

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*INFLUENCE DE L'ENERGIE DE SOUDAGE
ET DE L'EPAISSEUR DES TOLES SUR LES
CARACTERISTIQUES DE LA ZONE
AFFECTEE THERMIQUEMENT (Z.A.T)
DANS UNE SOUDURE*

Proposé et Dirigé par :

M^{me} K.REHOUMA

Mr. A.KASSER

Etudié par :

Mr. ADDAD ABDEL AZIZ

Mr. SEKIOU NACER

PROMOTION 97

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*INFLUENCE DE L'ENERGIE DE SOUDAGE
ET DE L'EPAISSEUR DES TOLES SUR LES
CARACTERISTIQUES DE LA ZONE
AFFECTEE THERMIQUEMENT (Z.A.T)
DANS UNE SOUDURE*

Proposé et Dirigé par :

Mr. K.REHOUMA

Mr. A.KASSER

Etudié par :

Mr. ADDAD ABDEL AZIZ

Mr. SEKIOU NACER

PROMOTION 97

DEDICACE



الجامعة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail :

A mon défunt père qui a tant fait pour moi

A ma tendre mère qui veille chaque jour pour mon bonheur

A mes frères abdelghani et toufik

A mon défunt grand-père ami ammar et ma grand -mère aicha

A mes defunts grand parents paternels

A ma tante houria qui est ma seconde mère

Je dedie en particulier ce travail à mes professeurs des sciences fondamentales de l'ENP

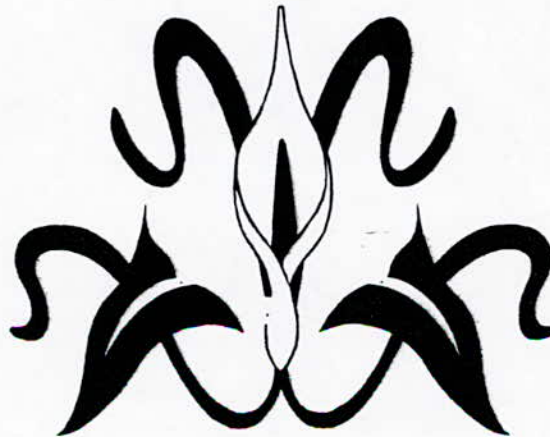
Boudjema mohamed , Manaa reda , et Chergui abdelmalek

Je ne saurai oublier mes amis qui sont pour moi des frères

Salim, Hassen, lotfi, ilyes , souhila, fahd, bahia, sarah,,nazim , mehdi , moh, ..

et les autres en leurs souhaitant pleine réussite dans leurs études .

Mr ADDAD ABDEL AZIZ



DEDICACE

A ceux qui ont donné le meilleur d'eux même pour voir ce jour arriver
à toi mon père à qui je dois tout ce bonheur
à toi ma mère , toi qui m'est la plus chère au monde.

A mes frères Salah et Fateh et à mes soeurs Dina Hanifa et Nadia, trouvez
ici mes profondes reconnaissances pour m'avoir tant encouragé et aidé .

A mes beaux frères et ma belle sœur.

A ma grande famille que j'aime beaucoup, sans toutefois oublier mes nièces et
mes neveux qui sèment la joie au sein de la famille .

A celui qui a fait preuve de tant de générosité et d'amitié et d'une
grande compréhension que jamais je ne saurai remercier , à toi Abdel aziz .

A tous mes amis de l'ENP et de la Ruba .

Said , Hakim, Rachid, et Abdelhamane... "

Je dédie ce mémoire

Macer



REMERCIEMENTS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Notre travail s'est effectuée au centre de recherche scientifique et technique en soudage de Chéraga (CSC) dans le laboratoire de métallurgie et de déféctologie sous la direction de notre promotrice madame **K. REHOUMA** à qui nous tenons à lui exprimer notre profonde gratitude pour son abnégation dans le suivi permanent de notre travail, notre co- promoteur **Mr Abdelmadjid Kasser** pour son aide et le suivie de notre travail au niveau de l'école nationale polytechnique

Nous tenons à remercier toute l'équipe scientifique et technique du (CSC) en particulier

Mr B BELLEKESSA responsable du laboratoire de métallurgie et de defectologie

Mr Y YAHMI, H MAZA, K ALLEM, GKAMEL, A BELAGRAA, S SMAIN, B MAACHE pour leur précieuses aides scientifique et technique

Mr M. BOURAHLA responsable de l'atelier de mecano-soudage

Mr R. AMOKRANE, Mr M AHMED-AISSA ainsi que tout le personnel technique de cet atelier

Nous tenons aussi à remercier toute l'équipe scientifique et technique de la GTP DE Réghaia pour leur immense dévouement et leurs aides techniques et scientifiques ; Notamment **Mr MAOUCHE, Mr TEBIB**.

Nous ne ~~savons~~ oublier de remercier chaleureusement tout les enseignants du département du génie métallurgique de l'ENP pour le riche savoir qui ils nous ont transmis dans cette merveilleuse discipline qui est la science des matériaux, ainsi que tout les étudiants de graduation et de post- graduation pour leur soutien morale en particulier ; **A.SARI, H.HAMLAOUI, M. GUEMACH, C.CHENITI**.



SOMMAIRE

	PAGE
INTRODUCTION GENERALE.....	1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1 LES ALLIAGES FERREUX	
1-1 Les diagrammes Fer - Carbone.....	2
1-2 Distinction entre acier et fonte	2
1-3 Classification des aciers	3
1-4 Aciers d'usage général.....	3
1-4-1 Composition et propriétés.....	3
1-4-2 Rôles des impuretés et des éléments d'addition	3
1-4-3 Nuance des aciers d'usage général.....	4
1-4-4 Désignation des aciers d'usage général.....	4
1-5 Carbone équivalent métallurgique : C.E.M.....	4
1-6 Carbone equivalent compensé : C.E.C.....	5
2 ETUDE THERMIQUE DU SOUDAGE	
2-1 Introduction	6
2-2 Notion de cycle thermique	6
2-3 Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique	7
2-3-1 Notion d'état quasi - stationnaire.....	7
2-3-2 Cycle thermique du soudage	8
2-3-3 Répartition thermique du soudage	10
2-3-4 Formulation mathématique	11
2-3-5 Soudage en plusieurs passes	12
3 ETUDE METALLURGIQUE DU SOUDAGE	
3-1 Changements structuraux au cours du chauffage.....	14
3-1-1 Etat recuit	14
3-1-2 Etat écrouit.....	15
3-2 Changements structuraux au cours du refroidissement	18
3-2-1 Courbes TRC	19
3-2-2 Courbes TRCS.....	19
4 PARAMETRES DE SOUDAGE	
4-1 L'apport d'énergie	23
4-2 La température initiale de la tôle.....	24
4-3 Les caractéristiques thermiques du matériau	24
4-4 Épaisseur de la tôle.....	25

5 PROCÉDES DE SOUDAGE

5-1 Classification des procédés de soudage	26
5-2 Soudage a l'arc électrique	26
5-2-1 Principe	26
5-2-2 Rôle de l'enrobage	27
5-2-3 Différents types d'enrobages.....	28
5-2-4 Symbolisation	28
5-3 Matériel de soudage	28
5-4 Identification d'un poste de soudage	28
5-4-1 Caractéristiques de la source de courant	29
5-4-2 Caractéristiques de l'arc	29
5-4-3 Point de fonctionnement	29

PARTIE EXPERIMENTALE

1 MODE OPERATOIRE

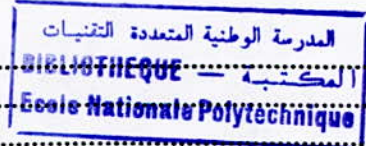
1-1 Choix du métal de base	30
1-2 Caractérisation du métal de base	30
1-2-1 Analyse chimique.....	30
1-2-2 Essai mécanique	30
1-3 Découpage et usinage des éprouvettes	31
1-3-1 Découpage des éprouvettes	31
1-3-2 Usinage et nettoyage des éprouvettes	31
1-4 Choix du procédé de soudage	31
1-5 Identification du métal d'apport	32
1-5-1 Choix du métal d'apport	32
1-5-2 Composition chimique du métal d'apport	32
1-5-3 Caractéristiques mécaniques du métal d'apport	32
1-6 Elaboration des fiches techniques du soudage	32
1-7 Calcul de l'énergie de soudage	42
1-7-1 Énergie nominale	42
1-7-2 Énergie dissipée dans le joint soudé.....	42
1-7-3 Énergie équivalente	42
1-7-4 Résultats	43
1-8 Découpages des tôles	43

2 INVESTIGATION METALLOGRAPHIQUE

2-1 Examen macrographique	44
2-1-1 Introduction	44
2-1-2 Découpe des échantillons	44
2-1-3 Polissage	44
2-1-4 Attaque chimique	44
2-1-5 Réalisation des macrographies	45
2-1-6 Interprétation des macrographies	46
2-1-7 Calcul de l'étendue de la ZAT	46
2-1-8 Calcul de la surface de la ZAT.....	47

2-2- Investigation micrographique	47
2-2-1 Polissage	47
2-2-2 Attaque chimique	47
2-2-3 Réalisation des micrographies	47
3 INVESTIGATION MECANIQUE	
3-1 Essai de traction	58
3-1-1 Principe de l'essai	58
3-1-2 Prélèvement des éprouvettes	58
3-1-3 Usinages des éprouvettes	58
3-1-4 Conditions d'exécution de l'essai.....	59
3-1-5 Résultats	59
3-1-6 Réalisation des éprouvettes de traction	59
3-1-7 Réalisation des essais de traction	59
3-1-8 Moyennes des valeurs obtenues	60
3-2 Essai de résilience	62
3-2-1 Principe de l'essai	62
3-2-2 Prélèvement des éprouvettes	62
3-2-2-1 Repérage des éprouvettes	62
3-2-2-2 Types d'éprouvettes.....	62
3-2-2-3 Prélèvement des éprouvettes	62
3-2-4 Position et orientation de l'entaille	63
3-2-5 Usinage des éprouvettes	63
3-2-6 Condition d'exécution de l'essai	63
3-2-7 Résultats	63
3-2-8 Réalisation des éprouvettes de résilience	64
3-2-9 Réalisation des essais de résilience	64
3-2-10 Moyennes des résultats	65
3-3 Essai de dureté sous cordon	65
3-3-1 Introduction	65
3-3-2 Définition	65
3-3-3 Type d'éprouvettes	65
3-3-4 Position de l'empreinte.....	66
3-3-5 Normalisation des résultats	66
3-3-6 Procès verbal de l'essai	66
3-3-7 Résultats de l'essai	66
3-4 Profil de la microduretés	67
3-4-1 Préparation des échantillons	67
3-4-2 Type d'essai et de charge	67
3-4-3 Mode opératoire	67
3-4-4 Résultats	67
4 INTERPRETATION DES RESULTATS	
4-1 Macrographies	68
4-1-1 Etendue de la ZAT	68
4-1-2 Surface de la ZAT.....	68
4-1-3 Interprétation	68

4-1-4 Morphologie des joints soudés	68
4-1-5 Nombres de passes	68
4-1-6 Constitution d'un joint soudé.....	68
4-2 Micrographie.....	70
4-2-1 Métal de base.....	70
4-2-2 Zone fondue	70
4-2-3 Zone affectée thermiquement	70
4-3 Taille moyenne des grains	70
4-4 Essai de traction	74
4-5 Essai de résilience	75
4-6 Essai de dureté sous cordon	76
4-7 profil de la microdureté	77
CONCLUSSION GENERALE	80



INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nombreuses structures en acier - comme les ponts, les réservoirs de stockage et les bateaux - sont assemblés par soudage.

- Le soudage constitue pour les aciers de construction métallique un traitement localisé à très haute température (zone affectée thermiquement ou Z.A.T) dont les caractéristiques dépendent à la fois du procédé utilisé (énergie de soudage) et de la géométrie des assemblages.

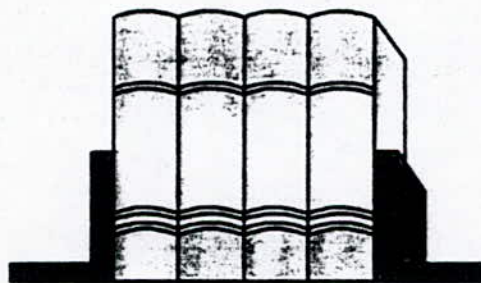
- Cependant le soudage peut entraîner une dégradation locale des propriétés de la Z.A.T., Cette dégradation résulte du grossissement des grains austénitiques à fort pourcentage en martensite (soudage à faible énergie) à de la bainite supérieure ou d'agrégats ferrite - carbure (soudage à forte énergie) [1].

