

4/04

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENSION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN METALLURGIE

THEME

***EFFET DU PRECHAUFFAGE SUR
LES ACIERS TREMPES ET
REVENUS
EFFET DE SUR ADOUCISSEMENT
ET PHENOMENE DE
CONSOLIDATION***

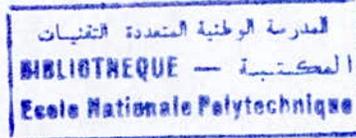
PROMOTEUR : M M.A. DJEGHLAL
COPROMOTEUR : M H.BEN-HANICHE

ETUDIE PAR : ILACINI Amina

Ecole nationale polytechnique d'Alger ,B.P, 62,10 Avenu Hassen Badi

2003.2004

Remerciement



Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant d'avoir illuminé mon chemin et m'avoir le courage donner le courage de continuer jusqu'au bout

Je tiens à remercier la personne à qui je dois reconnaissance et respect M. H. Ben-hanniche, mon encadreur à l'ENGTP

Je remercie aussi mon promoteur et chef de département M.M.A.DJGHLAL pour son aide et le soutien moral qu'il m'a porté

Je remercie M.A.K.Zafoun pour toute l'aide qu'il m'a portée.

Je remercie tous les membres de jury de leur patience

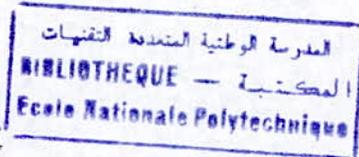
Je remercie mes amies et tous ceux qui mon porté de l'aide de près ou de loin

Dédicace

À ma mère, à mon père et mes frères : Halim, Lyes et Mourad.

À tous ceux que j'aime

Abréviation



E.N.P : Ecole Nationale Polytechnique

E.N.G.T.P : Entreprise Nationale des Grands Travaux Pétroliers

C.S.C : Centre de Soudage de Chéragua

C.R.D : Centre de Recherche et Développement

9% Ni : aciers au faible teneur en carbone alliés à 9% de Nickel

HSLA Q & T Stell : High Strength Low Alloy Quenching and Tempred Stell

Z.S.A : zone sur adoucie

Z.A.T : zone affectée thermiquement

Z.L : zone de liaison

M.Z : métal fondu

Z.F : zone fondue

T.R.C : transformation en refroidissement continu
Transformation isotherme

T.T.T : transformation isotherme

U : tension

I : intensité

H : énergie calorifique de soudage

V : vitesse de soudage

ملخص

ان استعمال الفلاد الخاضع لمعالجة الحرارية المتمثلة في التسقية ثم التصفية يعوض الفلاد الكلاسيكي في ميدان ميدان بناء خزانات الضغط العالي وهذا بفضل ما تملكه من خصائص اقتصادية وامنية. ان تلحيم هذا النوع يحتاج الى بعض الاحتياطات التي تاخذ بعين الاعتبار

ان التسخين المسبق لعملية التلحيم يؤدي الى ظهور مزطقة دان ليونة زائدة

كلمة المفتاح

منطقة ذات ليونة زائدة , التلحيم , المعالجة الحرارية , التسخين المسبق

Résumé

L'utilisation des aciers trempés et revenus remplace en une partie majeure les aciers ordinaires dans le domaine de construction des appareils à pression.

Le préchauffage qui est recommandé pour les aciers ordinaires est déconseillé pour les aciers trempés et revenus.

Abstract

The use of the quenching and tempered steel replace in majority the classical steel in construction of boiler.

The preheat of these steel is not necessary because the over softning

Mot clés :

Aciers trempés et revenus, Préchauffage, sur- revenu

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Recherche bibliographique	3
I-1- Généralités sur les alliages ferreux.....	4
I-2- Les aciers trempés et revenus.....	8
I-3- Soudage	11
I-4- Métallurgie de soudage	13
I-5- Traitement thermique des aciers.....	24
I-6- Traitement thermique et soudage	28
I-7- Le préchauffage	34
I-8- Effet de sur adoucissement et phénomène de consolidation.....	38
Chapitre II :Etude expérimentale	44
Résultats et interprétation	55
Conclusion	59

Introduction générale

Toute construction doit répondre, au rôle fonctionnel qui lui est dévolu sans omettre pour autant deux impératifs qui sont : - **Une sécurité optimale.**
- **Un moindre coût de réalisation.**

L'analyse de l'influence des paramètres à prendre en considération pour définir une construction est souvent difficile à faire pour rester dans le domaine du raisonnable vis-à-vis des impératifs « **sécurité optimale** » et « **moindre coût** » qui sont toujours liés à la qualité à exiger.

En ce qui concerne l'autorité responsable de choix, il apparaît à l'heure actuelle, que ce rôle est dévolu à l'utilisateur, car celui-ci est incontestablement le mieux placé pour apprécier les conditions de service et les risques de toute nature encourue en cas de défaillance du matériel.

Afin de construire, d'une part, avec la sécurité optimale et d'autre part, au moindre coût, les grandes structures métalliques (port, navires, réservoirs, appareil à pression, etc.) doivent répondre d'abord à un impératif de fiabilité, de fonctionnement et de sécurité. L'alternative aux aciers normalisés dans le cas des appareils à pression et les canalisations forcées est donc l'utilisation d'aciers trempés –revenus que suppose la corrélation entre les caractéristiques de traction et de ductilité qui permettent, à carbone égale, de bien meilleures performances qu'à l'état recuit, mais surtout de réduire la teneur en carbone à performances égales. Ces derniers présentent une microstructure bainitique qui, à caractéristiques mécaniques données, est obtenue avec des teneurs en carbone équivalent (Ceq) plus basses que celles des aciers normalisés. La structure bainitique revenue présente un comportement amélioré vis-à-vis des différents types d'endommagement rencontrés en milieu humide. La diminution du paramètre Ceq est également favorable pour les soudures qui sont souvent à l'origine des problèmes en service. Des aciers trempés revenus à haute limite d'élasticité et les Aciers cryogéniques sont aujourd'hui retenus pour la fabrication d'appareils à pression et les conduites forcées utilisés en présence de milieu humide.

Une application spectaculaire en est faite actuellement pour le soudage d'oléoducs ou gazoducs en aciers à haute résistance aciers cryogéniques.

La société **ETTERKIB** a rencontré des problèmes dans les essais mécaniques pour la qualification des procédures de soudage, dans le cadre de la réalisation du projet **STATION DE POMPAGE DE BEN-IHAROUN**. L'entreprise a utilisé l'acier trempé et revenu à haute résistance A517 grade H.

D'autres problèmes ont été rencontrés dans le cadre de réparation des grues (200 à 300 Tonne). La question que se sont posés les techniciens de maintenance est pour quoi en soude à froid.

Quant au 9% Ni trempé et revenu destiné aux application cryogéniques (utilisé par GTP pour SONATRCH – GL4.Z - ARZEW pour la réalisation du projet **SPHERE DE STOCKAGE D'Ethylene LIQUIDE**) les fournisseurs des tôles recommandent de souder à froid.

Les aciers trempés et revenus nécessitent des conditions de soudage opposées à celles qu'on a l'habitude de suivre pour les aciers à l'état recuit.

Dans cet optique, on se propose de clarifier la soudabilité de ce type d'acier trempé et revenu, sachant la difficulté du passage de la métallurgie classique à métallurgie de soudage. En effet ce sujet n'a pas de frontières, il a fallu assembler les information théoriques et pratiques nécessaires qu'on peut résumer en :

1. Comparaison de la solidification en soudage et en fonderie.
2. Phénomènes théoriques de soudage.
3. Passage bref sur l'effet d'entaille métallurgique.

Nous avons structuré ce travail suivant deux chapitres :

- Le premier chapitre présente toute les connaissances théoriques et pratiques à la comparaison de la métallurgie de soudage des aciers étudiés ;
- Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation micro-structurale et mécanique des différentes zone de soudage suivi d'une interprétation des résultats obtenus.

Nous avons clôturé ce travail par une conclusions.

Remarque :

Le chapitre I englobe les pages de 03 à

Le chapitre II commence de la page jusqu'à la conclusion.

Chapitre I : Recherche bibliographique.

Chapitre II : Etude expérimentale.

Chapitre

I :

*RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE*

I.1. Généralités sur les alliages fer -carbone

I.1.1. Diagramme d'équilibre métastable

Un diagramme d'équilibre est une représentation des transformations solide –liquide ou solide – solide d'un alliage. La partie haute température est formée par le diagramme fusion –solidification, et la partie basse température est constituée des lignes de transformation. (Fig. I-1)

Différentes variétés allotropiques du fer :

- Fe α : stable de T_{ambiante} à 906°C. Il ne dissout pratiquement pas le C (0,025% à 723°C).
- Fe γ : stable de 906°C à 1400°C. Il dissout facilement le C (2% à 1150°C).
- Fe δ : stable de 1400°C à 1540°C.

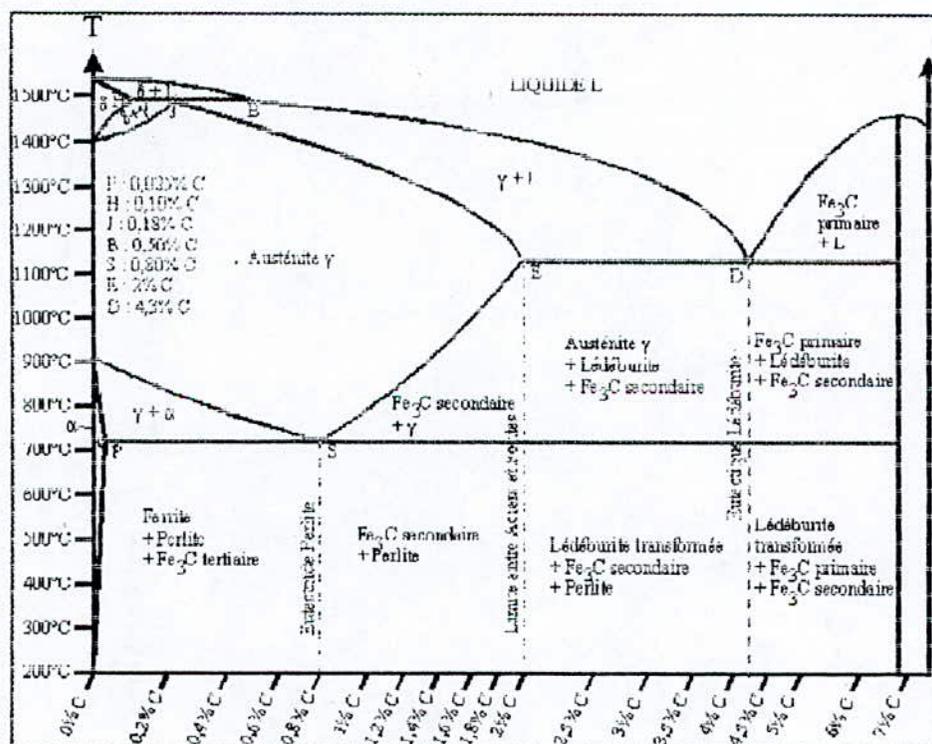


Fig.I-1 Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C métastable

I.1.2. Application aux alliages Fer – Carbone

Il existe deux diagrammes Fer - Carbone, car il existe du C à l'état libre (graphite), et du C en combinaison chimique (cémentite).

Il y a donc un diagramme Fer - Graphite (dit diagramme stable) et un diagramme Fe - Fe₃C (dit diagramme métastable). En pratique, pour des alliages Fe - C inférieurs à 4,3% C, c'est le diagramme métastable qui convient.

Aciers: lorsque $0 < \%C < 2\%$

- Aciers hypoeutectoïdes: $< 0,8 \%C$
- Acier eutectoïde: $= 0,8 \%C$
- Aciers hypereutectoïdes: $> 0,8 \%C$

- **Acier hypoeutectoïde** : Un acier hypo eutectoïde est un acier avec un pourcentage de carbone inférieur à 0.8%. Il est constitué de ferrite (α) et de perlite ($\alpha + Fe_3C$). La perlite se présente sous forme d'îlots

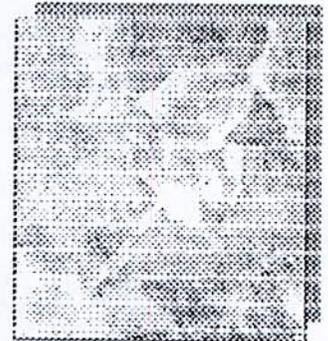


Fig.1-2 Structure hypoeutectoïde

- **Acier hypereutectoïde** : Un acier hypereutectoïde est un acier dont la teneur en carbone est supérieure à 0.8% (mais inférieure à 2.1%).
- **Le point eutectoïde** : S (0.8% C et 723 °C)

- **L'austénite (γ)** : Elle se présente toujours sous forme de grains polygonaux.

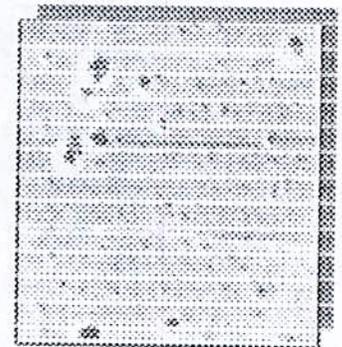
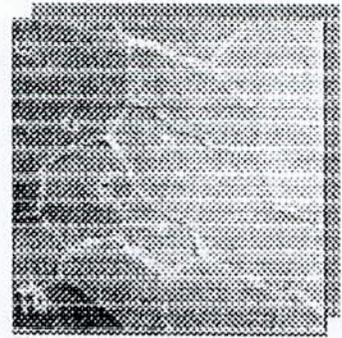


Fig.1-3 Structure austénitique

- **La ferrite (α)** : Elle peut se présenter sous deux aspects

Fig.I.4 Structure de la ferrite



- **Une structure cellulaire**, favorisée par un petit grain d'austénite et un refroidissement très lent; la ferrite se forme aux joints de grains de l'austénite et les entoure d'un liseré continu.
 - **Une structure en aiguille** (structure de Widmanstätten) favorisée par un gros grain d'austénite et un refroidissement très lent; la ferrite se dépose en aiguilles à l'intérieur de l'austénite
- **La perlite ($\theta + \text{Fe}_3\text{C}$)** : Elle est composée de deux phases : la ferrite (12%) et la cémentite (88%) dénommée perlite

- **La cémentite (Fe_3C)** : C'est une combinaison chimiquement définie, contenant 6.7%M de carbone. Cette teneur correspond à la formule Fe_3C .

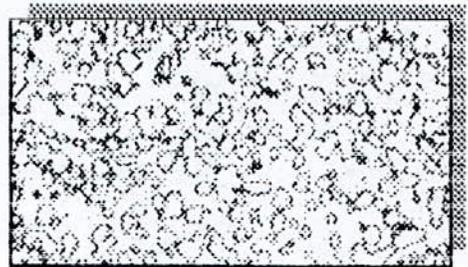


Fig.I-5 Structure de cémentite

- **Le graphite :**

C'est du carbone pur. Il cristallise dans le système hexagonal. Sa température de fusion est de 3500°C.

- **La ferrite fine :**

Elle est formée de lamelles extrêmement minces de ferrite et de cémentite, divergentes en "éventail" et formant des nodules plus ou moins arrondis. La ferrite, présentant des analogies avec la perlite, mais une dureté plus grande est souvent appelée "constituant perlitique".

- **La bainite :**

Elle comporte les mêmes phases que la perlite mais présente une structure microscopique en aiguilles.

N.B La bainite n'est obtenue en refroidissement continu que dans le cas des aciers alliés.

- **La martensite :**

C'est une solution solide sursaturée de carbone dans le fer α et de même teneur en carbone que l'austénite dont elle provient. Au microscope, elle présente une structure en aiguilles dont les directions dépendent de l'orientation du réseau cristallin de l'austénite initiale. Elle est donc très dure mais très fragile.

- **Le diagramme d'équilibre est obtenu par refroidissement lent** après chauffage à température élevée. Il est donc utilisable uniquement pour déterminer les constituants d'une fonte ou d'un acier refroidi lentement, après un traitement de recuit par exemple (mais jamais après traitement de trempe).

- **Lors du refroidissement rapide d'un acier**, l'austénite ne se transforme plus en perlite. De nouveaux constituants (hors équilibre) apparaissent. Leur existence dépend de la vitesse de refroidissement. Ce sont :

- **la ferrite fine** (refroidissement moyennement rapide)
- **la bainite** (refroidissement assez rapide)
- **la martensite** (refroidissement très rapide)

1.1.3. Les éléments d'addition

L'addition d'éléments tels que le nickel, le chrome, le manganèse, le molybdène, etc. donne à ces aciers des propriétés physiques et mécaniques supérieures à celles de l'acier ordinaire.

Les éléments d'alliage utilisés pour l'élaboration des aciers alliés sont très nombreux. Ils agissent sur leur structure et modifient par là certaines de leurs propriétés, mais ils peuvent aussi attribuer à l'acier des propriétés entièrement nouvelles.

I.2. Aciers trempés et revenus

I.2.1. Aciers au nickel

I.2.1.1 Introduction

On utilise le nickel comme élément d'addition dans les aciers résistant à la corrosion et aux très basses températures. Le nickel est un élément gammagène. Avec une teneur élevée en nickel, un acier conserve une structure austénitique jusqu'à la température ambiante une faible teneur en nickel accroît la trempabilité de l'acier et en conséquence, à une vitesse normale de refroidissement, de la martensite peut se former.

L'industrie utilise notamment trois types d'acier au nickel :
 L'acier à 3.5% Ni, l'acier à 9% Ni et l'acier à durcissement structural. Le premier n'est pas un acier fortement allié (teneur en Ni <5 %). Sa teneur en C est limitée à 0.15%. Il est employé jusqu'à (-100°C). Le second, qui a de meilleures propriétés de résilience et de ductilité à des températures bien basses, est également employé en cryogénie (stockage et transport de gaz liquéfiés, colonne de distillation fractionnée de certaines industries chimiques, etc....)

