes épaisseurs, cuivre et ses alliages.
- **Hydrogène** : Gaz réducteur n'est jamais utilisé pur et il est généralement additionné pour former un gaz binaire ou ternaire avec l'argon ou l'hélium pour la protection endroit et l'azote pour la protection envers duplex, augmente la tension d'arc, l'apport de chaleur, augmente la vitesse de soudage et des valeurs de pénétration pour certains aciers martensitiques, ferritiques.

Azote : Gaz diatomique, paresseux, incolore et indolore. Ce gaz instable peut générer une instabilité de l'arc et une détérioration accélérée de l'électrode tungstène, Généralement utilisé pour la protection envers des aciers inoxydables du fait de son faible coût. [11]

7. Les aciers :

a) Les aciers ordinaires ou aciers au carbone

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers (tableau 1.3). Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la

présence découle de leur mode D'élaboration : Manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers.

Tableau 1.1 : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés. [6]

Nuance	Pourcentage de carbone (C)	Résistance R_m (MPa) Etat recuit	Emplois
Extra-doux	$C < 0,15$	330-420	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, Pièces de forge
Doux	$0,15 < C < 0,20$	370-460	Charpente métallique, profilés, construction Mécanique courante, boulons, fils ordinaires
Demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	480-550	Pièces de machines pour applications Mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
Mi-dur	$0,30 < c < 0,40$	550-650	Petit outillage, éléments de machines agricoles, Organes de transmission
Dur	$0,40 < C < 0,60$	650-750	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et Traitées
Extra-dur	$0,60 < c$	>750	Outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées, les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- La résistance mécanique à l'état normalisé ou à l'état recuit,
- La trempabilité,
- La soudabilité
- La tenue à chaud,
- La résistance à l'usure et à la corrosion. [6]

8. Défauts de soudures

8.1. Décalage des rives

Le décalage des rives peut aussi s'appeler *haut-bas* ou *dénivellation*.

Le décalage radial maximal doit être de 10% de l'épaisseur nominale de paroi et au plus de 1,6 mm

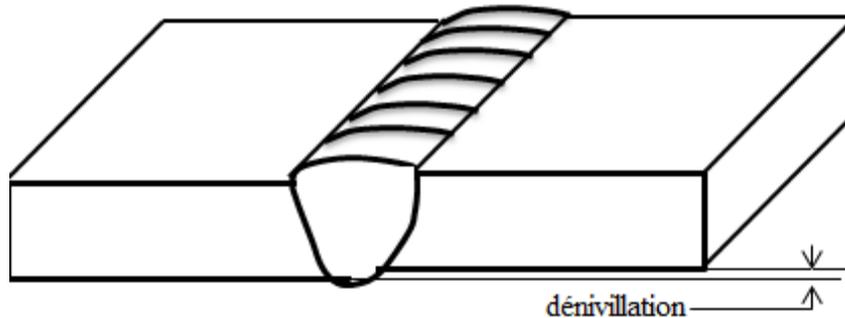


Figure1.5 : décalage des rives [11]

8.2. Hauteur des cordons de soudure à l'extérieur et à l'intérieur

La hauteur du cordon de soudure interne et externe doit indiquer l'armature de moment positif sur la longueur de la soudure, mais la hauteur du cordon ne doit pas dépasser 3 mm, quelle que soit l'épaisseur de paroi. Chapitre I : Généralités sur le soudage [11]

8.3. Fissures

Les fissures sont des ruptures du matériau. Elles sont orientées selon le type de défaut. Ces fissures peuvent se trouver aussi bien dans le métal de base que dans le cordon de soudure, dans la zone affectée thermiquement ou la zone de liaison.

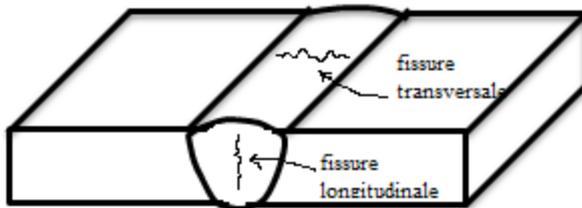


Figure1.6 : fissures [11]

Les fissures peuvent être dues à :

- . des contraintes excessives pendant le soudage (énergie trop élevée, refroidissement trop rapide, métal d'apport non adapté...)
- . volume de cordon trop faible (préparation des bords trop étroite...)
- . arrêt trop brutal de la soudure ;
- . arrêt prématuré de la protection gazeuse en TIG ;

Pour éviter les fissures :

- . Choisir un métal d'apport approprié ;
- . Adopter un préchauffage approprié ;
- . Effectuer une bonne préparation des joints. [11]

8.4. Pénétration incomplète

C'est l'absence de métal à la racine du chanfrein ; Plusieurs termes sont employés pour décrire ce défaut. La pénétration incomplète, la pénétration incomplète à la racine, le manque de pénétration et le manque de pénétration à la racine.

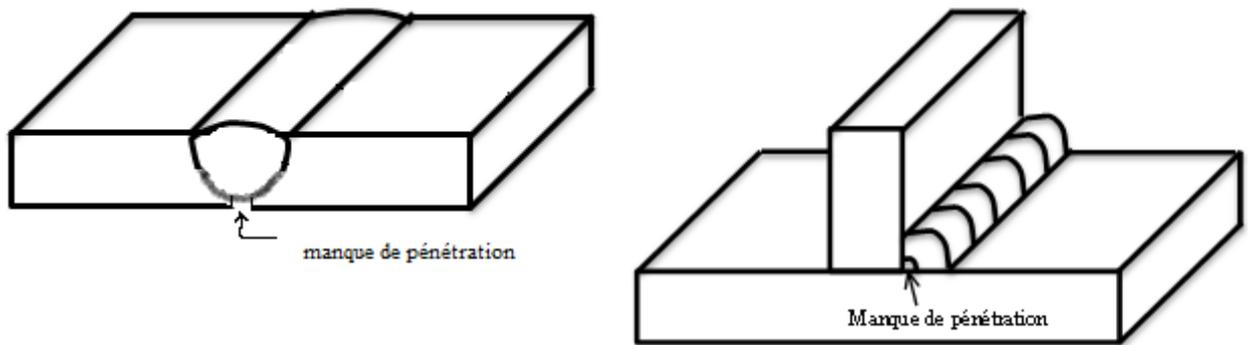


Figure1.7 : Pénétration incomplète [11]

8.5. Manque de fusion (collage)

Le métal de base n'atteint pas son point de fusion, l'adhésion est donc réalisée par un contact imparfait due au *manque de fusion*. Plusieurs types de *manque de fusion* peuvent être associés à une soudure. Le manque de fusion peut se situer entre le métal d'apport et le métal de base, entre le métal d'apport et le métal d'apport, et pour certains types de soudure, entre le métal de base et le métal de base.

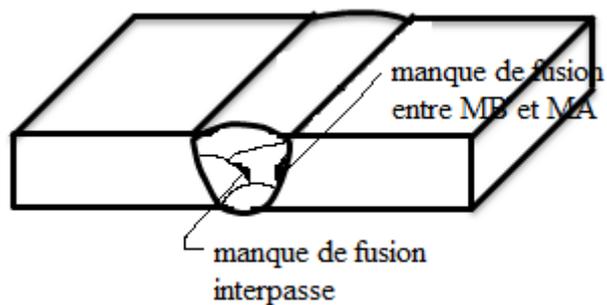


Figure1.8 : Manque de fusion

Les termes plus spécifiques, selon le type de manque de fusion, sont les suivants :

- manque de fusion à la racine;
- manque de fusion à la paroi latérale;
- manque de fusion d'interpasse (entre les passes);

8.5.1.Causes possibles:

- . préparation de la soudure contaminée;
- . manque d'énergie de l'arc, par exemple, courant trop faible;
- . vitesse de soudage trop élevée;
- . inductance trop élevée lors de soudage à Tare sous protection gazeuse (avec transfert par immersion);
- . se reporter également aux causes de pénétration incomplète. [11]

8.6. Caniveaux (sillons)

Un caniveau est un sillon irrégulier à la jonction d'une passe de soudure provoqué par le soudage.

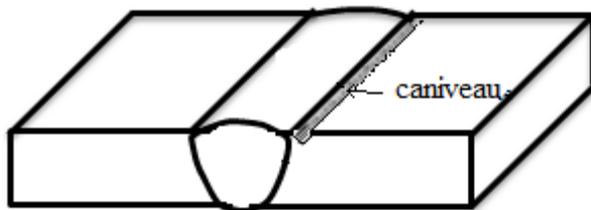


Figure1.9 : caniveau [11]

8.6.1.Causes possibles:

- énergie de l'arc excessive;
- mauvais angle de l'électrode;
- trop de balancements;
- électrode trop grande; [11]

8.7. Manque d'épaisseur

Le *manque d'épaisseur* ou le *manque de métal* est un canal continu ou intermittent sur la surface d'une soudure, le long de sa longueur, provoqué par un manque de métal de soudure. Le canal peut se situer au centre ou le long d'un des côtés ou des deux côtés de la soudure.

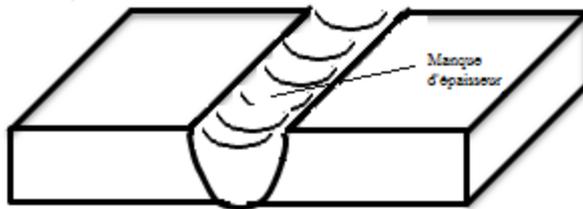


Figure1.10 : *manque d'épaisseur* [11]

8.7.1 Causes possibles :

- . quantité de métal de soudure déposé insuffisante;
- .mauvaise technique de soudage. [11]

8.8.Bulles / porosité

Une *bulle* est une cavité formée par l'occlusion d'un gaz lors de la solidification d'un métal en fusion. La *porosité* est un groupe de bulles. Les *retassures* (*soufflures vermiculaires*) sont des cavités allongées ou tubulaires. La *porosité en chevrons* se reconnaît à des soufflures juxtaposées selon un motif en chevrons.

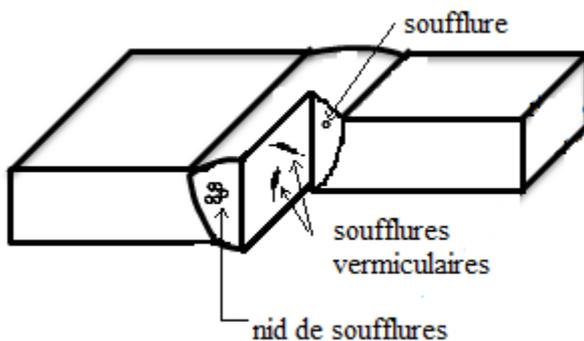


Figure1.11 : Bulles / porosité [11]

8.8.1. Causes possibles :

- excès d'humidité dans la préparation de la soudure;
- excès d'humidité dans le flux;
- préparation de la soudure contaminée (calamine, oxydes etc.);
- utilisation d'une énergie d'arc peu élevée;
- longueur d'arc excessive (notamment avec des électrodes basiques lors de SMAW);
- flux d'électrode endommagé (SMAW);
- perte de l'écran de gaz (SMAW, GMAW, GTAW). [11]

8.9. Inclusions de laitier

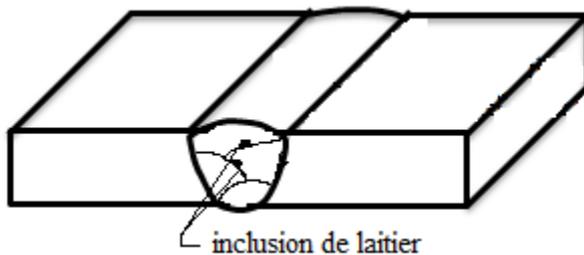


Figure1.12 : Inclusions de laitier [11]

Un *laitier* est un résidu non-métallique en fusion provenant de certains processus de soudage (utilisant un flux).

