

10/97

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

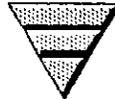
**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique
Département: METALLURGIE**



*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en METALLURGIE*

THEME



**ETUDE DE L'INFLUENCE DU PRECHAUFFAGE
SUR LES CARACTERISTIQUES DE LA Z.A.T.
DANS UNE SOUDURE**

Proposé et encadré par:

Mr: M. CHITROUB

Présenté par:

**Mr: S. Slimani
A. Houas**

PROMOTION 1997

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

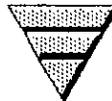
**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique
Département: METALLURGIE**



*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en METALLURGIE*

THEME



**ETUDE DE L'INFLUENCE DU PRECHAUFFAGE
SUR LES CARACTERISTIQUES DE LA Z.A.T.
DANS UNE SOUDURE**

Proposé et encadré par:

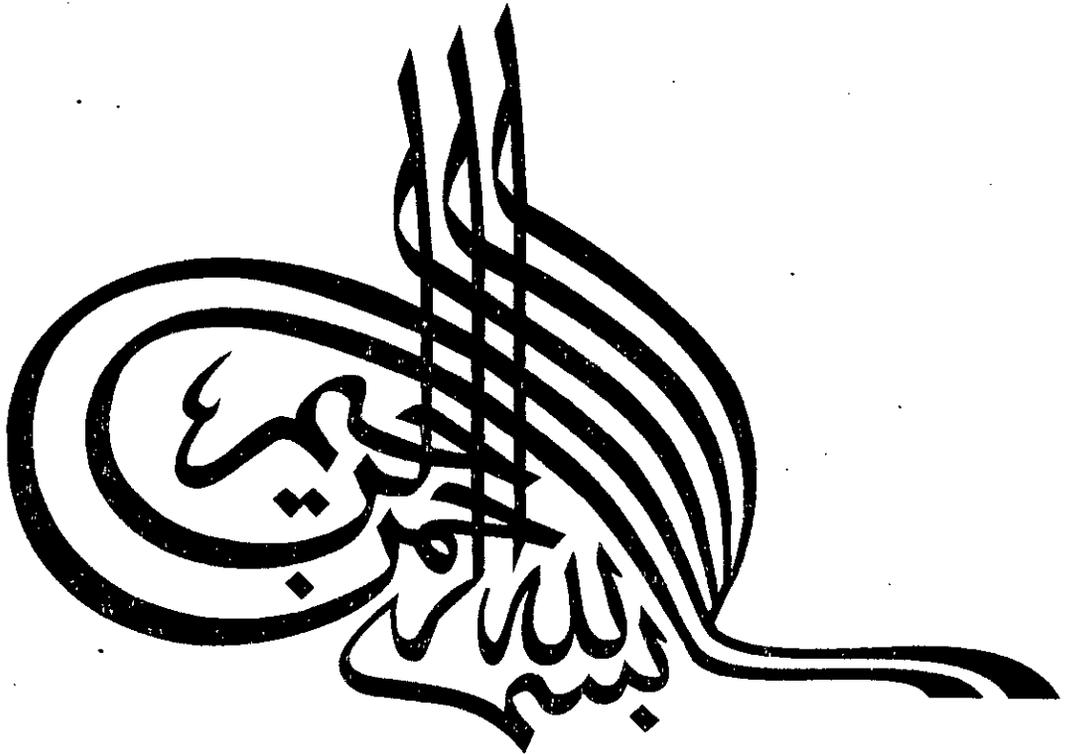
Mr: M. CHITROUB

Présenté par:

**Mr: S. Slimani
A. Houas**

PROMOTION 1997

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique



DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail à :

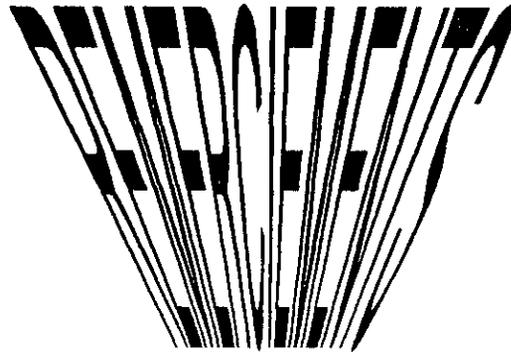
- *Mes très chers parents*
- *Mes très chers frères et leurs enfants*
- *Mes très chères soeurs et leurs enfants*
- *A toute ma famille*
- *A tous mes amis*

SAD SPTMANI



- *A mon père*
 - *A ma mère*
 - *A mes frères*
 - *A mes soeurs*
 - *A mes neveux et mes nièces*
 - *A toute ma famille*
 - *A tous mes amis et mes amies*
- Je dédie ce modeste travail*

W.A.S.



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement tous les professeurs et les responsables du département Métallurgie qui ont contribué à notre formation, en particulier notre promoteur Mr. M.CHITROUB , qui nous a aidé tout au long de l'élaboration de ce projet de fin d'étude.

Nous remercions également tout le personnel de la fonderie de Rouiba en particulier Mr. BELDACEMI et le Technicien Mr. KADARI.

Enfin sans oublier tous ceux qui nous ont aidé dans la réalisation de ce P.F.E en particulier nos collègues SÉKIOU ET ADDAD.

SOMMAIRE



CHAPITRE I

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

CHAPITRE II

APERÇU THEORIQUE SUR LA SOUDURE DE L'ACIER.....	2
- 1. GENERALITE SUR LES ACIERS.....	2
- 1.1 Définition.....	2
- 1.2 Les constituants de l'acier.....	3
- 1.3 Les aciers de construction.....	4
- 1.4 Traitement thermique des aciers.....	5
- 1.4.1 Courbe de transformation anisotherme.....	5
- 2. PROCÉDE DE SOUDAGE A L'ARC ELECTRIQUE.....	5
- 2.1 Introduction.....	5
- 2.2 Définition de l'arc électrique.....	6
- 2.3 Différents types de soudage à l'arc électrique.....	6
- 3. METALLURGIE DE LA SOUDURE DES ACIERS.....	7
- 3.1 Introduction.....	7
- 3.2 Notions de la métallurgie de soudage.....	8
- 3.2.1 Zone fondue (Z.F).....	8
- 3.2.2 Zone de liaison (Z.L).....	9
- 3.2.3 Zone affectée thermiquement (Z.A.T).....	9
- 3.2.4 Métal de base.....	9
- 3.3 Etude thermique et thermo-mécanique.....	10
- 3.3.1 Cycle thermique de soudage.....	10
- 3.3.2 Répartition thermique.....	11
- 3.3.3 Facteur d'influence sur le cycle et la répartition thermique.....	11
- 3.3.3.1 Métal de base.....	11
- 3.3.3.2 Conditions de soudage.....	13
- 3.3.3.3 Nombre de passe.....	13
- 3.4 Déformation et contraintes créées par le soudage.....	14
- 3.5 Transformation en phase solide au cours du soudage.....	14
- 3.5.1 Recristallisation après écrouissage.....	15
- 3.5.2 Surchauffe.....	17
- 3.5.3 Courbes de transformation en refroidissement continu en condition de soudage (T.R.C.-S).....	18
- 3.5.3.1 Transformation perlitique en soudage.....	19
- 3.5.3.2 Transformation martensitique en soudage.....	20
- 3.6 Fissuration de la soudure.....	21
- 3.6.1 Fissuration de la Zone Affectée Thermiquement.....	21
- 3.6.2 Remèdes à la fissuration.....	22
- 3.6.2.1 Préchauffage.....	22

CHAPITRE III PARTIE EXPERIMENTALE

-1. Matériaux.....	23
-2. Détermination de la température de préchauffage.....	24
-3. Soudage des pièces.....	25
-3.1 Découpage des pièces.....	25

-3.2 Usinage des chanfreins.....	25
-3.3 Opération de préchauffage.....	26
- 3.4 Soudage à arc électrique.....	26
- 3.5 Calcul de la vitesse de soudage.....	29
- 3.6 Calcul de l'énergie de soudage.....	30
- 4 EXAMEN METALLOGRAPHIQUE.....	31
- 4.1 Macrographie.....	32
- 4.2 Micrographie.....	33
- 4.3 Taille moyenne de grains.....	33
- 5 ESSAIS MECANIQUES.....	35
- 5.1 Essai de traction.....	35
- 5.2 Essai de résilience.....	35
- 5.3 Essai de dureté.....	36
CHAPITRE IV	
RESULTATS ET INTERPRETATION.....	38
 CHAPITRE V 	
CONCLUSION.....	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51
ANNEXES.....	53

CHAPITRE I

2-INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le problème fondamental qui domine la soudabilité des métaux et de leurs alliages et, sans conteste, celui de la sensibilité à la fissuration de l'assemblage. Cette fissuration peut-être provoquée par les transformations structurales de l'acier de base sous l'effet du cycle thermique de soudage. Elle peut être liée à l'apparition de phases nouvelles lors de la mise en oeuvre de la construction comme la précipitation des carbures dans les aciers austénitiques. La fissuration peut également se produire sous des tensions extérieurs ou développées par autobridage pour les pièces épaisses.

Le traitement thermique dit de *Préchauffage* reste le moyen le plus efficace pour réduire ou éliminer les risques de fissuration.

Ce problème de fissure est fréquemment rencontré par l'entreprise E.N.C.C. On a constaté des fissures après la soudure d'acier E36-4 'épaisseur 50 mm au niveau de la Z.A.T

Ce travail entre dans le cadre de trouver une solution à ce problème.

La démarche préconisée consiste en une étude comparative de deux zones affectées thermiquement (Z.A.T) de soudure sur tôles, l'une soudée à l'ambiante, l'autre préchauffée.

Cette étude se divise en cinq chapitres: Le premier chapitre introduction, le deuxième chapitre aperçue théorique sur la soudure de l'acier, la troisième partie expérimental, le quatrième résultats et interprétation et le dernier chapitre c'est la conclusion.

CHAPITRE II

2-APERCU THEORIQUE SUR LA SOUDURE DES ACIERS

1.-GENERALITES SUR LES ACIERS :

1-1 Définition :

Les aciers sont des alliages à base de fer et de carbone qui peuvent être toujours homogénéisés, par chauffage à une température convenablement choisie, sous la forme d'austénite solution solide de carbone dans le fer gamma. Ou sont les alliages dont leur teneur maximale en carbone, dans le cas où les éléments autres que le fer et le carbone sont en quantité négligeable, et environ **2,1%** en poids à 1130°C (fig.1)

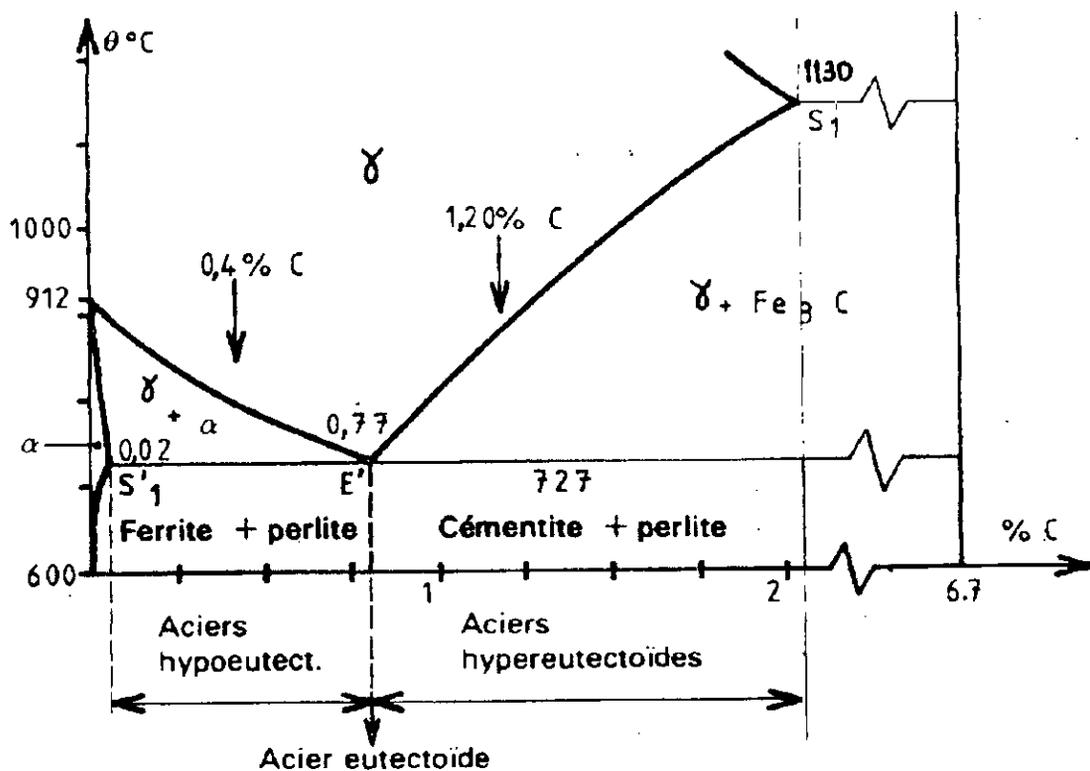


Fig1-Diagramme Fe-C. [1]

Il y a des éléments autres que le fer et le carbone que l'on rencontre dans les aciers sont :

a) Les éléments d'élaboration comme le silicium, le manganèse dont la teneur peut parfois dépasser celle du carbone.

b) Les éléments nuisibles qui, comme le Soufre et le Phosphore, ont été imparfaitement éliminés au cours de l'affinage de la fonte.

c) Les éléments d'addition que l'on ajoute volontairement à l'acier de façon à lui conférer les propriétés structurales, les propriétés mécanique ou un comportement aux traitements thermiques spéciaux.