- Les accidents venant de rupture brutale ou de rupture en fatigue ont souvent pour cause la faiblesse des joints de soudures. Le naufrage en 1980 de la plate-forme pétrolière d'alexandere keiland en est un exemple [2]

- La part du prix de revient des constructions liées au soudage peut être estimée de 35% à 50%. C'est pour cette raison que la métallurgie du soudage fait l'objet de recherche particulière [1]

Notre contribution consiste actuellement à observer uniquement l'influence de l'épaisseur à souder et de l'énergie mise en jeu, sur les caractéristiques de la Z.A.T c'est à dire essayer de comprendre les mécanismes métallurgiques survenus dans la Z.A.T. tel que grossissement des grains, précipitation,etc

**ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE**



CHAPITRE 1

LES ALLIAGES FERREUX

I- 1 LES DIAGRAMMES FER- CARBONE

Les alliages fer - carbone se solidifient en donnant naissance au solution solide interstitielles (Ferrite, Austénite) , d'une part et à de la cémentite ou du graphite d'autre part. Deux diagrammes peuvent être établit (Fig. 1).

Un diagramme fer - carbone à cémentite (Fe_3C) appelée diagramme métastable .

Un diagramme fer - carbone à graphite appelé diagramme stable .[3]

I- 2 DISTINCTION ENTRE ACIER ET FONTE

La classification des alliages fer-carbone en acier et fonte est établit à partir des points particuliers du diagramme métastable, et est justifié par l'analyse micrographique .

Les aciers : ce sont des alliages contenant jusqu'à 2.1 % de carbone .

les fontes : ce sont des alliages contenant entre 2.1 % et 6.7 % de carbone.[3]

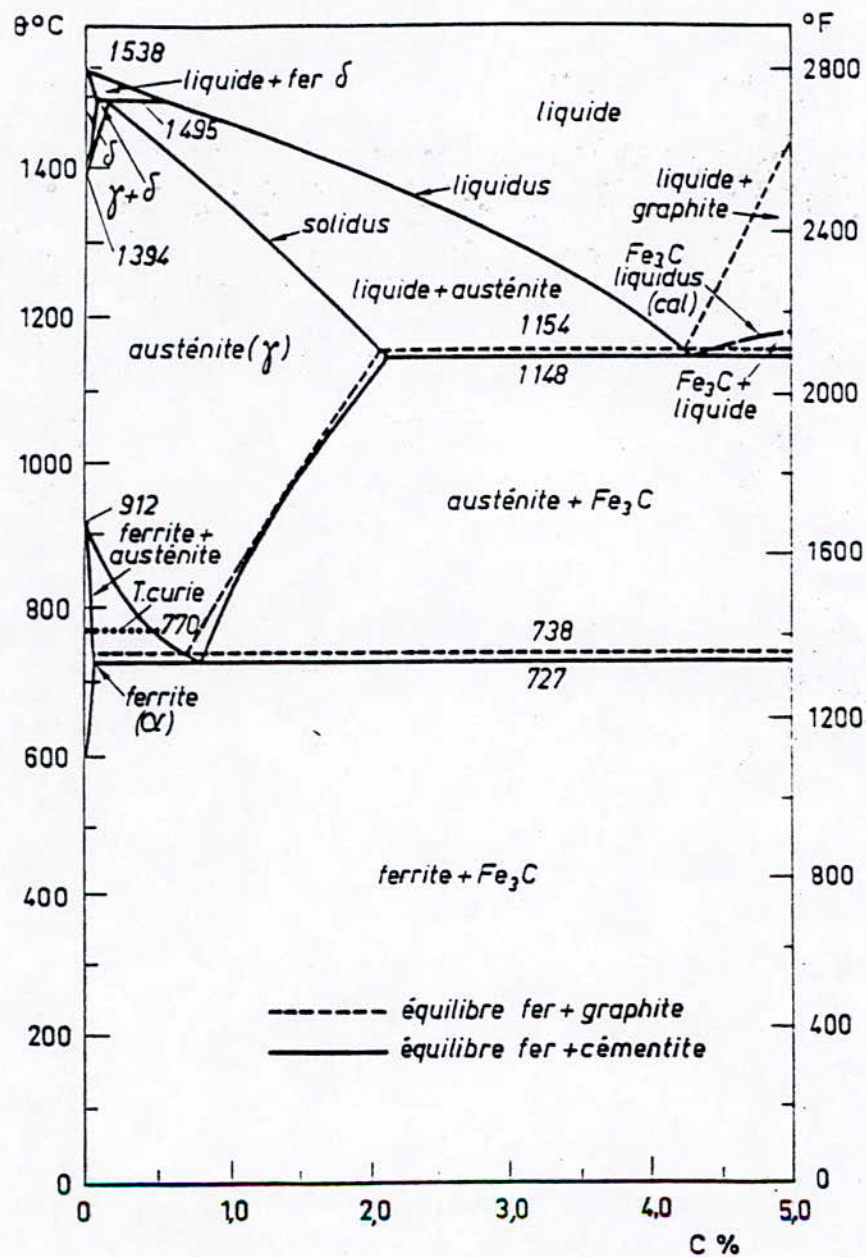


fig.1 diagrammes fer - carbone

I-3 CLASSIFICATIONS DES ACIERS

On peut classer les aciers selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation, on adoptant cette dernière on peut classer les aciers en quatre familles.

- les aciers au carbone d'usages général.
- les aciers de traitements thermiques alliés ou non.
- les aciers à outils.
- les aciers inoxydables. [4]

I-4 ACIERS D'USAGE GENERAL

I-4-1 Composition et propriété

Les aciers au carbone d'usage général utilisés tel que sans traitement thermique ultérieur constituent 85 % de la production d'acier. Ce sont des matériaux produits en très grande quantité et dont le prix est relativement bas.

Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse, silicium, soufre et phosphore dont la teneur limite est donnée par le tableau ci-dessous. [4]

Si	Mn	S	P
0.6	1.2	0.06	0.06

tab.1: teneurs maximales des éléments d'impuretés et d'additions dans les aciers

I-4-2 ROLES DES IMPURETÉS ET DES ELEMENTS D'ADDITION

- **Le manganèse** : il est utilisé sous forme de ferro-manganèse comme désoxydant et désulfurant, il augmente la proportion de perlite dans l'acier, car il se substitue en partie au fer de la cémentite. En solution solide dans la ferrite il exerce un effet durcissant de plus il abaisse la température de transition ductile - fragile.
- **Le silicium**: c'est un agent désoxydant, soluble dans la ferrite, le silicium a un effet durcissant comparable à celui du manganèse, mais il a tendance cependant à diminuer la soudabilité de l'acier.
- **Le soufre et le phosphore** : constituent les impuretés dont on cherche à abaisser les teneurs, car ils rendent l'acier fragile et difficilement soudable.

I-4-3 Nuance des aciers d'usage général:

D'après leur degré de désoxydation, on distingue 02 types de nuance :

Les aciers effervescents: ce sont des aciers insuffisamment désoxygénés contenant une quantité non négligeable de FeO, le métal est dit effervescent à cause des bulles de CO suite à la réaction de FeO avec le carbone du métal fondue. Ces aciers ont une plasticité élevée et se prêtent bien à l'emboutissage, cependant ils sont difficilement soudables.

- **Les aciers calmes:** ils s'obtiennent par désoxydation complète du métal et présentent une bonne soudabilité. [5]

I-4-4 Désignation des aciers d'usage générale

-1] **Aciers pour construction mécanique:** la désignation des aciers non alliés d'usage général destinés aux constructions mécanique est comme suit :

- Lettre A (acier).
- Résistance minimale R_m en daN/mm².
- Indice de qualité de 1 à 4 .
exemple A 50-2

-2] **Aciers pour construction métallique :** la désignation comprend dans l'ordre :

- Lettre E.
- Limite élastique minimale R_e en daN/mm².
- Indice de qualité de 1 à 4 .
exemple E 24-2 [5]

Les aciers d'usage général, qui en principe sont utilisés tel-que, après leur livraisons, sans traitement ultérieur sont définis en fonction de leurs propriétés mécaniques. Toutefois en raison de certaines caractéristiques particulières reliées à leur utilisation (par exemple leur soudabilité) les teneurs des différents éléments d'additions sont limités à des teneurs maximales. [4]

I- 5 CARBONE EQUIVALENT METALLURGIQUE : C.E.M

Afin de quantifier l'effet des éléments d'additions sur les transformations des aciers au même titre que celui du carbone équivalent métallurgique (C.E.M), chaque élément est affecté d'un coefficient en fonction de son influence sur la trempabilité. Différentes formules ont été proposées :

D'après l'I.I.S (institut internationale de soudure): [6]

$$CEM = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + Va}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

Cette formule est valable pour les alliages fer-carbone contenant des éléments dont les teneurs maximales sont :

C %	Ni %	Mn %	Cr %	Mo %	Cu %
0.5	3.5	1.6	1	0.6	1

tab. 2 teneurs maximales des éléments entrant dans la formule du C.E.M

Globalement pour de faible épaisseur on peut dire que :

si le $C.E.M < 0.4$ l'acier est soudable sans précaution particulière.

si le $0.45 < C.E.M < 0.7$ l'acier nécessite un préchauffage avant soudage .

si le $C.E.M > 0.7$ l'acier présente une mauvaise caractéristique de soudabilité .

I- 6 CARBONE EQUIVALENT COMPENSE: C.E.C

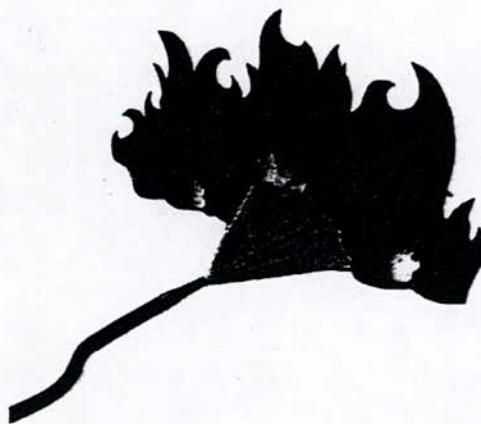
La B.R.W.A (British Research Welding Association) a superposé à la notion de carbone équivalent métallurgique (C.E.M) la notion de carbone équivalent compensé C.E.C, celui-ci tient compte de la géométrie du joint, en particulier de l'épaisseur :

$$C.E.C = C.E.M + 0.005 e$$

tel que e : épaisseur de la tôle . [7]

CHAPITRE 2

ETUDE THERMIQUE DU SOUDAGE



1-1 INTRODUCTION

L'intérêt de la connaissance thermique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation -aussi quantitative que possible- des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix des procédés et des modes opératoires .

Cette prévision s'appuie éventuellement sur des données qui permettent une simulation analytique au moyens de programmes appropriés, eux même fondés, soit sur la mémorisation d'un nombre suffisant de résultats expérimentaux, soit sur les expressions mathématiques de l'écoulement de chaleur.

En tout état de cause, la connaissance thermique du soudage, n'a d'intérêt du point de vue métallurgique, que si en sait tenir compte de l'influence, vis-à-vis des phénomènes qu'on étudie, des facteurs dont elle fournit les variations.

2-2 NOTION DE CYCLE THERMIQUE

L'interprétation métallurgique de tous les phénomènes résultants d'un effet thermique requit comme condition nécessaire la connaissance de la température atteinte. A cette condition de températures ajoutent une ou plusieurs conditions de temps. Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance durant l'opération de soudage en un point donné de l'assemblage, il faut donc connaître le cycle thermique du soudage, c'est-à-dire la variation de la température θ en fonction du temps t la courbe $\theta=f(t)$ tracée en un point A voisin d'une soudure (fig. 2) .

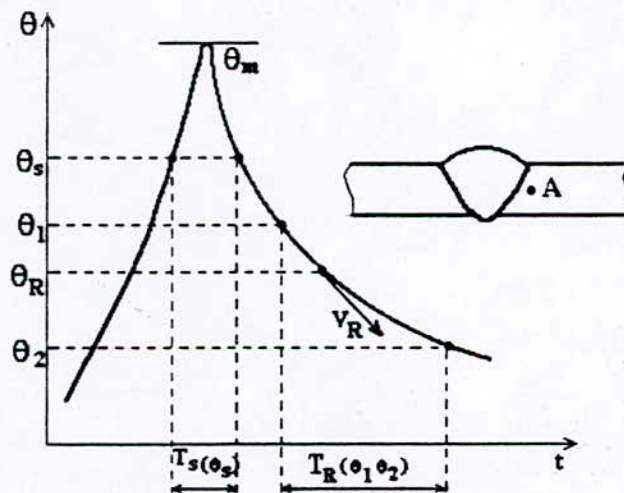


fig.(2) cycle thermique d'un point A d'une soudure

La courbe correspondante $\theta=f(t)$ tracée en point A voisin d'une soudure nous renseigne sur les grandeurs suivantes :

- La température maximale atteinte θ_m .
- Le temps T_s 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 température θ_1, θ_2 , ou par la vitesse de refroidissement V_R à une température θ_R .