La présence de 9% Ni confère à l'acier une dureté considérable, comme le montre le diagramme de transformation isotherme (Fig.I-6)

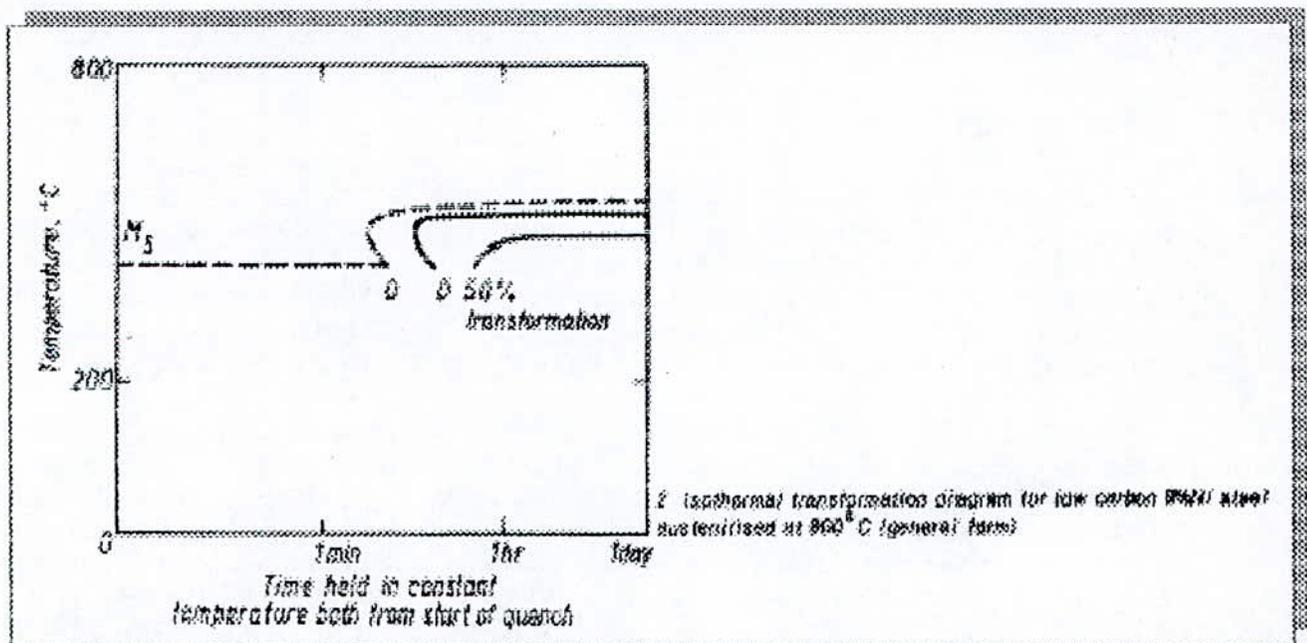


Fig.I-6 Diagramme TTT pour l'acier à 9% Nickel

1.2.1.2. Microstructure :

La microstructure est constituée de martensite à basse teneur en carbone dans les plans et les sections de cet acier trempé à l'eau.

Le traitement thermique usuel avant soudage est :

- a) Double normalisation : à 900°C puis à 790°C suivie d'un revenu, de préférence à 570°C, ou ;
- b) Trempe à l'eau

Durant le revenu, une faible teneur d'austénite se restitue. Cette phase est stable aux températures au-dessous de zéro.

Les effets thermiques de la fusion induisent à des changements structuraux de l'acier dans la Z.A.T. Adjacente à ce métal déposé, la partie qui a subi les plus forts effets de trempe et teneur. La structure est clairement aciculaire et différente du métal de base.

L'essai de la dureté et de résistance dans cette zone confirme les changements de structure et de propriétés.

Malgré la dureté acquise, les fissurations n'apparaissent pas dans cette région. Les précautions à prendre lors du soudage des aciers susceptibles à ce type de fissure, sont très connues, tels le préchauffage, l'utilisation des électrodes à faible teneur en hydrogène et bien étuvées. L'expérience avec le 9°Ni d'épaisseur supérieure à 50mm, indique que cet acier ne nécessite pas de préchauffage. [2]

1.2.1.3. Soudage

L'étape la plus importante dans la fabrication de n'importe quel appareil à pression est le soudage. Pour l'utilisation cryogénie ou autre service. Le procédé de soudage doit être préparé avant que le travail ne soit entamé. Il est important de considérer la préparation du métal de base, la position de soudage, le ou les procédés de soudage, le choix du métal d'apport, les traitements thermique de préchauffage et post chauffage. Ces deux derniers éléments ne sont pas nécessaires lorsqu'il s'agit d'une épaisseur qui dépasse 50mm.

La série des aciers au Nickel permet des températures de service plus basses que les aciers non alliés calmés à grains fins. Du point de vue de la soudabilité, la présence de nickel joue d'une part sur le pouvoir trempant de l'acier, d'autre part sur la fragilisation du métal fondu brut de solidification. Les aciers contenant jusqu'à 2.25% Ni sont normalement soudables avec des électrodes de composition convenable (déposant en général un acier de même nature) pour l'acier à 3.5 % Ni, dont la teneur en carbone est limitée à 0.15%, le problème principal est celui du choix de l'électrode, dans le métal fondu, une résilience acceptable à la température de -100 °C. Les assemblages sont toujours traités après soudage, sauf dans le cas des soudures hétérogènes.

Les aciers à 9°Ni, utilisés aux très basses températures, occupent une place à part dans la série, car leur basse teneur en carbone rend inoffensive la, martensite qui ne manque pas de se former lors du soudage, dans la zone de transformation. On peut ainsi éviter tous traitements thermique après soudage. Le principal problème est celui du métal d'apport : à l'état de métal de base, c'est-à-dire constituer soudures hétérogènes. un apport austénitique classique au Cr -Ni convient, du point de vue de la soudabilité, mais la limite d'élasticité est

trop faible, d'où la mise au point d'électrodes austénitiques Cr - Ni - Mn - W . on utilise aussi des électrodes du types suivant :

Ni = 67%, Cr = 14% à 17 %, Fe = 10 %, Mn = 2 % à 2.75 %, Ti = 2.5 % à 3.5 %.

I.2.2. Les aciers faiblement alliés à haute limite d'élasticité à l'état trempé et revenu (High Yield Strength Quenched and Tempered Low Alloy Steel HSLA Q&T)

I.2.2.1 Introduction

Les aciers faiblement alliés à haute limite d'élasticité à l'état trempé et revenu sont des alliages traités aux aciéries pour développer les meilleures propriétés. Ils diffèrent des aciers alliés conventionnels en ce sens qu'ils ne subissent pas de traitement à chaud additionnel lors de leur fabrication, sauf une relaxation des contraintes dans certains cas. Ces aciers ont généralement une faible teneur en carbone (limite supérieure de carbone : 0,20%) et une résistance à la traction élevée, entre 552MPa et 862MPa.

L'application d'un traitement de trempe et revenu permet d'augmenter d'environ 100 MPa la charge de rupture de l'acier. Ce traitement lui confère en même temps une microstructure très tenace.

I.2.2.2. Structure des aciers HSLA Q&T

Les aciers HSLA Q&T contiennent moins de 0.25% de C et moins de 5% d'éléments d'alliage. Ces aciers joignent une limite élastique élevée et une grande charge à la rupture avec une bonne ductilité, résilience, soudabilité et une résistance à la corrosion atmosphérique.

Cet acier acquiert sa résistance par traitement de trempe suivi d'un revenu pour obtenir une structure contenant la martensite, la bainite, et en faible proportion la ferrite.

Certaines nuances sont produites par durcissement structural par précipitation en laminage à chaud ou par tempe. La charge à la rupture est de 345 à 893 MPa et la limite élastique est de 485 à 1035 MPa, selon la composition chimique, l'épaisseur et le traitement thermique.

[3]

I.3. Soudage

3.1. Définition du procédé de soudage à l'arc avec électrodes enrobées

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre simultanément et très localement la pièce à assembler, l'âme métallique de l'électrode et l'enrobage pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur qui se détache plus ou moins facilement. L'enrobage de l'électrode fond avec un léger retard par rapport à l'âme métallique. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. [3]

3.2. Principe du procédé de soudage à l'arc avec électrodes enrobées

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode reliée sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. (Fig.I-3)

Le connecteur de pièce est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder.

L'amorçage de l'arc est réalisée en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder.[16]

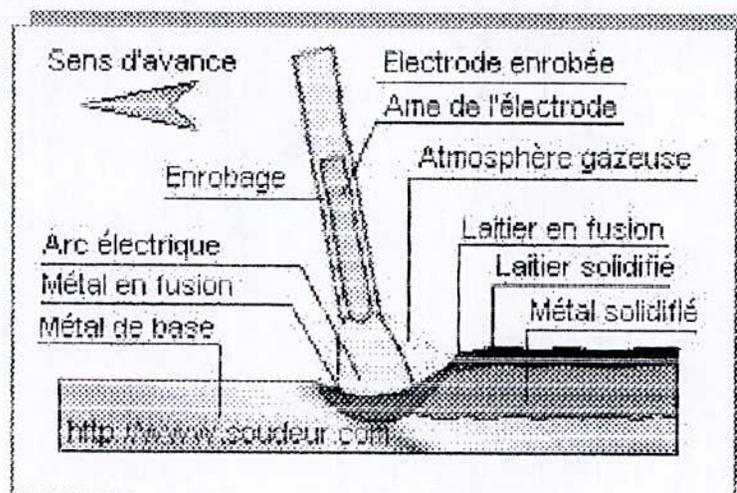


Fig.I-7 Procédé de soudage SMAW

I.3.3. Définition de l'électrode enrobée

L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

- **L'âme** : partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure.

- **L'enrobage** : partie extérieure cylindrique de l'électrode. Il participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide. L'enrobage a un rôle électrique, assure la stabilité et la continuité de l'arc par son action ionisante. L'enrobage a un rôle métallurgique, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires. Sa composition chimique et physique est très complexe. [1] (Fig.I-8)



Fig.I-8 L'électrode

3.3.1. Caractéristiques des enrobages

Code	Type	Caractéristiques
R	Rutile/ base: oxyde de titane / épaisseur moyenne	Bonne soudabilité, pénétration moyenne, utilisable pour la position V
RR	Rutile/ base: oxyde de titane / épaisseur $D/d > 1,55$	Pour les positions F et H.
B	Basique	Le cordon a une bonne résistance à la fissuration / appropriée pour les pièces lourdes / pour toutes les positions / séchage des électrodes nécessaire.
C	Cellulosique	Pénétration profonde / toutes les positions / application typique: soudage des canalisations.

Tableau I-1 Caractéristiques de l'enrobage

4. Métallurgie de soudage

4.1. Présentation macrographique d'une soudure sur un acier trempé et revenu

L'attaque chimique d'un échantillon pour macrographie fait apparaître, entre autres, les zones constitutives de la soudure, qui se manifestent par des intensités d'attaque ou des colorations différentes les unes des autres. (Fig.1.9)

Zone fondue

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport. Le métal qui constitue la soudure est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé.

Zone de liaison

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion. Elle délimite ainsi la zone fondue et elle est mise en évidence par la différence de structure que l'on constate de part et d'autre.

Zone affectée thermiquement

Le cycle thermique de soudage provoque au sein de cette zone, à partir de l'état initial, une ou plusieurs transformations à l'état solide intervenant à l'échauffement. Chaque transformation étant caractérisée par une température minimale, la limite extérieure de la zone affectée correspondante coïncide avec l'isotherme caractéristique de cette température.

Zone sur adoucie

Le soudage sur une pièce à l'état initial recuit provoque une zone thermiquement affectée, clairement délimitée par les isothermes A_1 et A_3 . Si l'acier a été traité avant soudage, par trempe et revenu, le cycle thermique exerce son effet au-delà de ces isothermes, il y est provoqué un « sur-revenu » dans la zone qui a été réchauffée au-delà de la température du revenu initial. (Fig.1-9)

Zone non altérée

Cette n'a subi aucun changement du point de vue structural et propriétés mécaniques [2]

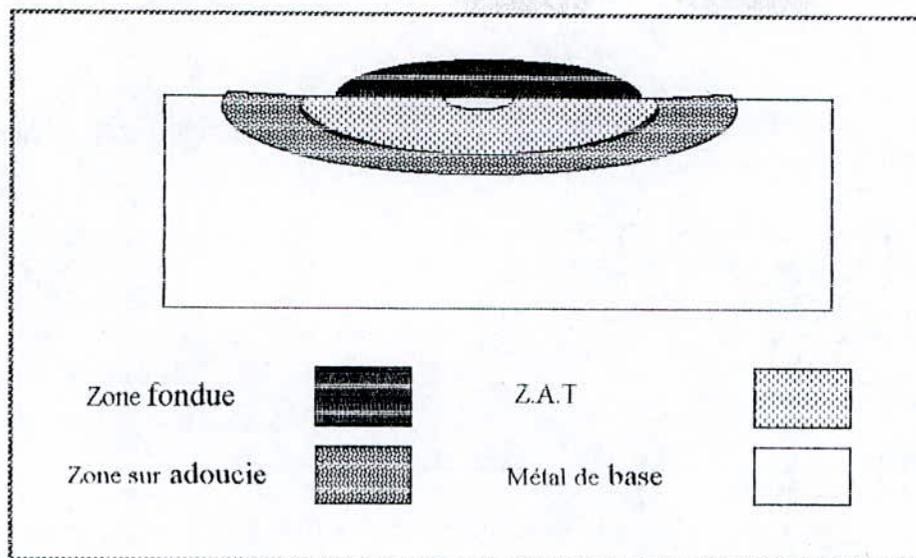


Fig.I-9 Présentation macrographique d'un joint soudé

1.4.2. Etude thermique du soudage

1.4.2.1. Notion d'état quasi-stationnaire (soudage avec déplacement de la source de chaleur)

Au moyen de thermocouple, on prélève des points différents : A_1, A_2, \dots etc. Les courbes $\theta = f(t)$ équidistant au cordon de soudure et à des distances croissantes de l'origine O de ce cordon, supposé amorcé en pleine tôle, nous obtenons donc le tracé (Fig.I-10) qui nous conduit aux remarques suivantes :

- La température maximale atteinte θ_m croît avec la distance parcourue à partir du début du cordon, puis se stabilise à une valeur qui devient constante, tant que la source de chaleur progresse à une vitesse uniforme, et une énergie calorifique constante ;

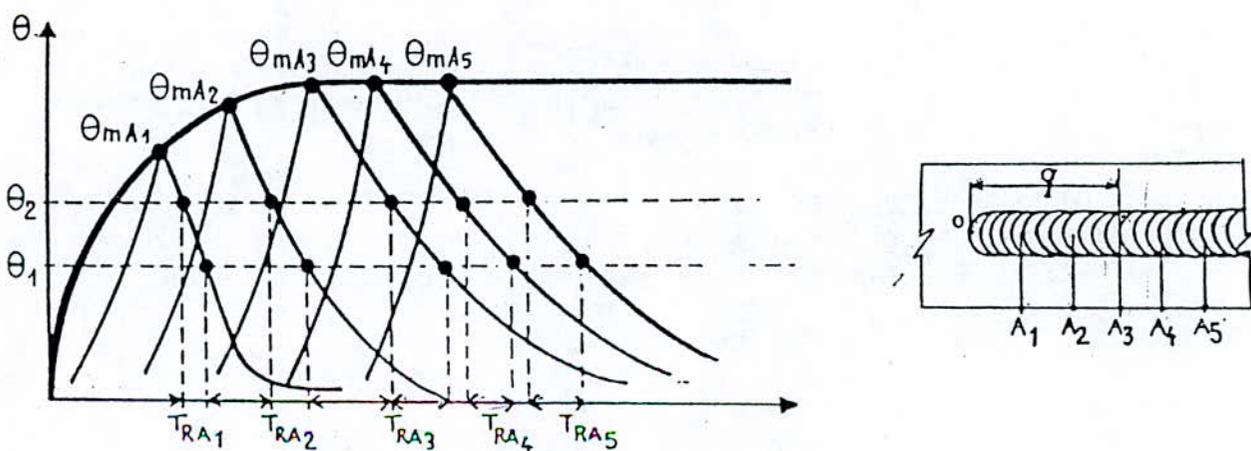


Fig.I-10 Evolution des courbes ($\theta = f(t)$) à une distance d'un cordon de soudure en fonction du parcours à partir d'un point d'amorçage O . Etablissement de l'état quasi stationnaire

- Les lois de refroidissement mesurées par les temps de refroidissement entre deux températures deviennent identiques ainsi qu'aux temps de séjour. Autrement dit, les courbes $\theta = f(t)$ deviennent superposables dès que la source de chaleur a franchi un certain parcours q .

Ainsi un régime s'établit à partir d'une certaine distance, ce régime est connue sous le nom de l'état quasi-stationnaire.