Les éléments d'addition les plus utilisés sont le Nickel, le Chrome, le Molybdène, le Vanadium, le Tungstène etc...

On a l'habitude d'appeler *acier au carbone* un acier qui renferme en plus du fer et du carbone, Les quantités appréciables des seuls éléments d'élaboration, et *acier spécial* ou acier allié un acier qui contient outre ces éléments un ou plusieurs éléments d'addition. [1]

1-2 .Les constituants de l'acier : [2]

Ferrite (α): Solution solide d'insertion de carbone dans le fer (α) Elle est relativement douce (HB=80), très ductile et très résiliante (K=30).

Cémentite (Fe_3C): Cette combinaison est très dure mais fragile (K=0)

Perlite : Elle est l'agrégat eutectoïde obtenu par transformation isotherme de l'austénite, elle est sous forme de lamelles alternées, quand le refroidissement est lent elle peut exister sous forme globulaire.

1-3. Les aciers de construction :

Ces aciers comprennent les aciers de construction alliés sans traitement thermique, les aciers alliés de traitements thermiques et les aciers alliés résistant au fluage.

1°)- Les aciers alliés sans traitement thermique tendent à se substituer à l'acier doux dont la résistance à la rupture $R=22\div 26 \text{ kg/mm}^2$, et la limite élastique $E=12\div 14 \text{ kg/mm}^2$ sont très faible. [1]

Le problème est de durcir l'acier tout en conservant ses propriétés de soudabilité indispensables dans la construction. Pour cela on utilise comme éléments durcissant le silicium ($<1\%$) et le cuivre.

Pour un acier soit soudable, il ne faut pas qu'il soit trempable à l'air cette condition limite la teneur en carbone à $0,2\%$.

2°) Les aciers alliés traités, leur emploi à la construction de machine et en particulier de moteurs, exige une haute résistance et sans fragilité. Pour obtenir ces propriétés il faut faire subir au métal une trempe martensitique aussi homogène que possible suivie d'un revenu à une température comprise entre 200 et 600°C .

3°) Aciers de construction résistant au fluage, les aciers les plus utilisés sont :

A/ - Aciers au Molybdène et au Chrome-Molybdène

B/ - Aciers au Chrome-Molybdène-Vanadium

C/ - Aciers ferritique au Chrome

D/ - Aciers austénitique au Chrome-Nickel.

1-4 Traitement thermique des aciers :

La structure et les propriétés d'un aciers dépendent , dans une très grande mesure, des traitement thermiques qu'il a subis et notamment des conditions dans lesquelles il a été refroidi.

1.4.1 Courbe de transformation anisotherme :

Appelées aussi courbes de transformation en refroidissement continu (T.R.C.) , elles nous permettent de prévoir les structures qu'on peut obtenir en fonction des vitesses de refroidissement .

Les courbes T.R.C. sont déplacées du côté des temps élevés et cela d'autant plus la vitesse de refroidissement est plus faible. Ces courbes permettent de définir des vitesses critiques de refroidissement qui correspondent au passage d'un état structural, en fin de refroidissement à un autre.

Ces courbes sont influencées par : [3]

- 1- La composition chimique
- 2- La condition d'austénisation
- 3- Les inclusions

2. PROCEDES DE SOUDAGE A L'ARC :

2.1. Introduction:

Le soudage à l'arc électrique est à l'heure actuelle le procédé industriel le plus répandu pour l'assemblage des aciers et la plupart des métaux non ferreux et de leurs alliages. Toutefois, suivant l'origine de la source calorifique les procédés de soudage mettent en jeu , on peut distinguer autres procédés d'assemblage tel que : [5,6,9]

- Les procédés au gaz
- Les procédés par radiations
- Les procédés par effet mécanique

2.2 Définitions de l'arc électrique :

A l'aide d'un courant électrique approprié (alternatif, continu) fourni par un poste de soudage, un arc électrique jaillit entre l'électrode et la pièce.

La chaleur dégagée par cet arc fait fondre très localement la pièce à souder et crée le bain de fusion. [4]

2.3 Différents types de soudage à l'arc électrique:

Ces types se distinguent par la façon dont le métal en fusion est protégé contre l'action de l'air ambiant.

On distingue plusieurs types : [6,9]

a) Soudage semi-automatique à électrode fusible nue avec une protection gazeuse inerte (M.I.G.) : les gaz inertes les plus souvent utilisés pour la protection du bain sont :

- L'argon (Ar)
- L'Hélium (He)

b) Soudage semi-automatique à électrode fusible avec une protection gazeuse active (M.A.G.) : c'est la même chose que le procédé (M.I.G.) sauf que les gaz de protections sont actifs.

c) Soudage semi-automatique à électrode non fusible en tungstène (T.I.G.):

La protection du bain de fusion est assurée par un gaz inerte :

- Argon (Ar)
- Hélium (He)
- Argon+Hélium+Hydrogène

d) Soudage automatique sous flux solide : une poudre de granulométrie déterminée protège le bain de fusion.

e) Soudage manuel à électrode enrobée : l'enrobage protège le bain de fusion vis-a-vis de l'atmosphère selon la composition chimique des enrobages, il existe six types d'enrobage [3,6] à savoir :

- Enrobage de type acide
- Enrobage de type basique
- Enrobage de type cellulosique
- Enrobage de type oxydant
- Enrobage de type rutile
- Enrobage de type rutile-cellulosique

3. METALLURGIE DE LA SOUDURE DES ACIERS :

3.1 Introduction :

La métallurgie du soudage couvre à la fois la métallurgie du procédé (l'extraction, l'affinage, la réalisation d'alliage, la coulée, la mise en forme le traitement thermique et l'assemblage des métaux afin de produire de fabricats semi-finis ou prêts à l'usage), et la métallurgie physique (la cristallographie, les essais mécaniques, la détermination de caractères physiques) . [3]

Ainsi on constate que le soudage est une opération métallurgique à laquelle le métal de base constitue le creuset et associé étroitement à la fusion du métal déposé dans celui-ci.

Ainsi, aussi l'opération de soudage a pour conséquence des expansions et de contractions très localisés, des réactions chimiques entre le métal et l'atmosphère ambiante des modifications de la microstructure sur une faible distance et des altérations dans les propriétés mécaniques.

L'opération de soudage est caractérisée par trois aspects . [5,8]

-Aspect thermique : du fait que les parois limitant la partie fondue sont soumises à un chauffage à l'état solide suivi de refroidissement.

-Aspect chimique : par les réactions chimiques qui peuvent s'effectuer entre le métal fondu et le milieu environnant aussi bien en atmosphère gazeuse ou fondante (laitier).

-Aspect thermo-mécanique : le caractère localisé de l'opération, en tout cas pour les procédés mettant en jeu la fusion, fait intervenir deux comportements : retraits à la solidification et dilatation thermique qui agissent simultanément pour engendrer déformations et contraintes résiduelles au niveau des joints soudés.

3.2 Notion de la métallurgie soudage :

Dans les assemblages soudés par fusion on peut rencontrer les zones suivantes (fig.2) :

3.2.1 - Zone fondue (Z.F)

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 participation plus ou moins importante d'un métal d'apport . [5,8]

3.2.2 Zone de liaison (Z.L)

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion. Elle délimite aussi la **Zone Fondue** et elle est mise en évidence par la différence de structure que l'on constate de part et d'autre. D'autre part, l'intérêt de cette zone est d'être le siège de l'amorçage de la solidification du métal fondu . [8]

3.2.3 Zone affectée thermiquement (Z.A.T)

C'est la zone comprise entre l'isotherme limitant le métal fondu et l'isotherme correspondant à la disparition de tout effet du chauffage sur la structure métallurgique du métal de base . [11]

Elle comporte trois zones :

1. Zone de surchauffe au voisinage de la zone fondue ($\theta_s > 1100^\circ\text{C}$),
2. Zone de recuit ($A_2 < \theta < \theta_s$),
3. Zone d'austénisation partielle ($A_1 < \theta < A_2$).

3.2.4 Métal de base (M.B)

Le métal de base sert de référence pour l'appréciation des transformations qui interviennent au cours du soudage.

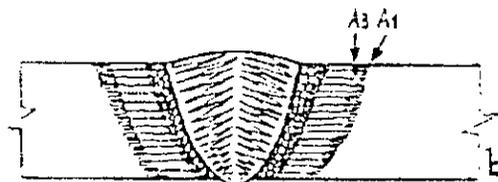


Fig.2- Les différentes zones dans un assemblage soudé [8].

3.3 Etude thermique et thermo-mécanique

Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance, durant l'opération de soudage, en un point donné de l'assemblage, il faut connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température « θ » en fonction du temps « t ». Mais si nous voulons accéder à la répartition topographique de ces modifications aux alentours de la soudure, il nous faut connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique et en particulier la courbe $\theta_m = f(x)$.

3.3.1 Cycle thermique de soudage : « Courbe température /temps »

C'est la loi suivant laquelle la température varie en un point de la pièce, en fonction du temps. La courbe correspondante $\theta - f(t)$ tracée en un point A voisin d'une soudure (fig.3), nous renseigne sur les grandeurs dont nous avons besoin à savoir : [4,8,9]

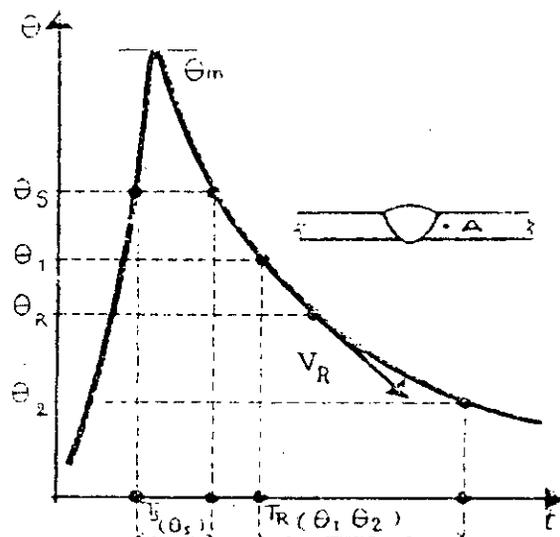


Fig.3- Cycle thermique de soudage [8].

- La température maximale atteinte θ_m
- Le temps de séjour au dessus d'une température θ_s

- La loi du refroidissement, traduite par le temps de refroidissement $T_{R_{\theta_1\theta_2}}$ entre deux températures θ_1 et θ_2 ou par la vitesse de refroidissement V_R d'une température θ_R

3.3.2 Répartition thermique : « courbe température /distance ».

C'est la courbe qui nous donne la variation de la température maximale atteinte en chaque point en fonction de la distance x (fig.4). Grâce à la courbe $\theta_m = f(x)$, nous pouvons situer la limite extérieure de la zone où un phénomène, qui nécessite une température θ , est susceptible de se produire.

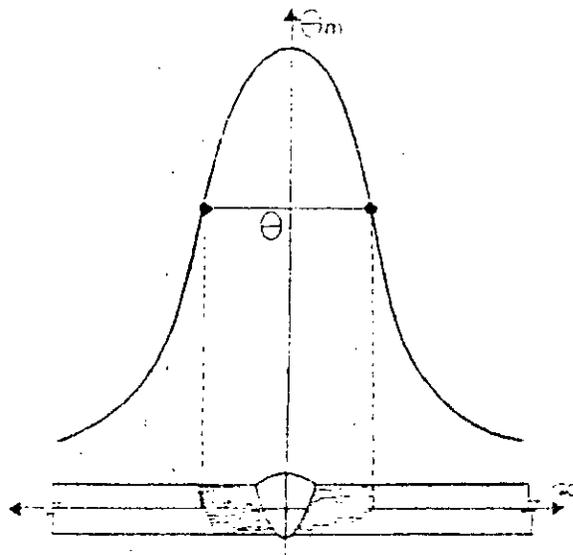


Fig.4- Courbe de la répartition thermique [8].