Ainsi déterminées en un point de l'assemblage, les grandeurs associées aux cycle thermique nous permettent d'accéder à la répartition topographique de ces modifications aux alentours de la soudure, il nous faut donc connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique en

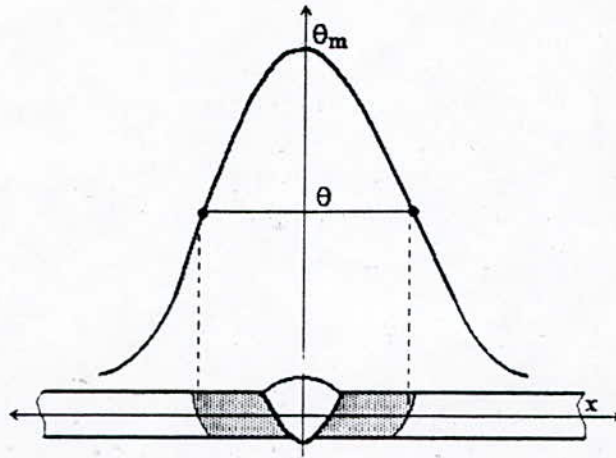


Fig.3 répartition thermique dans une soudure

donnant la variation de la température maximale θ_m atteinte en chaque point en fonction de la distance x . Chaque phénomène étant caractérisé comme première condition par la température θ nécessaire, nous pouvons situer grâce à la courbe $\theta_m=f(x)$ la limite extérieur de la zone où ce phénomène est susceptible de se produire.

Ainsi se trouve définie d'une manière générale la zone affectée thermiquement (ZAT) où ce phénomène a lieu, pour les soudures sur acier cette zone est réservée à la zone austénitisée par le cycle thermique, c'est-à-dire, celle qui est limitée par les isothermes aux points de transformation A_3 (austénitisation complète) et A_1 (austénitisation partielle).[9]

2- 3 CARACTÈRES GÉNÉRAUX DU CYCLE THERMIQUE ET DE LA REPARTITION THERMIQUE

2-3 -1 NOTION D'ÉTAT QUASI -STATIONNAIRE

Si nous relevons au moyen de thermocouples, les courbes $\theta=f(t)$ en des points A_1 , A_2 ,.....etc situés à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et à des distances croissantes de l'origine O de ce cordon, supposé amorcé en pleine tôle, nous obtenons pour chaque parcours expérimenté, par rapport à l'origine O du cordon, la disposition décrite par la Fig.(4),

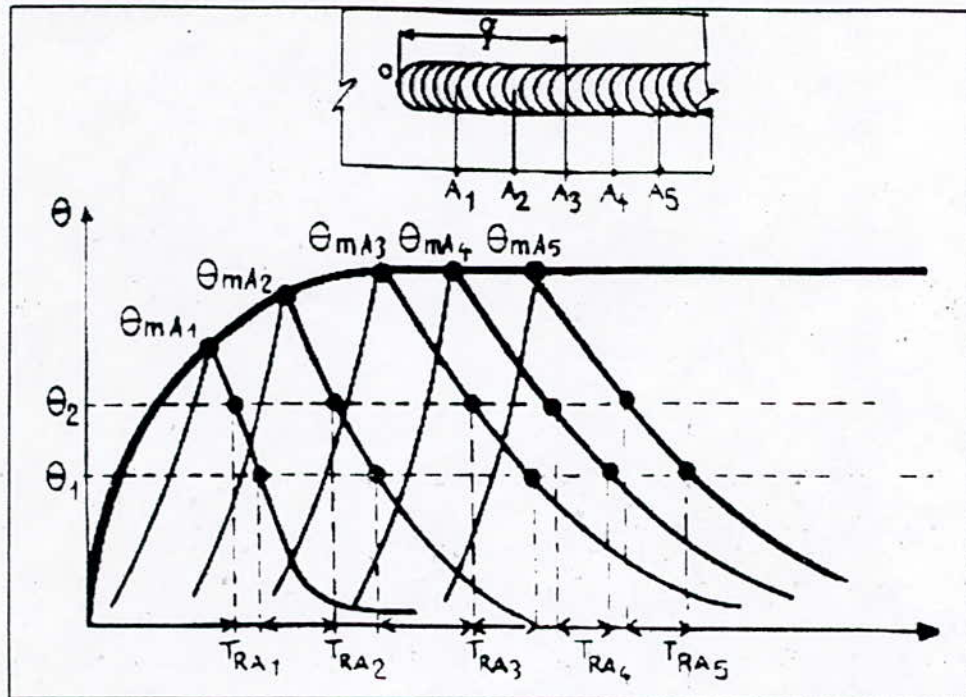


Fig.4 cycles thermiques le long du cordon de soudure

qui conduit à la remarque suivante :

- A- 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 (l'énergie demeurant uniforme).
- B- En même temps les lois de refroidissement mesurées par le temps de refroidissement entre deux températures deviennent identiques (comme le sont les temps de séjour non illustrés sur la fig. 4). Autrement dit les courbes $\theta = f(t)$ deviennent superposables dès que la source de chaleur a franchi un certain parcours (q). [9]

2-3-2 CYCLE THERMIQUE DU SOUDAGE

Grâce à l'existence de l'état quasi-stationnaire, nous pouvons limiter notre détermination des courbes températures -temps à des points A, B, C, ... répartis sur une droite XY perpendiculaire à la ligne de soudure, tracée à partir d'une position S de la source de chaleur. Quel que soit cette position dans la zone d'états quasi stationnaire, les résultats seront les mêmes, schématisés par la disposition de la fig. (5) qui appelle aux remarques suivantes.

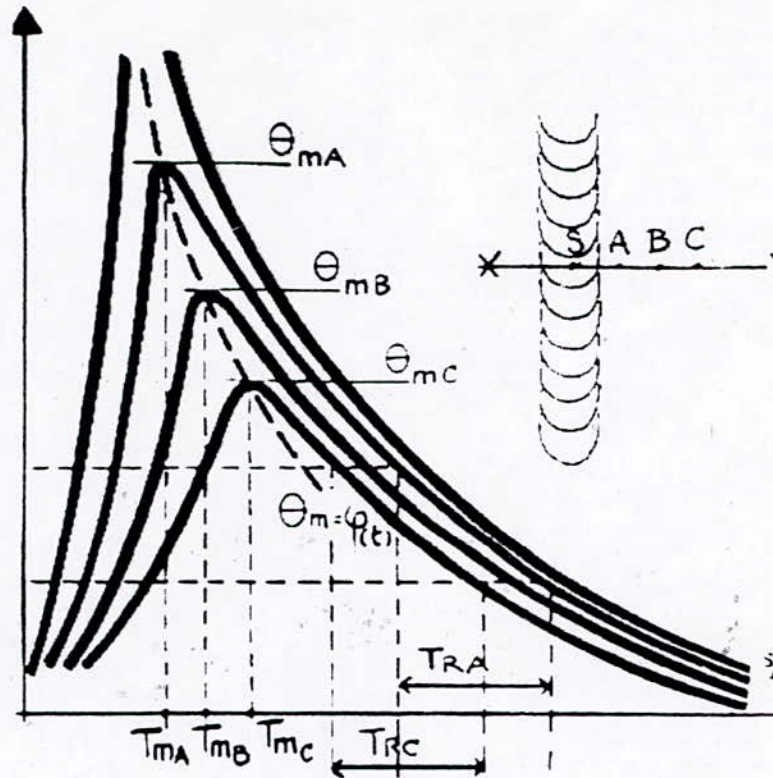


Fig.5: courbes températures/temps

-A- les courbes températures -temps se situent les unes au dessous des autres au fur et à mesure qu'on augmente la distance entre le point de mesure et la ligne de soudure. En particulier, les températures maximales atteintes θ_m sont décroissantes de manière plus ou moins abrupte selon le gradient de température qui caractérise le procédé et le mode opératoire étudié. Naturellement toutes les courbes se rejoignent asymptotiquement au niveau de la température initiale du métal de base.

-B- Les températures maximales atteintes θ_{mA} , θ_{mB} ,.....ect qui sont décroissantes à partir de la ligne de soudure, sont franchies pour des temps T_{mA} , T_{mB} ,.....ect qui sont croissants; se décalage se traduit par la courbe $\theta_m = \varphi(t)$ qui sépare le domaine des températures croissantes de celui des températures décroissantes, pratiquement ceci exprime le fait qu'au voisinage de la source de chaleur, les points les plus rapprochés sont déjà en train de se refroidir à partir de la température maximale qu'ils ont atteint, alors que les points les plus éloignés sont encore à la phase d'échauffement.

On conçoit tout l'intérêt de cette observation si on pense aux phénomènes qui sont commandés par une variation de température (transformations d'une part, dilatation et retrait d'autre part) et dont la chronologie est ainsi expliquée.

En particulier lorsque nous examinons la coupe transversale d'une soudure; nous y voyons des aspects métallographiques caractéristiques de ces phénomènes mais les structures que nous observons ne sont apparues au même moments.

-C- Compte tenu de la disposition des courbes, la vitesse de refroidissement, comptée à partir de la température maximale, décroît lorsque la distance à la ligne de soudure croît. Mais les courbes de refroidissement constituent rapidement un faisceau assez serré et on observe par exemple aux points A et C des temps T_R pratiquement identiques entre les températures θ_1 et θ_2 situées dans ce faisceau. C'est ainsi qu'on peut parler d'une vitesse ou des temps de refroidissement associé à une condition de soudage, en particulier, pour étudier la transformation de l'acier au refroidissement entre 800°C et 500°C , intervalle de température particulièrement critique dans ce cas . [9]

2-3-3 RÉPARTITION THERMIQUE DU SOUDAGE

Pour décrire la répartition spatiale des cycles thermiques de soudage, Portevin et Sefarian [9] ont proposé sous le nom de « solide thermique » (Fig.6) une représentation qui rend compte

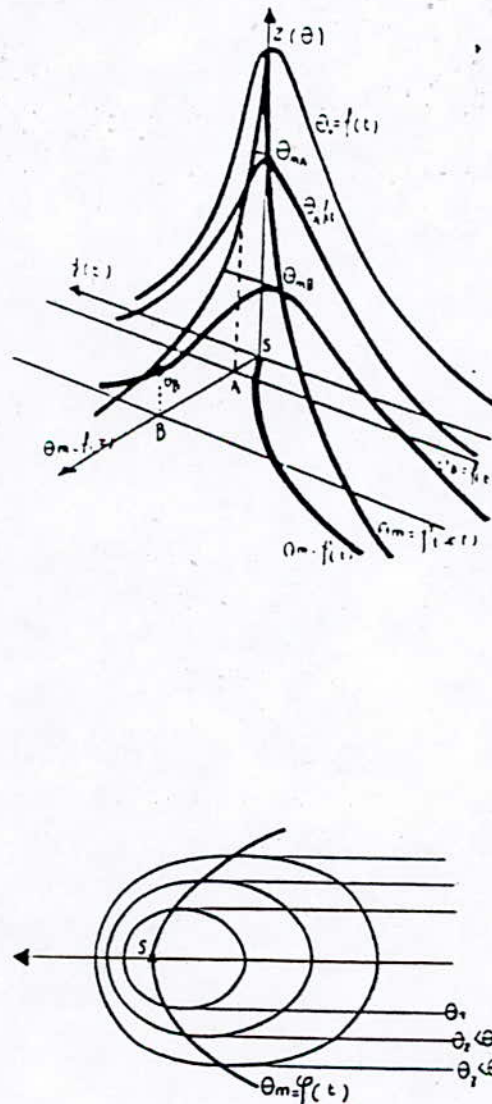


Fig 6 Solide thermique

selon les trois axes:

S_x : distance à la ligne de soudure,

S_y : distance le long de cette ligne, c'est-à-dire l'axe des temps,

S_z : sur une perpendiculaire au plan S_{xy} ,

de l'état instantané des températures atteintes aux alentours de la source S au moment de son passage à l'origine des coordonnées.

Du fait de l'état quasi-stationnaire, le solide thermique reste identique à lui-même tout au long de soudure selon laquelle il se place. On engendrant en chaque point les courbes températures/temps décrites sur le solide thermique de la (fig. 6) dont une moitié seulement est représentée.