8.9.1. Causes possibles :

- . mauvais nettoyage entre les passes de la soudure;
- . préparation de la soudure contaminée;
- . soudage sur un profil irrégulier;
- mauvaise vitesse de soudage;
- longueur de l'arc excessive. [11]

9. conclusion :

Le soudage (ou la soudure) est une opération consistant à assembler 2 (ou plus) éléments de manière permanente, tout en assurant la continuité entre ces éléments. L'assemblage se fait soit par chauffage, soit par pression, soit par les 2 combinés, et avec ou sans produit d'apport.

-Le choix du procédé de soudage dépend de plusieurs facteurs :

-L'épaisseur du matériau à souder.

-Le lieu du soudage: Les soudages à l'arc submergé et MAG sont plus adaptés pour l'atelier. Le procédé MMA quant à lui, peut être utilisé sur chantier.

-L'accès au joint. : L'équipement de soudage et la torche ou la tête de soudage doivent pouvoir atteindre la surface à souder.

-La position de soudage : Les soudages SAW et MAG avec transfert par pulvérisation ne conviennent pas pour du soudage vertical ou en position plafond. Le procédé MAG avec transfert par grosses gouttes est acceptable pour du soudage vertical ou en position plafond, mais le procédé MMA reste le plus adapté pour des travaux en position plafond, en particulier sur chantier.

-La composition de l'acier : Les aciers qui contiennent peu de carbone nécessitent des niveaux de préchauffage plus faibles.

-Le coût.

Chapitre 2

Etude mécanique

Et thermique de soudage

Chapitre 2 Etude de mécanique et thermique de soudage

1. Propriétés mécaniques :

1.1. Introduction :

La science des matériaux est l'étude des relations qui existent entre leur structure et leurs propriétés générales. La structure d'un matériau correspond à la façon dont s'agencent ses éléments constitutifs. Plusieurs échelles

- Échelle subatomique : noyau et électrons
- Échelle atomique : disposition des atomes ou molécules les uns par rapport aux autres
- Échelle microscopique : groupes d'atomes
- Échelle macroscopique : éléments de structure visibles à l'œil nu[12]

1.2. Propriétés mécaniques :

1.2.1. L'élasticité

L'élasticité est la capacité d'un matériel à reprendre sa forme originale après avoir subi une déformation. C'est le cas typique d'un ressort qu'on étire puis qu'on relâche. La déformation élastique est une déformation réversible. Un matériau solide se déforme lorsque des forces lui sont appliquées. Un matériau élastique retrouve sa forme et sa taille initiales quand ces forces ne s'exercent plus, jusqu'à une certaine limite de la valeur de ces forces. Les tissus biologiques sont également plus ou moins élastiques.

Les raisons physiques du comportement élastique diffèrent d'un matériau à un autre. Pour les métaux, le treillis atomique change de taille et de forme quand des forces leur sont appliquées. Quand les forces sont supprimées, le système retourne à son état original où l'énergie est la plus faible.[18]

1.2.2. La dureté :

La dureté est la capacité d'une matière à résister à la pénétration d'une matière plus dure qu'elle. Elle est aussi déterminée par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins, tandis que l'aluminium est de faible dureté.[15]

1.2.2.1. Processus de mesure de la dureté

Il faut distinguer entre les processus statiques et dynamiques pour mesurer la dureté. Tous se rapportent à un même principe ; un corps pénétrateur est constamment appuyé sur son matériau avec une force de test précise. La déformation locale provoquée sur la partie plastique et élastique sera mesurée. Les mesures statiques ne déterminent que la déformation plastique.

Selon l'ampleur de la force d'essai on distingue : macro dureté (force $F > 30$ N), la dureté de faible charge (de 2 à 30 N) et la micro dureté ($< 0,5$ N). La mesure de dureté avec Brinell, Vickers et Rockwell appartient aux processus de mesure de dureté statique. Dans les processus dynamiques (méthode de dureté Shore ou essai pendulaire de dureté) on provoque le choc d'un corps pénétrateur sur la partie à mesurer avec une énergie cinétique d'un intervalle défini. C'est ainsi qu'on vérifie les tuyaux, les arbres de turbines ou les pièces coulées. [16]

1.2.3. La ductilité :

À l'opposé de fragilité, la ductilité est la capacité d'un métal à se déformer sans se briser. Il peut être étiré, allongé ou soumis à des forces de torsion. Les matériaux ductiles sont difficiles à casser par ce que les fissures ou les défauts créés par une déformation ne se propagent pas facilement.[17]

Les matériaux ductiles sont habituellement relativement tendres, et les matériaux durs sont souvent fragiles. Les diamants sont des exemples de matériaux très durs, et le talc est un exemple de matériau très tendre. Le cuivre, par ailleurs, est un métal relativement ductile, bien qu'il soit tendre. On peut le plier plusieurs fois sans qu'il se rompe mais, comme nous l'avons appris l'expérience, s'il est plié trop souvent, il devient écroui puis fragile, et se rompt alors facilement. La ténacité est une propriété semblable qui combine la ductilité et la résistance. Le cuir est un excellent exemple de matériau ayant une bonne ténacité. De façon générale, les métaux ductiles ont également une bonne ténacité. [17]

Il existe deux méthodes principales pour mesurer la ductilité :

- Les essais de traction mesurant l’allongement à la rupture et la striction.
- L’essai mouton de Charpy mesurant l’énergie dépensée pour casser une éprouvette.

1.2.3.1. Condition de ductilité

La ductilité dépend de la température, de la pression et de la vitesse de déformation :

- Quand la température augmente, le seuil de plasticité diminue.
- Quand la pression augmente, le seuil de rupture augmente.
- Quand la vitesse de déformation augmente, le seuil de rupture diminue.

1.2.4. Malléabilité

La malléabilité est une particularité qui permet au métal de se laisser façonner. est la propriété d'un matériau à être déformé à chaud ou à froid, par choc ou pression, en conservant la nouvelle forme acquise. La malléabilité est la raison pour laquelle on peut laminier (rouleau compresseur) un matériau, le forger (martèlement), ou découper plus ou moins facilement un matériau de faible épaisseur. D’une autre façon C’est la résistance du métal soumis à des forces de compression, comme le forgeage ou le laminage. Ainsi, plus la température est élevée, plus la malléabilité d’un matériau augmente. [14]

La figure 2.2 qui suit présente certains matériaux en fonction de leur ductilité et de leur malléabilité.

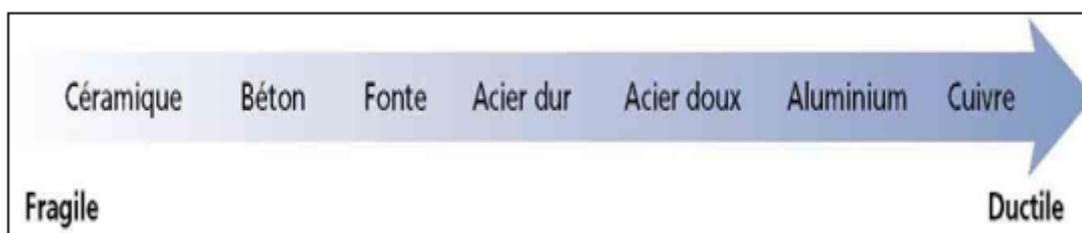


Figure 2.1 : Métaux : du plus fragile au plus ductile. [14]

1.2.5. La ténacité :

1.2.5.1. Définition

La ténacité est la capacité d’un matériau à emmagasiner de l’énergie avant sa rupture, elle

caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures. Les marteaux et les équipements utilisés pour déformer ou couper des plaques d'acier (matrices, poinçons, etc.) sont faits avec des matériaux de haute ténacité.

1.2.5.2. Détermination expérimentale

Pour déterminer expérimentalement la ténacité, on utilise une éprouvette pré-entaillée. En exerçant sur cette éprouvette un système de forces appropriées, on soumet sa fissure à un mode d'ouverture et on évalue l'énergie élastique libérée par la progression de la fissure. La ténacité est proportionnelle à la racine carrée de cette énergie. [17]

- Le mode I : on effectue un essai de traction perpendiculairement au plan de la fissure, c'est le mode le plus dangereux.
- Le mode II : on cisaille dans le plan de la fissure.
- Le mode III : on cisaille perpendiculairement au plan de la fissure.

La fissure étant une entaille, il se crée une concentration de contrainte. On définit donc les facteurs d'intensité de contrainte K_I , K_{II} ou K_{III} selon le mode de sollicitation.

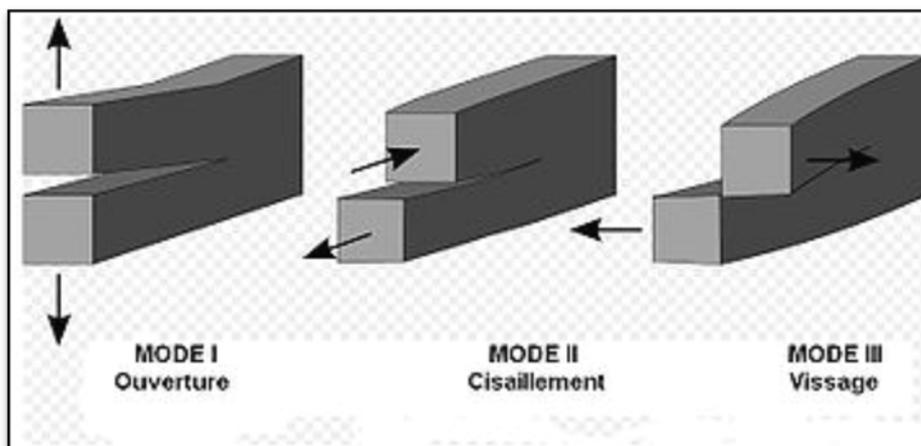


Figure 2.2 :trois modes de sollicitation de la fissure [15]

2. température de soudage :

2.1. Cycle thermique du rechargement

Sur le plan thermique, le soudage est caractérisé par un apport important et localisé de chaleur sur la pièce soudée. La diffusion de l'énergie, ainsi apportée, dans le métal fait du soudage une véritable opération de traitement thermique. Ces effets sont caractérisés par :

- Un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température initiale et la température de fusion du métal.
- Un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et dont la cinétique dépend essentiellement des paramètres de soudage.