3.3.3 Facteurs d'influence sur le cycle et la répartition thermique

3.3.3.1 Métal de base.

-La nature du métal de base intervient par ses caractéristiques de conductibilité calorifique et de capacité calorifique. [6,8,10.]

- Géométrie du joint et épaisseur, on peut résumer l'effet de ce facteur par l'expression suivante :

Doubler l'épaisseur revient à doubler la vitesse de refroidissement (fig.5)

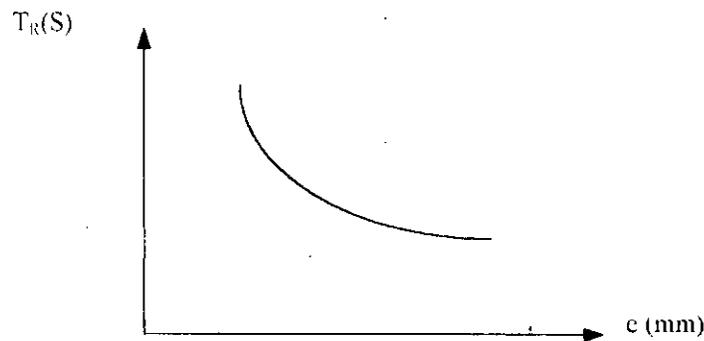


Fig.5- Temps de refroidissement en fonction de l'épaisseur dans une soudure.[8].

- Température initiale vis-à-vis du cycle et de la répartition thermique. En effet l'augmentation de celle-ci (ou le préchauffage), à pour conséquence (fig.6):

- Augmentation de la température maximale θ_m
- Augmentation du temps de séjour à haute température.
- Ralentissement du refroidissement.

Un autre effet, se lit sur les courbes $\theta_m f(x)$ où l'on voit que le préchauffage augmente l'étendue de la zone affectée thermiquement (Z.A.T) .[3.8]

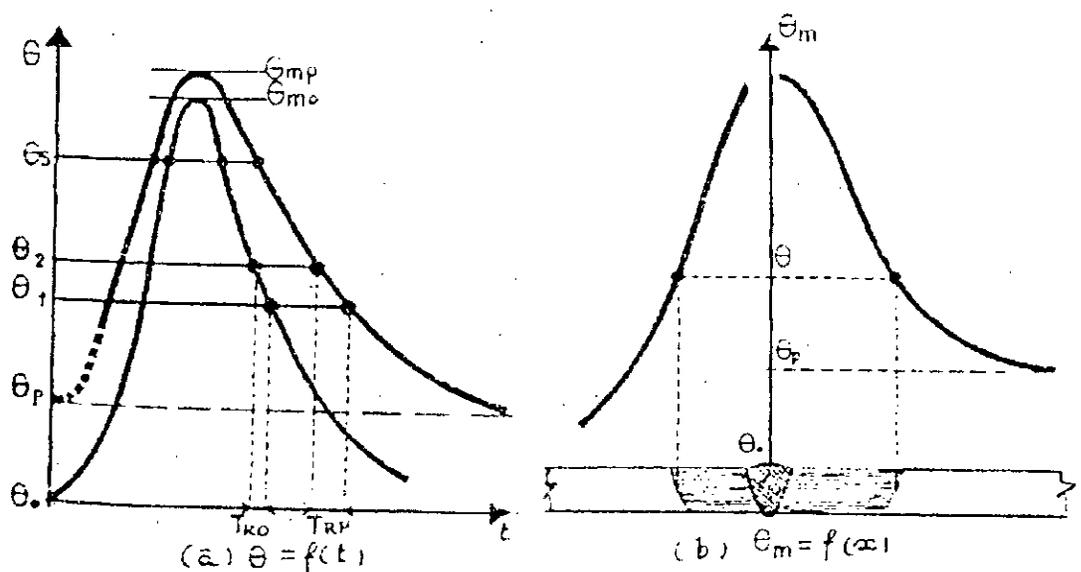


Fig.6-Influence de la température de préchauffage sur les cycles [8].

3.3.3.2 Conditions de soudage

Les conditions de soudage jouent un rôle important dans la configuration des cycles thermiques de soudage à savoir l'énergie mise en jeu (fig.7), et l'environnement.

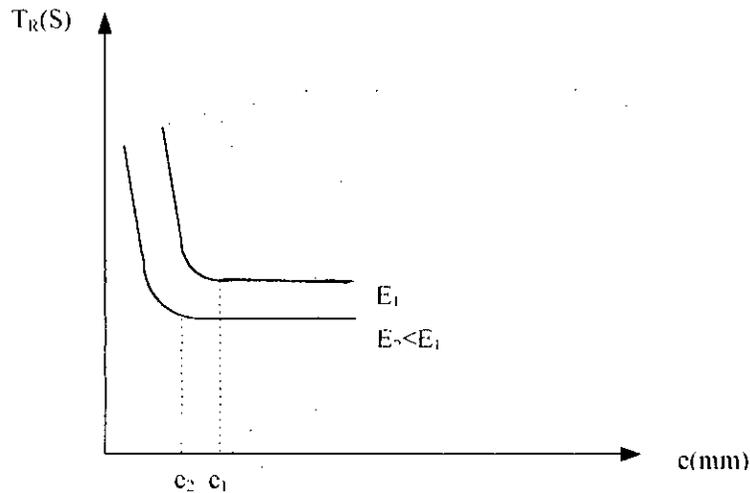


Fig.7 - Influence de l'énergie et de l'épaisseur sur le temps de refroidissement.[8].

3.3.3.3. Nombre de passes :

En réalité on effectue souvent des soudages en plusieurs passes, chaque passe, ainsi exécutée, superpose son cycle thermique à ceux des précédentes, provoquant une évolution des structures et de propriétés.[8]

Lorsque le temps qui s'écoule entre les passes successives n'est pas trop long, la température, au point A (fig.8) est encore supérieure, après la première passe, à la température de départ θ_0 , de même θ_2 est supérieur à θ_1 . D'où un effet de préchauffage qui entraîne une diminution de la vitesse de refroidissement au fur et à mesure que s'accumulent les passes.

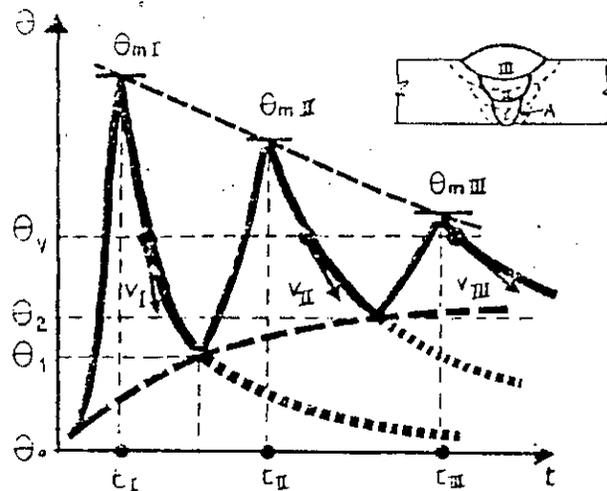


Fig. 8- Influence de nombre de passes sur le cycle thermique. [8]

3.3.4 Déformations et contraintes créées par le soudage.

Les pièces métallique soumises à un cycle thermique se dilatent ou se contractent suivant que leurs températures augmente ou diminue. L'empêchement de ces deux phénomènes, par bridage ou auto-bridage, conduit à l'apparition de déformation de retrait et de contraintes résiduelles.

3.4 Transformation en phase solide au cours du soudage.

Au cours de l'opération de soudage, les deux pièces de métal de base destinées à être assemblée sont portées à la température de fusion.

Lorsque l'arc a continué son cheminement, le métal liquide se refroidit, se solidifie et par conséquence des transformations de structure qui se produisent dans la zone affectée thermiquement.

3.5.1 Recristallisation après écrouissage.

Si un métal à l'état écroui est soumis à un chauffage on assiste au phénomène de *recristallisation* (fig.9)

A partir de la structure d'écrouissage (schéma.1) on voit apparaître, au voisinage de la température de recristallisation des germes (schéma.2) qui se développent en une structure équiaxe (schéma.3) cette structure, dite de recristallisation primaire, se stabilise avec un léger grossissement de grains jusqu'à la température θ_s , où commence la surchauffe.

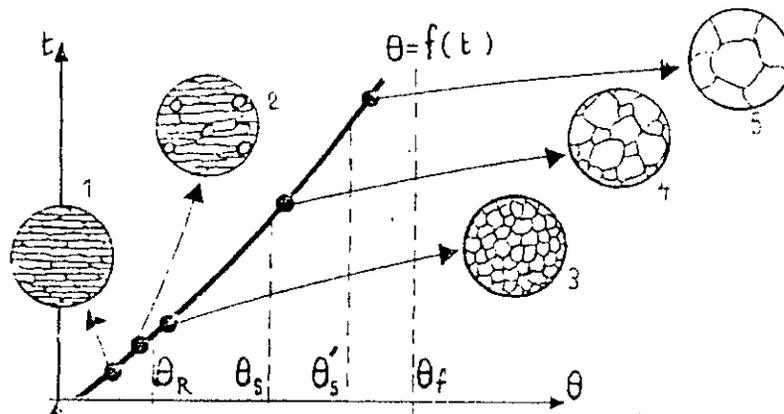


Fig.9 Phénomène de recristallisation après écrouissage. [CB]

En même temps que la recristallisation progresse, les propriétés mécaniques évoluent en sens inverse des effets de l'écrouissage. [8,1,2]

Le phénomène de recristallisation après écrouissage trouve son application directe dans le cas du soudage sur produit écroui : toute opération de soudage entraîne dans ce cas, un adoucissant du métal de base jusqu'au niveau de l'isotherme de la température de surchauffe, dans le cas de produits exempts de transformation allotropique (fig.10)

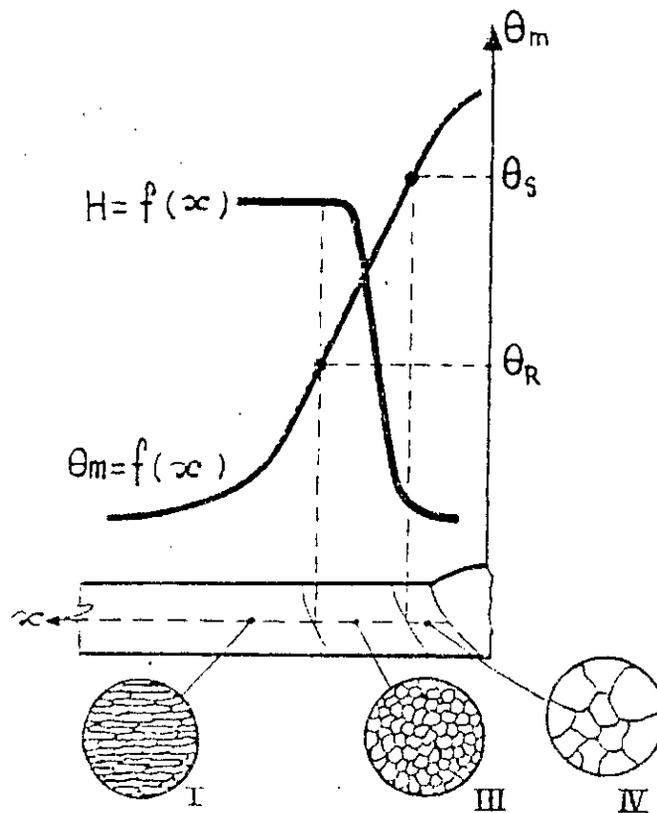


Fig.10 Adoucissement du métal de base dans le cas d'un produit exempt de transformation allotropique. [8]

Dans le cas des aciers, où il existe deux variétés allotropiques de fer, dont l'une dite austénite succède, dans l'échelle des températures croissantes, à la ferrite (α), à cause de l'intervention de la transformation (α/δ) qui a lieu à la température du point A_3 , c'est-à-dire peu au dessus de la température ($\theta_{R\alpha}$) de recristallisation de la ferrite, la zone adoucie par recristallisation de la ferrite est limitée entre $\theta_{R\alpha}$ et A_3 car à partir de cette dernière température, la réaction $\alpha \rightarrow \delta$ produit, l'effet d'une normalisation qui limite la largeur de la zone adoucie (fig. 11)