Les courbes $\theta=f(t)$ en des point définis par leur distance x à la ligne de soudure sont des coupes par des plans parallèles au plan XOZ. Sur ces courbes, le maxima des températures se trouve décalés dans le temps, ce dont rend compte la courbe gauche $\theta_m=\varphi(x,t)$ qui figure sur le solide, alors que la courbe $\theta_m=\varphi(t)$ dont nous avons souligné l'intérêt n'est que la projection sur le plan XOY.

Ainsi ce trouve rassemblées en une seule représentation les données de températures, de temps, de distance, que nécessite la compréhension des phénomènes engendrés par le soudage.

Selon le procédé dont il s'agit, le solide est plus ou moins aigu, mais tous les procédés de soudage avec déplacement de la source de chaleur sont tributaires de cette représentation [9].

-3-4 Formulation mathématique:

L'influence conjuguée de la nature du métal, de la masse et de la température initiales et enfin de l'énergie, a été traduite par des formulations dont nous retiendrons celle de rykiline [3]. Pour un produit épais sur lequel on dépose un cordon de soudure, le temps T_s et la vitesse de refroidissement V_θ s'écrivent:

$$(4) \quad t_s = K_1 \frac{E}{\lambda(\theta_m - \theta_0)} \qquad (5) \quad V_\theta = \frac{2\pi\lambda(\theta - \theta_0)^2}{E}$$

Pour une tôle mince ces deux grandeurs s'écrivent:

$$(6) \quad t_s = K_2 \frac{E^2}{\lambda C_v (\theta_m - \theta_0)^2} \qquad (7) \quad V_\theta = \frac{2\pi\lambda C_v (\theta_m - \theta_0)^3}{E^2}$$

λ : conductibilité thermique, [Watt/ cm² . C°] .

C_v : capacité calorifique volumique, [Joule/ cm³ . C°] .

E : énergie mise en jeu, [joule] .

θ_0 : température initiale, [C°] .

θ : température à laquelle est calculée la vitesse de refroidissement, [C°] .

K_1, K_2 : coefficients eux-mêmes fonction de la température θ à laquelle s'applique le calcul.

-En ce qui concerne la nature du métal on voit figurer la conductibilité λ , dans les deux types de formules, alors que la capacité calorifique volumique C_v n'intervient que pour les produits minces .

- L' influence de la température initiale θ_0 est traduite par sa présence au dénominateur pour les temps de séjour à haute température et numérateur pour les vitesses de refroidissement . Dans les deux cas cette influence s'accroît pour les produits épais comme le montre l'élévation au carré pour le temps de séjour et au cube pour les produits minces ceci implique que les produits minces requiert moins de préchauffage que les produits épais

-De même énergie qui intervient au numérateur pour les temps de séjour et au refroidissement à plus d'influence sur les produits minces que pour les produits épais puisque elle intervient au carré pour les premiers.

3-5 SOUDAGE EN PLUSIEURS PASSES .

Les données sur l'aspect thermique du soudage qui ont été indiquées jusqu'à présent ont concerné le soudage par fusion en seule passe . Examinons maintenant l'évolution de la température au cours des passes ultérieures, cette évolution dépend essentiellement :

- de la température initiale .
- du nombre de passes et de leur conditions d'exécution .
- de l'intervalle de temps entre passes .
- de la position par rapport à la soudure du point dont on suit la variation de la température.

La fig.7 décrit les effets thermiques du soudage en plusieurs passes dans le cas d'une soudure sur bords chanfreinés en V, exécuté en trois passes sans préchauffage d'un point A affecté dès la première passe .

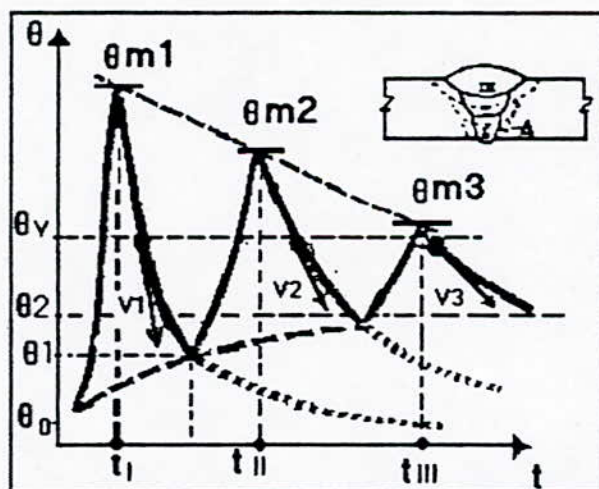


Fig. 7 effets thermique d'un soudage multipasse sur un point A d'une soudure

L'exécution de cette dernière passe se traduit par une première montée en température jusqu'à une valeur V_1 , au passage de la température θ_v , se poursuivra jusqu'à la température initiale si la deuxième passe n'était exécutée que tardivement. Tel n'est en général pas le cas, et la deuxième passe intervient avant que la température au point A n'ait rejoint la température initiale θ_0 . Elle est encore à $\theta_1 > \theta_0$ lorsqu'un nouveau cycle thermique intervient du fait de cette deuxième passe.

Finalement l'étude d'une soudure en plusieurs passes conduit aux observations suivantes:

-A- c'est au voisinage de la première passe que l'on observe les cycles thermiques les plus sévères, quand à la température maximale atteinte et à la rapidité du refroidissement, les passes suivantes provoquent à cet endroit des cycles de plus en plus atténués, en raison de l'élévation progressive de la température initiale, qui augmente après chaque passe.

-B- Suivant la disposition des passes, une même température θ (par exemple le point A_3 dans le cas des aciers) peut être dépassée deux ou plusieurs fois en une région donnée au cours des passes successives. La structure finale observée en cette région est le résultat de succession des cycles correspondants.

-C- Le rôle important que joue l'intervalle de temps qui sépare les passes successives vis-à-vis de la température au moment de chaque passe explique la nécessité de préciser ce facteur lors de la spécification du mode opératoire. Les cahiers de charges spécifient "la température entre passe" c'est-à-dire la température que garantit à tout moment la séquence choisie.

CHAPITRE 3

ETUDE METALLURGIQUE DU SOUDAGE

3-1 CHANGEMENT STRUCTURAUX AU COURS DU CHAUFFAGE .

3-1-1 ETAT RECUIT

Dans le cas de l'acier , l'existence de deux variété allotropiques du fer dont l'une dite austénitique γ (réseau cubique à face centré) succède dans l'échelle des températures croissantes à la ferrite α (réseau cubique à face centré) stable à la température ambiante , entraîne une variation de constitution lors de l'échauffement car le carbone est très peu soluble dans la ferrite alors qu'il l'est considérablement dans l'austénite ,de la sorte si on confronte pour une soudure en cours d'exécution ,la courbe des maxima des températures atteintes $\theta_m=f(x)$ avec la partie gauche du diagramme fer - carbone relative au aciers hypo - eutectoides ($C < 0,9\%$) on peut interpréter, comme suit (Fig.8), la constitution d'un acier à X% de carbone jusqu'à ce que soit atteinte la température maximale:

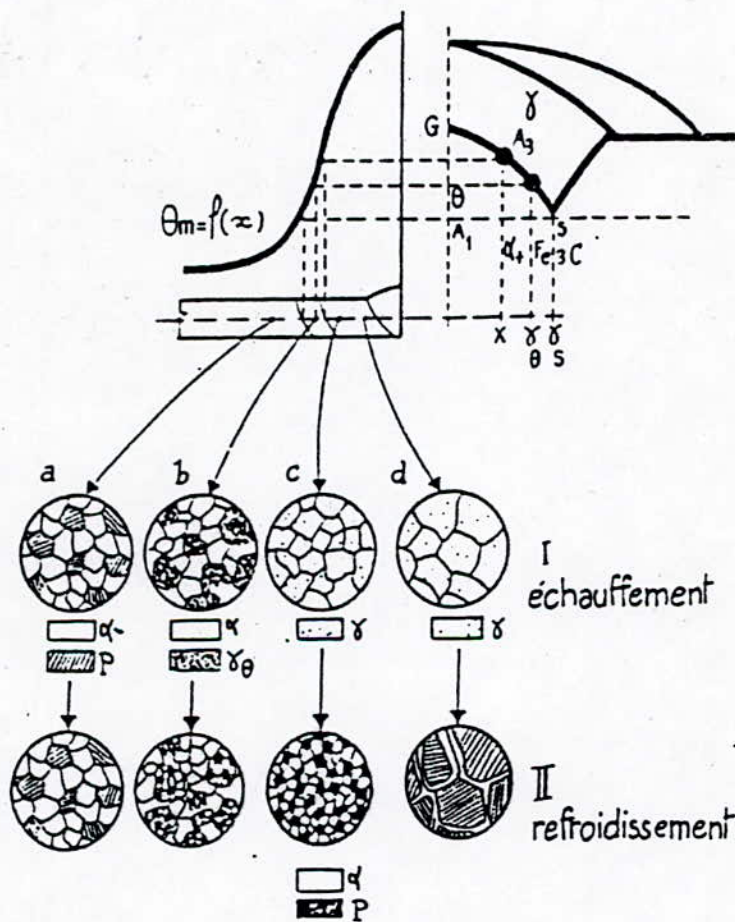


Fig 8: Répartition topographique des constituants au voisinage d'une soudure sur acier a X% en carbone

-A- le métal de base étant supposé à l'état recuit est constitué par de la ferrite α et de la perlite (agrégat lamellaire $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ à 0,9% de C) dans les proportions indiquées par le diagramme pour les teneurs de X% de carbone.

-B- Au niveau de la température A_1 la perlite se transforme directement en austénite, dont la teneur en carbone varie alors de γ_s (teneur en carbone de l'eutectoïde c'est-à-dire 0,9% de C), depuis ce niveau à X% pour la température A_3 de l'acier considéré.

Mécanisme qui implique la disparition de la quantité correspondante de ferrite. Il en résulte qu'à une température θ comprise entre A_1 et A_3 coexiste des plages d'austénite dont la teneur en carbone est égale à γ_θ intermédiaire entre (γ_s et X), et de la ferrite dont la proportion diminue lorsque θ augmente, cependant la teneur en carbone γ_θ diminue selon ce que indique la ligne SG du diagramme.

-C- Lorsque la température A_3 est atteinte, les plages d'austénite sont devenues jointives car elles ont remplacé la ferrite initiale en atteignant la teneur en carbone X%.

Toutes traces de la constitution antérieures sont alors effacées. Le cycle thermique du soudage joue le même rôle qu'un traitement de normalisation; dans la mesure où le refroidissement ultérieur permettra le retour à l'état d'équilibre.

-D- Une fois l'état austénitique atteint - à partir de A_3 - thermiquement affecté, il n'y a plus d'évolution à l'état solide sinon de structure, la surchauffe se manifeste avec une intensité dépendant du mode opératoire.

C'est à partir des constituants et structures b, c, et d de la fig.8 qu'il y a lieu, dès le début du refroidissement, les transformations qui seront examinées ultérieurement. Il faut toutefois noter que ces transformations sont influencées par l'état structural dans lequel se trouve l'austénite au début du refroidissement, état influencé par la vitesse d'échauffement, la température atteinte, et la durée du séjour en température. Ces facteurs agissant sur la mise en solution des carbures, d'éléments d'additions et sur l'homogénéisation de la solution solide austénitique [9].

I-1-2 ETAT ECROUI: "Recristallisation après écrouissage"

Le terme recristallisation désigne une réorganisation du réseau cristallin d'un métal à la faveur d'un échauffement à partir d'un état dit écroui. On dit qu'un métal est écroui lorsqu'il a subi un travail à froid; ou à chaud qui s'est traduit par une modification de sa structure micrographique (les grains se sont déformés dans le sens imposé par le traitement mécanique), ces modifications s'accompagnent d'une augmentation de la résistance à la déformation (résistance à la traction, limite d'élasticité, dureté) et d'une diminution de l'aptitude à la déformation.

Si un métal est à l'état écroui, soumis à un chauffage, on assiste au phénomène de la recristallisation dont la fig.9 schématise les phases successives, à l'échelle de la structure micrographique, en relation avec la grosseur du grain et l'évolution des propriétés mécaniques.

A partir de la structure d'écrouissage (schéma 1), on voit apparaître au voisinage de la température de recristallisation θ_R des germes (schéma 2), qui se développent en une structure equiaxe (schéma 3) dont les grains sont d'autant plus fins que le degré d'écrouissage initial est plus élevé. Cette structure dite de recristallisation primaire se stabilise avec un léger grossissement de grains jusqu'à la température θ_S où commence la surchauffe (recristallisation secondaire).