L'intérêt de la connaissance du cycle thermique (c'est-à-dire la variation de la température en fonction du temps, en tout point de l'assemblage) de soudage est de permettre l'interprétation quantitative des phénomènes métallurgiques engendrés par cette opération pour déterminer le critère de choix des procédés de soudage et des modes opératoires. (Figure I.13 et figure I.14) [16].

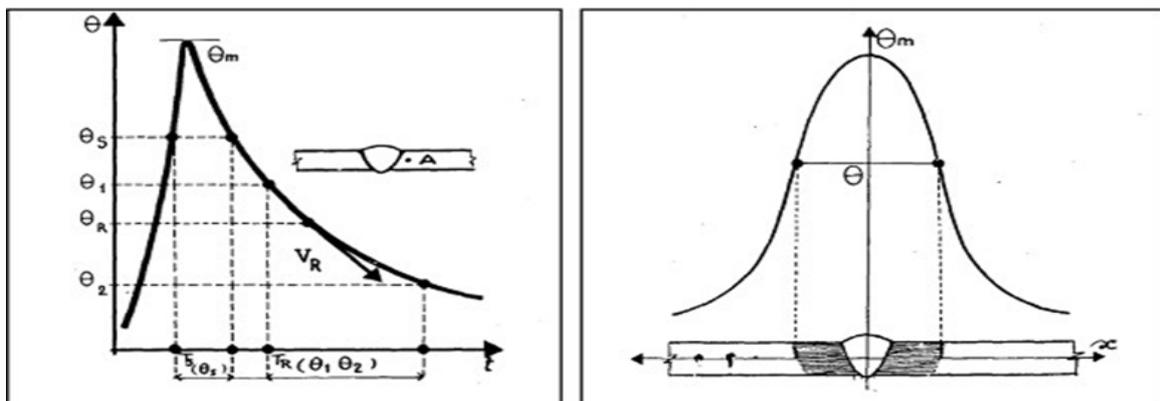


Figure 2.3: $\theta=f(t)$ cycle thermique Figure 2.4: $\theta=f(x)$ cycle thermique

d'un point A d'une soudure [16] d'un point A d'une soudure [16]

2.2. Modifications microstructurales en zone affectée thermiquement

2.2.1. Transformations dans la ZAT lors du chauffage.

Il est commode de raisonner à partir du diagramme d'équilibre pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales. A titre d'exemple, on se placera dans le cadre des aciers de construction métallique, (figure I.15) [16]. Considérons par exemple le cas du soudage d'un acier. En se rapprochant de la zone fondue, on trouvera successivement les zones suivantes :

- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage, c'est-à-dire ayant été chauffé à une température inférieure au point de transformation AC1 (727 °C). A l'équilibre, il s'agit donc d'une structure composée de ferrite α et de carbures de fer Fe₃C (ou cémentite) ou plus précisément de perlite, agrégat lamellaire de ferrite et de cémentite.
- Une zone, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Cependant, lorsque la température atteinte est suffisamment importante (par exemple $\theta > 600$ °C), certains phénomènes tels que le revenu, la globulisation des lamelles de cémentite, la recristallisation dans le cas de soudage sur produit écroui, le vieillissement, etc., peuvent éventuellement intervenir [16].
- Une zone de transformation partielle, portée entre AC1 et AC3 (~ 830 °C pour la composition considérée). Dans ce domaine, coexistent la ferrite et une phase nouvellement formée, l'austénite. C'est à partir de cette zone ($\theta > A$) que débute la zone affectée thermiquement.
- A partir de la température AC3 et jusqu'à 1495 °C environ, la transformation en austénite est totale. La nouvelle structure ainsi formée remplace et « efface » toute trace de la structure ferritique antérieure. C'est au sein de cette zone qu'intervient un grossissement du grain austénitique : de très petite taille à des températures légèrement supérieures à AC3, celui-ci peut atteindre quelques centaines de microns pour les plus hautes températures.

Dans ce cas, on parle de Zone à gros grains, (par exemple lorsque la taille du grain austénitique excède quelques dizaines de microns), il s'agit de la zone en général la plus susceptible de causer certains problèmes métallurgiques.

- Une zone portée partiellement à l'état liquide, où coexistent une phase ferritique solide (δ) et une phase liquide ; de très petite taille, cette zone constitue la zone de liaison entre le substrat et le métal fondu. Sur le diagramme d'équilibre, celle-ci correspond à l'intervalle de température entre le début et la fin de fusion (intervalle solidus-liquidus).
- Enfin le métal fondu ou les premiers germes se solidifient par épitaxie (relations de Cohérence cristallographique) sur les grains de la ZAT [16].

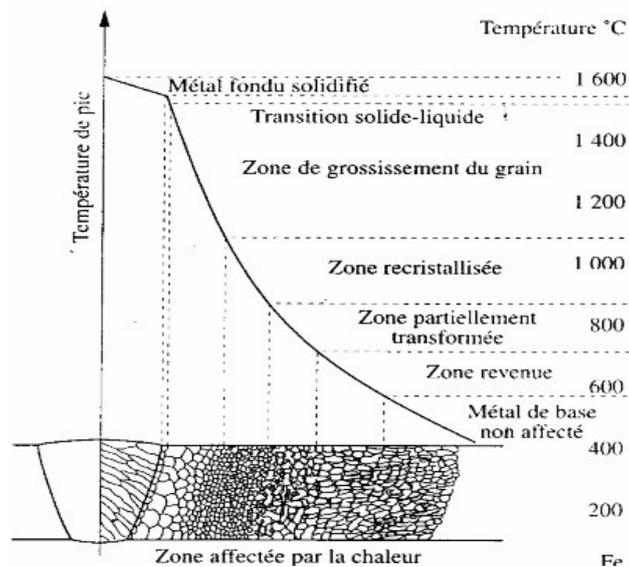


Figure 2.5: Présentation schématique des différentes parties soudées d'un acier [16]

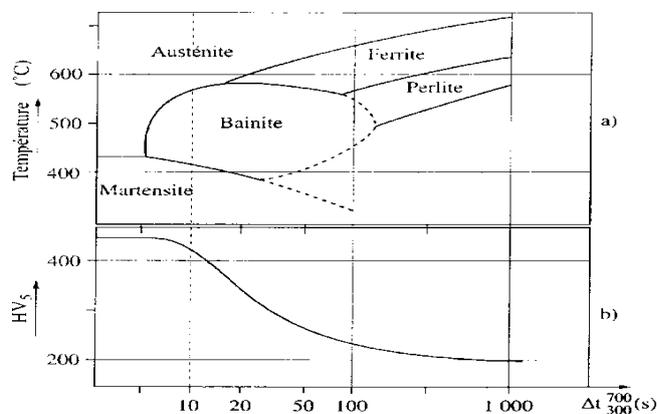
2.2.2. Transformations dans la ZAT lors du refroidissement

Dans le cas des aciers, les microstructures observées dans les ZAT des joints soudés correspondent aux produits de transformation de l'austénite. Il est en fait incorrect d'étudier ces transformations métallurgiques à partir des diagrammes TRC (transformation en refroidissement continu) classiques. En effet, ceux-ci sont généralement établis à partir de traitements austénitiques à température relativement basse (900°C-950°C) et pour des temps de maintiens longs, c'est-à-dire exactement la situation contraire à celle rencontrée en ZAT. Afin de se placer dans des conditions plus représentatives, on étudie généralement les phénomènes métallurgiques à partir de cycles thermiques de chauffage et de refroidissement très proches de ceux relevés en soudage.

Pour un matériau et des conditions d'austénitisation données (température généralement supérieure à 1200 °C, de manière à simuler la ZAT à gros grains), on peut apprécier les transformations de l'austénite en fonction de la vitesse de refroidissement à partir du diagramme TRC en conditions de soudage ou plus simplement de l'évolution de la dureté de la microstructure finale avec la température [16].

Selon la vitesse de refroidissement, différents types de microstructures sont susceptibles de se former. Pour des vitesses très élevées (inférieures à la vitesse critique de trempe, ce qui correspond à un plateau sur la courbe dureté-critère de refroidissement (HV - ΔT), apparaît la martensite (une structure cristallographique tétragonale) (figure I.16), elle a une dureté HV qui ne dépend pratiquement que de la teneur en carbone de l'acier.

Aux vitesses intermédiaires apparaissent des structures bainitique. Les vitesses de refroidissement les plus rapides conduisent à la formation des structures plus dures de bainite inférieure (précipitation de carbures sous la forme de minces plaquettes au sein des lattes de ferrite). Alors que les plus lentes sont associées à la formation de bainite supérieure (carbures =rejetés aux joints inter-lattes ferritiques. parfois sous forme de lamelles de cémentite quasi



continues [16].

Figure2.6: courbe dureté-critère de refroidissement (HV - ΔT) [16]

Les vitesses de refroidissement les plus lentes en soudage correspondent à la précipitation de ferrite proeutectoïde aux anciens joints de grains austénitiques et à l'évolution vers une structure ferrito- perlitique. C'est également dans cette gamme de vitesse de refroidissement

que certains composés (nitrures ou carbonitrures de niobium et de vanadium...), dissous lors de la phase de chauffage, peuvent précipiter sous une forme plus ou moins complète [16].

Le diagramme TRC (dit aussi diagramme CCT) décrit les conditions dans lesquelles, au cours de refroidissements, se déroulent les transformations structurales d'un acier préalablement porté à l'état austénitique (c'est-à-dire chauffé pour transformer le fer α en fer γ et dissoudre totalement ou partiellement les carbures).

Un tel diagramme décrit les domaines de températures dans lesquels se produisent les transformations structurales, domaines qui se situent tous au-dessous de Ac_3 ou Ac_1 et à des températures d'autant plus basses que le refroidissement est plus rapide. Les nombres indiqués le long d'une courbe particulière correspondent aux pourcentages massiques du constituant formé dans le domaine qu'on vient de quitter.

En tenant compte des essais de dureté enregistrés, la vitesse de refroidissement qu'on considérera pour le refroidissement à l'air de notre acier se situe entre les deux lignes « 243 HV et 193 HV ».

La transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ débute vers 750 °C, vers 680 °C, cette transformation s'achève avec une fraction finale en ferrite de 60 %, laissant place à la transformation $\gamma \rightarrow$ Perlite qui se termine vers 650 °C avec une proportion en perlite de 40 %.

Entre 650 °C, fin du domaine perlitique et l'ambiante, aucune transformation n'as lieu. A l'ambiante nous aurons au totale : Y ferritique = 0.6 %

Y perlitique = 0.4 %

2.2.3. Influence des cycles thermiques sur les propriétés mécaniques de la ZAT lors du rechargement

Les modifications importantes de microstructures provoquées par le soudage s'accompagnent naturellement d'évolutions significatives des propriétés mécaniques par rapport au métal de base. On examinera celles concernant les propriétés locales de traction ou de dureté.

Les modifications de propriétés mécaniques en ZAT (résistance mécanique, ou plus simplement dureté) doivent être naturellement appréciées en comparaison avec le métal de

base, dont les propriétés peuvent avoir été obtenues par différentes combinaisons (compositions/traitements thermomécaniques).