L'énergie dépensée par conductibilité dans la pièce est à chaque instant compensée par l'énergie fournie au niveau de la source de chaleur. [4]

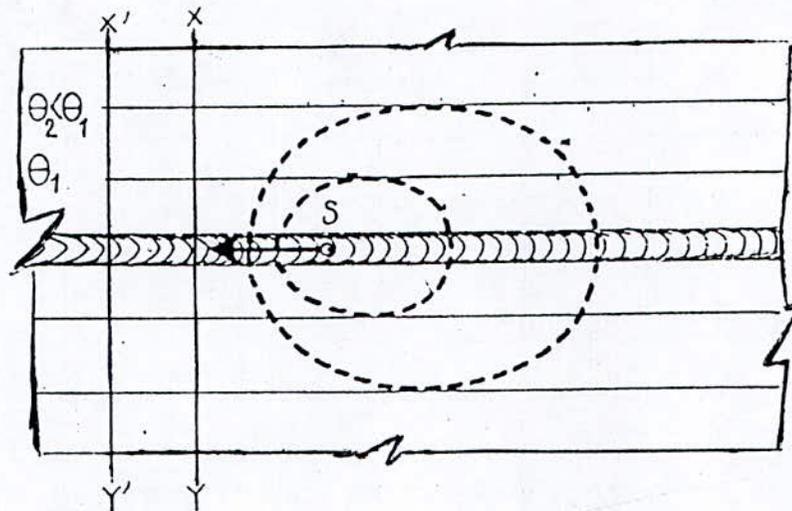


Fig.I-11 Position des isothermes instantanées (en trait interrompu)

1.4.2.2. Cycle thermique de soudage (courbe température – temps)

Pendant l'exécution d'une passe de soudage si l'on mesure la température en un point bien déterminé, par sa distance à l'axe du joint et sa hauteur dans l'épaisseur de pièces, on relève en ce point l'évolution de la température en fonction du temps ; $\theta = f(t)$ (Fig.I-12).

La loi suivant laquelle la température varie en fonction du temps porte le nom de cycle thermique. Le cycle thermique, par les renseignements qu'il apporte :

- La phase de réchauffage
- La température maximale atteinte au point de mesure θ_M .
- Temps de séjour à haute température
- Une phase de refroidissement avec l'allure de refroidissement V_r .

Donne le traitement thermique localement subi par le métal.

Les cycles thermiques dépendent des variables suivantes :

- Position et distance du point considéré par rapport à la ligne de soudure ;
- Procédé de soudage et ses paramètres ;
- Epaisseur des pièces et type de joint ;
- Température initiale de la pièce. [2]

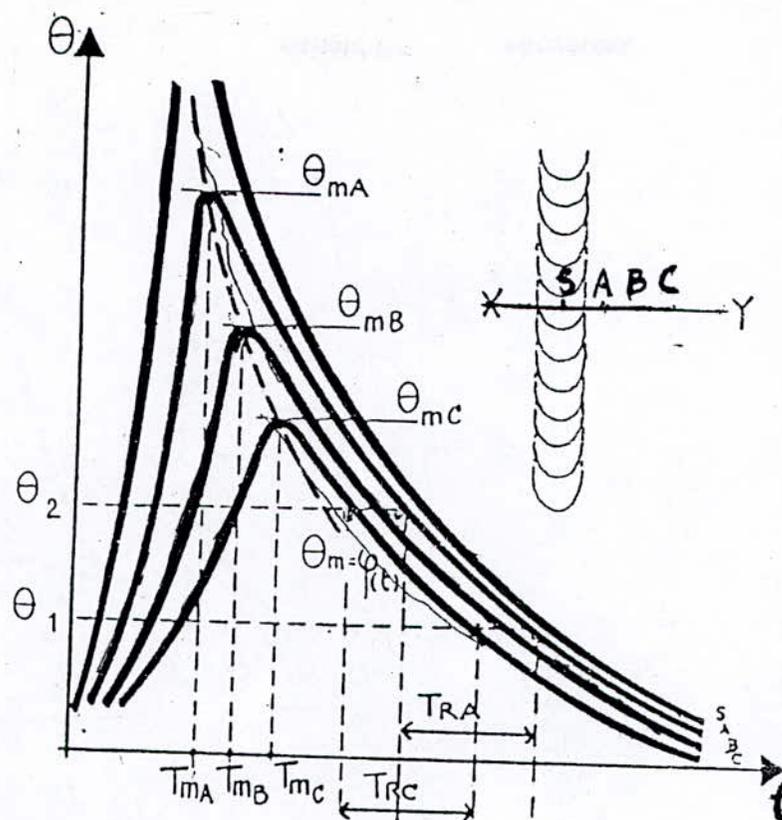


Fig.I-12 Faisceau de courbes de cycle thermique

1.4.2.3. Soudage en plusieurs passes

L'évolution de la température au cours du soudage en plusieurs passes dépend essentiellement de :

- La température initiale ;
- L'intervalle de temps entre passes
- La position par rapport à la soudure dont on suit la variation de température.

L'exécution d'une passe se traduit par une première montée en température jusqu'à la valeur maximale Θ_{m1} suivie d'un refroidissement caractérisé par la vitesse V_1 normalement devant se poursuivre jusqu'à Θ_0 si la deuxième passe est exécutée tardivement mais si l'intervalle de temps est court, un nouveau cycle intervient caractérisé par une température maximale Θ_{m2} et une vitesse de refroidissement V_2 . Mais ce cycle diffère du premiers : Θ_{m2} inférieur à Θ_{m1} d'une part et V_2 inférieure à V_1 d'autre part. La raison est que le cycle thermique par un effet de la deuxième passe est influencé analogue à celui du préchauffage.

Si on relevait les courbes $\Theta = f(t)$ au point B voisin de la dernière passe on aura une allure transposée des cycles. (Fig.I-9)

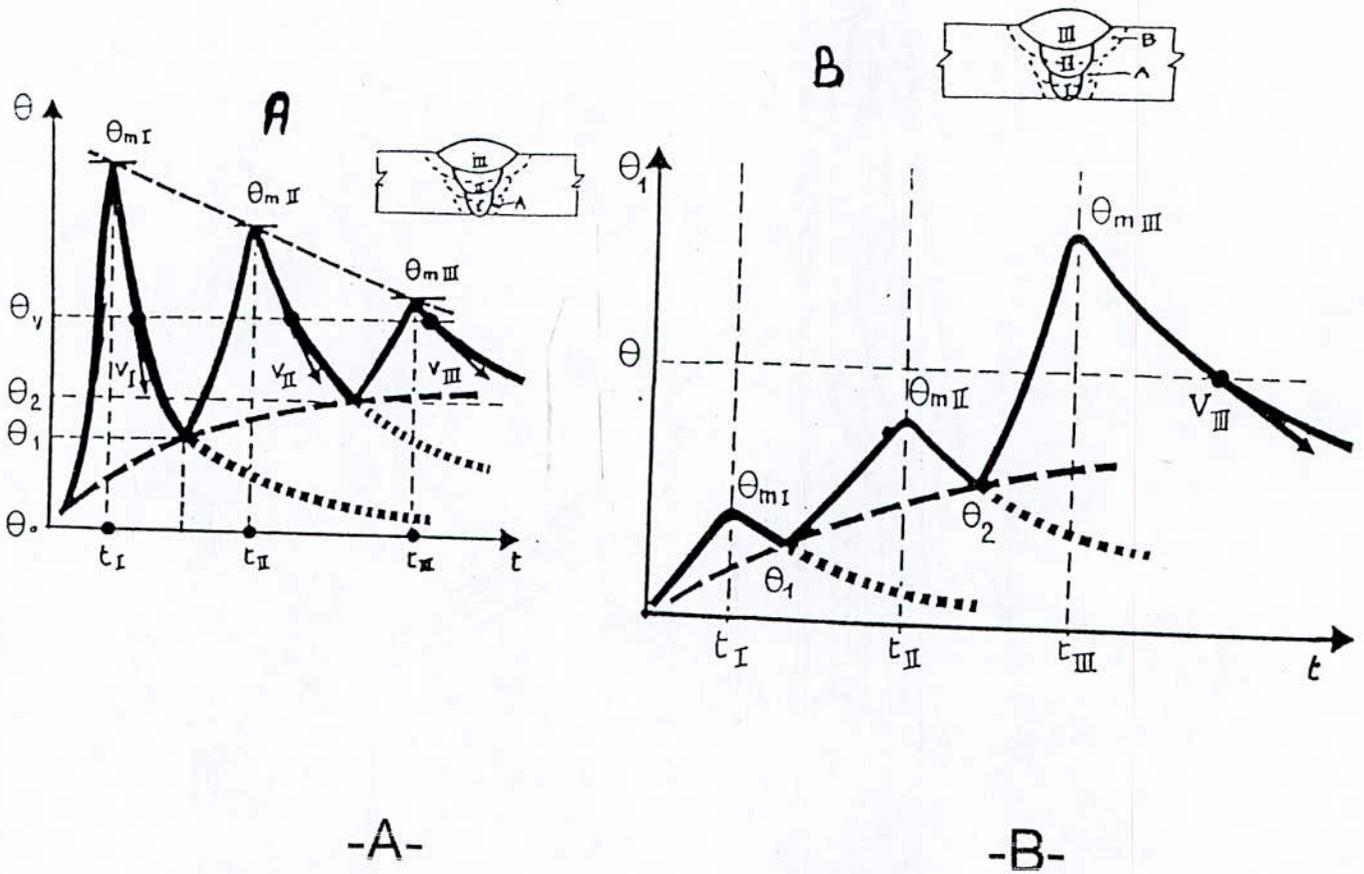


Fig.1-13 Soudage en plusieurs passes à partir de A et à partir de B

1.4.2.4. Répartition thermique

Les phénomènes thermiques de soudage montrent que l'opération de soudage se distingue des opérations métallurgiques classiques par

- Les vitesses de l'échauffement sont très élevées
- Les températures maximales des différents points des pièces qui varient avec leurs distances au joint de soudure.
- Les durées de maintien de ces températures qui sont relativement faibles.

Si on effectue des mesures simultanément, en multiples points dispersés en des endroits de plus en plus éloignés de l'axe du cordon, on peut retracer l'histoire thermique de tous ces points et la représenter à un instant donné. (Fig.1-2)

Si nous voulons accéder à la répartition topographique aux alentours de la soudure, il faut connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique et en particulier la courbe $\theta_M = f(x)$, donnant la variation de la température maximale θ_M atteinte en chaque point en fonction de la distance x grâce à la courbe $\theta_M = f(x)$, nous pouvons situer la limite extérieure de la zone où ce phénomène est susceptible de se produire. [4]

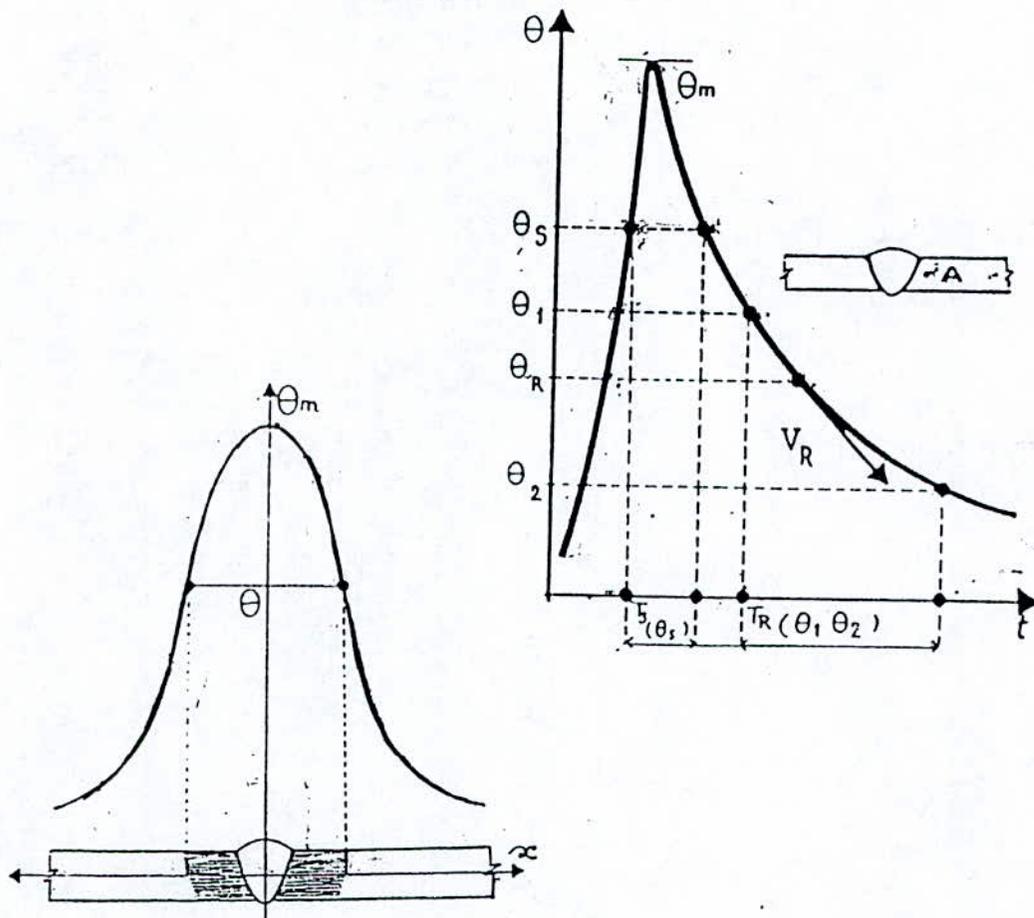


Fig.I-14 Courbe de répartition thermique

1.4.2.5. Solide thermique et lignes isothermes

La répartition spatiale des cycles thermiques de soudage est décrite par la représentation selon les trois axes :

S_x : axe des distances à la ligne de soudure.

S_t : axe des temps

S_θ : axe des températures

Grâce à ces coordonnées on peut tracer l'histoire thermique de tous les points maxima de température se trouvant décalés dans le temps et dans l'espace dont rend compte la courbe $\theta_M = \varphi(x, t)$.

Si on coupe le solide thermique par des plans parallèles au plan xOy , on obtient les courbes ellipsoïdes d'égal température instantanée dont le déplacement engendre les

isothermes lignes parallèles à la ligne de soudage. Chaque isotherme correspond à une température maximale. [4] (Fig.I-15)

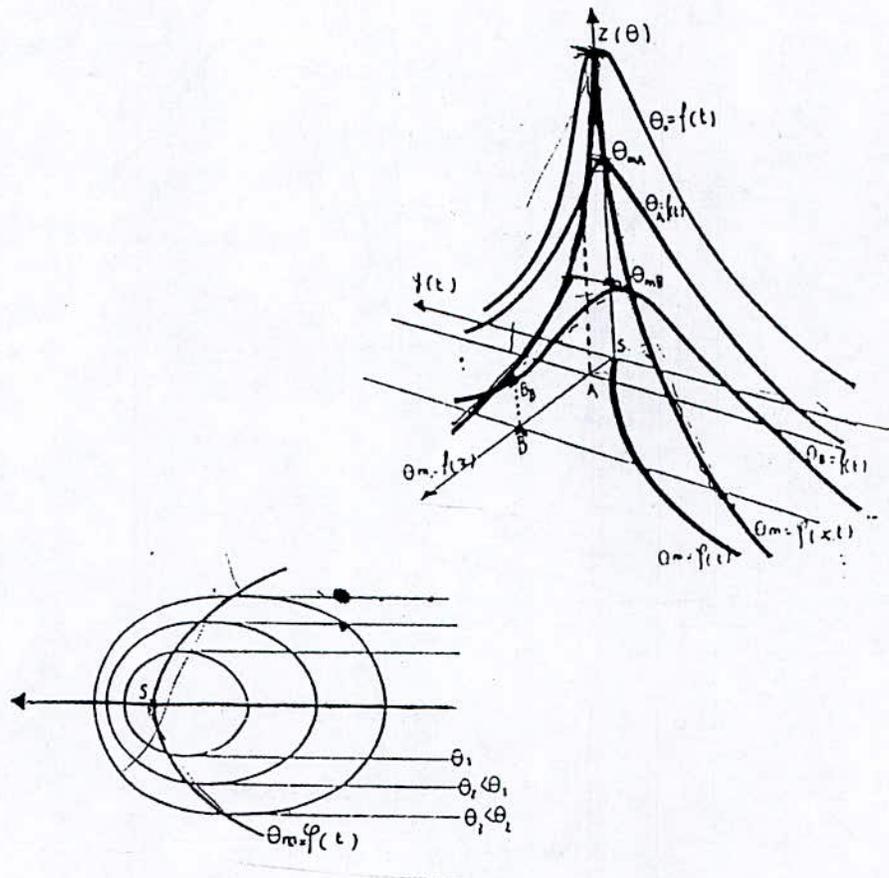


Fig.I-15 Solide thermique et formation des isothermes

1.4.3. Facteur du cycle et de la répartition thermique

1.4.3.1. Influence du métal de base

Le métal de base influence le processus thermique du soudage par ses propres caractéristiques thermiques, par la masse et la disposition des pièces à assembler et enfin par la température initiale de ces pièces.

La nature du métal de base intervient par ses caractéristiques de conductivité calorifique et capacité calorifique, qui agissent dans le même sens, à savoir que l'augmentation accroît le gradient de température et, par voie de conséquence, réduit le temps de séjour à haute température et augmente la vitesse de refroidissement. Ainsi en est-il pour l'acier inoxydable par rapport à l'acier ordinaire. Ainsi s'explique aussi la difficulté opératoire du soudage à l'arc du cuivre, que l'on résout grâce au préchauffage qui, ici, a pour effet de réduire le gradient de température et rendre possible l'obtention d'un bain de fusion.