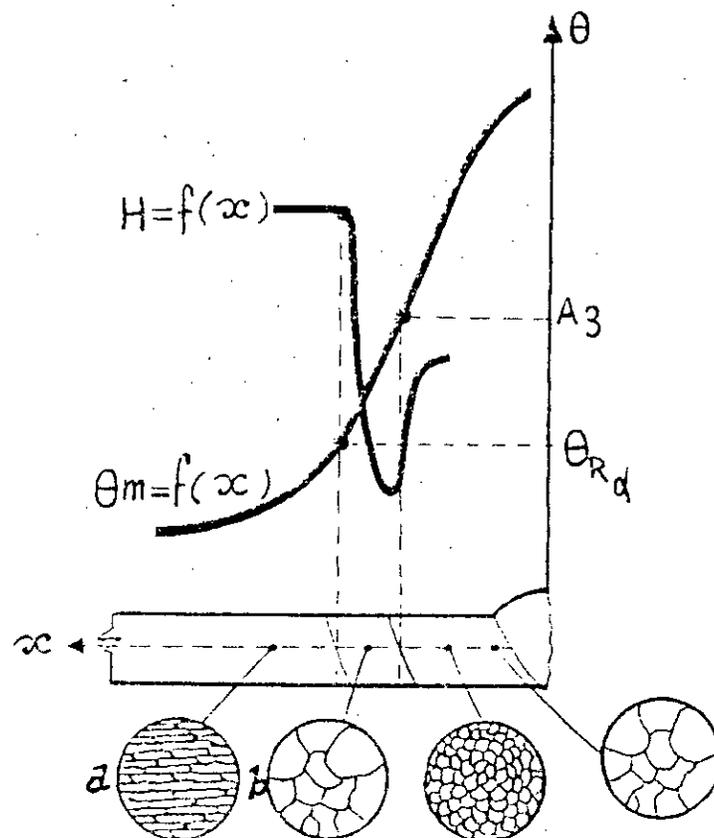


Fig. 11 Adoucissement du métal de base dans le cas d'un acier [8].

3.5.2 Surchauffe .

Le phénomène ultime avant fusion est celui que l'on appelle *surchauffe*. Dans la mesure où ce phénomène suit immédiatement la recristallisation après écrouissage il est appelé *recristallisation secondaire*.

Dans le soudage des aciers en générale, c'est l'austénite qui subit la surchauffe (voir fig.11)

L'étendue de la zone de surchauffe ainsi que la grosseur des grains, pour un acier donné dépend :

- Du gradient de température
- Du temps de séjour à une température supérieure à la température de surchauffe.

Les conséquences de la surchauffe en soudage sont d'ordre métallurgique et mécanique .

Au point de vue métallurgique les phénomènes susceptibles d'intervenir au refroidissement et qui résultent d'une diffusion vers les joints de grains sont freinés ou annulés par la surchauffe , ce qui conduit à la dispersion intergranulaire de la ferrite (α) , structure de Widmanstaetten . [5]

Au point de vue mécanique , pour l'acier , la fragilité est évidente en raison des joints de grains moins abondants , et qui donc , jouent un moindre rôle en tant qu'obstacles à la propagation des cassures . [8]

3.5.3 Courbes de transformation en refroidissement continu en conditions de soudage (T.R.C.-S.)

Lorsqu'on veut appliquer au soudage un diagramme T.R.C tracé dans des conditions classiques de traitement thermique , on rencontre des difficultés .En effet , les conditions particulières de traitement thermique , que subit l'acier lors du soudage , modifient d'une manière tangible le déroulement des transformations allotropiques .

Les particularités des conditions de soudage peuvent être résumées en quelques points importants qui doivent conditionner le tracé des diagrammes T.R.C-S :

- un mode perlitique
- un mode bainitique
- un mode martensitique.

3.4.3.1 Transformation perlitique en soudage.

Cette transformation, lorsqu'elle intervient, dépend en plus de la vitesse de refroidissement, de la grosseur initial du grain de l'austénite qui se transforme. Si ce grain est relativement fin on obtient une structure ferrito-perlitique (pour un acier hypo-eutectoïde), avec une perlite d'espace interlamellaire faible à cause de la vitesse de refroidissement relativement rapide (fig.12.a), mais si le grain de l'austénite qui se transforme est grossière (zone de surchauffe), le processus de diffusion se trouve gêné et la séparation de la ferrite proeutectoïde tend à se faire, non plus seulement aux joints des grains de l'austénite, mais aussi à l'intérieur des grains. La structure ainsi obtenue est plus ou moins apparentée à la structure de Widmanstaetten [5,12]. Les limites des grains d'austénite surchauffés qui donne naissance à cette structure sont soulignées par le réseau intergranulaire de ferrite pro-eutectoïde (fig. 12.b)

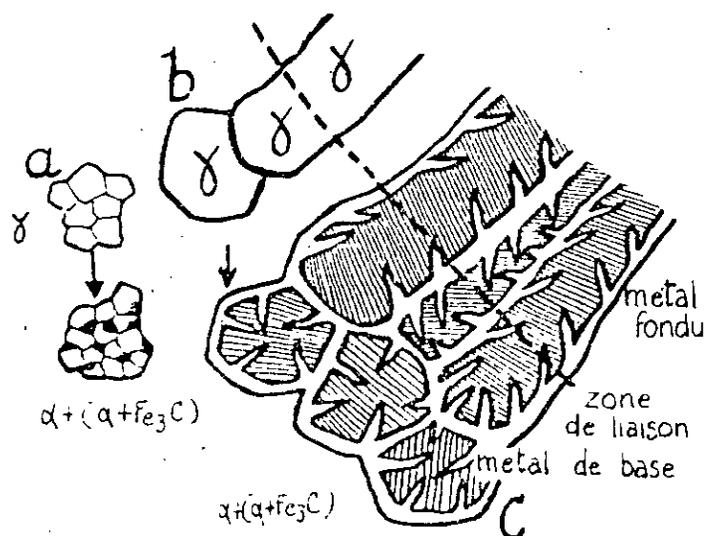


Fig 12 -Transformation perlitique en soudage [8].

Dans le cas où une soudure est réalisée en plusieurs passes, et c'est le cas le plus rencontré, le cycle thermique correspondant, provoque une réausténitisation dans tout ou partie du métal fondu déjà déposé et transformé, ainsi que dans la zone thermiquement affectée, et par suite une nouvelle transformation au refroidissement; ceci peut se produire une ou plusieurs fois en point donné, selon la disposition et l'importance des passes jusqu'à ce que la température A3 n'y soit plus atteinte chaque réausténitisation due à une passe entraîne une régénération structurale qui se traduit par un affinage des grains de ferrite et de perlite résultant de la passe antérieur [5,8] (fig. 13)

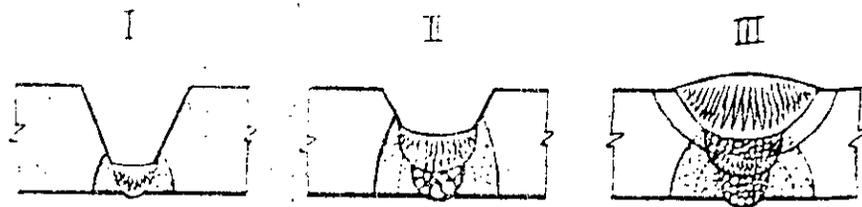


fig. 13 - Effet du soudage en plusieurs passes [8].

3.4.3.2 Transformation martensitique en soudage :

Les diagrammes TRC montrent que, pour un acier donné, la transformation martensitique, qui a lieu partiellement ou exclusivement à partir d'une loi de refroidissement c'est-à-dire au dessus d'un temps critique de refroidissement dans le cas du soudage, se produit au dessus d'une température M_s qui est la plus basse de toutes les températures de transformation qui peuvent affecter l'acier considéré.

En ce qui concerne la fragilité, souvent considérée comme systématiquement associée à la présence de la martensite, elle est aussi fonction de la teneur en carbone : les martensites à bas carbone ne sont pas fragiles, y compris celles qui résultent du cycle thermique de soudage, et on qualifie même de ductiles les martensites à moins de 0.1%C. [8]. Ainsi, en tous cas pour les teneurs en carbone des aciers utilisés en construction soudée, l'apparition de la martensite ne créerait pas de graves problèmes si ce constituant n'était pas fragilisable par l'hydrogène, (qui provient de l'enrobage, de graisse, d'huile, de peinture ou de rouille sur le métal inséré dans son réseau), une martensite non ou peu fragile en elle-même est fragilisée et peut, de ce fait concourir au mécanisme de la fissuration du métal de base.

3.5 Fissuration de la soudure :

Parmi les phénomènes qui limitent la soudabilité du métal ou de l'alliage, le plus important est contestablement la sensibilité à la fissuration du métal de base (ou de la ZAT) au voisinage de la soudure.

3.5.1 Fissuration de la zone affectée thermiquement (ZAT):

La fissuration de la ZAT intervient lorsque sont réunies les trois conditions de son apparition : trempe, hydrogène et contraintes [5,8], pour mettre en évidence l'intervention de la trempe, on a évalué une grandeur dénommée le *carbone équivalent* qui exprime la contribution à l'effet de trempabilité du carbone et les autres éléments d'addition. Diverses formules de carbone équivalent ont été proposées, la plus connue est la formule dite de I.I.S (Institut International de la soudure) : [8]

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

Ainsi, pour une valeur de C_{eq} supérieur de 0.4 la sensibilité à la fissuration augmente, d'où la nécessité de prendre des précautions particulières lors du soudage [5,8].

3.5.2 Remèdes à la fissuration :

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour atténuer et, dans beaucoup de cas, pour supprimer la fissuration des soudures : [5]

-Emploi des électrodes à basse teneur en hydrogène, comme certaines électrodes basiques

-Emploi des électrodes austénitiques, a cause de la solubilité plus grande de l'hydrogène par le métal fondu austénitique qui retient l'hydrogène susceptible de diffuser dans la sous-couche.

-Préchauffage des pièces.

3.5.2.1 Préchauffage:

Le préchauffage est incontestablement le remède le plus efficace pour éviter les fissurations de la ZAT. Il contribue à augmenter le temps de refroidissement [5,6,8]

Le préchauffage présente plusieurs avantages.

- Il atténue l'importance des transformations structurales en les déplaçant vers les structures d'équilibre, il réduit, aussi dans une certaine mesure, les contraintes localisées dues à ces transformations ;

- Il facilite la diffusion de l'hydrogène, cause initiale de la fissuration et également le dégagement des autres gaz, réduisant ou évitant la formation des soufflures.

2-PARTIE

EXPERIMENTALE .

CHAPITRE
III

•Méthodes expérimentales

MATERIAUX :

- L'acier étudié est un acier de construction de nuance E36-4 d'épaisseur de 50 mm , d'après le certificat de conformité du fournisseur cet acier a les caractéristiques suivantes :

- Limite de rupture $R_m \geq 55 \text{ kg f /mm}^2$
- Limite d'élasticité $R_e \geq 36 \text{ kg f /mm}^2$

Il faut noter que pour les aciers C-Mn , une valeurs maximale de 0.4 pour $C + \frac{Mn}{6}$ peut utilement renseigner sur la nécessité de précautions technologiques (tel que le préchauffage) si cette valeur est dépassée.

Le métal d'apport le plus convenable (qui permet un maximum d'homogénéité) pour cet acier .L'electrode est à enrobage basique fournie par la S.N.S. EL-EULMA.

Une analyse chimique des matériaux était faite par spectromètre de marque Philips au laboratoire de S.N.V.I. Fonderie.

L'analyse chimique a donné les résultats suivants :

Métal de base :

Tableau N° 1:

Elémet	C	Si	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Mn	Fe
%	0.20	0.30	0.10	0.04	0.066	0.4	0.3	1.55	97.2

Métal d'apport

Tableau N° 2 :

Elément	C	Mn	Si
%	0.1	1.2	0.4

Apartir de la formule précédente de l'IIIS (Chap .II), nous calculons la valeur du terme $C + \frac{Mn}{6}$, appelé : carbone équivalent réduit ($[c]_r$). On trouve:

$$[C]_r = C + Mn/6 \quad \text{--- (2)}$$

$$= 0.46$$

Alors, il faut faire, comme précaution, un préchauffage avant de souder.

2. DETERMINATION DE TEMPERATURE DU PRECHAUFFAGE :

Pour la détermination de la température de préchauffage , D.SEFERIAN [5] a proposé une formule simple:

$$T_p = 350 \sqrt{[C]_t - 0.25} \quad \text{--- (3)}$$

où : $[c]_t$ représente le carbone équivalent total .