En règle générale, les cycles thermiques associés à la zone à gros grains conduisent à un accroissement local de la dureté par rapport à celle du métal de base, tout particulièrement dans le cas d'un refroidissement rapide après soudage. Cette hétérogénéité mécanique a souvent pour but de « reporter » la localisation de la rupture vers le métal de base dans le cas d'essais de traction lisse ou de flexion en travers des joints soudés. Dans le cas d'essais mécaniques comportant une entaille localisée en ZAT, la présence du métal de base avoisinant moins dur contribue au développement facile d'une zone plastique et à une élévation de la ténacité apparente.[16]

3. Le joint soudé

3.1. Les zones des joints soudés

Les différentes zones du joint soudé sur la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé, on distingue les zones suivantes :

- a zone fondue
- b zone de liaison
- c zone affectée thermiquement
- d métal de base

a – Zone fondue

C'est la zone durant l'opération de soudage où l'état liquide a été obtenu qu'il y aie eu ou non apport de métal.

b – Zone de liaison

C'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu[17]

c – Zone affectée thermiquement

Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de

structure (gros grain) ou physico-chimiques (natures et proportions des constituants). Pour les aciers, la ZAT est la zone du métal de base qui a été austénisée au cours du cycle de soudage.

d – Métal de base

Le métal de base est la zone qui n'a pas été affectée par l'opération de soudage du point de vue des modifications physico-chimiques. Par contre cette zone peut être le siège de contraintes et de déformations.

Cette zone commence à l'isotherme A1 pour le soudage d'une tôle d'acier normalisé. (voir cours précédents.[17])

3.2. Soudure bout à bout

Les soudures bout à bout sont des soudures où deux pièces de métal à assembler sont dans le même plan. Ces types de soudures ne nécessitent qu'une sorte de préparation et sont utilisés avec des métaux en feuilles minces qui peuvent être soudés avec un seul passage. Les problèmes courants qui peuvent fragiliser une soudure bout à bout sont le piégeage de laitier, l'excessive porosité ou la fissuration. Pour les soudures fortes, l'objectif est d'utiliser le moins de matériel de soudage possible. Les soudures bout à bout sont répandues dans les procédés de soudage automatisés, tels que le soudage à l'arc submergé, en raison de leur relative facilité de préparation. Lorsque les métaux sont soudés sans orientation humaine, il n'y a pas d'opérateur de faire des ajustements pour la préparation conjointe non-idéal. En raison de cette nécessité, les soudures bout à bout peuvent être utilisées pour leur conception simplifiée à alimenter par des machines de soudage automatisé efficace.

3.2.1. Les types

Il existe plusieurs types de soudures bout à bout, mais entrent tous dans une de ces catégories: joints bout à bout simples soudés bout à bout, joint double soudure, et joints bout à bout ouverts ou fermés. Un joint bout à bout soudé unique est le nom d'un joint qui n'a été soudé d'un côté. Un joint bout à bout à double soudure est créée lorsque la soudure a été soudée des deux

côtés. Avec le double de soudage, au fond de chaque soudure peuvent varier légèrement. Une soudure de fermeture est un type de joint, dans lequel les deux pièces qui seront jointes sont en contact pendant le processus de soudage. Une soudure ouverte est du type joint où les deux pièces disposent d'un petit espace entre eux pendant le processus de soudage. [18]

3.2.1.1. Carrés joints bout à bout

La rainure en place est un joint de soudure bout à bout avec les deux pièces étant planes et parallèles entre elles. Ce joint est simple à préparer, économique à utiliser et fournit une résistance satisfaisante, mais elle est limitée par l'épaisseur des joints. La soudure bout à bout carré fermé est un type de joint à rainure carrée, sans espacement entre les pièces. Ce type de joint est commun avec le soudage à l'arc et du gaz.

Pour les joints plus épais, le bord de chaque élément de l'articulation doit être disposée à une géométrie particulière pour fournir une accessibilité pour le soudage et d'assurer la solidité et la résistance à la soudure désirée. L'ouverture ou la fente à la base du joint et l'angle inclus de la rainure doit être sélectionné pour nécessiter le moins de métal de soudure nécessaire pour permettre l'accès nécessaire et répondre aux exigences de résistance. [ibid]

3.2.1.2. V-joints

soudures bout à bout unique sont semblables à un joint en biseau, mais au lieu d'un seul côté ayant le bord biseauté, les deux côtés du joint de soudure sont biseautés. Dans les métaux épais, et lors du soudage peut être effectué des deux côtés de la pièce à usiner, un joint à double-V est utilisé. Lors du soudage des métaux plus épaisses, un joint à double-V nécessite moins de matériau de remplissage, car il y a deux joints en V plus étroites par rapport à une articulation unique V large. De plus, le double joint-V permet de compenser les forces de déformation. Avec un joint unique V, le stress a tendance à déformer la pièce dans une direction lorsque le joint en V est rempli, mais avec un double-joint en V, il y a des soudures sur les deux côtés du matériau, ayant des contraintes opposées, le redressement du matériau .

3.2.1.3. J-joints

Soudures bout à bout à l'unité-J sont quand une pièce de la soudure se présente sous la forme d'un J qui accepte facilement la matière de remplissage et l'autre pièce est carrée. A J-rainure est formée , soit avec des machines de découpe spéciale ou par meulage du bord de jonction en forme de J. Bien qu'une rainure en J est plus difficile et coûteux à préparer que une rainure en V, une seule rainure en J sur métal entre un demi - pouce et les trois quarts de pouce d'épaisseur fournit une soudure plus forte qui nécessite moins de matériau de remplissage.

Soudures bout à bout Double-J ont une pièce qui a une J forme dans les deux sens et l'autre pièce est carrée.

3.2.1.4. U-joints

soudures bout à bout à simple U sont des soudures qui ont deux bords de la surface de la soudure en forme de J, mais une fois qu'ils sont réunis, ils forment un joints U. Double-U ont une formation en U à la fois sur le dessus et le dessous de l'articulation préparée. U-joints sont le bord le plus coûteux à préparer et à souder. Ils sont généralement utilisés sur les métaux de base épais où une rainure en V serait à un angle extrême, qu'il en coûterait trop à remplir.

3.2.1.5. Tee-Joints

Le T - joint de soudure est formé lorsque deux barres ou feuilles sont reliées perpendiculairement les unes aux autres sous la forme d'un T forme. Cette soudure est faite à partir du procédé de soudage bout à bout de résistance. Il peut également être réalisé par extrusion de soudage . Habituellement, deux pièces plates de poly sont soudées à 90 degrés par rapport à l'autre, et soudées par extrusion sur les deux côtés. [18]

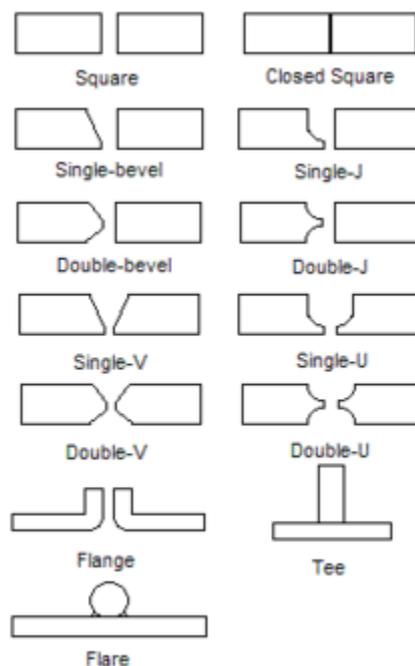


Figure2.7 : géométries communes Butt. [18]

4. Différentes classifications :

Principes de désignation symbolique des aciers selon la norme EN 10027-1-2.

Article détaillé : Désignation normalisée des aciers.

Chaque pays a son mode de désignation des aciers. Le schéma ci-contre indique la désignation européenne selon la norme EN10027. Cette norme distingue quatre catégories :

- les aciers non-alliés d'usage général (construction) ;
- les aciers non-alliés spéciaux, pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables, etc. ;
- les aciers faiblement alliés, pour trempe et revenu ; les éléments d'alliage favorisent la trempabilité et permettent d'avoir des structures martensitiques ou bainitiques, donc des aciers à haute dureté, à haute limite élastique, pour les outils, les ressorts, les roulements, etc. ;
- les aciers fortement alliés :
 - les aciers inoxydables,
 - les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forets.

4.1. Aciers non alliés

4.1.1. Aciers non alliés d'usage général

Ils sont destinés à la construction soudée, à l'usinage, au pliage, etc. On distingue :

- le type S qui correspond à un usage général de base (construction de bâtiment...)
- le type P pour usage dans les appareils à pression ;
- le type L pour les tubes de conduites ;
- le type E pour la construction mécanique ;
- le type R pour les rails.

La désignation de ces aciers comprend la lettre indiquant le type d'usage, suivie de la valeur de la limite élastique minimale (R_e) exprimée en mégapascals (MPa). À noter qu'il s'agit de la valeur à faible épaisseur, les résistances décroissant avec l'épaisseur.

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre G. La désignation peut être complétée par des indications supplémentaires (pureté, application dédiée, etc.).

4.1.2. Aciers non alliés spéciaux (type C)

La teneur en manganèse est inférieure à 1 %, et aucun élément d'addition ne dépasse 5 % en masse. Leur composition est plus précise et plus pure et correspond à des usages définis à l'avance.

Leurs applications courantes sont les forets (perceuses), ressorts, arbres de transmission, matrices (moules), etc.

Leur désignation comprend la lettre C suivie de la teneur en carbone multipliée par 100. S'il s'agit d'un acier moulé, on précède la désignation de la lettre G.

Exemples :

- C45, acier non allié comportant un taux de 0,45 % de carbone ;
- GC22, acier moulé non allié comportant un taux de 0,22 % de carbone.

4.2. Aciers faiblement alliés

La teneur en manganèse est supérieure à 1 % et aucun élément d'addition ne doit dépasser 5 % en masse. Ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance.

Exemples de désignation normalisée :

- 35NiCrMo16 : contient 0,35 % de carbone, 4 % de nickel, du chrome et molybdène en plus faible teneur. Cet acier présente une bonne tenue aux chocs ainsi qu'une haute résistance mécanique jusqu'à 600 °C ;
- 100Cr6 : 1 % de carbone et 1,5 % de Chrome. C'est l'acier typique utilisé dans les roulements à billes.

4.3. Aciers fortement alliés

Au moins un élément d'addition dépasse les 5 % en masse, destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, réfractaires, maraging (très haute résistance, utilisés dans l'aéronautique et pour la fabrication de coque de sous-marins), Hadfields (très grande résistance à l'usure), Invar (faible coefficient de dilatation).

Un exemple de désignation normalisée est « X2CrNi18-9 » (il s'agit d'un acier inoxydable).

Les aciers rapides spéciaux (ARS, ou high speed steels, HSS) font partie de cette famille.