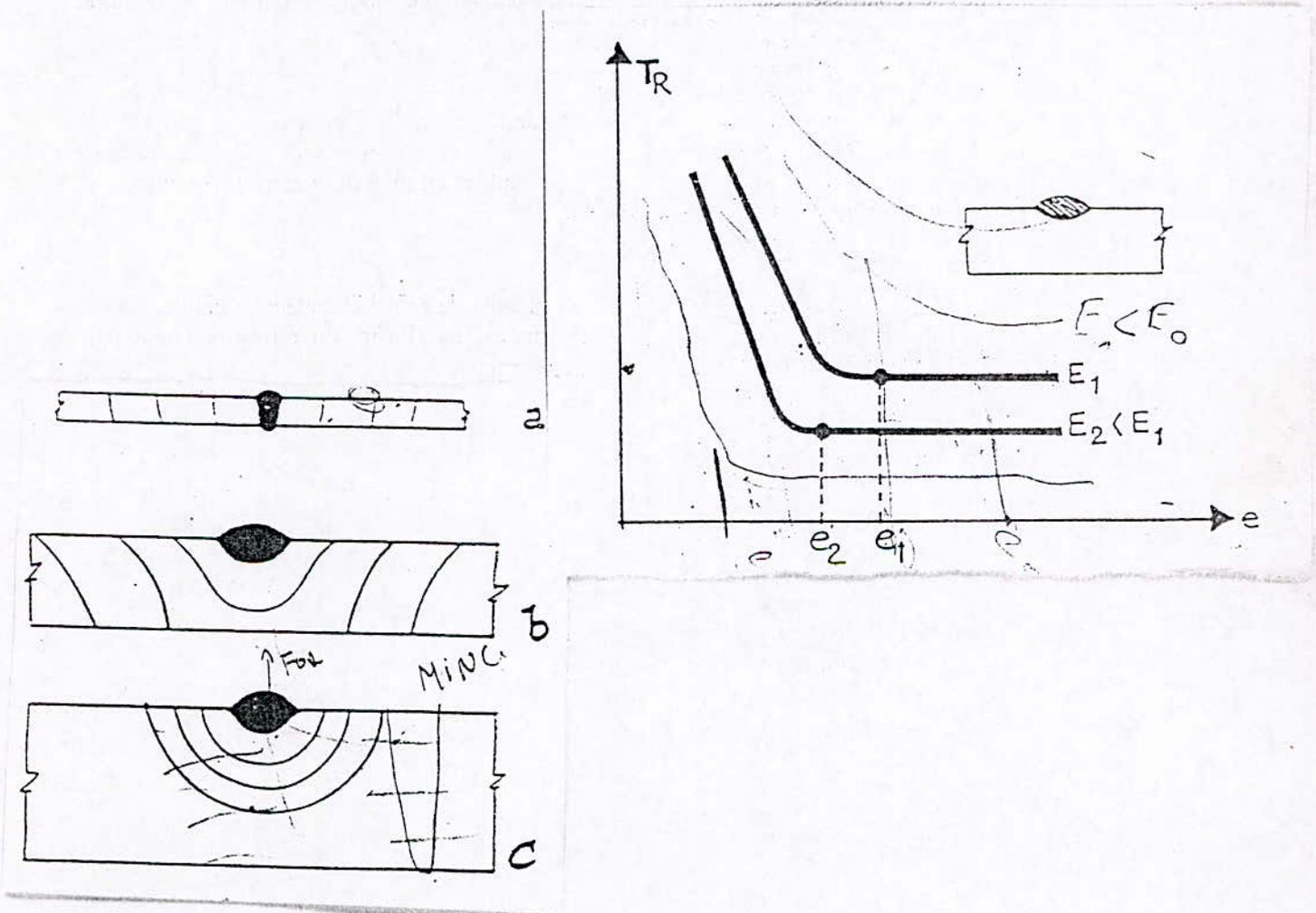


Fig.1.15.B Effet de l'épaisseur

On peut citer aussi le soudage par résistance par points de l'aluminium qui, par rapport à l'acier, requiert une énergie plus élevée, délivrée en un temps plus court, comme c'est aussi le cas pour l'acier inoxydable.

A propos de la masse des pièces, il faut noter d'emblée qu'il s'agit d'une notion toute relative, qui ne peut être séparée de l'influence des conditions de soudage. Puisque, par exemple en soudage à l'arc d'acier avec électrode enrobée, toute une gamme de réglage d'énergie est peut être utilisée pour déposer un cordon de soudure sur la surface d'une tôle d'épaisseur donnée.

C'est ainsi que si on trace un graphique donnant le temps de refroidissement T_r en fonction de l'épaisseur (E), au niveau d'un cordon déposé, et ceci pour deux énergies de soudage différentes E_1 et E_2 , on voit que le temps de refroidissement se stabilise à partir d'une certaine épaisseur, dite épaisseur limite, d'autant plus élevée que l'énergie est plus grande. Un produit est donc épais, du point de vue du soudage, si son épaisseur est supérieure à l'épaisseur limite associée à l'énergie mise en jeu. Dans ce cas, les isothermes se répartissent dans la masse symétriquement par rapport à la ligne de soudure sur lesquels ils sont centrés, prenant une forme cylindrique.

C'est à cette disposition que se rapporte la formulation de Rycalline. Par contre, dans le cas d'un produit dit mince- ou plus exactement d'un produit affecté sur toute son épaisseur par la fusion- les isothermes se répartissent dans la masse symétriquement par rapport au plan de symétrie de la ligne de soudure elle-même et, comme on le verra plus loin.

Le cas des pièces d'épaisseur moyenne, pour lesquels les temps de refroidissement se situent sur la partie descendante des courbes, les isothermes sont déformées par l'effet du refroidissement par rayonnement sur la face intérieure.

L'aspect tout relatif de cette notion d'épaisseur se traduit par une conséquence apparente : chaque fois qu'un procédé de soudage permet d'assembler deux pièces bout à bout en intéressant toute leur épaisseur à la fusion (bien entendu en une seule passe) on est en présence d'une répartition plane des isothermes, c'est-à-dire de la disposition (a)

C'est en particulier le cas pour le soudage par faisceau d'électrons et du soudage sous laitier, auxquels s'appliquent les formulations relatives aux produits dits minces.

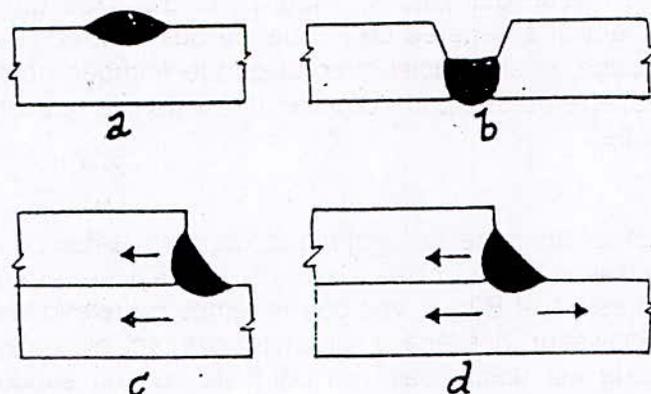


Fig.15.C Effet de la position de soudage

Pour rendre compte complètement du rôle joué par la masse du métal soudé vis-à-vis de l'effet thermique du soudage, il faut, en plus de l'épaisseur, prendre en compte la disposition des pièces ou, si on préfère, la géométrie des assemblages. En effet, à énergie égale et pour une même épaisseur de produit, un cordon de soudure peut être par exemple déposé à la surface ou bien utilisé pour réaliser la première passe d'une soudure sur chanfrein en V, ou encore pour constituer une soudure à recouvrement dite « bitherme » ou tritherme selon la proximité ou non du bord inférieur par rapport à la soudure.

On conçoit que chacun de ces cas corresponde à un écoulement de chaleur, donc à un cycle thermique différent, bien que résultant d'un même apport d'énergie.

Les recommandations relatives au soudage des aciers en tiennent compte par des coefficients affectant l'énergie mise en jeu selon la géométrie des joints pour les épaisseurs associées.

La température initiale du métal de base joue un rôle important vis à vis du cycle et de la répartition thermique en soudage, puisque le gradient de température en dépend directement. Si, toute chose égale par ailleurs, on passe, pour la température initiale du métal de base, de T_0 à T_p , on obtient au voisinage d'une soudure bout à bout des courbes température / temps illustrées par la figure suivante (fig. I.15.D.)

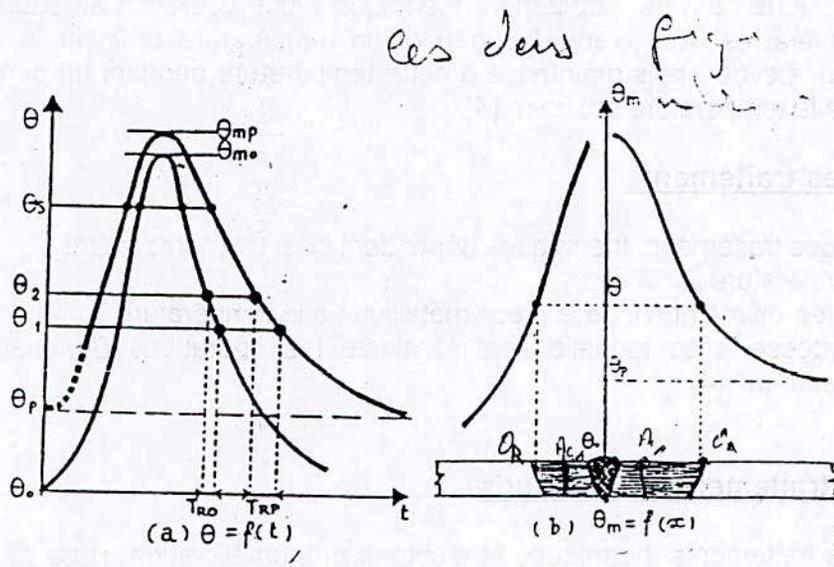


Fig.15.D. Effet de préchauffage sur le cycle et la répartition thermique

On lit sur la courbe qu'au prix d'une augmentation de la température maximale atteinte et du temps de séjour à haute température, l'augmentation de la température initiale réduit par ralentissement du refroidissement : le temps de refroidissement est augmenté, qu'il s'agisse du temps total pu du temps entre deux température. Tel est l'effet du préchauffage

I.5. Traitement thermique des aciers

I.5.1. Définition

On désigne sous le nom de « traitement thermique » une opération au cours de laquelle une pièce de métal est tout d'abord portée de la température ordinaire à une certaine température plus élevée, puis maintenue à cette température pendant un certain temps et enfin ramenée à la température ordinaire. [4]

I.5.2. Effets des traitements

Les effets de ces traitements thermiques dépendent pour un même métal :

- 1) de la température T
- 2) de la durée de maintien de la pièce métallique à la température T.
- 3) De la vitesse avec laquelle sont localisées les opérations de chauffage et de refroidissement. [4]

I.5.3. But des traitements thermiques

Le but de ces traitements thermiques est d'obtenir une amélioration d'une ou de plusieurs des caractéristiques mécaniques du métal traité. [16]

I.5.4. Le recuit

Il a pour but de faire disparaître les états hors équilibres provenant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques (tensions internes, écrouissages.)

I.5.4.1. Principe : Il consiste à :

- un chauffage de l'acier en général au dessus de la température d'austénitisation.

Selon le pourcentage de carbone et des éléments d'addition.

- un maintien isotherme
- un refroidissement lent très inférieur à la vitesse critique de trempe. [17]

I.5.4.2. Résultats après recuit

L'état recuit correspond aux valeurs minimales de ténacité (H, R) et aux valeurs maximales de ductilité

(A%, Z%) et sa structure est du type **ferrite - perlite**. [16]

I.5.4.3. Cycles thermiques des différents recuits :

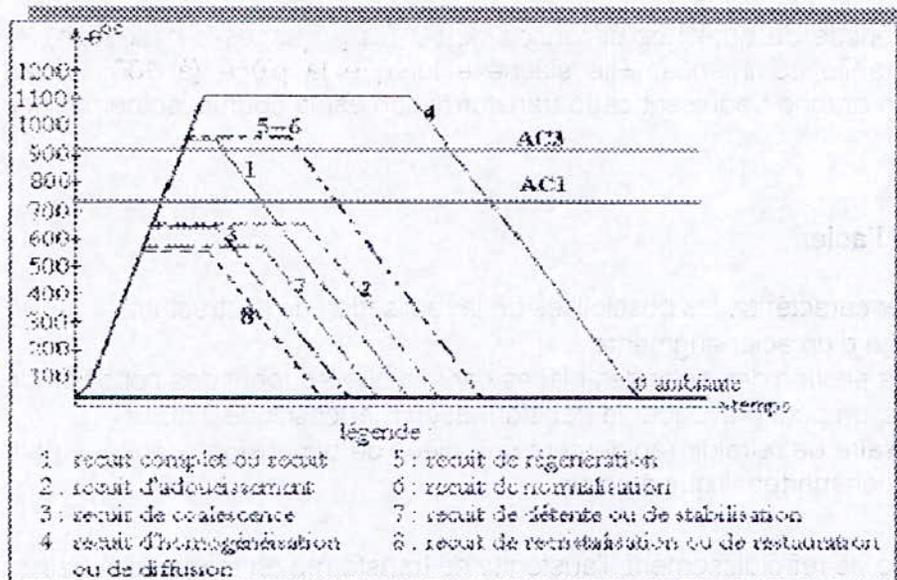


Fig.1-16 Cycles thermiques des différents recuits

1.4.5. La trempe

1.4.5.1. Principe

C'est un Traitement Thermique qui consiste :

- A chauffer l'acier à une température **d'austénitisation** égale à :
 - $A_3 + 50\text{ }^\circ\text{C}$ (Ac3) pour les aciers hypoeutectoides**
 - $A_1 + 50\text{ }^\circ\text{C}$ (Ac1) pour les aciers hypereutectoides**
- à le maintenir un certain temps à cette température afin de permettre aux transformations internes de se produire dans toute la masse.
- à le refroidir suffisamment vite par immersion dans un fluide (eau, huile, bain de sel).

Pour un acier donné :

- La composition chimique ;
- la température de la trempe ;
- et la loi de refroidissement

Sont des facteurs essentiels dits facteurs de trempe. [16]

1.4.5.2. Objectifs de la trempe

La trempe a pour objectif d'empêcher la précipitation du carbone au cours du retour de puis la température d'austénitisation, jusqu'à la température ambiante et cela dans la plus grande part possible de la section de la pièce. [4]

1.4.5.3. Transformations en refroidissement continu (courbe T.R.C) :

Dans le cas des traitements thermiques classiques des aciers (trempes, recuits ...), on a un cycle thermique d'une certaine forme.

On chauffe de la température ambiante θ_{amb} à la température θ_M ; on a alors l'austénite stable. Puis on refroidit suivant une certaine vitesse déterminée par le traitement thermique

choisi. Au bout d'une période de quelques secondes de t_{-1} à t_0 (temps d'incubation), la transformation de l'austénite commence. Elle s'achève lorsque la pièce (à 100 %) est transformée en perlite. le graphe traduisant cette transformation est la courbe isotherme dite en S.

1.4.5.4. Trempabilité de l'acier

La trempabilité d'un acier caractérise les possibilités de la réalisation de la structure,

- Plus la trempabilité d'un acier augmente
- Plus est grande la section des acier des pièces dans la quelles, pour des condition de refroidissement données, on peut provoquer la transformation martensitique à cœur.
- Moins est nécessaire de refroidir rapidement une pièce de dimensions données pour engendrer la transformation martensitique à cœur.

En fonction de la vitesse de refroidissement, l'austénite se transforme en martensite, bainite ou ferrite fine.

- **Martensite** : c'est le constituant le plus dur de la trempe (HV = 800) mais il est fragile. C'est ne solution solide d'insertion saturée en carbone dans le fer α .
- **Bainite** : c'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (ferrite + cémentite) mais de structure particulièrement fine.

Remarque : La plus petite vitesse de refroidissement correspondant à ne dureté de trempe acceptable est appelée **vitesse critique de trempe**. Si cette vitesse de refroidissement est inférieure à la vitesse critique de trempe, la trempe est dite douce et on obtient un constituant appelé troostite (moins dure que la bainite). [16]

4.5.5. Notion de carbone équivalent

L'aptitude à la trempe d'un acier est reflétée par la position, dans l'échelle des temps, de sa loi critique martensitique au refroidissement. Pratiquement, dans le cas du soudage, la trempabilité dans la zone affectée thermiquement peut s'apprécier par la valeur du temps critique de refroidissement, lui-même fonction, pour une épaisseur donnée de l'énergie mise en jeu et de la température initiale.

Le carbone et les éléments d'addition sont groupés pour calculer un nombre qui rend compte du comportement de l'acier du point de vue de la trempe en soudage. Ce nombre appelé **carbone équivalent**, est obtenu en ajoutant à la teneur en carbone les teneurs en éléments d'alliage, chacune étant affectée d'un coefficient rendant compte du rôle que joue l'élément.

On rencontre dans la littérature la formule suivante, dite de l'IIS :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{5} \quad (I-1)$$

La spécification du carbone équivalent maximum permet de mieux situer la courbe donnant la dureté maximale sous cordon, parce que l'acier A est plus dur à l'état trempé mais moins trempant, ce pendant que l'acier B est moins dur à l'état trempé mais plus trempant.

La notion de carbone équivalent complète celle du carbone maximum pour permettre une corrélation valable entre dureté sous cordon et le temps de refroidissement

Si on considère deux aciers A et B dont l'un présente la teneur maximale en carbone (donc la teneur minimale en manganèse), l'autre ayant une teneur minimale en carbone (donc la teneur maximale en manganèse), leur courbe dureté/ temps de refroidissement se croisent

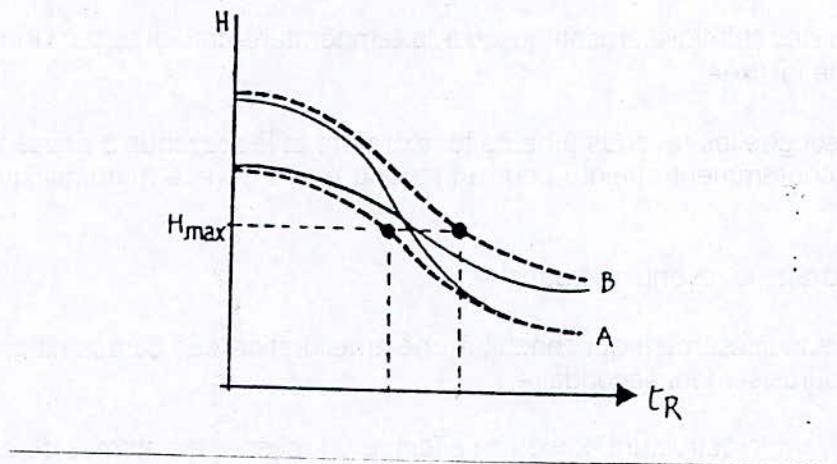


Fig.I-17 Dureté sous coudrons et notion de carbone équivalent

Après trempe, on obtient les modifications suivantes sur les caractéristiques mécaniques :

- R_m , R_e et H augmentent de valeur
 - $A\%$, K et $Z\%$ diminuent de valeur
- Défaut de la trempe :

Le refroidissement brusque du métal chaud immergé dans un fluide de trempe est accompagné d'une contraction. L'extérieur de la pièce se refroidissant plus vite que le cœur, il se produit **des tensions internes** qui risquent d'entraîner sa rupture. Si la contrainte dépasse la résistance à la rupture, il se crée de fentes appelées **tapures**. Des déformations peuvent aussi apparaître sur les pièces trempées. Pour remédier à ces défauts, la trempe est obligatoirement suivie d'un autre traitement thermique appelé **le revenu**.