Le carbone équivalent total $[C]_t$ est la somme des expressions du carbone chimique équivalent $[C]_c$ déduit de la composition chimique de l'acier et du carbone équivalent d'épaisseur $[C]_e$ qui dépend de la dimension de la tôle.

$$[C]_t = [C]_c + [C]_e \quad \text{--- (4)}$$

$$[C]_c = C + Mn/20 + Ni/15 + (Cr + Mo + V)/10 \quad \text{--- (5)}$$

$$[C]_e = 0.005 \times e \times [C]_c \quad \text{--- (6)}$$

e : étant l'épaisseur de la tôle en millimètres.

d'où :

$$|C|t = |C|e (1 + 0.005 e) \quad \text{--- (7)}$$

Dans notre cas:

$$|C|e = 0.324$$

$$|C|e = 0.081$$

$$|C|t = 0.405$$

d'où :

$$T_p = 140^\circ\text{C}$$

3. SOUDAGE DES PIÈCES :

3.1 Decoupe des pièces :

Nous avons prélevé deux éprouvettes de dimension 500x400x50 mm, puis nous avons découpé chaque éprouvette au milieu.

Il faut noter que les pièces préchauffées sont désignées par « P » et les non préchauffées par « NP ».

3.2 Usinage des chanfreins :

Les chanfreins en X, selon R.BAUS et W.CHAPEAU [6], sont utilisés dans le cas des pièces d'épaisseurs supérieur à 12 mm accessibles des deux cotés. De ce fait, on a choisi ce type de chanfrein dans notre travail. (Voi fig. ci-dessus). Et aussi parce que les chanfreins en X présentent par rapport aux chanfreins en V, l'avantage de réduire le métal déposé, il en résulte des réductions du coût et de retrait.

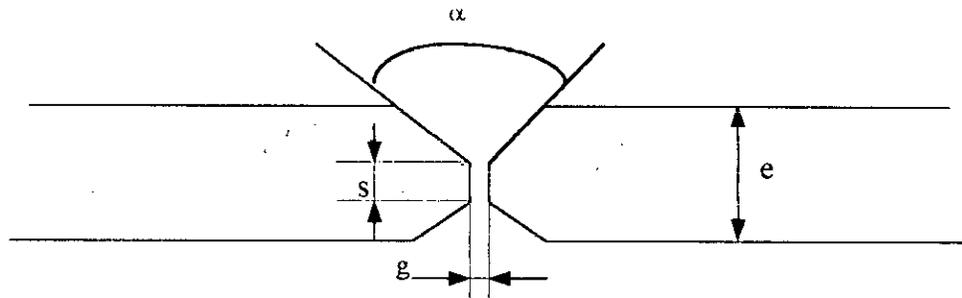


Fig.14 - chanfrein en X

α , s et g sont déterminés en fonction de la position des pièces à assembler, procédé de soudage et de l'épaisseur des pièces à souder. (Voir annexe ,Tableau 1).

Dans notre cas :

$$\alpha = 60^\circ$$

$$g = 1.5 \text{ mm}$$

$$s = 1.5 \text{ mm}$$

3.3 Opération de préchauffage :

Le préchauffage est exécuté dans la totalité de l'ensemble à souder. Dans un four de traitement thermique, nous avons porté l'ensemble à souder à la température $T_p = 140.^\circ\text{C}$ pendant 20 minutes.

3.4 Soudure à arc électrique :

Le procédé de soudage choisi est le soudage à arc électrique parce qu'il permet de souder pratiquement tout les types de joints, en toutes positions pour toutes épaisseurs ($e > 1\text{mm}$) avec un faible coût en équipement et, c'est le procédé le plus répandu industriellement.

Pour éviter toute contamination du bain fondu au cours de soudage, on a effectué un décapage mécanique sur bords des joints à souder.

Les paramètres de soudage sont montrés aux tableaux ci-dessous :

Paramètres de soudage sans prechauffage.

Tableau N° 3 :

Passé	Intensité (A)	Tensions (volts)	Temps de soudage	diamètre d'électrode (mm)
1	120	25	5'.44''	3.25
2	120	25	4'.59''	"
3	130	25	4'.35''	"
4	130	30	4'.47''	"
5	130	30	4'.29''	"
6	140	30	4'.53''	"
7	140	30	5'.39''	"
8	140	35	5'.48''	"
9	150	35	5'.40''	"
10	150	35	5'.57''	"
11	160	35	5'.13''	"
12	180	35	6'.04''	"
13	180	40	6'.10''	"
14	180	40	6'.15''	"

Paramètres de soudage avec prechauffage.

Tableau N° 4

Passé	Intensité (A)	Tension (Volt)	Temps de soudage	diamètre d'électrode (mm)
<i>1</i>	<i>120</i>	<i>25</i>	<i>5'.50''</i>	<i>3.25</i>
<i>2</i>	<i>120</i>	<i>25</i>	<i>5'.10''</i>	<i>''</i>
<i>3</i>	<i>130</i>	<i>25</i>	<i>5'.00''</i>	<i>''</i>
<i>4</i>	<i>130</i>	<i>30</i>	<i>4'.45''</i>	<i>''</i>
<i>5</i>	<i>130</i>	<i>30</i>	<i>5'.15''</i>	<i>''</i>
<i>6</i>	<i>140</i>	<i>30</i>	<i>4'.10''</i>	<i>''</i>
<i>7</i>	<i>140</i>	<i>30</i>	<i>4'.33''</i>	<i>''</i>
<i>8</i>	<i>140</i>	<i>35</i>	<i>4'.59''</i>	<i>''</i>
<i>9</i>	<i>150</i>	<i>35</i>	<i>5'.15''</i>	<i>''</i>
<i>10</i>	<i>150</i>	<i>35</i>	<i>5'.17''</i>	<i>''</i>
<i>11</i>	<i>160</i>	<i>35</i>	<i>4'.47''</i>	<i>''</i>
<i>12</i>	<i>180</i>	<i>35</i>	<i>5'.40''</i>	<i>''</i>
<i>13</i>	<i>180</i>	<i>40</i>	<i>5'.58''</i>	<i>''</i>
<i>14</i>	<i>180</i>	<i>40</i>	<i>6'.10''</i>	<i>''</i>

3 -5 Calcul de la vitesse de soudage :

A l'aide d'un chronomètre, nous avons prélevé le temps écoulé pour le soudage de chaque passé pour les différentes éprouvettes [8]

En divisant la longueur de cordon par le temps calculé, on obtient la vitesse de soudage V_S :

$$V_{si} = \frac{Li}{Tsi} \quad \text{--- (8)}$$

Où : T_{si} : Temps de soudage de la passe i

V_{si} : Vitesse // // // i

V_{si} est exprimée en cm/mm

La vitesse moyenne de soudage est calculée à partir de la formule suivante :

$$V_{moy} = \frac{i \sum Li}{\sum Tsi} \quad \text{--- (9)}$$

A partir des tableaux précédents, nous avons calculé la vitesse moyenne de soudage de la pièce non préchauffée et de celle préchauffée .

On a trouvé :

$$V_{p_{moy}} = 9.71 \text{ cm/mm}$$

$$V_{np_{moy}} = 9.29 \text{ cm/mm}$$

Tel que : $V_{p_{moy}}$: Vitesse moyenne de soudage avec préchauffage.

$V_{np_{moy}}$: Vitesse moyenne de soudage sans préchauffage.

3.6 - Calcul de l'énergie de soudage :

a/ *Energie nominale* : « E_n »

C'est l'énergie fournie au niveau de l'arc pour exécuter une soudure. Elle est calculée à partir de la formule suivante [4]

$$E_n = \frac{U \times I \times 60}{V_m} \quad \text{--- (10)}$$

E_n : S'exprime en *Joules/cm*

Avec :

U : La tension du soudage, s'exprime en Volts.

I : L'intensité de courant de soudage (Ampères)

V_m : La vitesse moyenne de soudage (cm/mm).

b/ *Energie dissipée dans le joint soudé* : « E_d »

L'énergie fournie au niveau de l'arc n'est pas entièrement transmise aux pièces à souder en raison des pertes par rayonnement et par convection de la colonne d'arc. [4]

Pour cette raison et pour tenir compte du rendement énergétique de l'arc, l'énergie dissipé a été défini :

$$E_d = E_n \times \eta \quad \text{--- (11)}$$

η : Le rendement énergétique de l'arc, dépend du procédé de soudage et de la nature du métal à souder (voir annexe Tableau 2)

c/ *Energie équivalente* : « E_{eq} »

Elle est définie par la formule :

$$\begin{aligned} E_{eq} &= E_n \times K \times \eta \\ &= E_d \times K \end{aligned} \quad \text{--- (12)}$$

Où : K est un coefficient de correction qui tient compte de la géométrie du joint à souder. Il varie en fonction de l'angle et du type de chanfrein (voir annexe Tableau 3).

Les énergies utilisées au cours du soudage sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau N°5

ENERGIE	EPROUVETTE P	EPROUVETTE NP
$E_n(J/cm)$	25428.85	26125.97
$E_d(J/cm)$	19071.64	19594.47
$E_{eq}(J/cm)$	14303.73	14695.85

4- EXAMENS METALLOGRAPHIQUES :

Cet investigation nécessite un certain nombre d'essais , il s'agit de :

- Macrographie
- Micrographie
- Mesure de la taille moyenne des grains

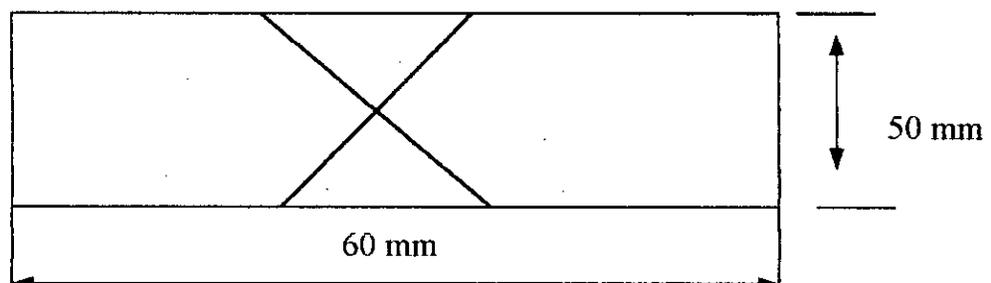
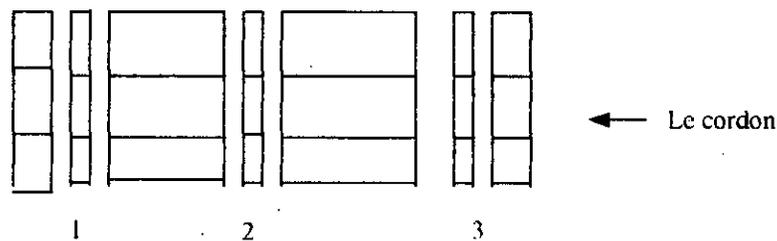
4.1 - Macrographie :

L'examen macrographique utilise l'œil nu ou une loupe. Les observations se font sur des pièces polies attaquées.

A/ Prélèvement des échantillons :

Des deux éprouvettes soudées, nous avons prélevé à l'aide d'une coupe transversale au cordon de soudure, trois échantillon de dimension 60x50x8mm, deux étant prélevés à 100 mm des bords et un au milieu (voir fig. ci dessous).

Le prélèvement est réalisé à froid à l'aide d'une scie électrique



B/ Polissage :

Sur chaque échantillon, nous avons effectuée un polissage sur la surface à examiner

Pour cette opération nous avons utilisé les papiers abrasifs suivant : 80-100-180-240

C/ Attaque chimique :

Pour mettre en évidence les différentes zones constitutives de la soudure, nous avons préparé une solution chimique adéquate. Il s'agit de 15ml de (HNO₃) à 100 ml d'eau. La durée de l'attaque est de 15 mn, suivie d'une prise de photo.

4.2 Micrographie :*A/ Découpe des pièces :*

Les mêmes échantillons de la macrographie sont utilisés à l'étude micrographique.

B/ Polissage

Ces échantillons ont subi un polissage par des papiers de granulométrie plus fine à savoir :

- 320- 400- 600- 800- 1000- 1200. A la fin de cette opération de polissage un passage de chaque surface ainsi polie, à l'alumine (de granulométrie allant de 1 mm à 0.05 mm) nous a permis de finir cette opération.

C/ Attaque chimique :

Après le polissage, les échantillons sont attaqués par le nital (A 5ml d'acide nitrique avec 100 ml d'alcool éthylique) qui, après une durée de 30s, nous a permis de mettre en évidence les différents constituants de l'échantillon. Alors nous avons pris des photos dans des différents points allant de la ZF jusqu'à MB non affecté.