Pendant que la recristallisation progresse, les propriétés mécaniques évoluent en sens inverse des effets de l'écroutissage, à savoir que le métal retrouve ses capacités d'allongement, cependant la résistance que lui avait conférée l'écroutissage diminue.

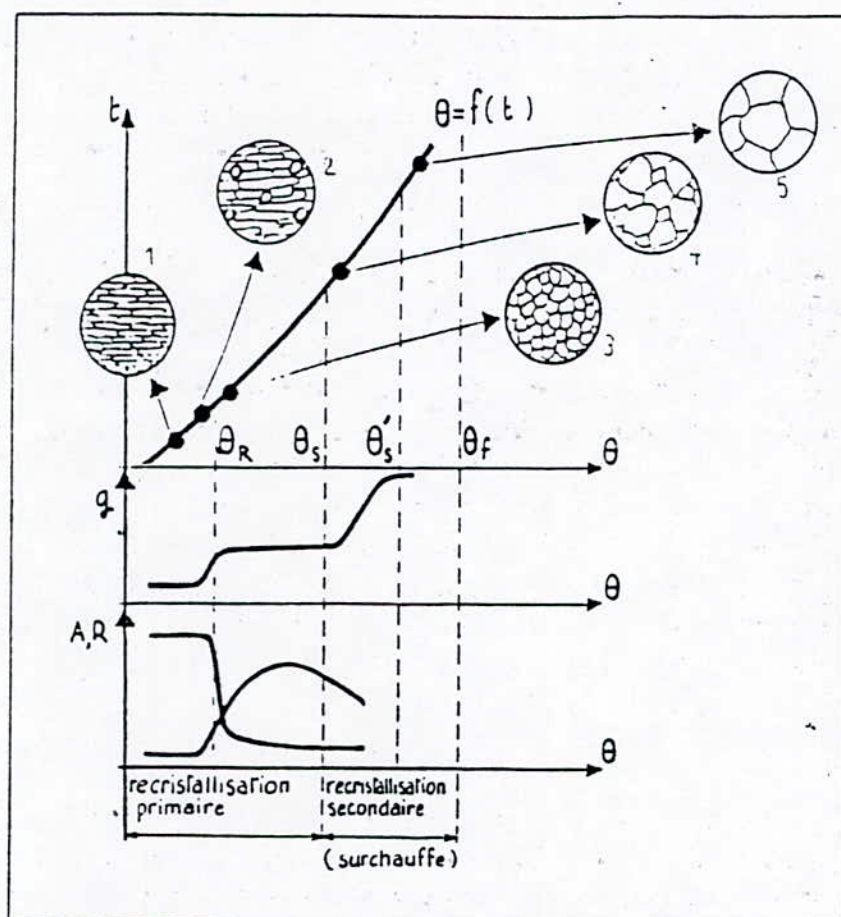


Fig.9 ..Evolution de la structure micrographique d'un produit écroui au cours du chauffage et la variation correspondante de la grosseur du grain et des caractéristiques de traction.

Le phénomène de recristallisation après écrouissage trouve une application directe dans le cas du soudage sur produit écroui. Toute opération de soudage entraîne un adoucissement du métal de base jusqu'au niveau de l'isotherme de température de recristallisation, cet effet apparent sur la filiation de la dureté (fig10) se manifeste plus ou moins vis-à-vis des caractéristiques de traction relevées sur éprouvettes soudées usinées perpendiculairement au joint selon la largeur de la zone affectée.

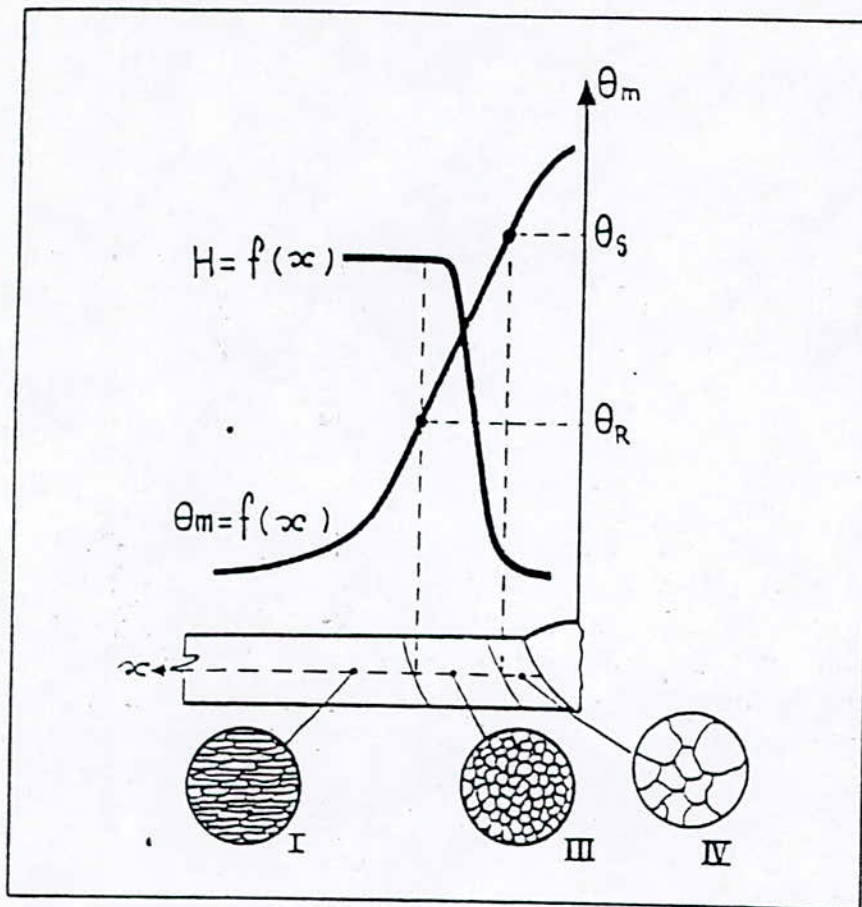


fig10: évolution de la structure d'un produit écroui au cours du chauffage

Dans le cas d'une zone relativement large, la réduction de la dureté correspond à une diminution de la résistance à la traction, la rupture ayant effectivement lieu dans la zone adoucie. Si cette zone est étroite la rupture ne s'y localise que pour une charge plus élevée, parce que le métal dur voisin raidit la zone adoucie, ou même ne s'y localise pas du tout, et l'effet de l'adoucissement ne se manifeste pas.

Ainsi se présente le phénomène de recristallisation engendré par le soudage dans le cas de produits exempt de transformation allotropiques tel est le cas de l'aluminium ou de l'acier inoxydable austénitique.

Il en va différemment de l'acier non ou faiblement allié (fig 11), à cause de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$, 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, dans ce cas la zone adoucie par la recristallisation de la ferrite est limitée entre $\Theta_{R\alpha}$ et A_3 , car à partir de cette dernière température, la réaction $\alpha \rightarrow \gamma$ produit, par un autre mécanisme, l'effet d'une normalisation qui limite la largeur de la zone adoucie, par conséquent il n'y a pas à craindre l'adoucissement par recristallisation dans le cas du soudage sur un acier écroui autre que extra-doux. [9]

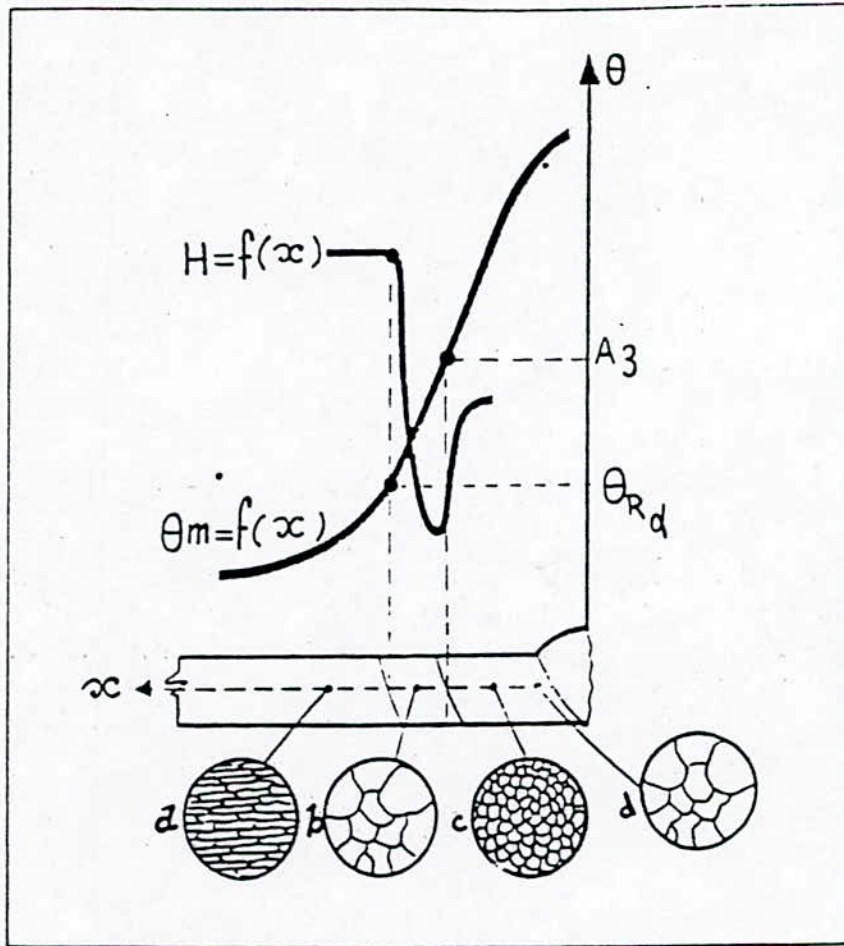


fig 11 incidence de transformation ferrite/ austérite sur la structure micrographique et la dureté au voisinage d'une soudure sur acier doux écroui

- a- ferrite écroui
- b- ferrite recristallisé
- c- ferrite résultant d'austenisation peu au dessus de A_3
- d- ferrite résultant de la surchauffe de l'austenite

3-2 CHANGEMENT DE STRUCTURE AU COURS DU REFROIDISSEMENT

Le diagramme fer - carbone, déjà évoqué (fig. 8) pour rendre compte du processus de transformation de l'acier à l'échauffement, représente aussi la succession des phénomènes au cours du refroidissement à partir de l'état austénitique obtenue à haute température, état qui, à l'état d'équilibre, se maintient jusqu'à la température du point A_1 : par suite de la séparation progressive entre A_3 et A_1 , la ferrite dite pro - eutectoïde qui dissous très peu de carbone. L'austénite s'enrichit en cet élément, jusqu'à atteindre la teneur eutectoïde (0.85%) à la température du point A_1 , à laquelle elle donne naissance à un ensemble ferrite - perlite constitué de ferrite pro - eutectoïde et de perlite, agrégat lamellaire ($\alpha + Fe_3C$) à 0.85% de C. [9]

3-2-1 COURBES TRC

Pour rendre compte de la loi de refroidissement à partir de l'état austénitique obtenue à une température donnée, on trace pour les principales familles d'aciers des diagrammes dit TRC "transformation en refroidissement continue", ou on trouve, pour un ensemble donnée de lois de refroidissement à partir d'une même température d'austénisation, les températures de début, d'arrêt-éventuelle de transformation; ainsi que des indications sur la nature et la proportion des constituants qui apparaissent à chaque instant le long de la courbe de refroidissement (Fig.12).[9]

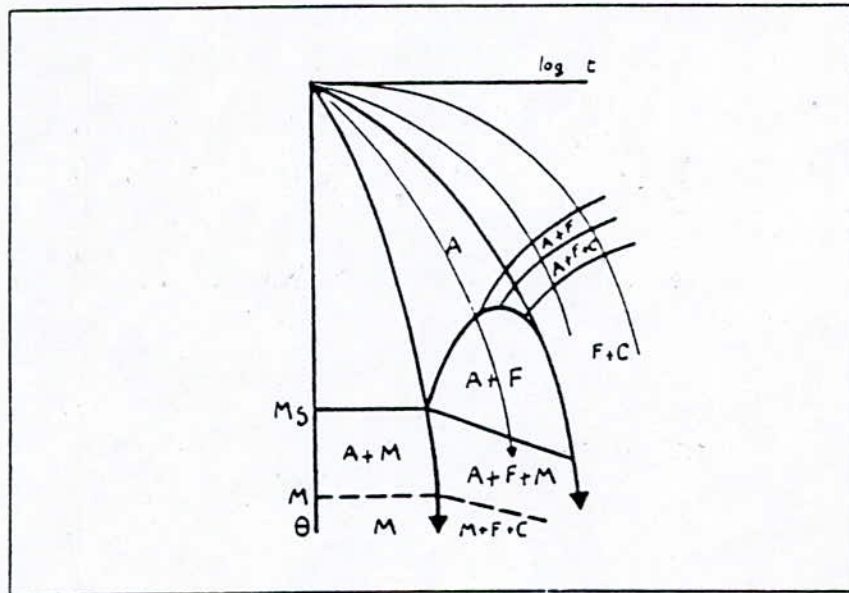


Fig 12 : exemple schématisé d'un diagramme T.R.C

3-2-2 COURBE TRC- SOUDAGE

lors de cycle thermique de soudage la durée d'austénisation est très faible; alors que les diagrammes T.R.C. sont établis dans des conditions classiques de traitement thermique.(austénisés de 5 à 30 min.).