Les aciers doux (%C inférieur à 0,25%) ne prennent pas la trempe

I.4.6. Le revenu

Traitement thermique effectué sur un produit après durcissement par trempe en vue de modifications lui conférant les caractéristiques d'emploi désirées.

Ce traitement provoque la formation d'une structure plus proche de l'état d'équilibre physico-chimique celle obtenue lors de la trempe.

4.6.1. Principe

Le cycle thermique comporte successivement :

- Un réchauffage jusqu'à une température déterminée mais inférieure à celle de AC_1 .
- Un ou plusieurs maintiens à une ou plusieurs températures déterminées.
- Un ou des refroidissements jusqu'à la température ambiante par un mode approprié ou suivant une loi fixée.
- On distingue les revenus à haute température et les revenus à basse température. La température couramment atteinte pour un revenu après trempe martensitique est de 500 à 600°C.

En règle générale, le revenu se traduit :

- soit par un adoucissement qui conduit à une amélioration des caractéristiques de ductilité,
- soit par un durcissement secondaire.

Au niveau de la microstructure, lorsqu'on effectue un revenu, les atomes de carbone qui sont dans la martensite sous forme de solution solide vont pouvoir diffuser car la cinétique à 500 à 600°C est beaucoup plus rapide qu'à température ambiante où elle est complètement négligeable. Ainsi, la propriété de résilience sera améliorée

1.4.6.2. Différents types de revenu (après trempe)

- Le **revenu** dit de **détente** est généralement réalisé à une température comprise entre 180 et 220 °C ; il ne fait intervenir que le premier stade du revenu et n'est donc appliqué qu'à une structure totalement martensitique. Il provoque une précipitation généralement incomplète (suivant la température) du carbone. Un tel revenu ne provoque qu'une faible baisse de la résistance à la traction et de la dureté ; par contre, il augmente très sensiblement la limite d'élasticité et améliore un peu le niveau des caractéristiques de ductilité.
- Le **revenu** que nous qualifions d'**habituel** ou de banal est réalisé à une température comprise entre 500 et 575 °C environ et provoque la précipitation complète du carbone sous forme de cémentite
- Le **revenu** de **durcissement secondaire** est réalisé à une température comprise entre 600 et 675 °C environ et provoque, dans les aciers contenant des éléments d'alliage carburigènes la précipitation complète du carbone sous forme de carbures spéciaux. Ce type de revenu est particulièrement effectué sur les pièces devant travailler à haute température. [16]

I.6. Traitements thermiques et soudage

Le soudage en lui-même provoque un véritable traitement thermique dans la zone voisine de la soudure, le plus communément appelée ZAT (*zone affectée thermiquement*). Il s'ensuit couramment soit un adoucissement local trop important, soit une fragilisation dont les conséquences sont aggravées par les risques de formation de défauts dans la soudure et son voisinage (contraintes ou même fissuration d'origine thermique), et éventuellement une sensibilisation à la corrosion, selon les modifications structurales qui en résultent. Ces inconvénients peuvent en grande partie être atténués par des traitements de préchauffage ou de post-chauffage qui ont surtout pour but de diminuer les vitesses de refroidissement après soudage, et par le choix d'un alliage dont la structure est stabilisée et a la faculté de ne subir que des modifications structurales limitées ou non dangereuses. Mais, souvent, il est nécessaire de faire un traitement thermique d'ensemble de la pièce, même pour des constructions énormes, tout au moins pour la relaxation des contraintes résiduelles inévitables après soudage. [7]

I.6.1. Transformation en refroidissement continu dans les conditions de soudage (courbe T. R. C. S) :

Les diagrammes T.R.C, décrits précédemment sont établis dans les conditions des traitements thermiques classiques. Les durées de chauffe et d'austénitisation sont assez longues ; de l'ordre de 5 à 30 min, celles de refroidissement varient entre quelques secondes et plusieurs heures.

Les conditions de soudage diffèrent nettement de celles des traitements thermiques. La durée de chauffe, suivant le procédé, peut être quasiment instantanée ou durer quelques minutes, tandis que la durée d'austénitisation est pratiquement nulle. Quand aux vitesses de refroidissement, elles varient entre quelques secondes et quelques minutes.

Les différences de conditions sont telles que les diagrammes T.R.C relatifs aux traitements thermiques, ne permettent pas d'analyser correctement le comportement des assemblages soudés.

Ainsi on a établi des diagrammes T.R.C.S, relatifs aux conditions de soudage. [7]

I.6.2. Conséquences de la trempe en soudage

I.6.2.1. Dureté sous cordon

Le durcissement provoqué par le soudage, en particulier dans la ZAT est choisi comme critère d'argument ou de contrôle du mode opératoire de soudage, sous le non de critère de dureté sous cordon.

Pour un acier donné et une épaisseur donnée, le tracé des courbes dureté sous cordon (énergie à diverses températures initiales, permet de choisir le couple le plus favorable énergie / température initiale assurant une dureté maximale sous cordon.

I.6.2.2. Fragilité –fragilisation par hydrogène

- La fragilité de la martensite est fonction de la teneur en carbone.
- Quant à la fragilisation par hydrogène, il ne s'agit pas d'une fragilisation acquise mais elle ne se manifeste que lorsque l'hydrogène est présent et elle cesse dès que ce gaz disparaît par diffusion.
- La fragilisation est d'autant plus sensible que la teneur en carbone est élevée

I.6.2.3. Effet d'entaille métallurgique

La présence de la martensite au niveau d'un joint soudé (métal fondu ou ZAT) crée, par le durcissement localisé qu'elle entraîne un effet « d'entaille métallurgique » qui existe aux confins de la zone durcie, du fait de la discontinuité de la limite d'élasticité correspondante, par rapport à celle du métal de base. C'est à cet endroit que se manifestent, le plus volontiers pour les pièces soumises à des sollicitations cycliques, les amorçages de rupture par fatigue. [2]

I.6.3. Fissuration à froid

Ce mode de fissuration apparaît à basse température, dans la ZAT (zone affectée thermiquement) et subsistant plusieurs heures après l'exécution des joints.

La fissuration à froid dépend de la présence d'une structure fragile, de la présence d'hydrogène et de l'état de contrainte de la Z. A. T.

I.6.3.1. Structure fragile

Les durées de refroidissement ne doivent pas conduire à la formation de martensite, car elle a une ductilité réduite, son réseau cristallographique est le siège de nombreuses dislocations et de contraintes résiduelles élevées d'où la naissance et la propagation des microfissures.

I.6.3.2. Hydrogène

On trouve l'hydrogène sous forme d'eau, dans les flux, sous forme d'humidité, de graisse, d'huile, de peinture ou de rouille sur le métal de base et sous forme de vapeur d'eau dans l'air.

Au cours de refroidissement, lorsqu'on dépasse la température Ac_3 : la différence de solubilité de l'hydrogène dans la ferrite et l'austénite fait qu'il y a migration de cet hydrogène en sursaturation se concentre dans les dislocations du réseau. Il y a alors augmentation considérable des pressions locales ce qui entraîne la fissuration.

- a) Le métal fondu est moins trempant que le métal de base : l'isotherme T_F est en avant de l'isotherme T_B ; l'hydrogène quitte le métal fondu, devenu ferritique et gagne, à travers la zone de liaison, le métal de base, encore austénitique où il est plus soluble, mais moins diffusible ce qu'il l'empêche d'aller loin en profondeur dans la ZAT ; au passage de l'isotherme T_B , la transformation martensitique se produit dans la ZAT en présence de l'hydrogène ainsi concentré. (fig. I-18)
- b) Le métal fondu est plus trempant que le métal de base : l'isotherme T_F est en arrière de l'isotherme T_B ; le mécanisme de passage de l'hydrogène à travers la zone de liaison n'a pas lieu, et c'est dans le métal fondu que la transformation martensitique a lieu en présence d'hydrogène, d'où la possibilité de fissuration à froid dans le métal fondu, alors que la ZAT en est exempte. (fig. I-19)

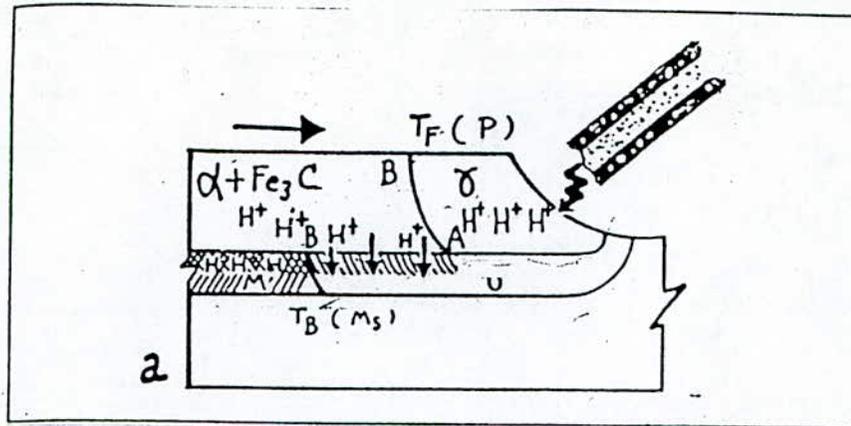


Fig.I-18 Métal fondu moins trempant que le métal de base

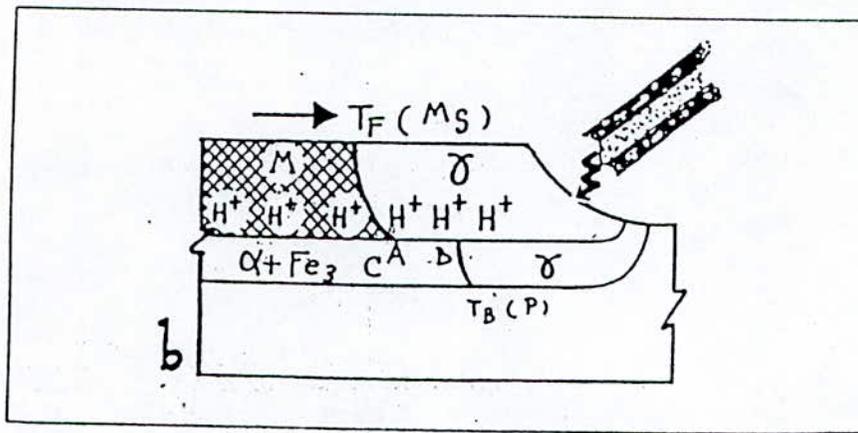


Fig.I-19 Métal fondu plus trempant que le métal de base

- c) Le métal fondu exempt de point de transformation (apport austénitique) donc pas de modification de solubilité de l'hydrogène : la diffusion n'a pas lieu, puisque le métal fondu demeure austénitique et la transformation au refroidissement a lieu en l'absence d'hydrogène dans la ZAT. (Fig.I-20) [2]

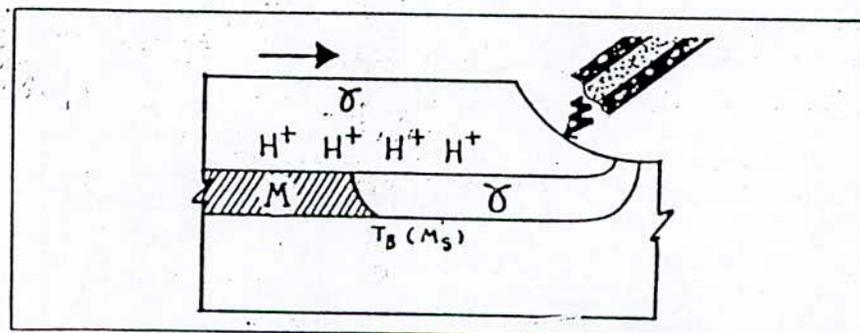


Fig.I-20 Métal fondu exempt de point de transformation

1.6.3.3. Etat de contraintes

La ZAT est le siège de :

- Contraintes résiduelles de soudage ;
- Contraintes de bridage dues aux retraits empêchés ;
- Contraintes dues aux sollicitations de service qui favorisent donc l'apparition de microfissuration.[2]

6.4. Revenu en soudage multi- passes

Dans le soudage en plusieurs passes, chaque fois qu'une passe s'accompagne de trempe, dans le métal de base, et qu'une passe ultérieure entraîne un réchauffage qui, lui-même provoque un revenu. Ainsi en est-il, par exemple, dans le cas d'un rechargement austénitique en passes larges (Fig.I-21) sur tôle épaisse en acier trempant.

- Métal fondu des passes I et II
- Métal de base trempé par une passe I ou II
- Métal de base trempé par la passe I puis par la passe II (ré - austénitisation),
- Métal de base trempé par la passe I et revenu par la passe II,
- Métal de base non affecté.

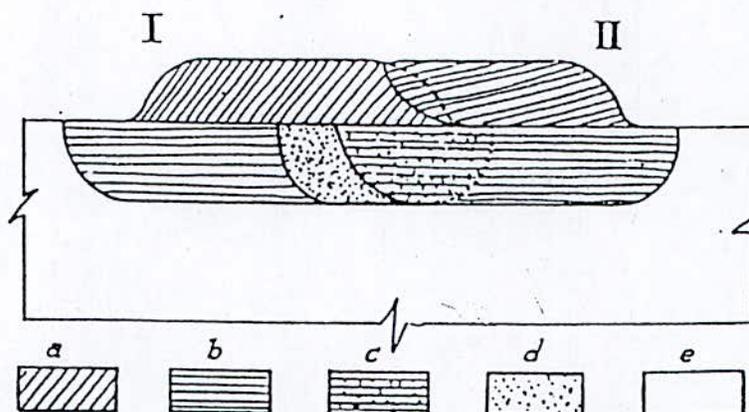


Fig.I-21 Effet du revenu lors du soudage multi passe

1.6.5. Revenu et sur revenu

Avec l'acier à l'état martensitique, on est en présence d'un état hors d'équilibre où le carbone se trouve engagé en solution sursaturée dans un constituant appelé martensite, qui est lui-même directement issu de l'austénite par refroidissement. A partir de l'état martensitique, un préchauffage à une température inférieure à celle du point A_1 produit une mise hors solution du carbone, qui précipite sous forme de particule très fines de cémentite Fe_3C , ce qui conduit à une structure appelée sorbite. Ce phénomène, dit revenu, qui a lieu à partir d'une température θ_R (Fig.I-22) s'accompagne d'un adoucissement et d'une amélioration de résilience ; à partir d'une température θ_c , il y a coalescence de la cémentite, juste avant que soit atteinte : au point A_1 , la remise en solution de ce constituant.

D'autre part, si un acier initialement trempé et revenu à la température θ_R , avec l'évolution correspondante de la dureté et de la résilience. Cette évolution traduit ce qu'on appelle le **sur-revenu** : le sur-revenu intervient en soudage sur acier trempé et revenu ; quant à lui, le revenu se produit lors du soudage en plusieurs passes d'acier trempant, ou exceptionnellement du soudage sur acier trempé.

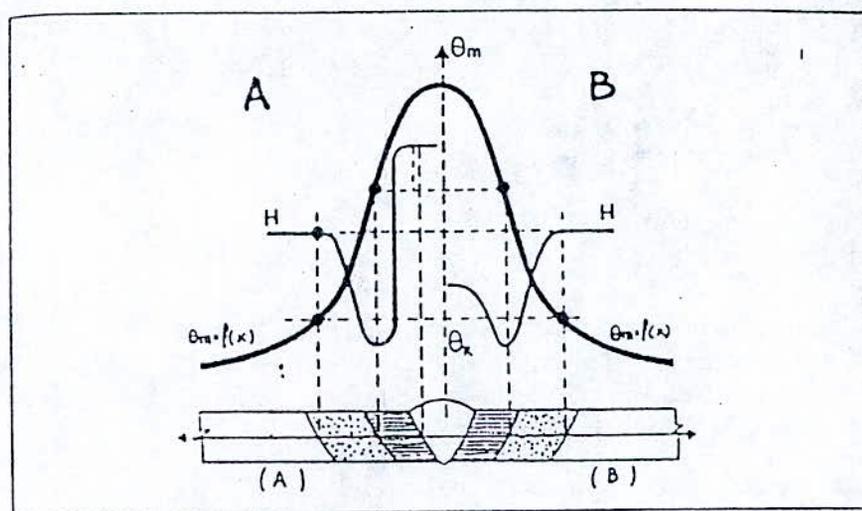


Fig.1-22 Filiation de dureté au voisinage d'une soudure sur acier trempé et revenu à θ_R :

- Cas d'un acier trempant par soudage
- Cas d'un acier ne trempant pas par soudage

1.7. Le préchauffage

1.7.1. Qu'est ce que le préchauffage ?

Le préchauffage est une opération préparatoire au soudage, qui consiste à élever la température de la pièce à souder, soit dans sa totalité, soit aux niveaux de la zone concernée par l'opération de soudage.