4.3 Taille moyenne des grains :

Pour analyser la taille, nous avons choisi la méthode de comptage (méthode de JEFFRIES) [7].

Cette méthode consiste à appliquer sur la photographie (microscopique) de la structure analysée un transparent sur lequel on a tracé un cercle d'aire égale à 5000 mm² (diamètre de 79,78 mm)

Le grossissement (g) de la photographie doit être tel que le nombre de grains à l'intérieur de la cercle doit être supérieur à 50.

La superficie de l'échantillon correspondante à l'air du cercle (S) est :

$$S_r = S/G \text{ (mm}^2\text{)} \quad \text{--- (13)}$$

Soit n_1 le nombre de grain se trouvant complètement à l'intérieur de circonférence et soit n_2 nombre de grains coupés par la circonférence (arrondi au nombre supérieur si le nombre n_2 est impair). Le nombre total de grains dans la circonférence est :

$$n_g = n_1 + n_2/2$$

Le nombre de grains par unité d'aire est :

$$m = \frac{2.8^2}{100} \cdot n_g \text{ (mm}^{-2}\text{)} \quad \text{--- (14)}$$

La taille moyenne des grains est calculée par la formule suivante :

$$M_C = \frac{1000}{\sqrt{m}} \text{ (mm)} \quad \text{--- (15)}$$

Dans notre cas, on a analysé 14 photos microscopiques, sept photographies de l'échantillon préchauffée et sept pour la non préchauffée.

Ces photos sont prise, en balayant la ZAT avec un pas de 0.5 mm a partir de la zone de liaison.

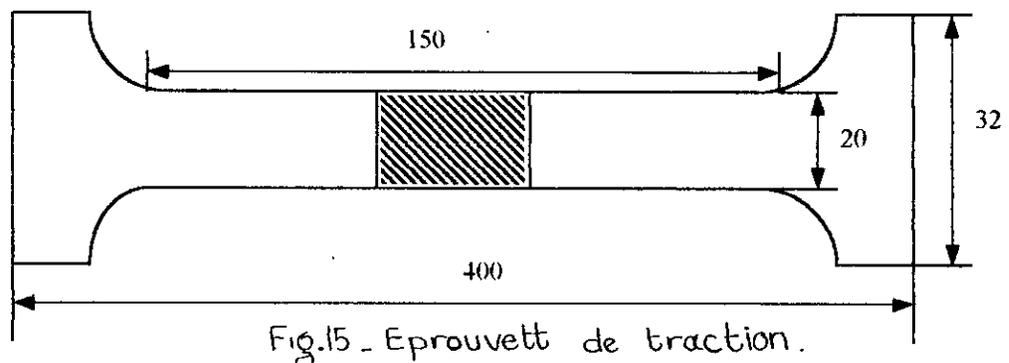
5. LES ESSAIS MECANIQUES :

5.1 Essai de traction :

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques .[7]

Pour l'essai de traction d'un assemblage soudé, on s'intéresse à la résistance mécanique de joint soudé. Pour cela on a découpé à froid dans la pièce d'essai une éprouvette de traction transversale du type représenté sur la figure ci-dessous.

(selon la norme NF A89.200)



5.2 Essai de résilience :

L'essai de résilience consiste à rompre d'une seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée et reposant sur deux apuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience.

$$\text{Re silience} = \frac{\text{Energie absorbé epar la rupture } W(\text{Joule})}{\text{Section au droit de l' entaille } (\text{cm}^2)}$$

Pour une étude plus complète de la ZAT, l'essai de résilience revêt un grand intérêt dont le but est d'évaluer sa fragilité (dans le cas de préchauffage et non préchauffage).

Les éprouvettes de résilience sont prélevées transversalement au joint, avec entaille en V verticale au centre de la zone affectée thermiquement, selon la norme NF A89-202 (voir figure)

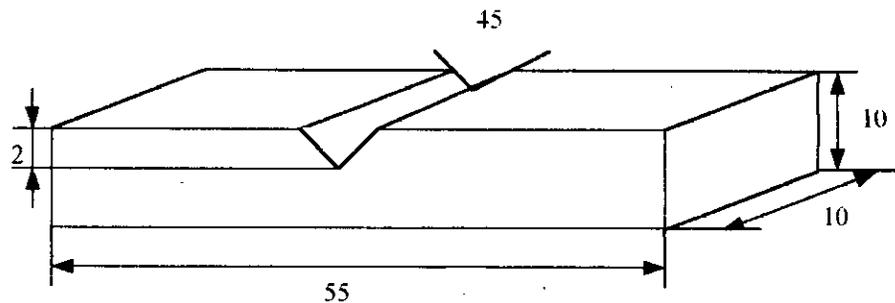


Fig.16. Eprouvette de résilience.

5.3 Essais de microdureté :

En générale, l'essai de microdureté consiste à enfoncer un pénétrateur de type VIKERS dans le métal. La mesure de la dimension de l'empreinte est réalisée à l'aide d'un microscope (x100 ou x 400) [7]

A/ Profil de dureté :

Le profil de dureté, nous permet de savoir la variation de la dureté (microdureté) dans la zone fondue, la zone affecté thermiquement et le métal de base. Pour cela, on a effectué un balayage le long de l'axe X avec une charge de 1 Kg, Voir fig.17 :

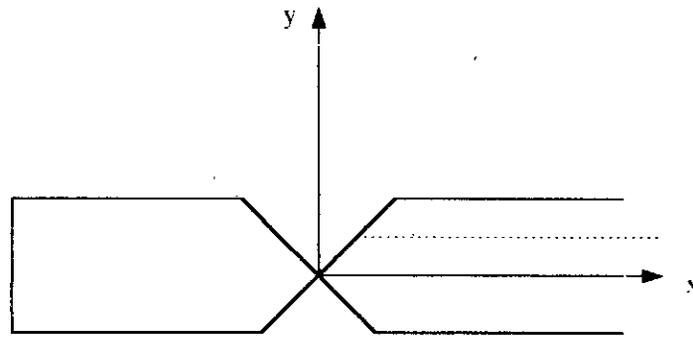


Fig.17- Profil de dureté

B/ Dureté sous cordon :

Nous avons mesuré la dureté sous cordon pour mettre la différence de fragilité entre les deux ZAT (ZAT préchauffée et ZAT non préchauffée)(fig. 18).

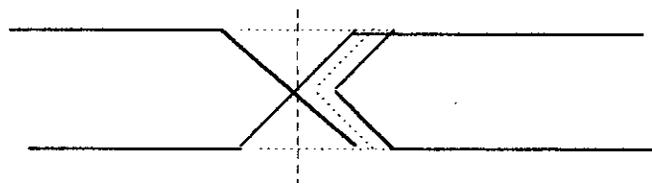


Fig.18- Dureté sous cordon

On prend le moyen des trois valeurs les plus élevées obtenues, parmi les cinq mesures, effectués sous une charge 49.2 N selon la norme NF A81-460 . [4]

CHAPITRE
IV

2-RESULTATS ET
INTERPRETATIONS

1 - EXAMEN METALLOGRAPHIQUE :

1-1 MACROGRAPHIE

A l'aide d'un appareil photo, on prend des photos pour chaque échantillon (préchauffé (p) et non préchauffé (NP)) . Voir fig. 19

A partir des photos de la fig. 19 nous remarquons une différence entre les deux zones affectées thermiquement.

On constate que l'étendue de la ZAT augmente avec le préchauffage. En effet le préchauffage peut élargir la zone entourant le cordon de soudure susceptible de subir une transformation de phase.

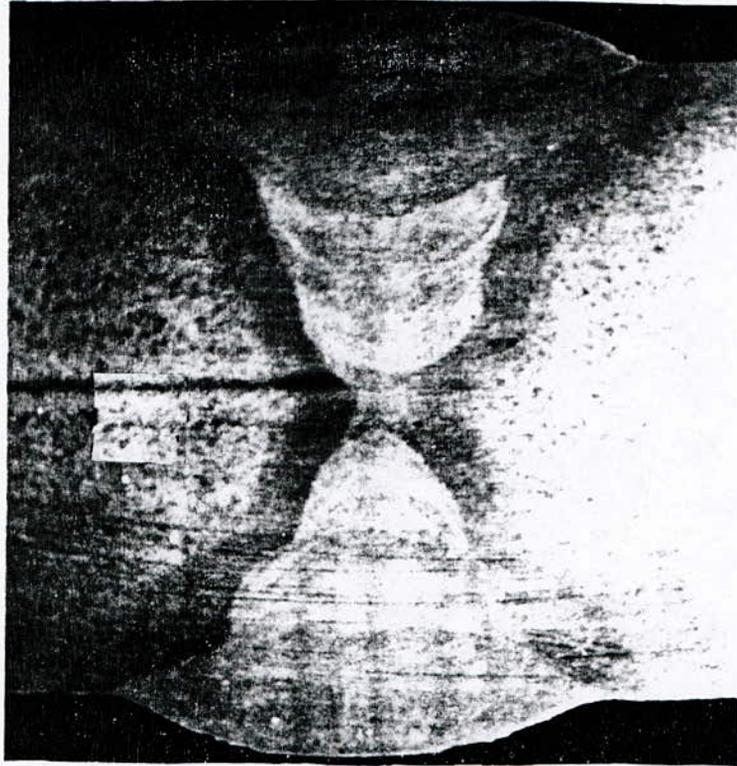


Fig 9a-Macrographie de l'échantillon non préchauffé

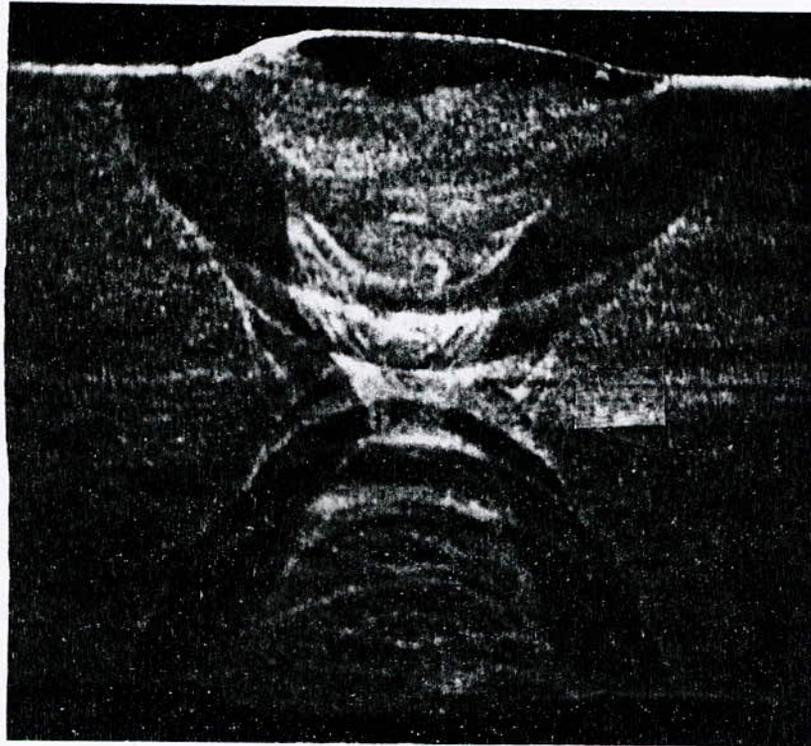


Fig 9b-Macrographie de l'échantillon préchauffé

Fig 9-Macrographie

1-2 MICROGRAPHIE

Les photos des microstructures ont été prise à l'aide d'un microscope optique équipé d'un appareil photo.

La photo de la fig. 20 montre la microstructure du métal de base. C'est une microstructure des tôles laminés : ferrite + perlite en bandes.