Le besoin c'est donc fait sentir d'établir des diagrammes pour différents aciers en conditions de soudage (T.R.C.S). Le diagramme T.R.C.S. permet, pour un acier donné, de relier la microstructure formée;(élément essentiel à la métallurgie du soudage) au cycle thermique subit par la zone affectée par la chaleur et plus particulièrement à la durée de refroidissement

Δt_{500}^{800} (temps écoulé entre 800°C et 500°C) appelé paramètre de refroidissement.

Comme pour les diagrammes T.R.C. classique, les refroidissements les plus rapides conduisent à des structures martensitique, puis à mesure que le refroidissement est plus lent à des structures mixtes (martensitique + Baïnite), le cas échéant bainitique et enfin à des structures du types ferrite + carbures (perlite) (Fig13). [12]

Acier E 36

C	Mn	Si	P	S	Al
0,156	1,30	0,335	0,004	0,008	0,013

austénitisé à 1300°C sans maintien grain γ : 1-2

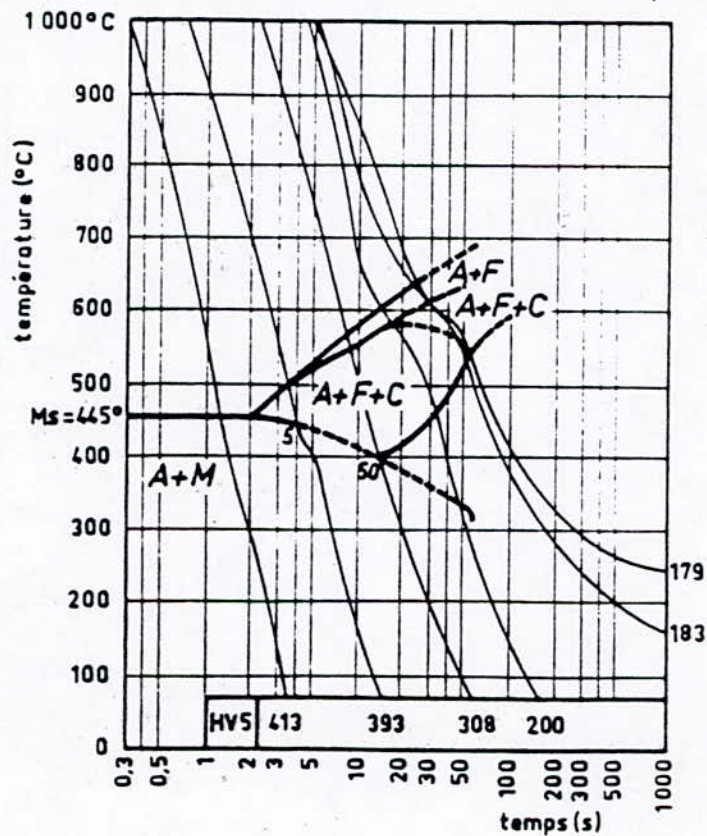


Fig. 13::Diagramme TRCS de l'acier E 36

Pour rendre facilement accessible et directement utilisables les paramètres représentatifs des transformations pendant le cycle thermique de soudages, un recueil de courbes dureté - paramètres de refroidissement [13] donne, pour les aciers les plus courants, les informations contenues dans les diagrammes T.R.C.S. La dureté, on le sait, renseigne pour un acier sur les conditions d'austénisation et de la microstructure formée. A titre d'exemple, la Fig. 14 reproduit la courbe dureté - paramètre de refroidissement pour un acier du type E36. [13]

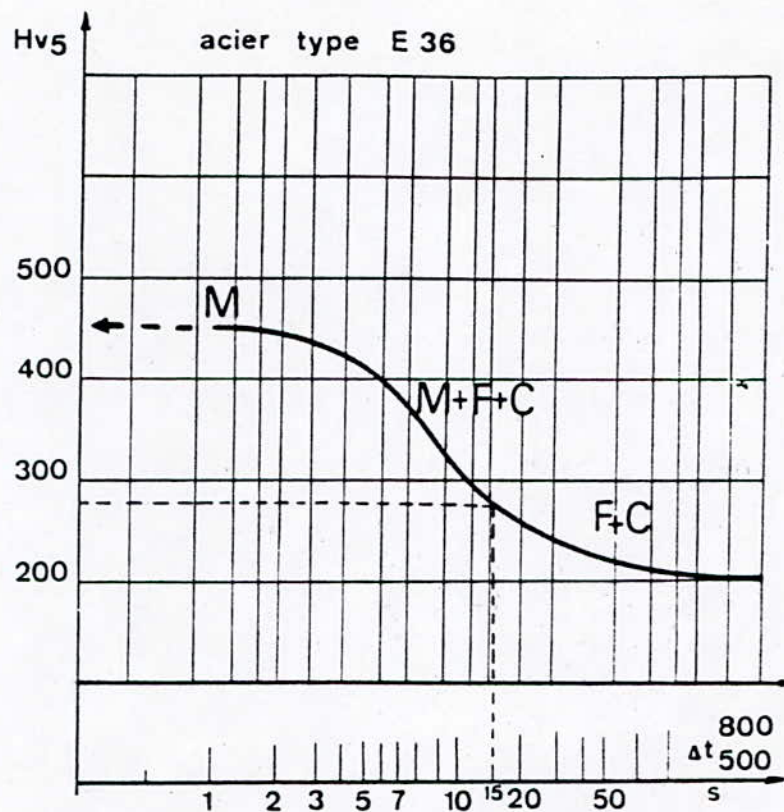


fig. 14: courbe dureté paramètre de refroidissement pour un acier E 36

Ces courbes possèdent un certain nombre de traits particuliers: un plateau supérieur où la dureté varie peu (structure essentiellement martensitique), une zone à forte pente qui correspond à la traversée du domaine mixte (M+F+C), et un dernier tronçon de faible pente tendant asymptotiquement vers des duretés proche de celle du métal de bases. L'examen de ces diagrammes permet donc, de déterminer la durée de refroidissement nécessaire pour obtenir une structures favorable au joint soudé, caractérisé par la dureté Hv_5 . En outre, elle nous permet de déterminer les différentes microstructures dans la (Z.A.T) (Fig. 15). [1]

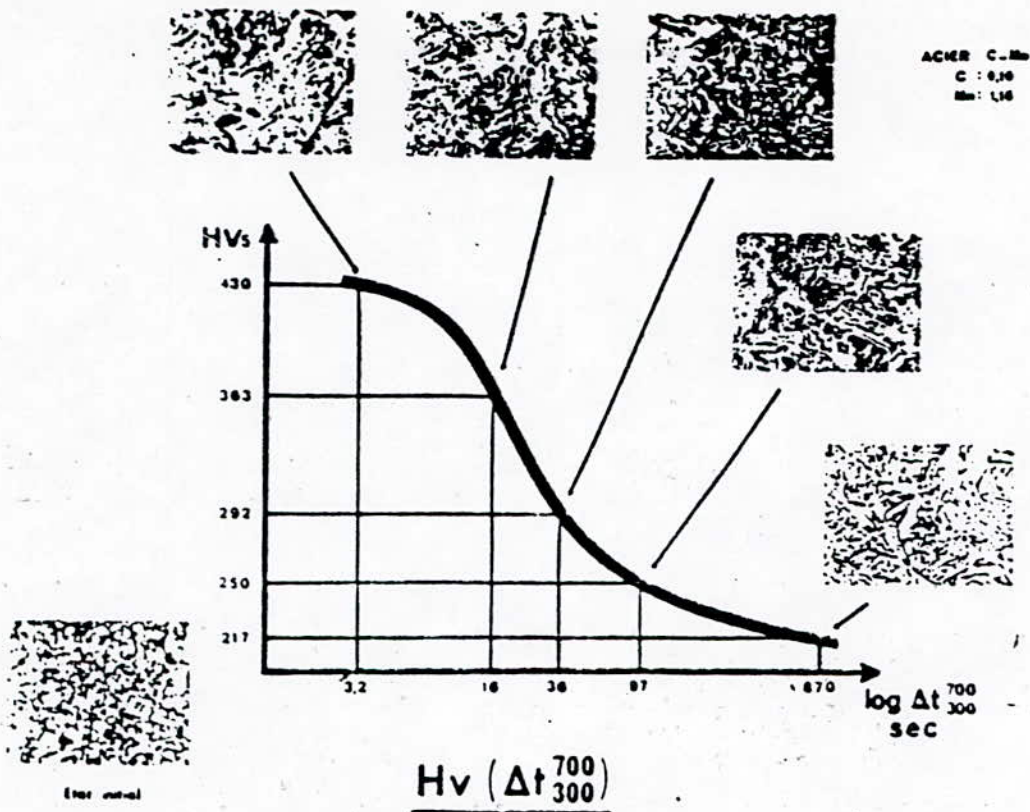


Fig. 15: Relation entre la dureté et la microstructure de la ZAT

Les diagrammes T.R.C ou bien T.R.C.S. font apparaître pour chaque acier trois modes distincts de transformation de l'austénite dont, l'apparition dépend pour un acier donné de la loi de refroidissement à savoir:

A) un mode dit perlitique (ou Ar') où les constituants qui apparaissent sont conformes au diagrammes Fe-Fe₃C. Et apparaissent dans l'ordre indiquée par ce dernier à savoir, ferrite proeutectoïde, puis agrégat ferrite cémentite résultant d'un mécanisme de germination et de croissance de la cémentite. Ce mode qui met en œuvre la diffusion prévaut pour les refroidissements lents, c'est-à-dire, dans la partie droites des diagrammes T.R.C.

B) Un mode dit bainitique (ou Ar'') dont la constitution finale (ferrite et cémentite) est aussi presque conforme au diagramme Fe-Fe₃C, mais la chronologie de la transformation est différente, (la ferrite apparaît aussi par germination et croissance), à partir de l'austenite en retenant momentanément le carbone en solution sursaturée puis, ce carbone précipite sous forme de fines particules .

Ce mode dans lequel intervient aussi la diffusion est favorisé par certains éléments d'alliages, il a lieu pour les lois de refroidissements intermédiaires .

C) un mode martensitique (ou Ar''') se traduisant par la précipitation directe sans diffusion d'un constitution appelée martensite dont, la teneur en carbone est la même que l'austenite mère et qui apparaît brusquement par fractions échelonnées à partir d'une température appelée M_s jusqu'à une température M_f . La transformation martensitique se produit pour les lois de refroidissement les plus rapides, c'est-à-dire, la partie gauche des courbes TRC.

CHAPITRE 4

PARAMETRES DE SOUDAGE

4- PARAMETRES DE SOUDAGES

Les procédés de soudages utilisant l'arc électrique comme source d'énergie demandent d'un certain nombre de variables indépendantes ou non sur lesquelles on peut, plus ou moins, agir en fonction du résultat recherché.

4-1 L'APPORT D'ENERGIE :

Il est généralement exprimé en joule par centimètre de soudure comme suit :

$$E = \frac{U \cdot I \cdot 60}{V} \quad (7)$$

E: joule/centimètre.

U: volt.

I: ampère.

V: centimètre/minute.

L'augmentation de l'énergie mise en jeu étend la zone thermiquement affectée, augmente le temps de séjour à haute température et ralentit le temps de refroidissement (Fig.16).