4.4. Aciers inoxydables

Ces aciers présentent une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (déformation irréversible). Ils sont essentiellement alliés au chrome, élément qui confère la propriété d'inoxidabilité, et au nickel, élément qui confère de bonnes propriétés mécaniques. Les aciers inoxydables sont classés en quatre familles : ferritique, austénitique, martensitique et austéno-ferritique. Les aciers inoxydables austénitiques sont les plus malléables et conservent cette propriété à très basse température ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Leurs applications sont multiples : chimie, nucléaire, alimentaire, mais aussi coutellerie et équipements ménagers. Ces aciers contiennent au moins 10,5 % de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

4.5. Aciers multiphasés

Ces aciers sont conçus suivant les principes des composites : par des traitements thermiques et mécaniques, on parvient à enrichir localement la matière de certains éléments d'alliage. On obtient alors un mélange de phases dures et de phases ductiles, dont la combinaison permet l'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques. On citera, par exemple :

- les aciers Dual Phase qui sont la déclinaison moderne de l'acier damassé, mais où la distinction entre phase dure (la martensite) et phase ductile (la ferrite), se fait plus finement, au niveau du grain¹⁶ ;
- les aciers duplex formés de ferrite et d'austénite dans des proportions sensiblement identiques ;

- les aciers TRIP (Transformation Induced Plasticity), où l'austénite se transforme partiellement en martensite après une sollicitation mécanique. On débute donc avec un acier ductile, pour aboutir à un acier de type Dual Phase ;
- les aciers damassés où des couches blanches ductiles pauvres en carbone absorbent les chocs, et les noires, plus riches en carbone, garantissent un bon tranchant. [15]

5-conclusion :

La durée de vie en fatigue des joints soudés est fortement affectée par la présence en pied du cordon d'une concentration de contrainte liée à la géométrie de la soudure. Les zones d'amorçage de la fissure sont en correspondance soit avec cet accident géométrique du cordon, soit avec un défaut interne (manque de pénétration, soufflures) ou externe (caniveaux, inclusions de laitier).

La résistance statique d'un assemblage soudé bout à bout est en général égale à celle du métal base par contre la résistance en fatigue est bien inférieure. Différents paramètres affectent la tenue en fatigue des joints soudés :

- facteurs géométriques : forme du cordon, mauvais alignement des tôles, épaisseur des tôles,
- facteurs métallurgiques : nature du métal base, procédé de soudage, défauts de soudage, niveau des contraintes résiduelles,
- facteurs liés à la sollicitation : mode de chargement (amplitude constante ou variable, rapport de charge), gradient de sollicitation, biaxialité des contraintes, environnement.

Chapitre 3 :

**Influence de la température sur les
propriétés mécaniques
(transformations métallurgiques)**

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les transformations métallurgiques ainsi que le refroidissement de la soudure (transformations métallurgiques), l'étude de la zone affectée thermiquement (ZAT), et ses régions différentes. Et les classifications des aciers.

2. Solidification

2.1. Diffusion

Quand une interface liquide-solide se déplace, le solide qui se forme n'a pas la composition du liquide qui lui donne naissance.

Même dans les métaux industriellement purs, il subsiste une faible quantité d'impuretés ou d'éléments d'accompagnement ce qui fait qu'il s'agit d'alliages.

Pendant la solidification et selon:

- la dimension des atomes,
- la mobilité des éléments en phase solide,
- le temps permettant une certaine mise en ordre pendant la construction des cristaux,

le front de solidification résorbe une certaine quantité de ces atomes ; mais la plus grande partie de ceux-ci se trouve refoulée vers le métal liquide où la mobilité des atomes est aisée.

Il y a ségrégation.

On note ainsi un partage K:

$$K = \frac{\text{concentration du soluté dans le solide}}{\text{concentration du soluté dans le liquide}}$$

K est en général < 1 ; ce qui veut dire que le liquide s'enrichit en impuretés ou en éléments d'alliage. [20]

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

2.2. - SURFUSION CONSTITUTIONNELLE

Cette ségrégation entraîne une surfusion que l'on appelle constitutionnelle car le gradient de température calculé à l'aide du diagramme d'équilibre est supérieur au gradient qui existe en avant de l'interface.

En soudage, à la zone de liaison, le gradient de température est maximal et la vitesse de solidification minimale ; au centre du cordon, le gradient est minimal et la vitesse de solidification maximale.

Selon MATSUDA, en partant de la zone de liaison, la vitesse de solidification va croissante ; l'interface solide-liquide est macroscopiquement plane et donne sur le support une croissance épitaxiale plane sur une certaine longueur. Au delà, des ondulations apparaissent à mesure que la diffusion des éléments d'alliage fait croître la surfusion.

Bientôt des cristaux cellulaires prennent naissance avec une ségrégation accusée aux joints des cellules.

Puis très rapidement, en s'approchant de l'axe, la vitesse de solidification augmente et l'interface liquide- solide se développe sous forme dendritique; la ségrégation se fait dans les espaces interdendritiques.

Au voisinage de l'axe du cordon, le liquide atteint un degré élevé de surfusion si bien qu'en avant du front de solidification il se forme un deuxième front ; les cristaux prennent une forme équiaxée.

L'étendue de chacune de ces zones dépend :

-de la pureté et de la nature des métaux et alliages,

-de la dissipation calorifique (évacuation de la chaleur latente de solidification; saturation périodique, cernes et vagues de solidification),

-des procédés et paramètres de soudage, en particulier de la vitesse de soudage ($V_s > V_c$),

(en avant de l'interface liquide-solide en soudage à l'arc avec électrodes enrobées, la longueur de la surfusion est de l'ordre de 4/1000 à 4/100mm).

L'agitation du bain, l'apport extérieur de métal, le mode de transfert, les variations de viscosité, la tension de vapeur de certains éléments, l'affinité pour former des solutions solides interstitielles de certains éléments, tout ce qui joue sur la forme et les dimensions de la zone fondue, modifient l'importance ou la composition du liseré de soluté en avant du front de solidification.

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

La dimension de la cristallisation de la zone fondue dépend de l'état du métal de base dans la zone affectée voisine, lui-même dépendant :

- de la dimension initiale des grains du métal de base,
- de l'état d'écrouissage et de la texture d'écrouissage du métal de base,
- du procédé de soudage et du mode opératoire,
- de la température initiale des pièces,
- de la masse et de la conductibilité des pièces.
- du temps de séjour à haute température qui découle des trois derniers éléments et va jouer sur .la surchauffe, c'est-à-dire sur la dimension du grain « germé » à la zone de liaison,
- .l'homogénéisation par l'effacement des structures en bandes. [20]

2.3. SÉGRÉGATION DES ÉLÉMENTS

La vitesse de diffusion n'est pas la même pour tous les éléments et cette vitesse varie également en fonction des éléments en présence.

D'après certains auteurs, on peut écrire que la diffusion des éléments peut être classée selon la suite :

du plus diffusible

au moins diffusible

S - N - Sn - As - P - C - Ti - Mo - Cr - Si - Cu - Mn - Ni

+ 

mais ce classement n'est pas absolu, il peut être modifié selon la nature de l'alliage considéré.

[21]

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

3. TRANSFORMATIONS MÉTALLURGIQUES AU REFROIDISSEMENT

3.1. Données générales

Après refroidissement, les structures obtenues en zone affectée thermiquement varient entre l'état recuit (quand une diffusion suffisante permet d'obtenir l'état d'équilibre au refroidissement), et l'état trempé (quand une diffusion insuffisante ne permet pas d'obtenir l'état d'équilibre au refroidissement).

Cela dépend :

- de la trempabilité de l'austénite formée au chauffage,
- de la vitesse de refroidissement de cette austénite consécutive aux cycles thermiques. [21]

3.1.1 Cas d'un acier 25CrMo, à l'état recuit soudé en une passe par fusion de proche en proche

Région a : non transformée.

Région b:

Facteurs de la trempabilité :

- austénite à grains fins \implies faible trempabilité (f),

austénite plus chargée en carbone que le métal de base \implies forte trempabilité par rapport aux régions c et d (F),

faible vitesse de refroidissement faible risque de trempe (f).

CONCLUSION:

- $f+F+f \implies$ faible à moyenne probabilité de trempe. [21]

Région c:

Facteurs de la trempabilité :

. austénite à grains moyens = moyenne trempabilité (m),

. austénite de même teneur en carbone que le métal de base moyenne trempabilité par rapport à la région b (m),

.moyenne vitesse de refroidissement moyen risque de trempe (m).

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

CONCLUSION :

.m + m + m \implies moyenne probabilité de trempe. [21]

Région d:

Facteurs de la trempabilité :

.austénite à gros grains forte trempabilité (F)

.austénite de même teneur en carbone que le métal de base > moyenne trempabilité par rapport à la région b (m),

.forte vitesse de refroidissement fort risque de trempe (F)

CONCLUSION :

F+m + F \implies Forte probabilité de trempe. [21]

On remarque que la région sous le cordon est la plus susceptible de trempe.

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

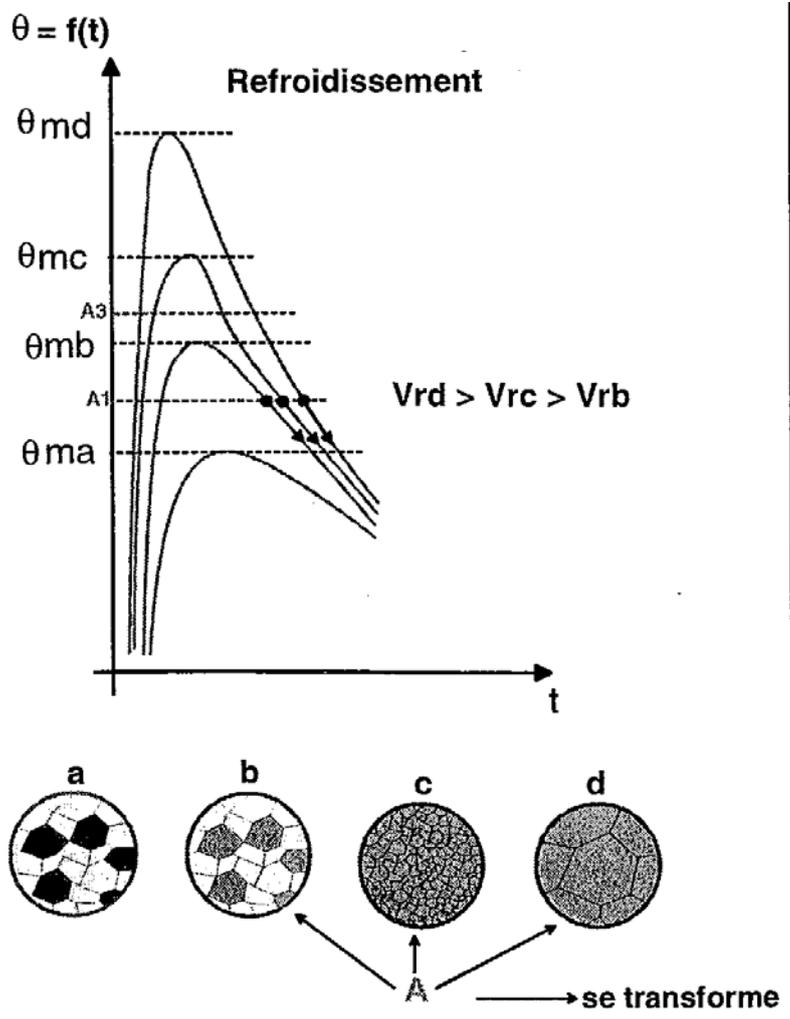


Figure 3.1: vitesse de refroidissement [21]

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

3.2. –UTILISATION, EN SOUDAGE, DES COURBES T.R.C. POUR TRAITEMENT THERMIQUE

3.2.1. - Données générales

T.R.C. = Transformation au Refroidissement Continu.