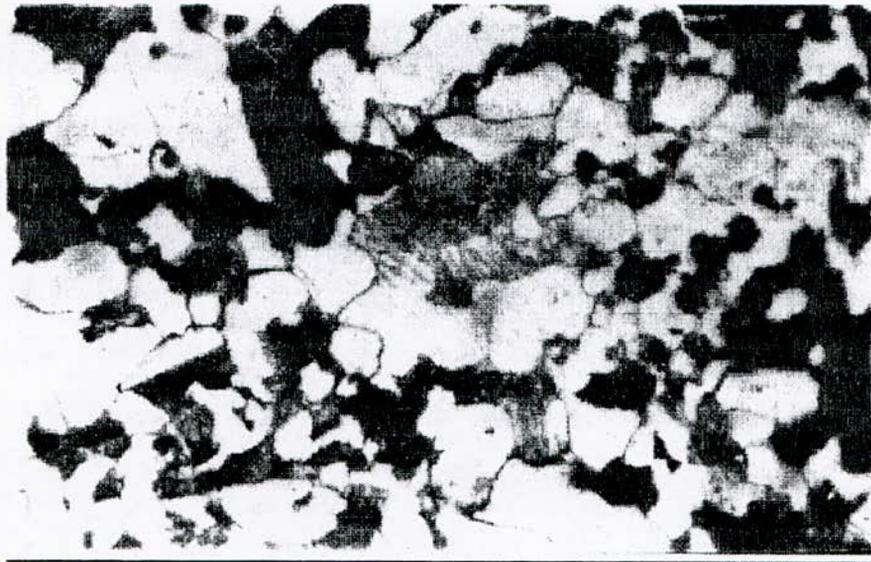


Fig 20 $\times 1000$ microstructure du métal de base (structure ferrite+perlite en bandes)

-Les photos de la fig. 21 montrent la microstructure de la ZAT à 0.5 mm de l'extrémité de la zone fondue, après la dernière passe. C'est une microstructure de « Widmanstaetten », où on peut remarquer l'existence de la ferrite dans les joints de grain de perlite est au sein de celui-ci sous forme des aiguilles.

On constate que le préchauffage atténué cette microstructure.

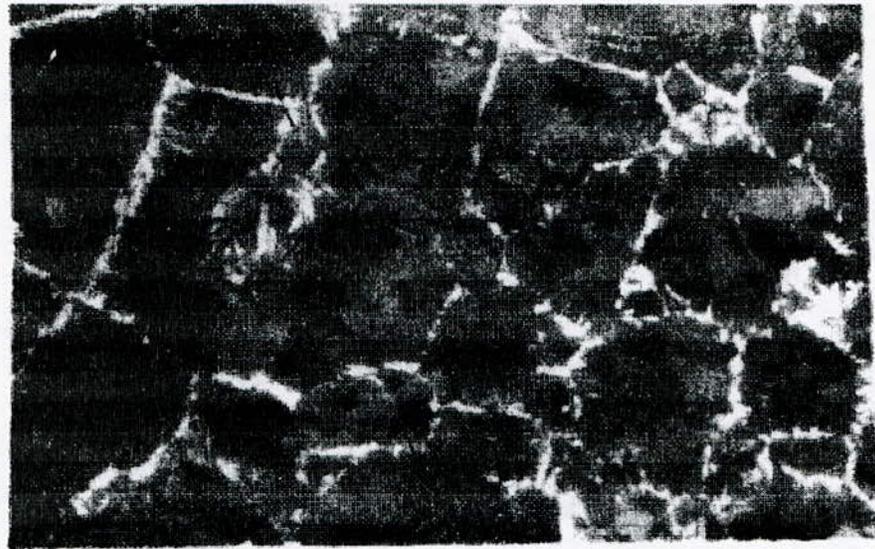


Fig 21.a -G \times 1000 microstructure de la zone surchauffée de la dernière passe
(Structure Widmanstaetten) dans la pièce non préchauffée

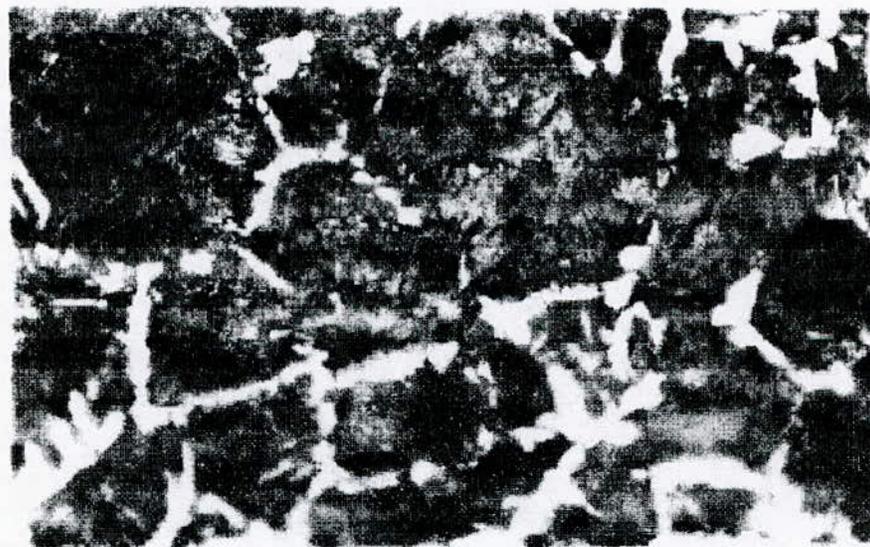


Fig 21.b -G \times 1000 microstructure de la zone surchauffée de la dernière passe
(Structure Widmanstaetten) dans la pièce préchauffée

Fig 21- La microstructure de la ZAT à 0.5 mm de l'extrémité de la zone fondue,

Les photos de la fig.22 montrent les microstructures de la ZAT de l'échantillon non préchauffé , présent a une distance de 3 et 3,5 mm de la ZL.

-Les photos de la fig.23 montrent les microstructures de la ZAT de l'échantillon préchauffé présent à la même distance (3 et 3.5 mm) à partir de ces deux figures on peut constater que dans le cas de l'échantillon préchauffé l'affinement de grains est total.

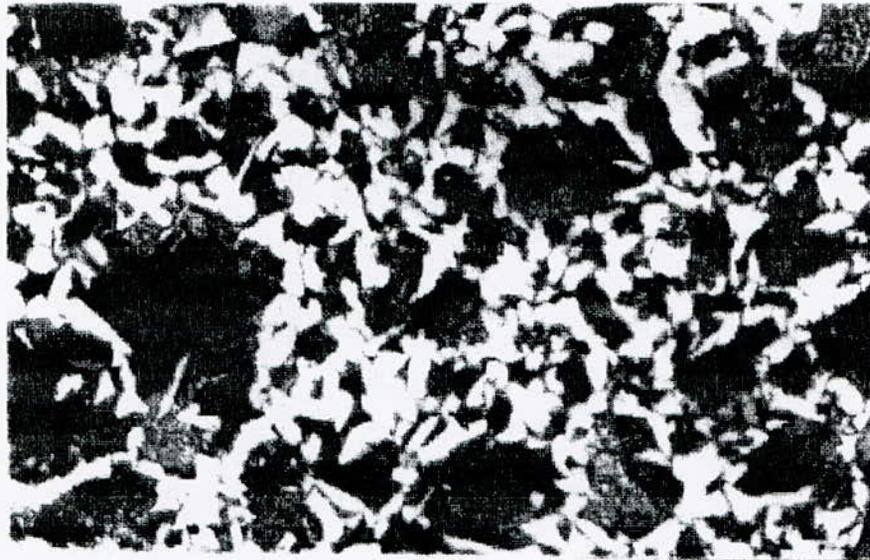


Fig22.a-G \times 1000 microstructure de la ZAT non préchauffé à distance 3 mm de la ZL .

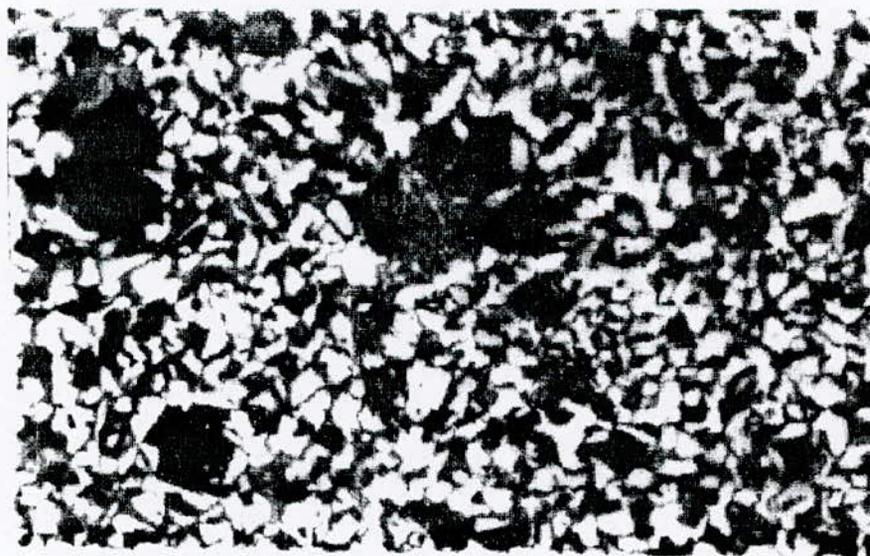


Fig22.b-G \times 1000 microstructure de la ZAT non préchauffé à distance 3.5 mm de la ZL .

Fig22- microstructure de la ZAT non préchauffé à distance 3 et 3.5 mm de la ZL

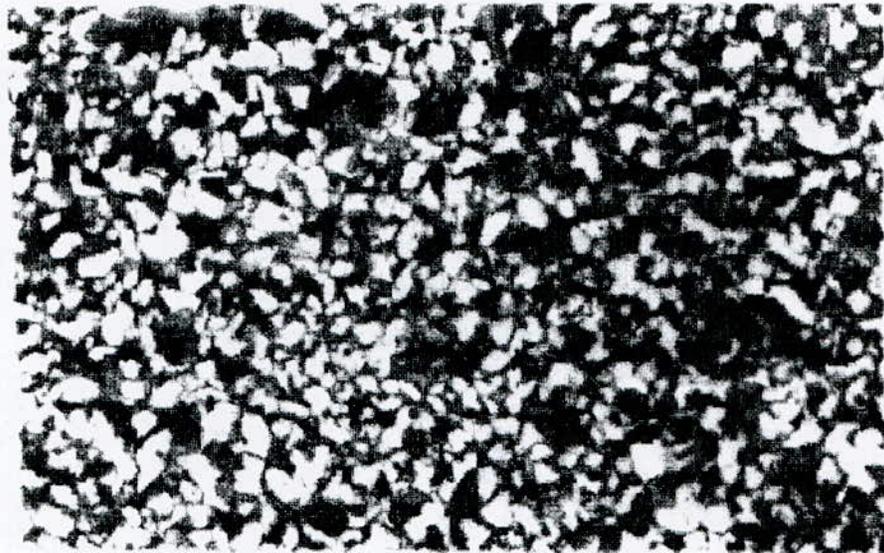


Fig23.a-G \approx 1000 microstructure de la ZAT préchauffée à distance 3 mm de la ZL .

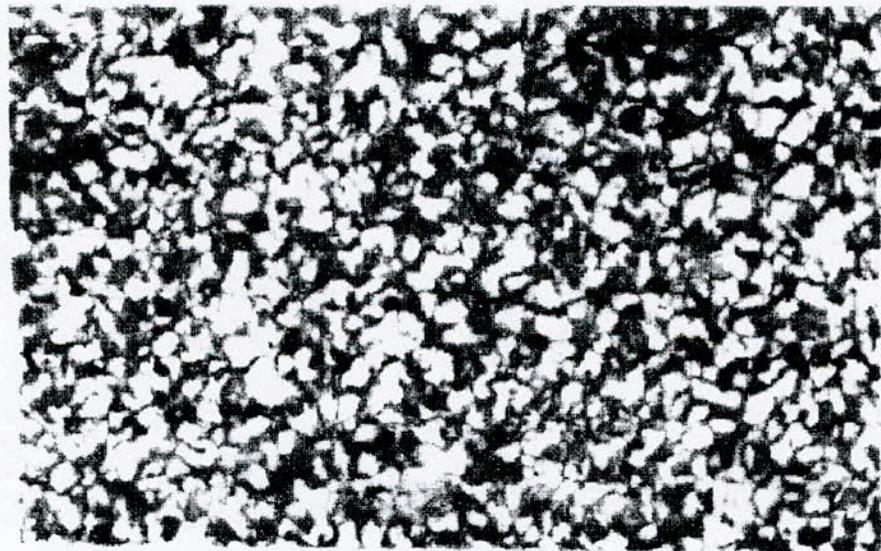


Fig23.b-G \approx 1000 microstructure de la ZAT préchauffée à distance 3.5 mm de la ZL

Fig23.- microstructure de la ZAT préchauffée à distance 3 et 3.5 mm de la ZL

-La figure 24 montre que dans zone située entre l'isotherme A_3 et l'isotherme A_1 (zone d'auténisation partielle) il y a un globulisation de la perlite sans modification de la ferrite.