Le maintien de la température obtenue durant l'opération de soudage dépend du but recherché par l'intervention du préchauffage, de la masse et de la disposition des pièces à souder, du caractère local ou global de l'intervention et enfin du moyen utilisé pour obtenir l'élévation de la température.

Le maintien de cette température après la fin de l'opération de soudage n'est pas systématiquement nécessaire lorsqu'on l'a fait suivre par un post-soudage. [8]

1.7.2. But du préchauffage

Le problème de la soudabilité se traite au niveau de la possibilité pratique de réaliser l'opération de soudage, des effets mécaniques ou plutôt Thermo- mécaniques de cette opération. C'est à ces trois niveaux que le préchauffage est susceptible d'intervenir simultanément ou séparément.

- a) En rendant possible (ou plus aisée) l'opération de soudage.
- b) En agissant sur les effets métallurgiques de cette opération dans le sens d'une atténuation de leurs conséquences.
- c) En agissant sur le système de contraintes provoquées par le soudage et sur son évolution, là aussi.

- Pour réaliser l'opération de soudage, il faut pouvoir - du moins en soudage par fusion- établir un bain de métal fondu en équilibre avec le métal de base environnant, ce que permet le préchauffage en diminuant le gradient de température, c'est-à-dire la différence de température entre la zone atteinte par la source de chaleur et le métal de base.
- Du point de vue métallique

Le préchauffage est essentiellement illustré par son intervention en soudage des aciers. Ici, ce rôle est assuré par la diminution de la vitesse de refroidissement que le préchauffage procure, pour une pièce de masse donnée et pour une certaine valeur de l'énergie de soudage. Grâce à cette diminution, la transformation de l'acier, dans la zone fondue comme dans la zone voisine austénitisée, a lieu dans les conditions plus proches de l'état d'équilibre, ce qui peut éviter la trempe qui se produit si le préchauffage n'intervenait pas. Mais ceci n'est pas le cas pour certains aciers plus ou moins alliés que le préchauffage n'empêche pas de tremper lors du soudage.

Il est cependant utile, car le ralentissement du refroidissement lors du soudage favorise la diffusion de l'hydrogène et retarde l'établissement des contraintes résiduelles que le soudage, intervention thermique localisée ne peut manquer de provoquer. Or, il se trouve que trempe, hydrogène et contraintes sont les trois facteurs indissociables de la sensibilité à la fissuration à froid, d'où le rôle important du préchauffage dans les programmes de soudage. [9]

- Concernant les contraintes
Il y a création de contrainte lors du soudage, dès le début du refroidissement jusqu'à la fin, où elles atteignent leur maximum, de proche en proche, le long du joint, par suite du retrait thermique d'un métal qui, du moins dans la zone affectée, a vu sa dilatation empêchée, ce qui a provoqué une plastification, lors de l'échauffement, de sorte que le retrait est, lui aussi, empêché au refroidissement. Or, certains matériaux sont intrinsèquement trop fragiles, dans le métal de base lui-même, indépendamment de tout effet métallurgique, pour supporter l'état de contrainte ainsi provoqué.

Lorsque le préchauffage intervient en soudage d'acier, son prolongement lors du refroidissement offre un bénéfice supplémentaire, car la croissance des contraintes résiduelles est interrompue pendant toute la durée de ce qu'on appelle préchauffage. [1]

1.7.3. Influence du préchauffage sur un assemblage soudé

Le préchauffage est utilisé pour éviter la formation de structure fragile dans la Z.A.T, (Zone affecté thermiquement), et pour permettre à l'hydrogène dissout dans les pièce de diffuser vers l'extérieur.

La température initiale du métal de base joue un rôle important vis-à-vis du cycle et de la répartition thermique en soudage, puisque le gradient de température en dépend directement. Pour les mêmes conditions, si on passe de la température initiale du métal de base, de θ_0 à θ_p , on obtient au voisinage d'une soudure bout à bout des courbes température/temps illustrées par la Fig.1-23 et des courbes température maximale- distance du type (Fig.1-23)

On lit sur la courbe $\theta = f(t)$ qu'une augmentation de la température initial se traduisent par :

- Augmentation de la température maximale atteinte
- Augmentation du temps de séjour
- Ralentissement du refroidissement : le temps de refroidissement est augmenté, qu'il s'agisse du temps total ou du temps entre deux passes
- Un autre effet non recherché se lit sur la courbe $\theta = f(t)$ où l'on voit que le préchauffage augmente l'étendue de la zone affecté thermiquement c'est-à-dire il diminue le gradient de température. [4]

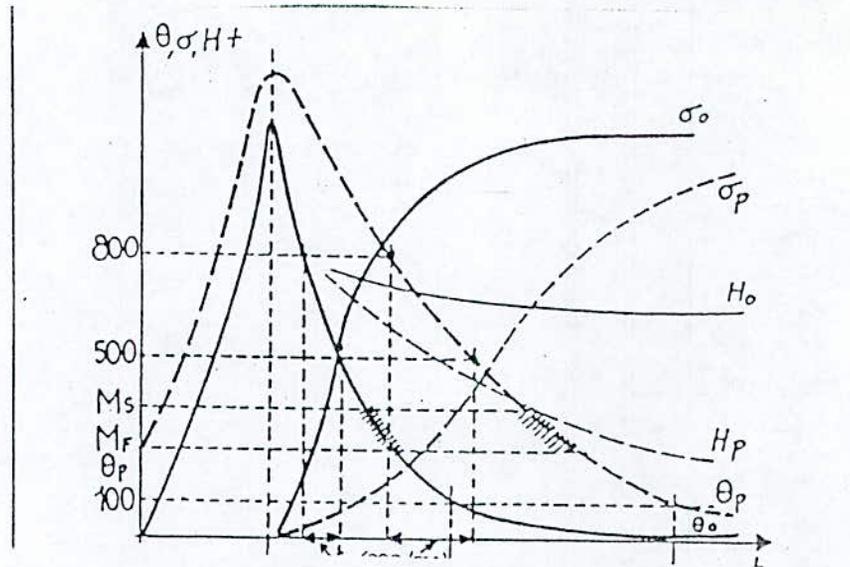


Fig.1-23 effet de préchauffage sur les propriétés mécaniques

1.7.4. Effet de préchauffage

Le préchauffage des aciers à assembler permet de :

- Diminuer la vitesse de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite, et par suite, limiter les transformations physico-chimiques ; (surchauffage, trempe ...) ;
- Réduire la teneur en hydrogène en fin de refroidissement et faciliter son dégagement pour éviter la formation de soufflures ;
- Réduire les déformations et de ralentir la croissance des contraintes

Le principal but du préchauffage est :

Amélioration des conditions de refroidissement, en vue d'éviter la formation des constituants de trempe ou de semi- trempe (martensite) ; la température de préchauffage est d'autant plus élevée que le pouvoir trempant de l'acier est plus énergétique. [6]

1.7.5. Le préchauffage pour les aciers trempés et revenus

Une fois les aciers faiblement alliés sont à l'état trempé et revenus, un réchauffage au dessus d'une certaine température va détruire les propriétés développées par le processus de fabrication. Certains assemblages, doivent être préchauffés avant soudage pour éviter les fissurations à froid lors du refroidissement rapide, mais le préchauffage doit être contrôlé afin de ne pas détruire les propriétés mécaniques acquises :

- La limite élastique et la charge à la rupture qui caractérisent ces aciers et les recommandent pour des applications spéciales.

- Durant le soudage, la Z. A .T subira un chauffage. Le refroidissement doit être rapide pour rétablir les propriétés originales et éviter la structure fragile.

A travers les recherches, les procédés de soudage sont développés de telle sorte qu'il assure une grande limite élastique. Une bonne résistance, ductilité et résistance dans les joints soudés à l'énergie calorifique et la température de préchauffage. [4]

1.7.6. Inconvénients du préchauffage

Le préchauffage des avantages mais aussi des inconvénients qui limitent son emploi. Il augmente la température maximale atteinte au niveau du joint et à ses abords et le temps que dure l'échauffement.

- Cas de la surchauffe, qui est un grossissement héréditaire du grain, c'est-à-dire que l'on retrouve après refroidissement qui pour les aciers se traduit par une fragilisation, qui peut être préjudiciable pour certains aciers alliés.

I.8. Effet d'adoucissement et phénomène de consolidation

si on soude sur acier trempé, et revenu, l'échauffement dû à l'opération de engendre un revenu supplémentaire, dit **sur - revenu**, dont l'effet possible sur les caractéristiques mécanique du joint doit être considéré. Soit un acier trempé, puis revenu à la température θ_R .

Le soudage sur aciers trempés et revenus fait apparaître une zone adoucie par sur-revenu, et prolongeant celle-ci, soit une zone de transformation trempée, soit une non trempée. Si on veut que le joint soudé se comporte, du point de vue des propriétés mécaniques, comme le métal de base, il est nécessaire de limiter le plus possible l'étendue de la zone. Pour éviter les ruptures dans la zone soudée, on a donc intérêt à mettre les conditions de soudage qui font retremper l'acier ; ainsi la zone de dépression due au revenu, qui est inévitable peut être assez étroite pour que les ruptures ne puissent pas s'y localiser, grâce au phénomène dit de **consolidation**. [1]

I.8.1. Définition de la consolidation

L'importance de l'écroutissage plastique macroscopiques ne peut s'expliquer par le déplacement des seules dislocations préexistantes. Il faut donc qu'il ait création de nouvelle dislocation de façon continue. Ainsi, au fur et à mesure que l'on déforme plastiquement le réseau, les dislocations vont donc agir entre elles pour former un réseau tridimensionnel, formant ainsi un écheveau de plus en plus difficile. Par conséquent, la contrainte nécessaire pour déformer la structure augmente avec la déformation plastique antérieure, c'est ce que l'on appelle la consolidation du métal. [8]

I.8.2. Effet d'entaille

La circonstance pratique la plus commune capable d'introduire dans les constructions un état de contrainte triaxial est représentée par les entailles.

On définit comme entaille, au sens général, toute cause qui provoque des condensations de lignes de force.

Citons comme exemples d'entailles :

- Les variations brusques de section ou de rigidité ;
- Les points durs au sein de zones déformables ;
- Les défauts de soudure et les discontinuités en général. [6]

I.8.2.1. Relation entaille – triaxialité

Pour illustrer les rapports existant entre les entailles et la triaxialité, nous allons examiner le cas simple d'une éprouvette cylindrique présentant une gorge transversale en V, autrement dit une entaille au sens le plus intuitif du terme (Fig. I-24)

Si l'on applique à l'éprouvette une charge de traction externe monoaxiale, on constate que :

1. Dans le sens longitudinal, les lignes de force montrent une distribution non uniforme avec une condensation particulièrement forte au fond de l'entaille. La contrainte longitudinale σ_1 qui, sur la section entaillée s , a la valeur moyenne F/s , atteint du fond de l'entaille la valeur maximale kF/s . le « facteur de concentration k » est d'autant plus élevé que l'entaille est plus aiguë et plus profonde : il peut prendre des valeurs allant jusqu'à 10 et même au-delà.

2. Soumise à la tension longitudinale, la section entaillée tendrait à se contracter transversalement, mais les bords de l'entaille, évités par les lignes de force, s'y opposent en donnant naissance à une contrainte : radiale σ_r , normale à σ_l .
3. σ_l a pour conséquence l'apparition d'une autre tension σ_p , appelée *périphérique*, dans une direction perpendiculaire aux deux premières. [6]

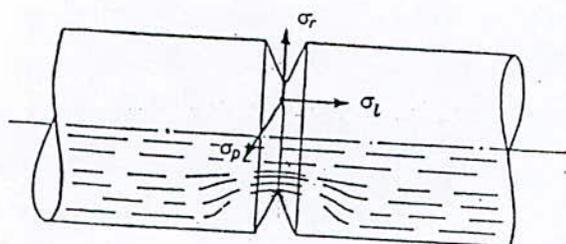


Fig.I-24 Déviation des lignes de force et l'état consécutif sous le fond de l'entaille

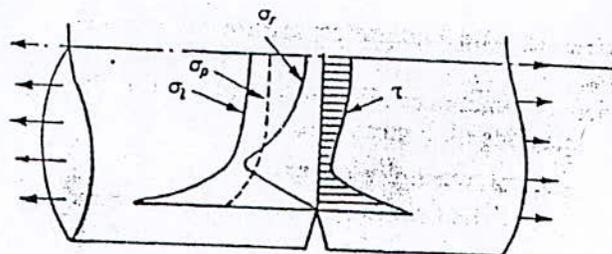


Fig.I-25 Allure des tensions σ_r , σ_p et τ sur la section

1.8.2.2. Action combinée de la basse température, des entailles et d'autres facteurs défavorables

En pratique, la triaxialité produite par les entailles, même lorsqu'elle sont aiguës et profondes, n'est jamais équilatère, de sorte que l'effet de cisaillement conserve de toute manière des valeurs suffisantes pour amorcer, dans le cas des matériaux ductiles, la déformation plastique.

Si l'on rompt par traction, à la température ordinaire, une série d'éprouvettes cylindriques avec des entailles de profondeur croissante, on constate que la charge de rupture rapportée à la section entaillée augmente progressivement tandis que l'allongement diminue. Il n'est toute fois pas possible de parvenir par l'effet d'entaille seul à la rupture par décohesion.

Si à l'effet d'entaille s'ajoute l'action de la basse température, il devient alors facile d'obtenir expérimentalement la rupture fragile.

La situation peut être aggravée par toute circonstance susceptible de compromettre la ductilité du matériau comme, par exemple, l'accroissement de la grosseur des grains, la trempe, l'écroutissage et le vieillissement.

En présence de ces facteurs qui, comme la basse température, augmentent la résistance aux glissements, la rupture fragile devient encore plus facile à obtenir.[6]

1.8.3. Comparaison entre l'entaille à profil purement géométrique et l'entaille métallurgique

1.8.3.1. Entaille à profil purement géométrique

L'entaille à profil géométrique présente deux aspects

1. augmente la concentration de contrainte au fond de l'entaille.
2. création d'un état de contrainte triaxial

Les deux effets mènent à un **état de contrainte triaxial**

- 1.1. Empêchement de toute déformation (surtout si σ_1 , σ_2 , σ_3 sont proches les uns des autres, on peut devenir nul donc impossibilité de déformation)
- 1.2. augmentation de la limite élastique et de la charge de rupture.

1.8.3.2. Entaille métallurgique

Une zone adoucie, étroite et localisée entre deux régions dures devient raidie et indéformable.

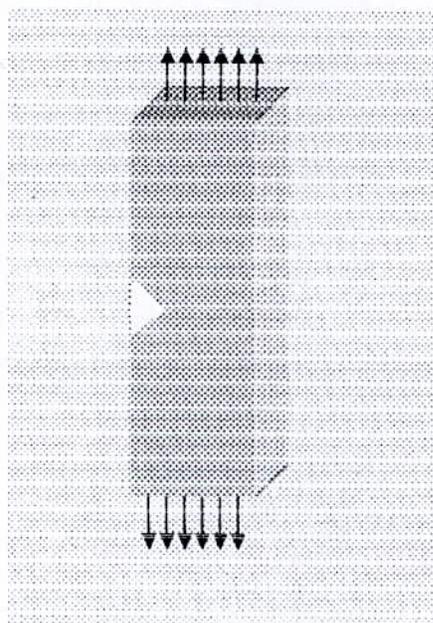
Pour avoir la déformation, il faut que la bande adoucie se contracte transversalement, or cette contraction transversale est empêchée par les parties dures voisines

En d'autres termes, la zone adoucie tend à se contracter, mais le métal dur voisin qui l'encadrait l'a raidit ;

En dernière analyse, cette zone adoucie intervient comme l'effet d'entaille et joue le même rôle que l'entaille.[2]

1.8.3.3. Similitude entre l'effet « d'entaille mécanique » et l'effet d'entaille métallurgique

1. Le premier effet, le plus connu est l'effet sur la distribution des tensions :
L'entaille est à l'origine de la concentration de contraintes.
La mécanique de la rupture et l'expérience montre que :
Juste au fond de l'entaille la valeur de la contrainte est égale à un multiple de la tension moyenne.
Selon la théorie de la mécanique de la rupture, le coefficient de surtension dépend de la profondeur de l'entaille et surtout du rayon de courbure au fond de l'entaille. Il peut atteindre 10 fois et même plus.



1. l'effet de concentration de contrainte n'est qu'un des aspects de l'effet de l'entaille.
Un autre effet est l'apparition d'un état de contraintes

Fig.I-25 Entaille structurale

Si les σ_L , σ_R , et σ_P peuvent devenir égales, la contrainte tangentielle responsable de la déformation sera nulle d'où impossibilité de déformation.

La zone entaillée peut accepter une plus grande charge sans se déformer. Il y a création artificielle de la limite élastique

1.8.3.3.1. Cas d'une zone sur-adoucie large

1. Pour qu'il y ait effet de consolidation, la largeur de la zone adoucie doit être de l'ordre de quelque dizaine de millimètres. Dans ces conditions, lorsque on est dans le domaine élastique. Tous se passe normalement, chaque zone obéit à la loi de l'élasticité.

La déformation élastique se produit dans l'ensemble de la pièce.

2. Comme la zone adoucie a une plus faible limite élastique, elle atteint la limite élastique la première. A ce moment, elle tend à se déformer plastiquement

- i. Dans le sens transversal, elle veut se contracter pour permettre sa déformation longitudinale.
- ii. Les parties dures s'opposent à la contraction transversale.