Les structures obtenues en zone affectée thermiquement peuvent être déterminées à l'aide des courbes T.R.C. pour traitement thermique, en y intégrant les temps de refroidissement mesurés à partir des cycles thermiques (dans la mesure où le traitement thermique de chauffage figurant dans la courbe T.R.C. pour traitement thermique est équivalent au cycle de chauffage (température + temps) de la région soudée étudiée).

3.2.2. – Cas d'un acier 25CrMo, à l'état recuit soudé en une passe par fusion de proche en proche

Région b :

La courbe T.R.C. pour traitement thermique du 25CrMo, ne peut pas être utilisée car le traitement thermique d'austénitisation qui y figure (900°C, 1/2 heure) n'est pas équivalent au traitement thermique d'austénitisation de la région b (chauffée entre A1 et A3 quelques secondes).

Région c :

La courbe T.R.C. pour traitement thermique du 25CrMo, peut être utilisée car le traitement thermique d'austénitisation qui y figure (900°C, 1/2 heure) peut être considéré équivalent au traitement thermique d'austénitisation de la région c (chauffée au dessus de 900°C quelques secondes).

Région d = région sous cordon:

La courbe T.R.C. pour traitement thermique du 25CrMo, ne peut pas être utilisée car le traitement thermique d'austénitisation qui y figure (900°C, 1/2 heure) n'est pas équivalent au traitement thermique d'austénitisation de la région d (chauffée juste en dessous de la température de fusion quelques secondes).

Dans ce cas, une courbe T.R.C. spécifique au soudage est nécessaire.

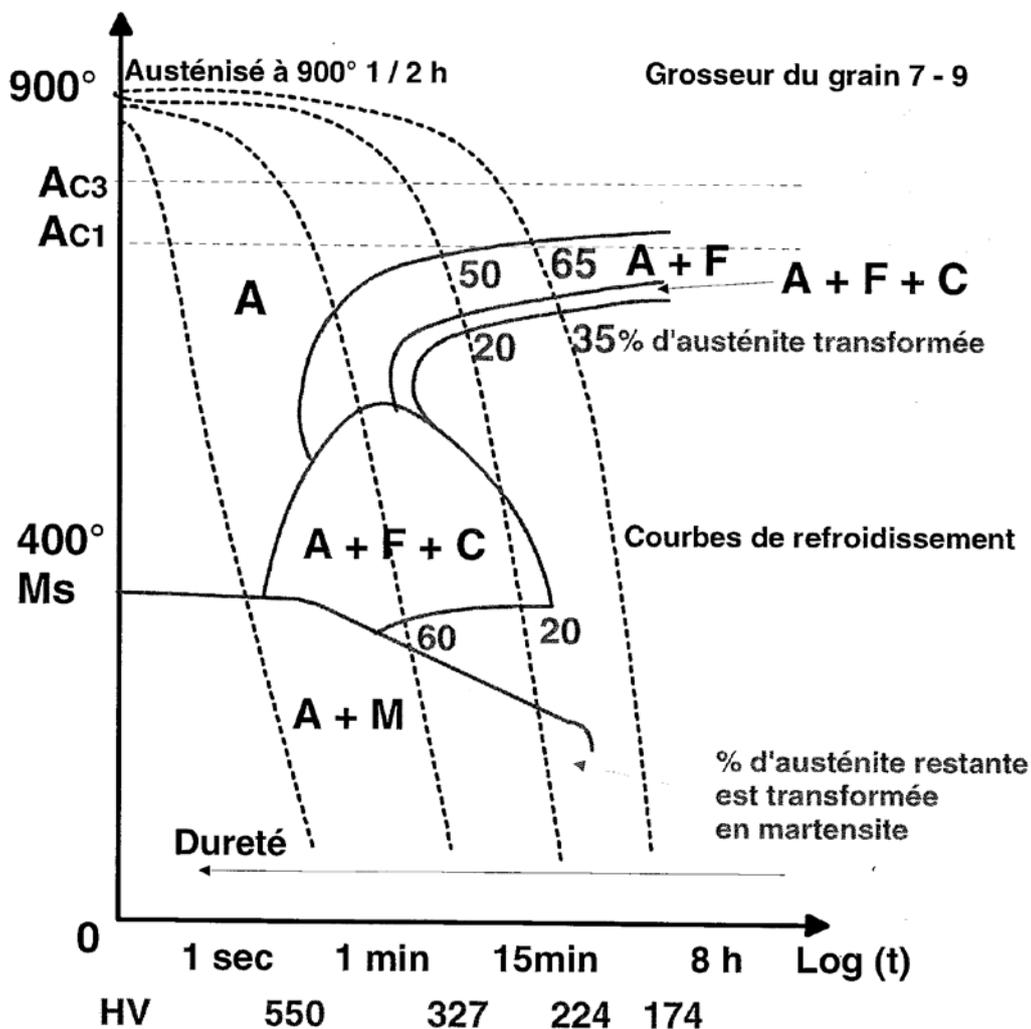


Figure3.2: traitement thermique de 25CrMo [21]

4. Classification des aciers :

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation.

L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers [11] :

- Les aciers au carbone d'usage général ;
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non ;
- Les aciers à outils ;

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

- Les aciers inoxydables.

Dans notre étude on s'est intéressé aux aciers au carbone, utilisé pour la fabrication des tubes. [22]

4.1. Les aciers ordinaires ou aciers au carbone

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers (Tableau 1). Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers. [23]

Nuance	Pourcentage de carbone(C)	Résistance R_m (Mpa) Etat recuit	Emplois
Extra-doux	$C < 0.15$	330-420	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie Pièces de forge
Doux	$0.15 < C < 0.20$	370-460	Charpente métalliques, profiles, construction mécaniques, courante, boulons, fils ordinaire
Demi-doux	$0.20 < C < 0.30$	480-550	Pièces de machines pour application mécaniques Pièces ou bâtis moulés, pièces forgées.
Demi-dur	$0.30 < C < 0.40$	550-650	Petites outillage, éléments de machines agricoles, organe de transmission
Dur	$0.40 < C < 0.60$	650-750	Pièces d'outillage d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutelleries, pièce moulées et traités
Extra-dur	$0.60 < C$	< 750	Outils d'usinage et découpe, câbles, ressort

Tableau 3.1 Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés [23]

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées, les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- la trempabilité ;
- la soudabilité ;
- la tenue à chaud ;
- la résistance à l'usure et à la corrosion. [23]

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

4.2. Le soudage des aciers au carbone

Les aciers pour les constructions soudées sont des hypoeutectoïdes et leur teneur encarbonate ne dépasse pas la valeur 0,40 %. A côté du carbone, nous trouvons toujours dans l'acier quelques éléments inévitables, dont la présence est due au processus de fabrication et qui sont le Manganèse, le Silicium, le Soufre et le Phosphore. L'opération de soudage se distingue des opérations métallurgiques classiques par le fait que les vitesses d'échauffement sont très élevées, que les températures maximales des différents points des pièces varient avec leurs distances au joint et que les durées de maintien de ces températures sont très faibles. De plus, les transformations métallurgiques qui apparaissent au refroidissement, dans la zone affectée thermiquement (ZAT) du joint soudé, s'accompagnent de traitements thermiques. L'expérience montre en fait que la structure métallurgique finale en tout point de la ZAT ne dépend pratiquement que de la température maximale atteinte en ce point, et du critère de refroidissement.

Dans le cas du soudage des aciers au carbone, on peut distinguer quatre zones dans les joints, suivant les températures maximales atteintes [24] :

1. La zone fondue, pour laquelle la température maximale est supérieure ou égale à la température de fusion ;
2. La zone entièrement austénitique, pour laquelle la température maximale est comprise entre la température de fusion (TF) et la température Ac3 ;
3. La zone partiellement austénitique, pour laquelle la température maximale est comprise entre les températures Ac3 et Ac1 ;
4. La zone influencée, non austénitisée, pour laquelle la température maximale est inférieure à Ac1.

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

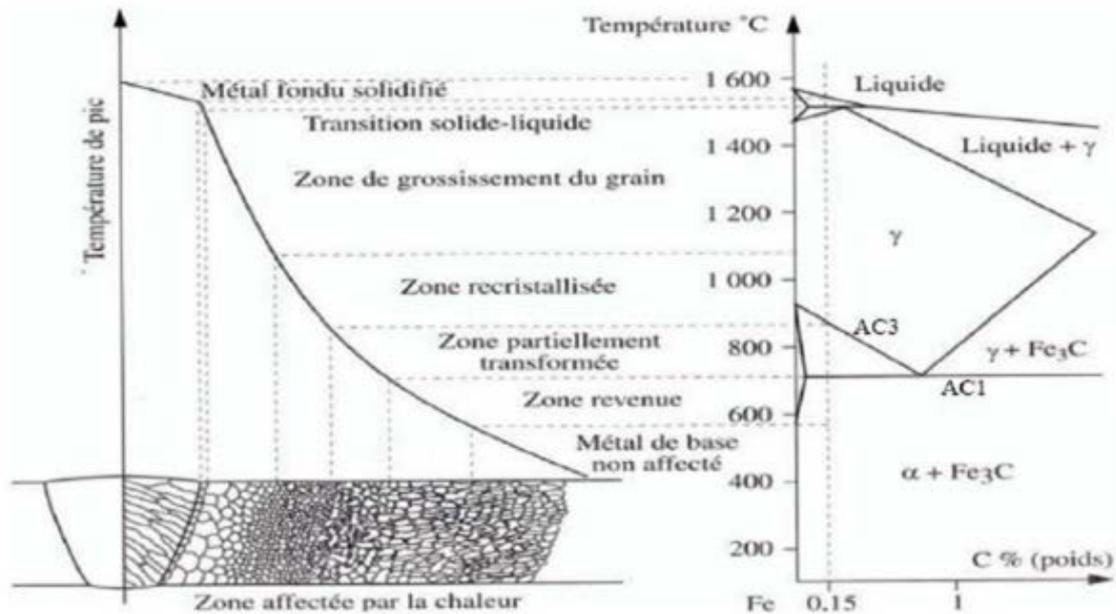


Figure 3.4 Transformation de l'acier dans la zone réchauffée [23]

4.3. Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZAT après le soudage. Afin de préserver les qualités du métal à souder, notamment en ce qui concerne la ductilité, le métal soudé doit retrouver une structure interne similaire à son état initial.

La figure 4 illustre l'effet de la température sur les grains de l'acier, on peut remarquer la zone où on trouve de l'austénite, c'est dans cette zone que, dans le cas où le refroidissement est trop rapide, le métal se solidifie en martensite plutôt qu'en ferrite et en perlite, ce qui crée des tensions internes [25].