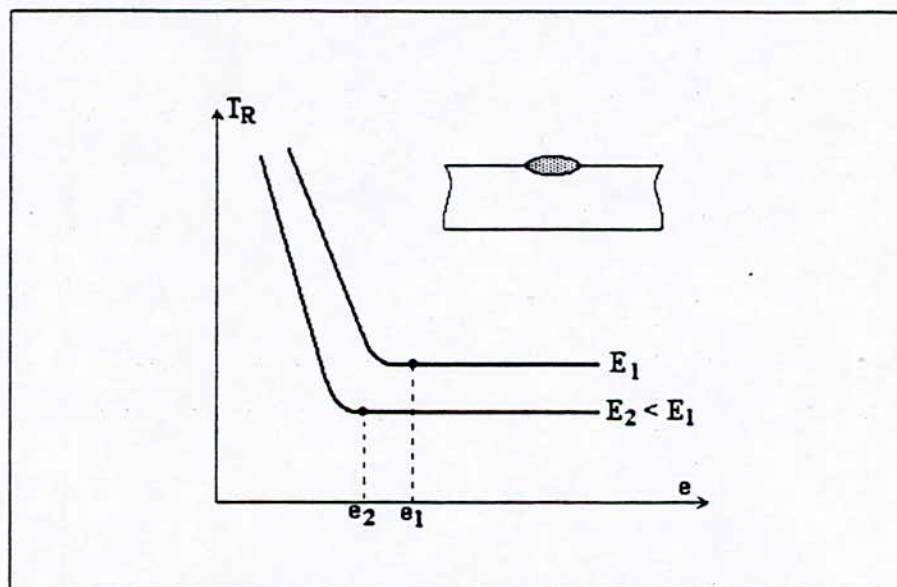


Fig. 16 variation du temps de refroidissement en fonction de l'énergie et de l'épaisseur

4 - 2 La température initiale de la tôle :(température de préchauffage)

La température initiale du métal de base joue un rôle important vis à vis du cycle thermique en soudage puisque le gradient de température en dépend directement. Si, toutes choses égales par ailleurs, on passe, pour la température initial du métal de base θ_0 à θ_p , On obtient au voisinage d'une soudure bout a bout des courbes températures - temps illustrés par la Fig. 17. On lit sur la courbe $\theta=f(t)$ que l'augmentation de la température initiale du métal de base de θ_0 à θ_p conduit à :

- l'augmentation de la température maximale .
- l'augmentation du temps de séjour à haute température .
- l'augmentation du temps de refroidissement .

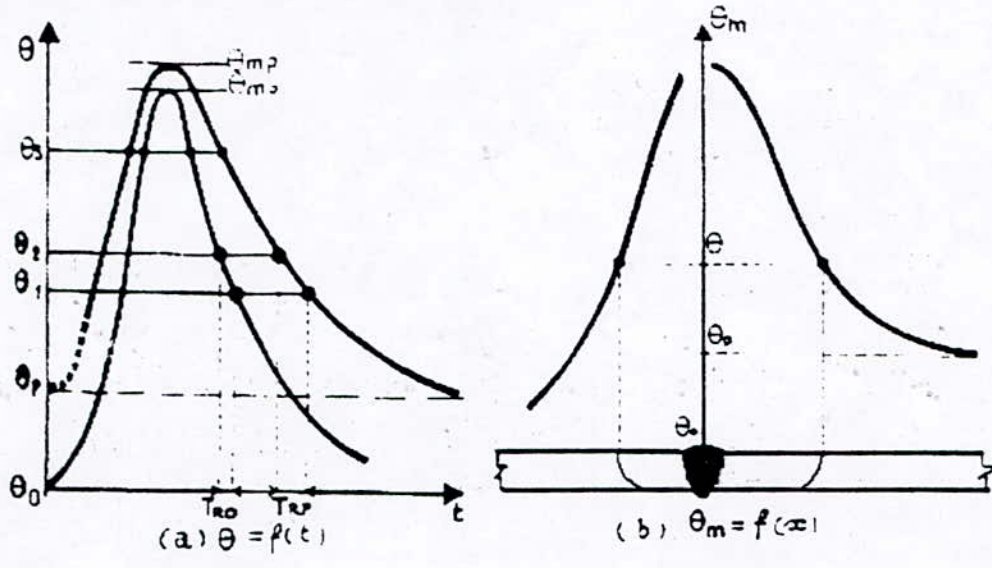


Fig. 17: influence de la température de pré - chauffage sur le cycle thermique et répartition thermique

4-3 Les caractéristiques thermiques du matériau

La nature du métal de base par ces caractéristiques de conductibilité calorifique et de capacité calorifique, qui agisse dans le même sens; à savoir que leur augmentation accroît le gradient de température et par conséquent réduit le temps de séjour à haute température et augmente la vitesse de refroidissement.

En d'autres termes on définit la duffusité thermique par:

$$K = \frac{\kappa}{\rho C} \quad (8)$$

- K: Duffusité thermique cm^2/sec
- κ : conductibilité thermique $\text{cal/ sec .cm .c}^\circ$
- ρ : masse volumique g/ cm^3
- C/ capacité calorifique cal/ g .c° [14]

Ainsi en est-il de l'acier inoxydable par rapport à l'acier ordinaire, ainsi s'explique aussi la difficulté opératoire du soudage à l'arc du cuivre .

4-4 EPAISSEUR DE LA TOLE

L'épaisseur de la tôle joue un rôle dominant dans la configuration du cycle thermique du soudage, à titre d'exemple la fig. 18, illustre l'influence de l'épaisseur sur le cycle thermique dans une soudure effectuée en bout à bout avec un apport d'énergie de l'ordre de 20 KJ/cm sur des tôles de 6 mm, 12 mm, 25 mm d'épaisseur.

On note que lorsque l'épaisseur des plaques augmente :

- la vitesse de refroidissement augmente.
- le temps de séjour à haute température décroît. [15]

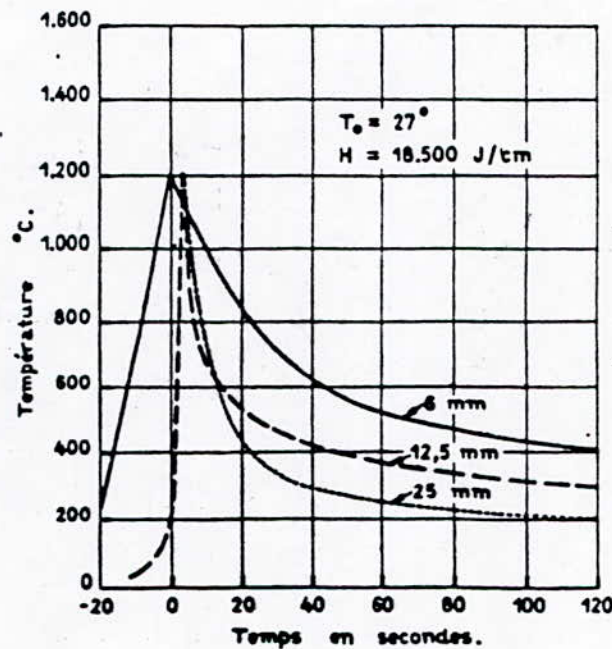


Fig. 5a

Fig 18 Influence de l'épaisseur de la tôle sur le cycle thermique du soudage.

CHAPITRE 5

PROCEDES DE SOUDAGE

-1 CLASSIFICATION DES PROCÉDES DE SOUDAGES

Toute classification des différents procédés est rendue difficile au regard de nombreuses variantes d'un procédé à l'autre, le tableau (1) classifié à partir de la source d'énergie et des éléments de protection. Le nombre entre parenthèses correspond à un code numérique affecté à chaque procédé de soudage par l'A.F.N.O.R (N.F. E 04 021) . [16]

5-2 SOUDAGE A L'ARC ELECTRIQUE

5-2-1 PRINCIPE :

Un générateur de courant électrique, alternatif ou continu permet de produire un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et la pièce. La chaleur dégagée par cette arc électrique fait fondre localement les pièces à souder, créant un bain de fusion et simultanément l'électrode métallique qui fournit le métal d'apport. L'atmosphère gazeuse de l'arc est portée à très haute température (5000° et 8000°) est fortement ionisée. La fig 19 représente la pièce, l'arc électrique, et le transfert du métal d'apport dans le bain de fusion. [12]

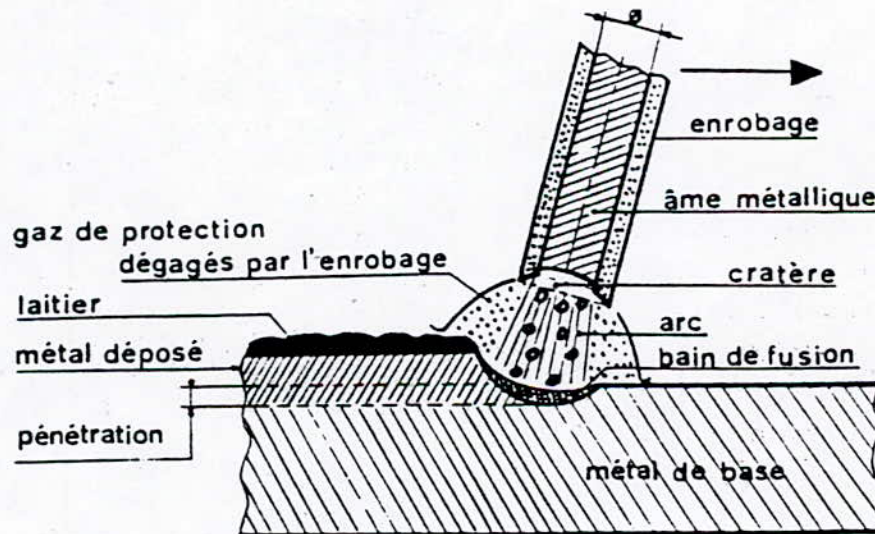


Fig 19 Schéma de principe du soudage à l'arc avec électrode enrobée

SOURCE D'ENERGIE	éléments de protection du joint soudée				
	flux solide	gaz inerte	gaz actif	sous vide	aucune
arc électrique (1)	-Electrodes enrobées (111) -Automatique sous flux solide (121) -M.A.G. avec fil fourré (136) -Electrogaz (75)	-T.I.G.*(141) -M.I.G.** avec fil électrode fusible (131) -Electrogaz (73) -Plasma (15)	-M.A.G.*** avec électrode de fusible (135)		-Soudage des goujons (731) -Arc Electrode au carbone (181) -Par décharge de condensateur
résistance électrique (2)					-Par points(21) -Par brossage (23) -Par étincelage en bout (24) -Résistance pure (25)
optique (7)		-Laser (751)			-Laser (751)
thermo-chimique (3) (7)	-Alumino-thermie(71)	-plasma-arc non transféré	-Oxyacételynique (311) -Oxypropane(312) -Oxydrique (313)		
mécanique (4)				-Par pression à froid (48)	-Par friction (42) -Par pression à froid (48) -Par ultra sons(41) -Par explosion(441) -A la forge

*Tungstène electod-inert gas

**Métal inert gas

***Métal active gas

Tab. 3 classification des procédés de soudage

5-2-2 RÔLE DE L'ENROBAGE

L'enrobage assure les fonctions suivantes :

- Protection du métal en fusion vis - à - vis de l'atmosphère ambiante .
- Diminution de la vitesse de refroidissement (action du laitier) .
- Guidage du métal d'apport lors du transfert vers le joint .
- Maintien du métal fondue en position .
- Ionisation de l'espace électrode /pièces .

◆ 5-2-3 DIFFERANT TYPES D'ENROBAGES :

Parmi les enrobages les plus courants nous distinguons les types suivants :

- ◆ - **Cellulosique** : enrobage à base de cellulose dont la combustion dégage de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone. Cet enrobage donne un arc puissant, facilement contrôlable assurant une pénétration régulière, convient pour le soudage divers et à forte pénétration.
- ◆ - **Basique** : enrobage à base de carbonate de calcium. La teneur en hydrogène dans le métal déposé est inférieure à $5 \text{ cm}^3/100\text{g}$. Cet enrobage permet d'obtenir d'excellentes caractéristiques mécaniques.
- ◆ - **Rutile** : enrobage à base d'oxyde de titane. Cet enrobage permet le soudage en toute position. Ils ne conviennent pas pour les pièces soumises à des contraintes élevées.
- ◆ - **Acide** : enrobage à base d'oxyde de fer et de ferro-alliage. Cet enrobage permet de réaliser une grande vitesse de fusion et convient particulièrement pour les soudures d'angles.
- ◆ - **Oxydant** : enrobage à base d'oxyde de fer donnant de faibles caractéristiques mécaniques mais, un excellent état de surface.
- ◆ - **A haut rendement** : enrobage très épais (3mm) comportant un fort pourcentage de poudre métallique (Cr, Ni, Mo). Il permet d'obtenir un rendement élevé (150%) et des caractéristiques mécaniques adaptées. [7]

5-2-4 SYMBOLISATION :

la norme N.F. A.81-309 [16] définit la désignation des électrodes enrobées.
exemple de désignation normalisée :

E	51	5	4	4	120	2	0	BH
	a		b	c	d	e	f	g

a: Caractéristique mécanique du métal de base.

b: Température correspondante à une énergie d'impact minimale de $KV=47 \text{ J}$.

c: Type d'enrobage.

d: Position de soudage.

f: Courant de soudage.

g: Teneur en hydrogène diffusible.