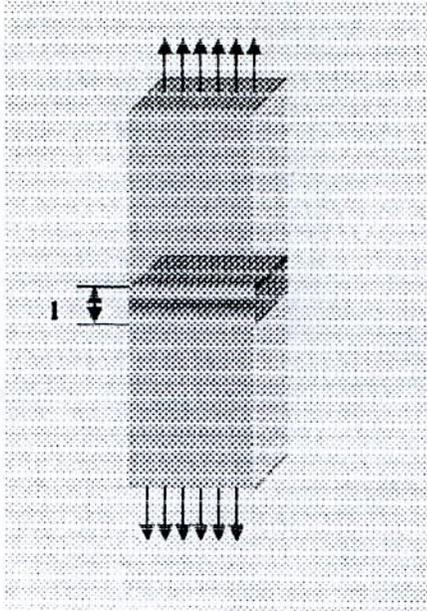
Tous se passe comme dans le cas de l'entaille mécanique. La zone adoucie accepte une plus grande sollicitation sans se déformer donc comme l'a dit GRANJON :

La rupture ne se localise que pour une charge plus élevée, ou même ne s'y localise pas du tout.

1.8.3.3.2. Cas d'une zone sur-adoucie large

Quand la zone sur-adoucie est trop large, le phénomène de consolidation ne se manifeste pas et la rupture se produit dans la zone adoucie.

1. Au moment de l'application de l'effort, tout le barreau se trouve tendu. En d'autre termes terme, chaque partie dure et adoucie sont sollicités élastiquement.
2. la tension et la déformation de la partie adoucie sont pratiquement sans influence sur la distribution générale des tensions.
3. Elle en est indépendante aussi de la déformation de l'ensemble de l'éprouvette.
4. cette petite partie adoucie obéit à la déformation élastique.
5. De même que toutes les autre régions obéissent à la déformation élastique.
6. tant que cette petite partie adoucie obéit à la loi d'élasticité, sa tension est liée à la déformation par le coefficient de proportionnalité élastique : module de Young.
7. d'ailleurs même les parties dures obéissent à la loi d'élasticité et leurs tensions sont liées à leur déformation pour le module de Young.
8. ensuite l'effort extérieur continu à croître et toute les zones dures et adoucie continuent à se déformer élastiquement
9. l'effort croit jusqu'à ce que la limite élastique soit atteinte et dépassée dans la petite partie adoucie



10. La déformation plastique de la partie adoucie se poursuit jusqu'au moment où s'amorce la rupture.

Quand la charge de rupture est atteinte, l'éprouvette se sépare en deux, la cassure étant dans la partie adoucie.

A ce moment là, les régions dures se trouvent toujours dans le domaine élastique ou ils ont juste entamé leur déformation plastique.

Fig.1-26. Entaille métallurgique

Chapitre II:

ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Matières premières méthodes expérimentales

II.1.1. Identification du matériau à l'état de livraison

Dans ce travail expérimental deux nuances d'acier ont été utilisées :

- Le premier acier correspond la nuance **A 517 Grade H** selon l'ASTM A517 / A517 M- 93 (son équivalent dans la norme AFNOR est **S690**), cet un acier faiblement allié, trempé et revenu, à haute limite élastique, fourni par la société ETTERKIB (BOUFARIK). Il a été utilisé dans la construction des conduites forcées dans le cadre du projet STATION DE POMPAGE DE BENI- HAROUN à Mila.

Les pièces ont été livrées sous forme de tôles utilisées pour la qualification des procédures de soudage des conduites forcées.

- Le deuxième acier correspond à la nuance **A 553 type I** selon l'ASTM (son équivalent dans la norme AFNOR est **Z 10N 9**). Cet un acier allié à 9%Ni trempé et revenu, utilisé dans la réalisation de l'ouvrage : SPHERE DE STOCKAGE D'Ethylene LIQUIDE – ARZEW

Dimension des tôles

Tôles	Avec préchauffage	Sans préchauffage
A517 Garde H	20 x 115 x 180 (mm ³)	20 x 165 x 270 (mm ³)
A553 Type I	12 x 205 x 270 (mm ³)	12 x 180 x 270 (mm ³)

Tableau II-1 dimension des tôles utilisées

II.1.2. Spécifications des aciers

II.1.2.1. Le A 517 Grade H

Le A 517 Grade H correspond à la spécification A 517/ A 517M – 93 selon le code ASTM Standard

II.1.2.1.1. Traitement thermique

L'acier est chauffé à une température pas moins de 900°C, trempé à l'eau ou à l'huile suivi d'un revenu à une température 620°C pendant au minimum ½ h .

II.1.2.1.2. Propriétés mécaniques

Ces propriétés mécaniques concernent les épaisseurs 65 mm et moins sont donnés dans le tableau II-2

Charge à la rupture (MPa)	Limite élastique (MPa)	Elongation %
795 - 825	585	16

Tableau II.2 propriétés mécaniques de l'acier A 517

II.1.2.1.3. Eléments chimiques

Selon l'ASTM A517/ A517 M-93

Eléments (%)	C	Mn	P _{maxi}	S _{maxi}	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	nuance
A517	0.12	0.95	0.035	0.035	0.15	0.30	0.40	0.20	-	0.03	H
	0.21	1.30	-	-	0.35	0.70	0.65	0.30	-	0.08	

Tableau II.3 composition chimique de l'acier A 517 (% poids)

1.2.2. Le A553 Type I

Le A 553 Type I correspond à la spécification ASTM

1.2.2.1. Traitement thermique

L'acier est chauffé à une température de 800°C à 925°C, maintenu pendant un temps suffisant pour l'homogénéisation de la pièce selon sa dimension. Ensuite l'acier est trempé à l'eau suivi d'un revenu à une température entre 565°C à 635°C pendant au minimum 1.2 min/mm d'épaisseur.

1.2.2.2. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques de la nuance d'acier A 553 sont données dans le tableau II-4

Charge à la rupture	Limite élastique	Elongation %
690 - 825	585	20

Tableau II-4 propriétés mécaniques de l'acier A 553

II.1.2.2.3. Eléments chimiques

Selon l'ASTM A517/ A517 M-93, la composition chimique de l'acier A 553 est donnée dans le tableau suivant :

Eléments (%)	C	Mn	P _{max}	S _{max}	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V
A553 type I	0.13									

Tableau II-5 composition chimique de l'acier A 553 (% en poids)

II.1.3. Choix du métal de base

Le A517 Grade H a été choisi pour :

- Permet une bonne soudabilité
- Permet de réduire l'épaisseur et la compensé par sa haute résistance.
-

Le A553 Type I a été choisi pour :

- Permettre une bonne soudabilité
- Permettre de réduire l'épaisseur
- Utilisation dans les travaux cryogéniques

II.2. L'analyse chimique

II.2.1. But

Le but de cette analyse est de vérifier la conformité des compositions chimiques des aciers choisis aux exigences des normes

Cette vérification a été faite par la méthode de fluorescence (spectromètre à RX) au Centre de Recherche et Développement de SONATRACH Boumerdes (CRD).

II.2.2. Principe de l'opération :

- On prélève un échantillon de 36 x 36 mm² à l'aide d'une scie à froid pour éviter tout réchauffage de la pièce.
- Faire une rectification par la fraise afin d'améliorer l'état de surface.
- Etaler une couche de vernie à angle pour éviter tout oxydation jusque-là l'analyse.

- Chaque échantillon doit être circonscrit dans un porte-échantillon de diamètre 50mm.

II.2.3. Analyse métallographique

II.2.3.1. But

Le but de l'analyse métallographique est de définir la structure des échantillons avant et après soudage et renseigner sur les transformations structurales qu'à subit le matériau étudié lors de l'opération de soudage. L'observation se fait au microscope optique.

II.2.3.2. Préparation de l'échantillon

L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opérations, les voici :

II.2.3.2.1. Le polissage

L'opération de polissage passe par deux étapes :

1. polissage grossier : qui s'effectue avec du papier abrasif en forme de disque collé sur une polisseuse : les granulométries que l'on utilise sont croissantes : 120, 240, 600, 800 et 1200.
A chaque changement du papier, le sens d'orientation des éprouvette change de 90°, ce qui a pour effet d'éliminer les stries et les raies laissés par le disque précédent.
2. le polissage fin ou de finition : cette opération permet d'améliorer davantage notre surface en utilisant des tissus en feutre imbibés de suspension d'alumine diluées de granulométrie 0.3 puis 0.05 μm , avec une vitesse de rotation entre 50 et 100 tours/mn.

A la fin de cette étape, la surface obtenue a un aspect miroir. Elle doit être séchée à l'aide d'un sèche-cheveux.

L'opération de polissage a été faite au laboratoire contrôle de ENGTP.

II.2.3.2.2. L'attaque chimique

Elle consiste à mettre en contact les surfaces miroir avec un réactif approprié au matériau pendant un temps approprié au métal.

Le réactif utilisé pour le A517 et le A 553 est le Nital (5 ml d'acide nitrique et 95 ml d'éthanol)

- Composition du réactif est la suivante :

- Temps de contact : 5 secondes

II.2.3.2.3. Micrographie

Les micrographies ont été prises avec un microscope optique de marque ZEISS AxiolPlan au laboratoire de métallurgie du CSC.

II.3. Préparation du chanfrein

L'usinage a été fait à l'ENGTP au Service Mécanique. Le chanfrein adopté est en K, un coté droit et un coté demi X faisant un angle de 45° . Ce choix est justifié la prise de dureté se fera du coté de l'angle droit ainsi la structure sera la même

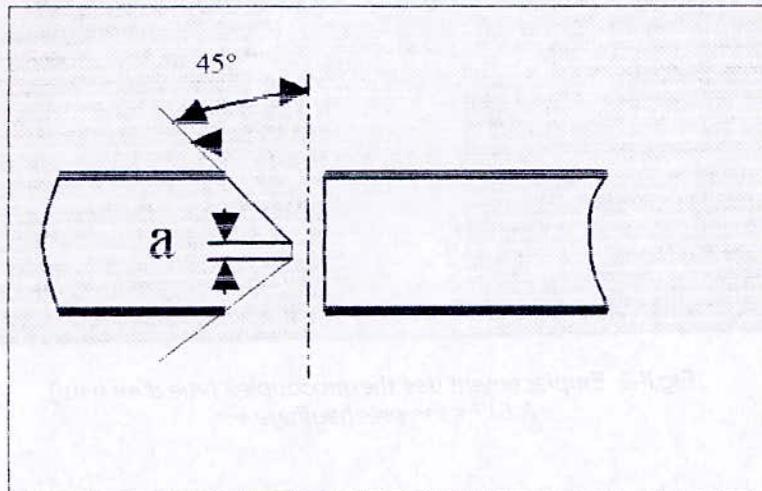


Fig.II-1 Chanfrein en K

II.4. Enregistrement des températures

Cette opération a été effectuée au service traitement thermique de l'ENGTP

L'enregistrement des cycles thermiques se fait à l'aide de thermocouples en chromeur – Alumel (type K), ils peuvent supporter jusqu'à 1200°C . Les thermocouples sont soudés à la tôle puis couverts d'une pâte réfractaire qui durcit au contact de la chaleur protégeant ainsi les thermocouples de l'arc.

Les thermocouples sont reliés à des enregistreurs numériques de type **FUJI**. Chaque enregistreur a douze entrées. Le nombre total des enregistreurs est de quatre. La vitesse de l'enregistrement est 1500mm/s

Dans les opérations de soudage qu'on a effectuées la disposition des thermocouples est la suivante :

- il y a deux séries de thermocouples
 1. la première série est de 24 thermocouples placés du côté face de l'angle droit
 2. la deuxième série est de 24 thermocouples placés du côté envers de l'angle 45°
- soudage sans préchauffage : la distance entre chaque thermocouple est de 1 mm
- soudage avec préchauffage : les douze premiers thermocouples sont distants de 1 mm, 9 distants de 2mm et 3 de 3 mm



Fig.II-2 Emplacement des thermocouples (vue d'en haut)
« A 517 sans préchauffage »

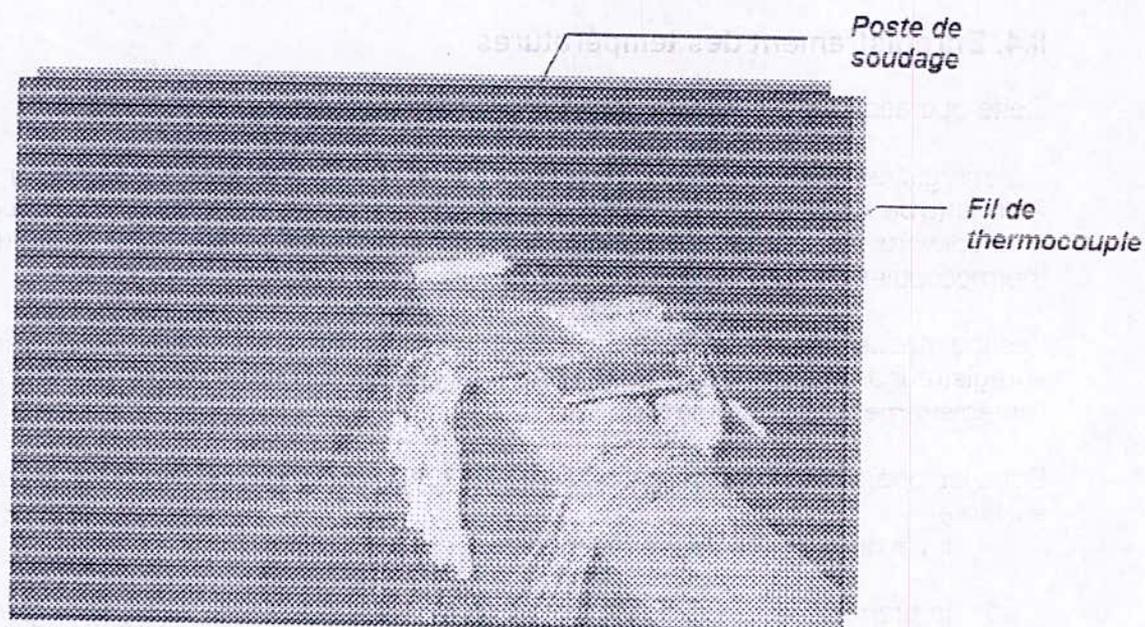


Fig.II-3 Emplacement des thermocouples (vue de profil)
« 9% Ni sans préchauffage »

II.5. Préchauffage des pièces

Pour les deux pièces A 517 et A 553, leur préchauffage a été fait par une source de flamme fig. (chalumeau oxyacétylénique) pendant 5 minutes.



Fig.II.4 Opération du préchauffage pour le A517 et 9% Ni

II.6. Les spécifications du soudage

II.6.1. Calcul des paramètres de soudage

- Calcul de la vitesse de soudage

$$V_s = \frac{l_s}{t_s} \quad \text{tel que } (l_s \text{ longueur soudée})$$

(II-1)

- Calcul de l'énergie de soudage

$$H = \frac{0.9UI}{V} \quad \text{tel que } U : \text{voltage, } I : \text{ampérage}$$

(II-2)

II.6.2. Composition chimique du métal d'apport

Eléments chimiques	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Co	Cb	Cr	Mo	W
										Plus Ta			
ENiCrMo-6	0.10	2.0	10.00	0.03	0.02	1.0	0.50	55.0	-	0.5	12.0	5.0	1.0
		a						min		a	a	a	a
		4.0								2.0	17.0	9.0	2.0

II.7. Préparation des pièces pour les essais mécaniques

II.7.1. Essai de traction

L'essai de traction a pour but de déterminer la résistance à la rupture du cordon de soudure. Pour cela, des éprouvettes de traction sont usinées comme le montre la figure ??

L'essai de traction permet de déterminer les différents paramètres qui caractérisent la résistance mécanique en appliquant une charge croissante aux deux extrémités de l'éprouvette et selon son axe longitudinal.

II.7.1.1. Localisation des éprouvettes de traction sur un joint soudé

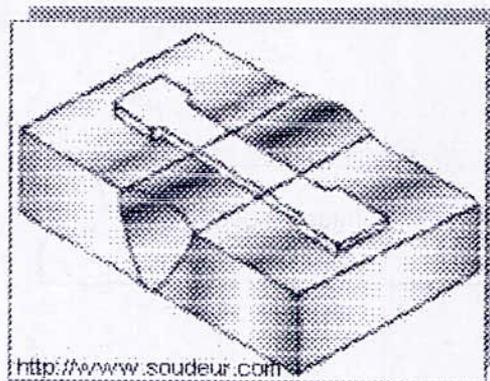


Fig.II-5 Prélèvement des éprouvettes de traction

II.7.1.2 Dimension des éprouvettes de traction

La préparation des éprouvettes a été faite à l'atelier mécanique de l'ENGTP selon les exigences du code ASME sec IX

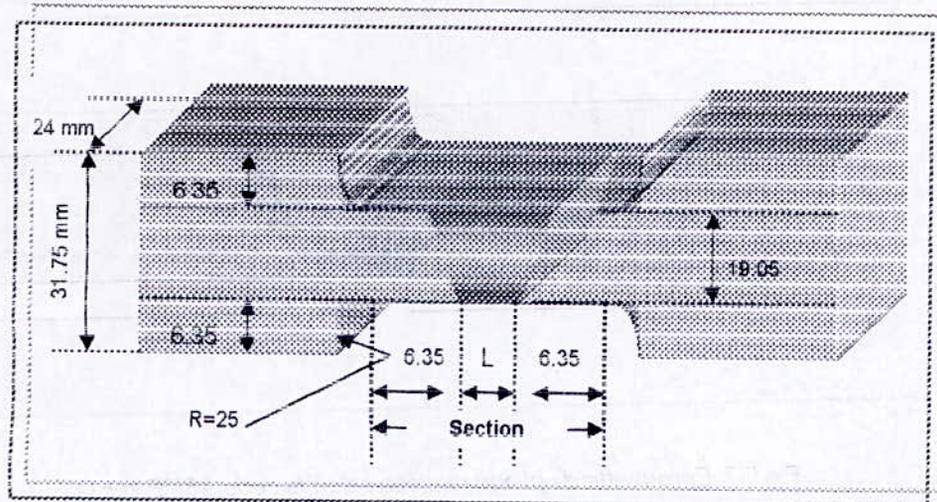


Fig.II-5. Eprouvette de traction réalisée selon le code ASME sec XI

II.8.2. Essai de pliage

Le pliage d'une tôle consiste en la réalisation d'une déformation permanente, rectiligne, caractérisée par un rayon de courbure et par un angle constant sur toute la longueur pli.