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

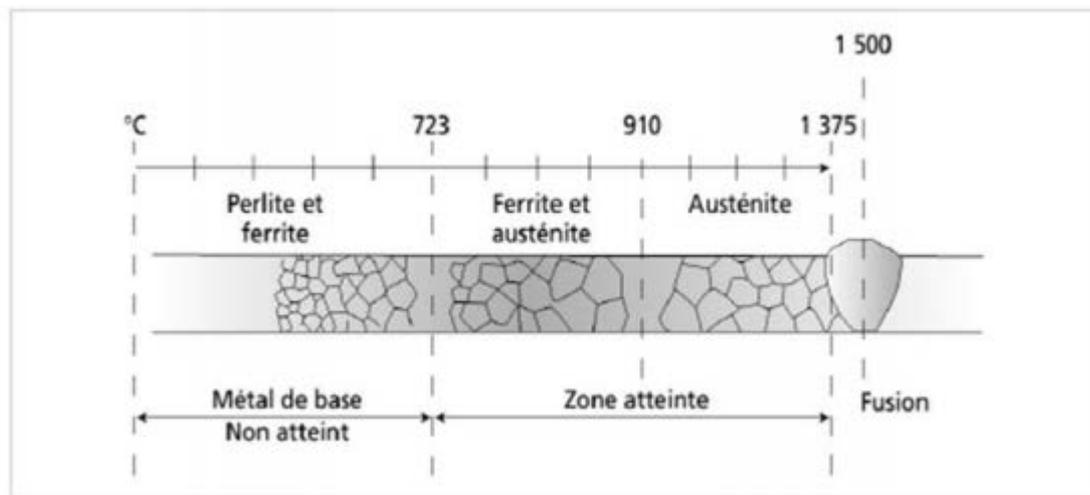


Figure 3.5 Influence de la température sur les grains [25]

Les principaux facteurs qui influent sur la soudabilité du carbone sont les suivants:

- Trempabilité : c'est le facteur principal. Il détermine le comportement des aciers lors du refroidissement rapide. Plus l'acier a tendance à adopter une structure martensitique, plus sa fragilité augmente et cela accroît d'autant les risques de fissures.
- Carbone équivalent (CE) : le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité de l'acier, car plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la trempé. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent . [23]

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	Préchauffage
< 0,40	Excellent	Aucun
0,40 à 0,50	Bon	Aucun De 100 à 300 °C
0,50 à 0,60	Moyen	De 100 à 300 °C De 200 à 400 °C
0,60 à 0,70	Médiocre	De 300 à 400 °C
> 0,70	Mauvais	Non soudable

Tableau3.2 Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier [25]

Les métaux suivants entrent dans le calcul du carbone équivalent : le carbone bien sûr (C), le manganèse (Mn), le silicium (Si), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu). La formule à utiliser est la suivante :

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

$$\text{Carbone équivalent} = C + \frac{Mn + Ci + Cr}{6} + \frac{Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{13}$$

Dans cette formule, le symbole de l'élément indique son pourcentage de masse

dans l'alliage (Par exemple, si on a 0,5 % de carbone et 0,03 % de manganèse, alors $C = 0,5$ et $Mn = 0,03$). Une autre formule d'essence japonaise s'appliquerait à un large éventail de nuance d'acier à haute limite d'élasticité à plus bas carbone (cas des aciers pour tubes) [14] :

$$\text{Carbone équivalent} = C + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Plus la teneur en carbone est élevée, plus les aciers sont difficiles à souder. [23]

4.4 Les aciers à haute limite élastique

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HSLA : High Strength Low Alloy) sont un groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent un peu d'éléments d'alliage pour atteindre les limites d'élasticité plus supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé. Ces aciers ont des meilleures propriétés mécaniques et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone graphite lamellaire. D'ailleurs, la haute limite élastique des aciers HSLA peut être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HSLA est comparable ou meilleur à celui des aciers doux. [23]

5. Procédés d'assemblage nécessitant de la chaleur

Les procédés disponibles pour la jointure des métaux et alliages sont les suivants :

- Le brasage tendre
- Le brasage fort
- Le soudage

Ce qui fait la distinction entre le soudage le brasage tendre et le brasage fort sont les points suivants:

- Le brasage tendre (Fig.6) et brasage fort (Fig. 7) impliquent la fusion d'un matériau à une température de fusion plus basse entre les pièces pour former un lien entre elles, sans pour autant faire fondre les pièces.

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

- Les matériaux à souder sont élevés au-dessus de leur point de fusion à proximité du joint, afin qu'il y ait fusion.
 - En conséquence de cela, des changements chimiques et métallurgiques complexes ont lieu dans les matériaux autour du joint soudé.
 - Ces changements microstructuraux peuvent avoir une influence profonde sur les propriétés du joint et sur son aptitude à l'emploi.
- *Le brasage tendre: il s'agit du procédé par le biais duquel deux métaux sont joints par l'intermédiaire d'un troisième métal ou alliage avec un point de fusion relativement bas. Le brasage tendre se caractérise par la valeur du point de fusion du troisième métal ou alliage, qui est inférieur à 450°C. .
- *Le brasage fort: a lieu à la température de fusion du métal d'apport pour brasage (par exemple, de 870°C à 980°C pour les alliages de bronze) ce qui est souvent considérablement plus bas que le point de fusion du matériau de base (par exemple, 1600°C pour l'acier doux). [26]

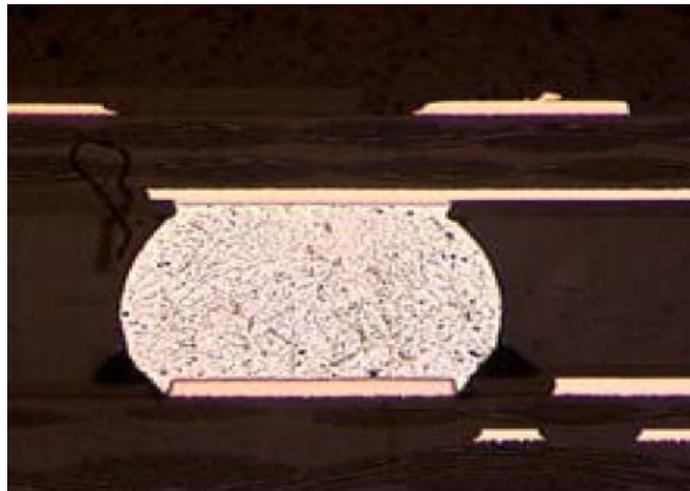


Fig.6: Section polie d'une brasure tendre entre des connexions conductrices de cuivre dans un circuit imprimé. Fond clair, 100x. [26]

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

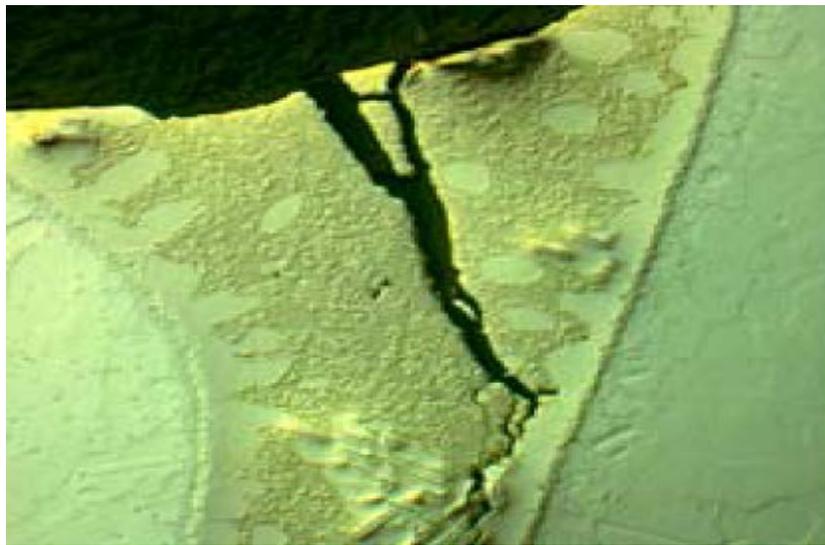


Fig 7: Section polie à travers une brasure forte fissurée dans un acier inoxydable austénitique. Contraste interférentiel différentiel, 100x. [26]

En général, une soudure est considérée comme une jonction entre deux pièces de métal ou plus dans lesquelles les surfaces doivent être élevées à un état plastique (par exemple, le soudage par friction linéaire Fig. 8) ou à un état liquide par l'application de chaleur avec ou sans métal ajouté et avec ou sans application de pression.

Chacun de ces processus possède ses caractéristiques propres et uniques, par exemple, la pénétration, la vitesse de soudage, la génération de laitier, le débit de chaleur, les propriétés d'une soudure, etc. et ceci peut, en revanche, avoir une influence considérable sur le détail microstructural qui est résulte. En conséquence, toute étude sur les effets d'un processus de soudage particulier demandera un examen métallurgique minutieux d'échantillons de soudure représentatifs, que l'objectif soit l'examen de l'intégrité d'ensemble de la soudure ou bien la relation microstructure/propriété, ou encore l'identification de la nature et l'origine des défauts. L'exactitude de l'analyse et l'interprétation microstructurelles vont alors dépendre de la production des échantillons préparés, exempts de tout artefacts pouvant avoir été introduits à n'importe quelle étape du processus de préparation.