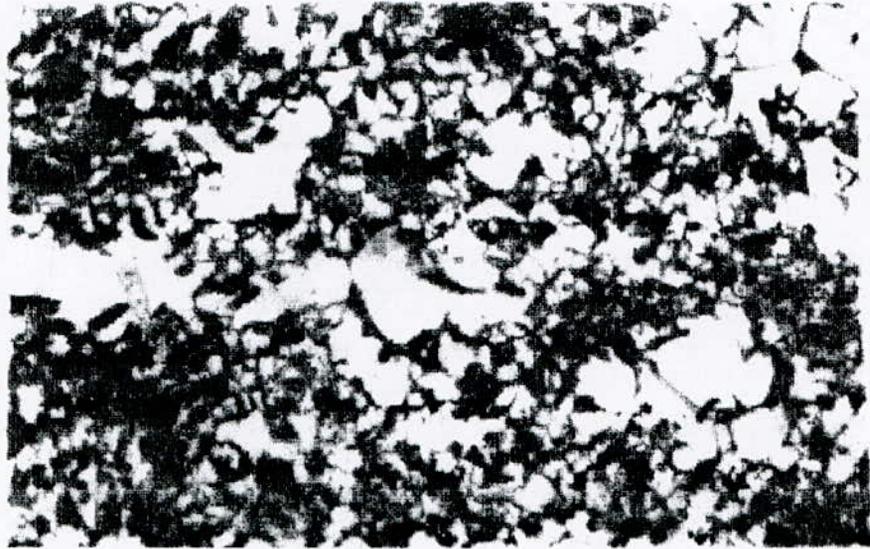


Fig.24- $G=1000$ globulisation de la perlite dans la zone d'auténisation partielle

- La photo de la fig.25a été prise en descendant de 4 mm par rapport à la dernière passe. On constate la disparition de la structure Widmanstaetten . On peut conclure : que cette dernière structure est localisée seulement dans la zone de la dernière passe, et que l'effet des cycles thermique des passes ultérieures normalise la microstructure.

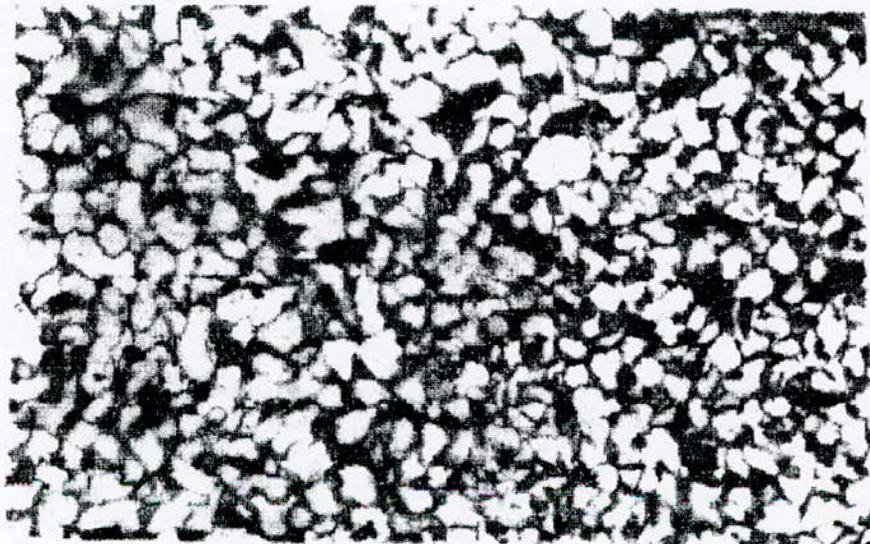


Fig. 25- $G = 1000$ L'effet des cycles thermique des passes ultérieures (normalisation de la structure)

1-3 PROFIL DE LA TAILLE MOYENNE DES GRAINS DE LA ZAT :

Les résultats sont montrés dans le tableau 6 :

Distance (mm)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4
Eprouvette non préchauffée (µm)	5.0	5.2	5.6	6.2	5.3	5.5	5.9	6.0	6.1
Eprouvette préchauffée (µm)	5.2	5.3	5.5	5.4	6.4	5.6	5.6	5.5	5.8

La figure 26 montre les profils de la taille moyenne des grains dans la ZAT.

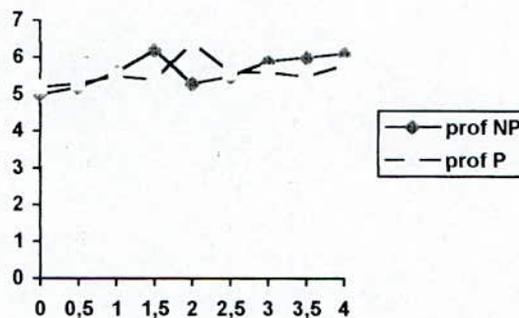


Fig26- Profil de la taille moyenne des grains dans la ZAT

A partir des courbes de la fig.26 on constate qu'au voisinage de la Z.L. il y a un affinement de grains sous l'effet des passes antérieures, dans le cas de la Z.A.T. non préchauffée, cet effet influe sur une zone plus large dans le cas de la Z.A.T. préchauffée à cause de la diminution du gradient thermique.

A distance égale à 1.5 mm et de 2 mm de la Z.L. pour les Z.A.T. non préchauffées et préchauffée respectivement, on constate une augmentation de la taille moyenne de grains due au phénomène de surchauffe. En avançant vers le métal de base, on constate que les grains redevient plus fines (zone recuite).

2 - ESSAIS MECANIQUES :**2.1 ESSAI DE TRACTION :**

L'ensemble des résultats obtenus est résumé dans le tableau 7 :

	Section (mm ²)	Limite d'élasticité E _{0,2} (kgf/mm ²)	La valeur moyenne	Résistance à la rupture (kgf/mm ²)	La valeur moyenne
Eprouvette non préchauffée	496.1	39.74	38.30	57.37	57.78
	498.0	36.86		58.20	
Eprouvette préchauffée	432.0	42.50	42.05	55.10	55.69
	500.0	41.61		56.29	

On a constaté que toutes les ruptures sont produites par glissement après striction en dehors de la ZAT. Dans le cas de préchauffage, la rupture s'est produite à 29 mm de l'axe du cordon, cette rupture est située à 25 mm de cet axe pour la non préchauffée.

La valeur de la résistance à la rupture est de l'ordre de 56 (kgf/mm²) pour les deux cas (préchauffage et non préchauffage), qui correspond à peu près la valeur théorique de l'acier E 36 -4

2.2 ESSAI DE RESILIENCE SUR LA ZAT :

Les résultats de cet essai sont montrés dans le tableau 8 :

	Section (cm ²)	Résilience (kgf/cm)	La valeur moyenne
Eprouvettes non préchauffées	0.80	24.33	23.46
	0.79	22.59	
Eprouvettes préchauffées	0.78	27.50	27.12
	0.77	26.75	

D'après le tableau 8 , on constate que la résilience augmente légèrement avec le préchauffage, elle passe de 23 à 27 kgf/cm

Cette augmentation est expliquée par la formation de structures moins fragiles dans la ZAT préchauffée.

2.3 ESSAI DE LA MICRODURETE VICKERS :

On a utilisé un microduromètre à affichage digital, des résultats sont illustrés dans les tableaux 9 et 10.

Tableau 9 : [Résultats de la dureté sous le cordon]

	Dureté Vickers
Eprouvette non préchauffée	212
Eprouvette préchauffée	210

Tableau10: Resultats de profil de dureté suivant l'axe X

Distance de la zone de liaison (mm)		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eprouvette non préchauffée	213	221	209	210	199	197	198	202	196	197
Eprouvette préchauffée	209	215	216	205	202	203	197	195	198	195

La figure 9 illustre les resultats du tableau10.

On constate que les valeurs de la microdureté de la ZAT préchauffée sont légèrement inférieure aux celles de la microdureté de la ZAT non préchauffée .Ceci est due au fait que le préchauffage diminue la vitesse de refroidissement , d'où ,on evite la formation des structure dures.

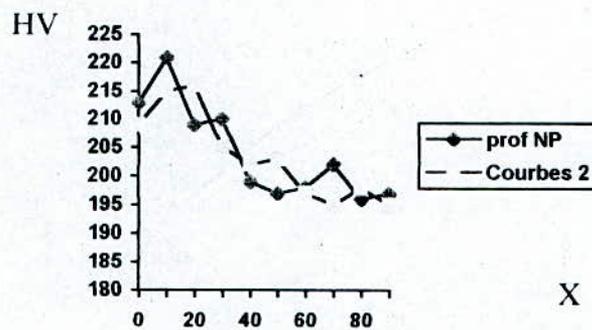


Fig .9- Profil de dureté dans la ZAT

CHAPITRE
V

2-CONCLUSION

CONCLUSION :

Au terme de la présente étude , nous pouvons dire que la qualité d'un joint soudé ne peut être évaluée en dehors de la qualité de la ZAT les caractéristiques de cette dernière dépendant des conditions de soudage.

Le préchauffage permet à la Z.A.T. d'avoir une étendue plus large, une taille moyenne de grains réduite et une microstructure optimale, et par conséquent une amélioration des propriétés mécaniques de cette zone à savoir :

- la résistance à la rupture
- la résilience
- la dureté.

Le préchauffage tel qu'il est recommandé, exerce une influence notable sur la diffusion de l'hydrogène et des contraintes thermiques

La conclusion de cette étude nous a permis d'affirmer qu'un traitement thermique de préchauffage à 140 C° de l'acier E36-4, est nécessaire avant le soudage.

ANNEXE



ANNEXE

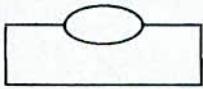
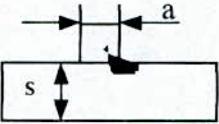
Tableau : 1

Procédés de soudage	Positions de soudage	e (mm)	α (deg.)	s (mm)	g (mm)
E.E. G.M. G.F.	Soudage en toutes positions Soudage Vertical	$e > 12$ $e > 12$	60 60	$0 \leq s \leq 1.5$ $0 \leq s \leq 1.5$	$1 \leq g \leq 4$ $2 \leq g \leq 5$
M.F.S.	Soudage à plat	$e > 15$	$60 \leq \alpha \leq 90$	6	0

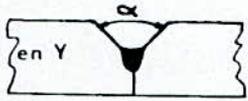
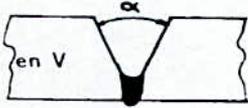
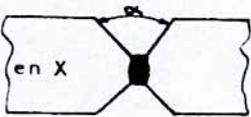
Tableau : 1

Procédés de soudage	Métaux	Rendement de l'arc (η)
Automatique sous flux solide	Aciers	0.90 à 0.99
A l'arc, avec électrodes enrobées	Aciers	0.70 à 0.85
M.I.G.	Acier doux Aluminium	0.65 à 0.85 0.70 à 0.85
T.I.G Courant alternatif Courant continu Courant alternatif	Acier doux Acier doux Aluminium	0.22 à 0.48 0.36 à 0.46 0.21 à 0.43

Tableau : 3

	Sur plats $K=1$					
	$\frac{a}{s}$	0	0.25	0.5	0.75	1
	K	1	0.97	0.89	0.78	0.67

Avec chanfrein

FORME	α	60°	75°	90°	105°
	K	0.60	0.63	0.67	0.70
	K	1.50	1.72	2	2.38
	K	0.75	0.85	1	1.20

BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

[1] **I LAKHTINE** , « Métallographie et traitement thermique des métaux, quatrième édition, Mir, MOSCOU 1978.

[2] **C. CHAUSSIN , G.HILLY**

Métallurgie

1- Alliages métalliques

10^e cd; Lunod 1976

[3] **H. HOFMAN , J. MATHONET , H. MATY et R. SALKIN**

« Cours de Métallurgie de soudage »

Etude de l'Institut Belge de la Soudure

[4] **R. VARISILLZA** , « Soudage », éléments de conception et de réalisation

Ed. Dunod 1982

[5] **D.SEFERIAN**, « Métallurgie de la soudure »

Ed. Funot 1965

[6] **R.BAUS , W.CHAPEAU** « Application du soudage aux constructions »

Ed. Eyrolles 1979

[7] **J. BARRALIS** « Précis de la Métallurgie du soudage ».

5^{ème} ed. NATHAN 1990

[8] **H. GRANJON** , « Base métallurgique du soudage »,

Ed. Eyrolles 1989

[9] **S. BENISSAAD** « Le soudage TEC 340 »

Université de Constantine

Institut de Génie Mécanique

Ed. OPU 1995

[10] **A.VALLINI** « Joints soudés »

Contrôle métallurgie, résistance

Ed. Dunot 1968

[11] **Technique d'ingénieur-Soudage des aciers**

Multipasse {M31} M715

[12] **J.BENARD , A.MICHEL, J. PHILIBERT et J. TALBOT** , « Métallurgie

Générale »

2^{ème} éd. Masson 1984