II.8.2.1. Localisation d'une éprouvette de pliage dans un joint soudé

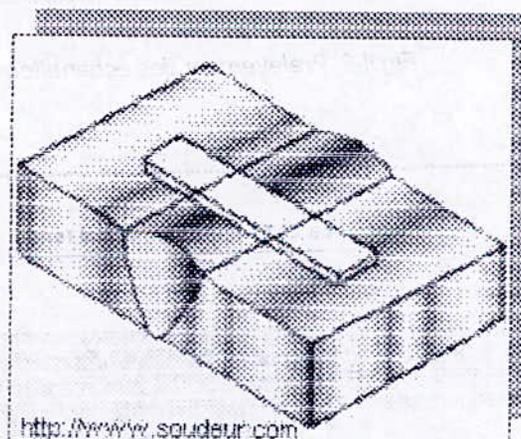


Fig.II-6 Localisation des éprouvettes dans un joint soudé

II.8.2.2. Dimension d'une éprouvette de pliage côté

La préparation des éprouvettes a été faite à l'atelier mécanique de l'ENGTP, selon les exigences du code ASME sec IX

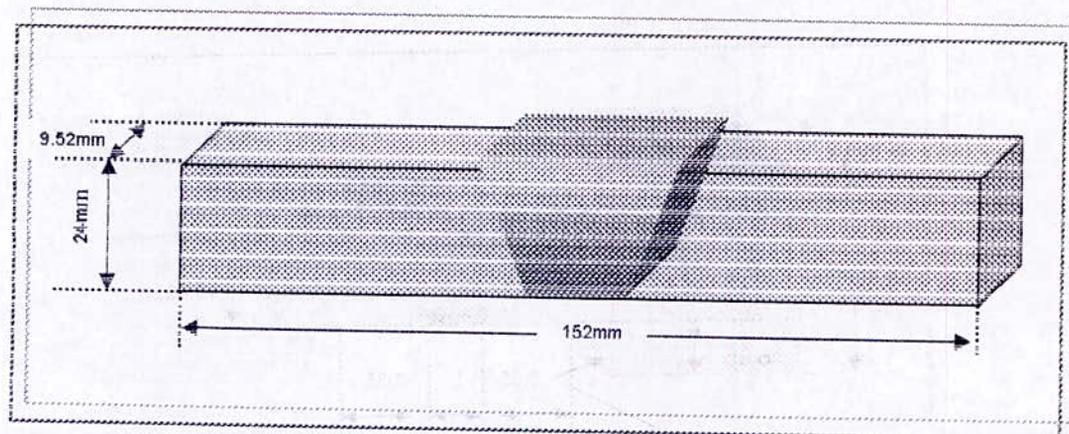


Fig.II-7 Epreuve de pliage réalisée selon le code ASME sec IX

II.8.3. Essai de résilience (Fig.II-8), (Fig.II-9) et (Fig.II-10)

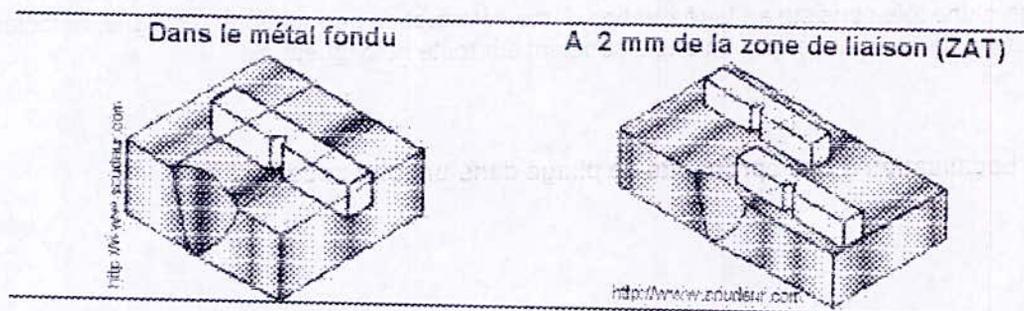


Fig.II-8 Prélèvement des échantillons

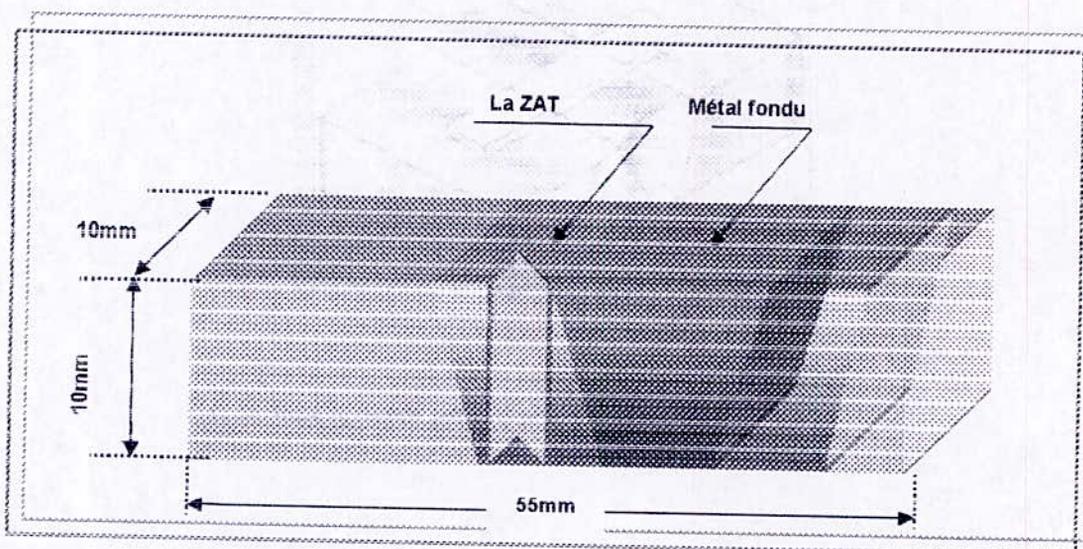


Fig.II-9. Epreuve de l'essai de résilience dans la ZAT selon le code ASMEX sec XI

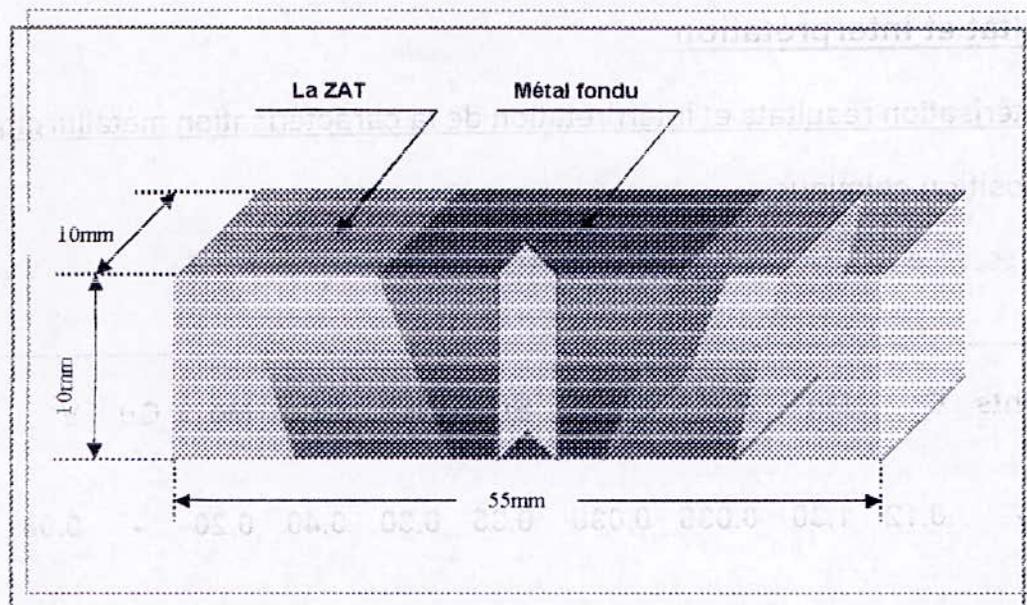


Fig.II.10. Eprouvette de l'essai de résilience dans la ZAT selon le code ASME XI

II.8.4. Essai de dureté et micro-dureté Vickers

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette à mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions des empreintes laissés par le pénétrateur (selon la méthode et la forme du pénétrateur).

Sur la surface du matériau contrôlé. Ces empreintes sont d'autant plus importantes que le métal est qualifié de mou ; en d'autres termes, la dureté peut être définie comme la résistance à la pénétration.

Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° sous une charge F . On mesure les diagonales "d" de l'empreinte.

La diffraction à rayon X

A partir du spectre de diffraction de l'échantillon (rayonnement X caractéristique), sont obtenus les indices cristallins hkl déterminés par la relation de Bragg qui traduit la condition de réflexion du rayon incident par les plans réticulaires :

$$n\lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta$$

Avec :

- n : l'ordre de réflexion
- λ : longueur
- d_{hkl} : distance inter-réticulaire
- θ : l'angle de Bragg, angle formé par le plan hkl et le rayon incident ou de réflexion

la diffraction à rayon X est complémentaire à la microscopie électronique à balayage, car elle permet de connaître la nature des dépôts.

Résultat et interprétation**Caractérisation résultats et interprétation de la caractérisation métallurgique****Composition chimique**

La fluorescence par rayon X a donnée les résultats suivants

Eléments (%)	C	Mn	P _{maxi}	S _{maxi}	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	nuance
A517	0.12	1.30	0.035	0.035	0.35	0.30	0.40	0.20	-	0.08	H
A 553	0.23	0.9	0.035	0.035	0.15	7.80	-	-	-	0.07	Type I

Analyse métallographique**Métal de base**

On observe pour les deux nuances une structure fine en aiguille à savoir une structure martensitique revenu. Avec des traces de bandes ce qui est légitime car il s'agit de tôles laminées

La ZAT

Elle apparaît aussi en structure en denture d'aiguille mais elle moins fixe que le métal de base, il s'agit de la martensite, car une fois soudé, la ZAT a pris la trempe et juste avant le début du métal de base, on distingue une zone claire mais d'une couleur claire mais foncer a structure d'aiguilles, c'est la ferrite aciculaire.

La zone fondu

Pour le 9% Ni, la zone fondu apparaît en claire car elle n'a pas subit la l'attaque mais on peut déduire structure, sachant qu'on a soudé avec des électrodes austénitiques (55%Ni), la structure ne peut être que austénitique.

Pour le A 517, la structure de la zone fondue est la martensite car l'acier du métal d'apport est auto-trempant.

Résultats des essais de traction pour le 9% Ni

	Larg (mm)	E _p (mm)	Section (mm ²)	F _m (daN)	R _m (MPa)	F (0.2%) (daN)	Re (0.2%) (MPa)
1 avec préchauffage	18.35	11.65	213.78	> 16751.56	783.598	12154.46	568.56
2 sans préchauffage	19.15	11.99	229.61	> 17301.83	753.536	13249.45	577.05

L'essai de traction effectué sur l'éprouvette sans préchauffage, la rupture s'est produite hors soudure, elle est acceptée du point de vue de la tolérance du code ASME sec 9.

Pour l'éprouvette préchauffée, la rupture a lieu au cordon et c'est dû au fait que le préchauffage ralentit l'effet de la trempe du cordon donc diminue la dureté de ce dernier donc au lieu que la rupture est lieu dans la zone sur adoucie, elle c'est effectuée au cordon.

Pour le 9% Ni, la rupture a lieu dans la ZAT, et plus précisément dans la zone sur adoucie, pourtant la dureté du cordon est plus faible que le métal de base (structure austénitique); ce qui montre l'effet du sur-revenu.

La charge de la rupture des éprouvettes non préchauffées est légèrement inférieure à celle des éprouvettes préchauffées

Essai de résilience

Vu le manque de matière les essais de résilience ont été faits seulement dans la Z. A. T.

Le 9% Ni sans préchauffage

Entaille	Essai	Eprouvette	T° d'essai	Energie de rupture	Moyenne des mesures
Zone affectée thermiquement	1	50x10x10x	-100°C	234.9	234.75
	2			209.4	
	3			257.4	

Le 9% Ni avec préchauffage

Entaille	Essai	Eprouvette	T° d'essai	Energie de rupture	Moyenne des mesures
Zone affectée thermiquement	1	50x10x10x	-150°C	248.3	192.33
	2			188.8	
	3			139.3	

A 517 sans préchauffage

Entaille	Essai	Eprouvette	T° d'essai	Expansion latérale	Moyenne des mesures
Zone affectée thermiquement	1	50x 10x 10	- 48°C	1.008	1.136
	2			1.080	
	3			1.331	

A 517 avec préchauffage

Entaille	Essai	Eprouvette	T° d'essai	Expansion latérale	Moyenne des mesures
Zone affectée thermiquement	1	50x 10x 10	- 48°C	1.013	1.06
	2			1.106	

Seule la ZAT est concernée par l'essais de résilience vue le manque de matière et non la nécessité de faire l'essai sur la zone fondue.

Les résultats sont acceptables selon le code ASME

Essai de pliage

Les essais de pliage ont été effectués sur le A 517 grade H et le A 553 type I avec et sans préchauffage n'ont signalé aucun défaut

La répartition thermique

La courbe de répartition thermique correspondant à chaque passe se situe les une au dessus des autres au fur et à mesure que le nombre de passes augmente, mais elles constituent rapidement un fuseau plus au moins serrés. Elles se focalisent à des températures assez proches.

On remarque aussi que les courbes des éprouvettes préchauffées atteignent des maxima supérieurs à celles qui ne sont pas préchauffées.

La micro dureté

La micro dureté révèle bien la présence de la zone sur-adoucie .

Pour le métal fondu la zone fondue a une dureté faible à cause de la nature du métal d'apport.

Pour le A 517 , le métal déposé a une dureté importante

La dureté reflète à peu près le même résultat

CONCLUSION

Les résultats d'étude qui viennent d'être exposés confirment l'intérêt de souder les aciers trempés et revenus avec faible énergie et sans préchauffage pour limiter la zone sur revenue.

L'effet de consolidation de la zone sur adoucie atteint le maximum quand cette bande est étroite

Le phénomène par lequel la résistance de la zone sur adoucie devient artificiellement aussi grande si non plus grande que le métal de base trempé revenu ne dépend que de la largeur de cette zone sur adoucie.

Plus elle est mince, plus l'efficacité de consolidation est grande.

Il serait intéressant pour la prochaine promotion d'ingénieur de poursuivre les travaux dans cette direction.

Il convient de noter qu'il est fortement recommandé d'utiliser des tôles d'essai suffisamment grandes pour obtenir un écart de température suffisamment significatif. En effet plus les tôles sont petites, plus l'apport de chaleur de l'arc est nettement supérieur à la capacité d'évacuation des calories. Les tôles de petites dimensions deviennent très vite sursaturées thermiquement et elle se traduisent par deux conséquences :

- (i) – Les conditions d'essai ne reflètent pas la réalité pratique
- (ii) – L'effet de préchauffage quelque soit la température devient insignifiant

Il serait d'une grande utilité de déterminer la largeur maximale sur adoucie qui se rapproche des conditions réelles.

La littérature spécialisée de soudage ne donne que des informations discrètes sur cette zone inévitablement sur adoucie par l'opération de soudage.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

Les aciers trempés et revenus sont d'une importance primordiale dans l'industrie de pétrochimie et navale, vu leurs propriétés peu communes, mais les problèmes rencontrés lors du soudage de ces aciers mènent à des précautions qu'on doit pas négligés. Ces précautions consistent à choisir les bons paramètres de soudage et bien les contrôler. Seulement le contrôle de ces paramètres n'est pas encore explicite reste à déterminer leur valeur exacte.

Une sollicitation aux conditions de service est nécessaire pour pouvoir valider les résultats obtenus : effet de vieillissement, l'usure ...etc.

REFERENCES
BIBLIO-
GRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Thechnique de l'ingénieur MB3 – M 1365 - M886
- [2] Base métallurgique de soudage Gronjon
- [3] Soudage et techniques connexe 1998
- [4] Cours de métallurgie *C. Chaussin, G. Hilly*
Ed 1972
- [5] Aciers spéciaux ; *G. Beranger, G. Hanry*
- [6] Joints soudé *A. Valleni*
Ed DUNO 1967
- [7] CETIM
- [8] Matériaux industriels : Matériaux métalliques *M. Colombie & Coll*
Ed DUNOD –2000
- [9] Qualification Standard Forging and Brazing procedures, welder, Brozers, and welding and brazing operators - *Code ASME Section IX*
Ed July 1,1998.
- [10] Ferrous Material Specification *Code ASME Section II partie 1*
Ed july 1,1998.
- [11] Soudage TEC 340 *S. Benissad* Université de Constantine – Institue de génie Mécanique
Ed OPO 1995
- [12] Soudage –Eléments de conception et réalisation -*R. Varissilace*
- [13] Préchauffage et post chauffage en construction soudée : *F. Guyot.* Institut Belge de la Soudure
Ed 1980
- [14] Welding, Brazing and Soldring ASM HANDBOOK Volume 6 *D. Le Roy Olson, T. A. Siewert, S. Liu, G.R. Edwards*
Ed. Decembre 1993
- [15] The Procedure HAND BOOK of Arc Welding *LINCOLN ELECTRIC*
Ed 1995
- [16] www.soudeur.com
- [17] Nine Percent Nickel - The Internationale Nickel Company INC
USA 2001