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

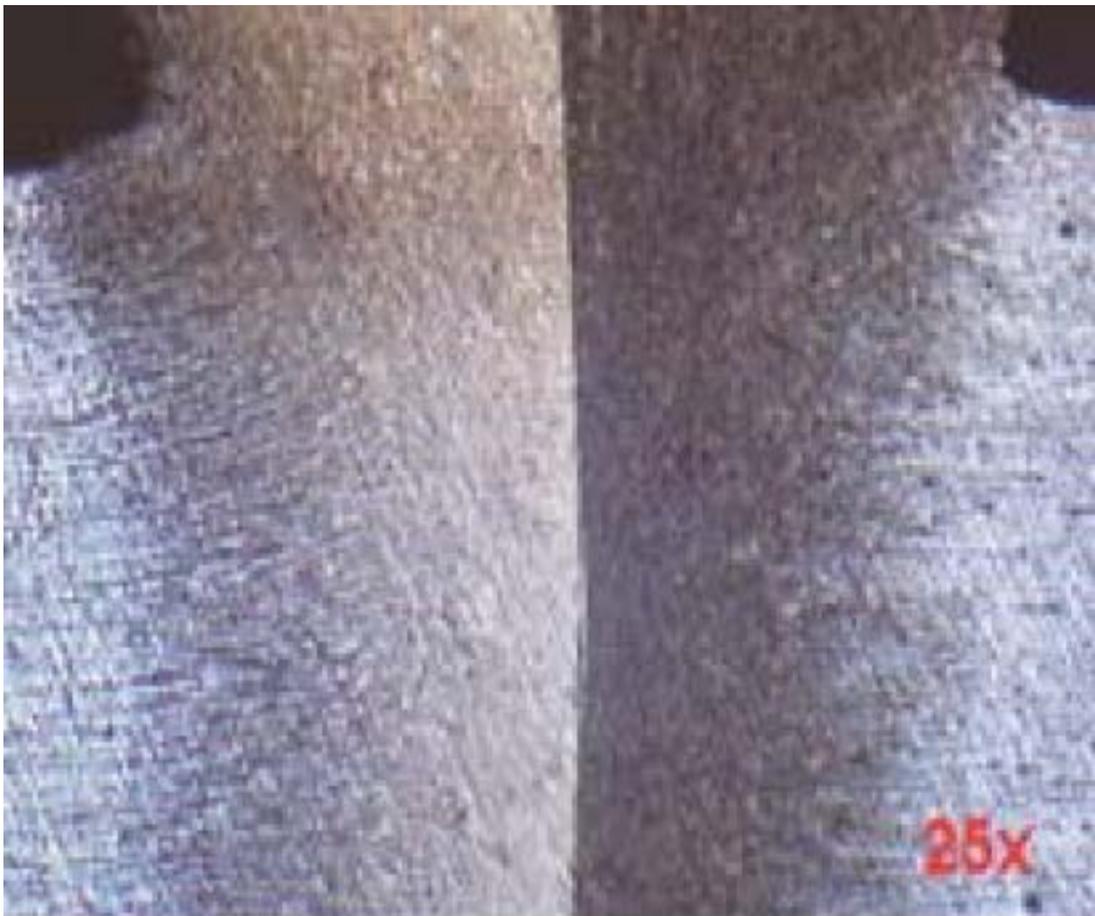


Fig. 8: Interface de fusion sur un alliage d'acier faiblement allié soudé par friction linéaire sous pression, montrant une zone affectée thermiquement et une déformation plastique associée. Fond clair, 25x. [26]

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

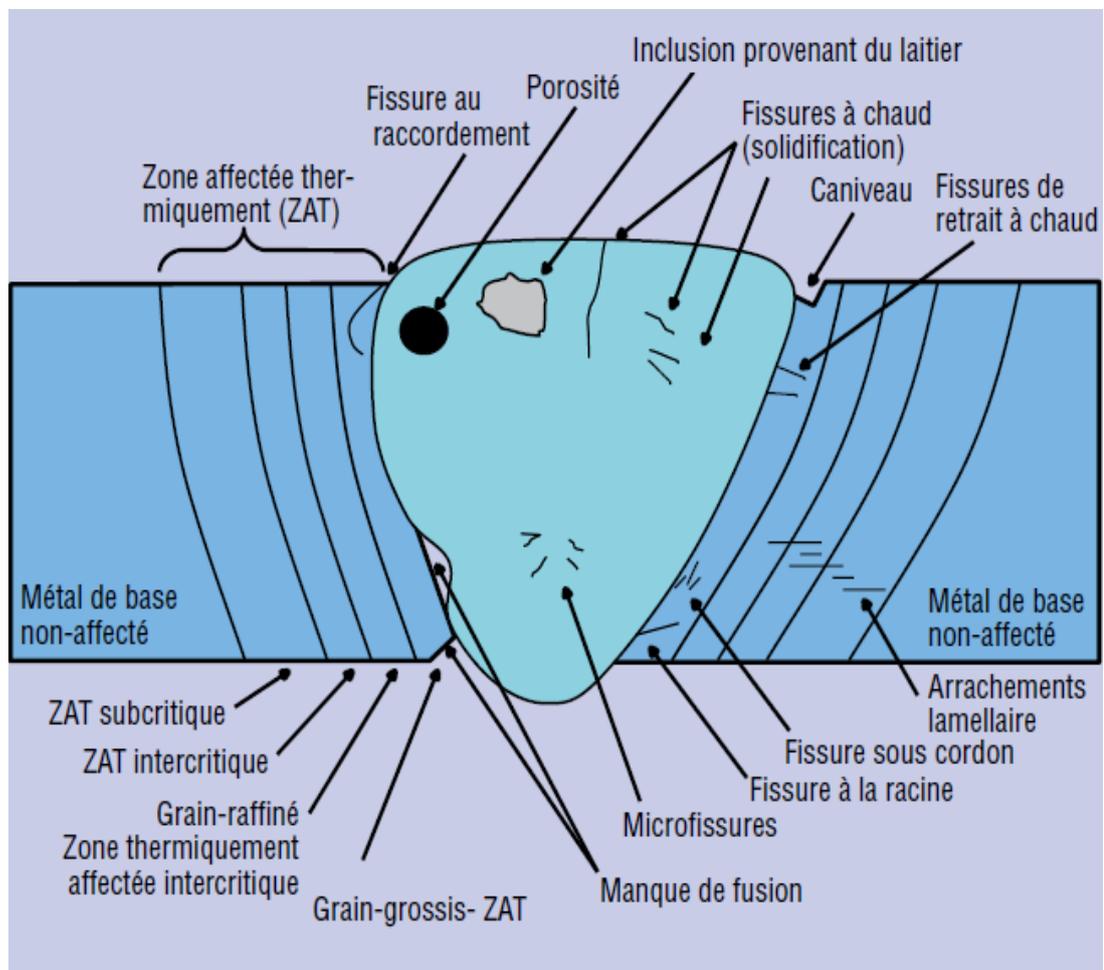


Fig. 9:Schéma illustrant les différentes régions de la zone affectée thermiquement (ZAT) dans une soudure à passe unique et les défauts éventuels. [26]

Chapitre 3 : Influence de la température sur les propriétés mécaniques (transformations métallurgiques)

5. conclusion :

La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement, puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure du métal dans la zone soudée. La zone périphérique au bain de fusion, également touchée par cet accroissement de la température, est appelée « zone thermiquement atteinte » ou ZAT.

Le soudage est une opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler cette continuité doit être mécanique, métallurgique. Cette opération peut se faire par chauffage et pression, par chauffage, par fusion avec ou sans métal d'apport.

Conclusion générale :

Le soudage relève de la métallurgie : il faut connaître le matériau pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que l'ouvrage sera fortement sollicité. C'est pourquoi le soudage est régi par des cahiers des charges et des modes opératoires précis. Le soudage est une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un Cordon fondu liant les bords de deux pièces.

Il constitue un moyen d'assemblage privilégié pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques.

Les modifications métallurgiques influent sur la tenue mécanique du joint soudé. Aussi faut-il s'assurer d'obtenir une tenue mécanique suffisante, et tenir compte des soudures dans le calcul et le dimensionnement des pièces.

Cette étude nous présentons les transformations métallurgiques ainsi que le refroidissement de la soudure (transformations métallurgiques) et les résultats utilisation, en soudage, des courbes T.R.C. pour traitement thermique.

Le soudage est une opération qui consiste à assembler deux ou plusieurs pièces rigides de manière à assurer une certaine continuité entre elles ou parties d'un grand ensemble. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène aux caractéristiques plus au moins proches de celles du métal de base.

Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- la trempabilité.
- la soudabilité.
- la tenue à chaud.
- la résistance à l'usure et à la corrosion.

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZAT

En soudage, la vitesse de refroidissement de la ZAT est élevée et dépend des conditions de soudage. Par conséquent, une approche intuitive des phénomènes métallurgiques dans la zone thermiquement affectée.

Références bibliographiques :

- [1]. Soudage et techniques connexes 1960 - Ryckaline - Écoulement thermique en soudage
- [2]. R. BLONDEAU, procédés et application industrielle du soudage, LAVOISIER 2001, Paris.
- [3]. brochure Brasage et Soudobrasage du Cuivre et de ses Alliages, publiée par le Centre d'Information du Cuivre, boulevard Berthier. Paris.
- [4] H. Granjon ; Bases métallurgiques du soudage, Eyroles, Paris ,1977.
- [5] A. Roos, B. Milet. "Précis de métallurgie Appliquée", Edition Technique et Documentation, Lavoisier, 1982.
- [6] Wiki for home-Soudure TIG » [archive] (consulté le 26 avril 2020)
- [7] Le soudage électrique par résistance de Jean Nègre, Publications de la soudure autogène Paris
- [8] Cours Soudage et rechargement Destiné aux étudiants de la deuxième année Master sciences et technique Option : Maintenance industrielle Préparé par : Dr TOUALBIA Djamel
- [9] Science et génie des matériaux/Auteurs: CallisterWD/ Ed : Dunod
Des matériaux/Auteurs : Bailon JP et Dorlot JM/ Ed : Montréal, Presse internationale polytechnique
- [10] Henry Lossier, Les progrès des théories de la résistance des matériaux et leur application à la construction des ponts, p. 183-189, Le Génie civil, Numéro spécial du Cinquantenaire 1880-1930, Novembre 1930
- [11] (en) Stephen Timoshenko, History of strength of materials, Dover publications, New York, 1983 ; p. 452
- [12] Marc Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux,2006-2007.
- [13] CSMOFMI. Soudage et assemblage Guide d'auto-apprentissage, p.8, Le Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle,2010.
- [14] institut de soudage Elaboration et solidification de la ZF jacky Schutz page 18 -20
- [15] institut de soudage etude de la ZAT page 6 -9

- [16] ROOS A. et MILET B., «Précis de métallurgie Appliquée », Edition Technique et Documentation-Lavoisier, 1982.
- [17] Mémoire de fin d'études Etude expérimentale et simulation numérique de l'effet de différents types de défauts sur le comportement mécanique de l'acier API 5L X70 OULADBRAHIM ABDELMOUMIN 2016/2017
- [18] GRANJON H., «Bases métallurgiques du soudage», Institut de Soudure (SI), 2000.
- [19] Gilbert R., «Soudage et assemblage-soudage», le Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI) en collaboration avec le Centre d'élaboration des moyens d'enseignement du Québec (CEMEQ), 2010.
- [20] Metallographic instructions for colour etching by immersion, Part 2: Behera colour etchants and their different variants, Erika Weck and Elisabeth Leistner. Process and Physical Metallurgy; J. E. Garside 2nd Edition 1967. Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, K. Geels, ASTM, 2007. Metallographic etching. 2nd Edition, G. Petzow, ASM, Metals Park Ohio, 1999.
- [21] Albert Caquot, Idées actuelles sur la résistance des matériaux, p. 189-192, Le Génie civil, Numéro spécial du Cinquantenaire 1880-1930, Novembre 1930 (lire en ligne)
- [22] soudage, Disponible sur : <http://www.lyc-de-gaulle-pulversheim.ac-strasbourg.fr> consulter le 26/04/2020.
- [23] <http://www.bossons-fute.fr/> (consulté le 26 avril 2020)
- [24] <https://www.rocdacier.com/le-soudage-par-point/> (consulté le 12 mai 2020)
- [25] dureté, disponible sur : <https://www.pce-france.fr/mesureurs/links/explication-mesure-durete.htm> consulté le 25/04/2020.
- [26] Fragilité, disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fragilit%C3%A9> consulté le 12/04/2020
- [27] Module de Young, disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9formation_%C3%A9lastique#Module_de_Young consulté le 25/04/2019.
- [28] <https://metalblog.ctif.com/2020/05/25/les-technologies-de-soudage-des-pieces-en-aluminium-2/> (consulté le 12 mai 2020)