5-3 MATERIEL DE SOUDAGE

La structure générale d'un poste de soudage électrique à l'arc comprend :

la source de courant.

les organes de commandes.

l'outillage de soudage.

éventuellement la source de gaz ou de flux.

5-4 IDENTIFICATION D'UN POSTE DE SOUDAGE.

Tout poste de soudage comprend une plaque signalétique sur laquelle sont mentionnées les données relatives à l'exploitation avec la norme N.F. A. 85-011. [16]

Parmi les caractéristiques du poste à soudage, nous retiendrons :

Le facteur de marche : c'est - à - dire le temps pendant lequel le poste peut débiter une intensité donnée sans échauffement excessif. Quand on dit qu'un poste débite 200A à 70% multi - horaire cela signifie qu'il peut fonctionner normalement 3.5 minutes toutes les 5 minutes.

La tension :

- a vide celle qu'on mesure du poste de soudage en circuit ouvert .
- en charge :celle qu'on mesure entre l'électrode et la pièce en régime de fonctionnement .

L'intensité

- de soudage celle:fournie par le poste en régime de fonctionnement normale.
- de court-circuit :celle mesurée lorsque le circuit est fermé sans qu'il y ait toutefois production d'arc.

5-4-1 Caractéristique de la source de courant

La tension diminue lorsque l'intensité croit ,une telle caractéristique est dite plongeante. L'intersection avec l'axe des ordonnées donne la tension à vide U_0 et avec l'axe des abscisses l'intensité de court - circuit.

5-4-2Caractéristique de l'arc.

L'allure de la caractéristique de l'arc varie avec l'atmosphère dans laquelle l'arc jaillit celui-ci.

5-4-3Point de fonctionnement

Au cours du soudage ,l'intensité de l'arc est donnée par le point F, intersection des caractéristiques relatives de la source 1 avec celle de l'arc 2

F. est appelé point de fonctionnement (Fig. 20) .[7]

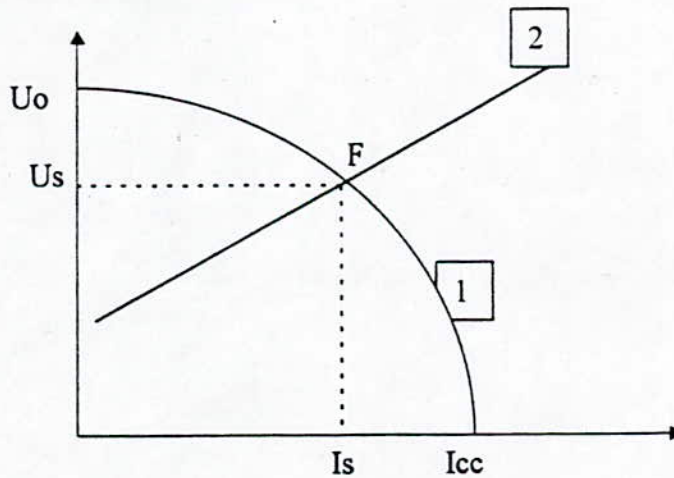


Fig 20 point de fonctionnement

**PARTIE
EXPERIMENTALE**

CHAPITRE 1

MODE OPERATOIRE

1 DENTIFICATION DU METAL DE BASE

1-1 CHOIX DU METAL DE BASE

Le choix du métal de base en l'occurrence le E 24 est motivé par 2 raisons :

- 1- sa bonne soudabilité.
- 2- sa disponibilité sur le marché (offert gracieusement par l'ENCC de Hussein-dey).

1-2 Caractérisation du métal de base

1-2-1 Analyse chimique

On a découpé de la tôle d'épaisseur 6 mm un échantillon brut, puis procéder à un usinage au tour jusqu'à l'obtention d'un disque de 25 mm de diamètre. Après décapage mécanique et nettoyage chimique, l'échantillon a subi une analyse spectrométrique au laboratoire de métallurgie de la S.N.V.I. de Rouiba. Cette analyse a donné la composition suivante:

éléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
(%)	0.16	0.48	0.14	0.002	0.004	0.02	0.001	0.023	0.095

Tab 4 composition chimique réelle.

Les résultats du tableau ci-dessus confirme ceux indiqué par la norme N.F-501 (S235-JR)

éléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
(%) max	0.18	-	-	0.045	0.045	-	-	-	-

Tab. 5 composition chimique selon la norme

1-2-2 Essai mécanique: essai de traction

Sur une chute de tôle de 6 mm d'épaisseur, on a découpé à froid deux barreau de dimension (140mm . 20mm) .Ces barreaux ont été ensuite usinée par fraisage jusqu'à obtention des dimensions fixée par la norme N.F. A 03-151.

Les éprouvettes ainsi obtenues ont subies un essai de traction jusqu'à rupture au niveau du laboratoire de FRANTZ- FANON (ex: H.C.R) la moyenne des résultats obtenus est mentionnée dans le tableau suivant

$\sigma_{\text{élastique}} (KN/cm^2)$	$\sigma_{\text{rupture}} (KN/cm^2)$	$\sigma_{\text{maximale}} (KN/cm^2)$	A(%)
27.89	29.18	37.75	38

Tab.6 caractéristiques mécaniques du métal de base

Le tableau ci-dessous indique les résultats mentionnés au niveau de la norme N.F. 35-501.

$\sigma_{\text{élastique min.}} (KN/cm^2)$	$\sigma_{\text{mécanique min.}} (KN/cm^2)$	A(%) min.
16.5	34-46	22

Tab.7 caractéristiques normalisées du métal de base

1-3 DECOUPAGE ET USINAGE DES EPROUVETTES

Nous avons prélevé sur des chutes de tôles trois éprouvettes de chaque épaisseur, de dimension (500mm x 300mm), voir (Fig. 21) ci-dessous.

1-3-1 Découpe des éprouvettes

Les éprouvettes de même épaisseur sont repérées à l'aide de trois lettres A , B, C et poinçonnée, à froid . Nous disposons donc de neuf éprouvettes désignées comme suit 6A 6B 6C 12A 12B 12C 25A 25B 25C . Les chiffres 6, 12, 25 indiquent l'épaisseur à souder, alors que les lettres A, B, C indiquent l'énergie de soudage .

Une découpe au chalumeau s'est faite au milieu de chaque éprouvette dans le sens de la longueur suivie d'un meulage des bords afin d'éliminer les traces de coupes.

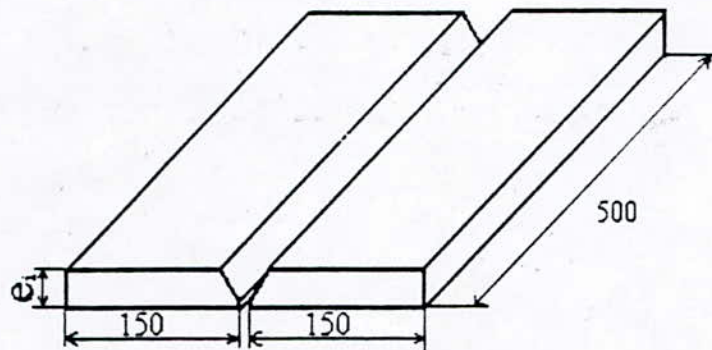


Fig.21 éprouvette avant soudage .

1-3-2 USINAGE ET NETTOYAGE DES CHANFREINS

Le chanfrein pour chacune des éprouvettes est choisi principalement en fonction de l'épaisseur de la tôle [16]. Nous avons réalisé un chanfrein en V pour les épaisseurs de 6mm et 12mm, pour la dernière épaisseur de 25mm, nous avons choisi un chanfrein en X .

L'ouverture de ces chanfreins est d'un angle de 60°.

Pour éviter toute contamination du bain fondue au cours du soudage, un décapage mécanique suivi d'un nettoyage chimique a été effectué sur les bords des joints à souder .

1-4 CHOIX DU PROCEDE DE SOUDAGE

Notre choix s'est porté sur le soudage à l'arc car ce dernier est largement utilisé dans la construction des assemblages. Le choix étant porté au début sur la machine M.I.G. de soudage du C.S.C (Centre de Soudage de Chéraga) . Mais , ayant constaté, que cette machine ne pouvait pas souder des tôles d'épaisseur supérieur à 10 mm, ce procédé a été écarté, et nous avons adopté le procédé du soudage manuel.

1-5 IDENTIFICATION DU METAL D'APPORT (M.A)

1-5-1 CHOIX DU METAL D'APPORT

Le métal d'apport est une électrode basique OK 4800 fournie par la S.N.S. d'el -eulma. Elle est la plus adaptée pour le soudage de l'acier E 24 .Les caractéristiques de son enrobage donnent une meilleure qualité du joint soudé.

1-5-2 COMPOSITON CHIMIQUE DU METAL D'APPORT

la composition du métal d'apport est:[17]

éléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
%	0.1	0.5	0.9	-	-	-	-	-	-

1-5-3 CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU METAL D'APPORT

Ces électrodes nous permettent d'obtenir un métal déposé dont les caractéristiques mécaniques sont:[17]

$E(\text{KN/cm}^2)$	$R(\text{KN/cm}^2)$	A	résilience KV
410 à 450	510 à 550	5 30%	+20° 150 J -20° 80 J

1-6 ÉLABORATION DES FICHES TECHNIQUES DE SOUDAGE

Des fiches techniques de soudage (FTS) ont été élaborées avant l'opération de soudage. Ces fiches indiquent l'ensemble des paramètres de soudage ainsi que les conditions dans lesquelles s'est déroulée cette opération(voir ci joint les F.T.S. du 1.....9)

chaque opération de soudage comprend les phases suivantes:

Alignement et pointage des pièces à souder.

Réglage et pointage des pièces à souder.

Soudage .

Elimination du laitier après chaque passe soudée .

En parallèle un certain nombre de mesures ont été prises tel les que I_s , U_s , T_s :

I_s : intensité de soudage.

U_s : tension de soudage.

T_s : temps de soudage .

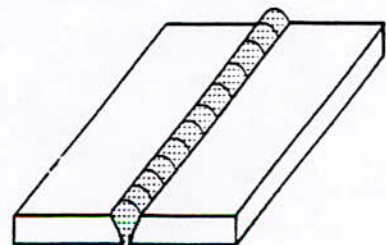


fig.21 éprouvette après soudage

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N° 1

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S.EL-EULMA .
JOINT	POSITION : à plat

Chanfrein : en V à $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$

Repérage de éprouvette : 6A

Dimension de l'éprouvette: 500mm×300mm×6mm

Traitement avant soudage

Pré- chauffage(Métal de base): sans
Température d'étuvage: (métal d'apport): entre 200° C et 300° C
Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures
Température d'utilisation: (métal d'apport): entre 80° C et 150° C

Paramètres de soudage

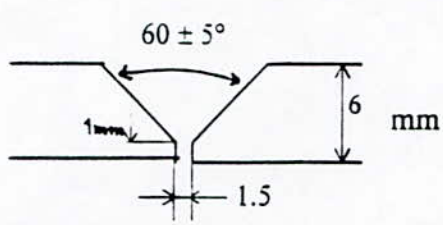
procédé	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de l'électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	100	24	3' 09"	2.5	électrode à relier au pole positif
	N° 2	120	22	3' 33"	3.25	

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N° 2

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S EL-EULMA
JOINT 	POSITION : à plat

Chanfrein : en V à $60^\circ \pm 5^\circ$
Dimension de l'éprouvette: 500mm×300mm×6mm

Repérage de éprouvette : 6_B

Traitement avant soudage

Pré- chauffage(Métal de base): sans
Température d'étuvage: (métal d'apport): entre 200° C et 300° C
Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures
Température d'utilisation: (métal d'apport): entre .80° C et 150° C

Paramètres de soudage

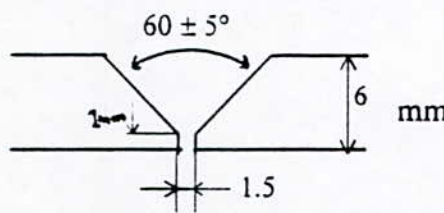
procédé	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	120	21	2' 48"	2.5	électrode à relier au pole positif
	N° 2	140	22	2' 55"	3.25	

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N° 3

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S EL-EULMA
JOINT 	POSITION : à plat

Chanfrein : en V à $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Dimension de éprouvette: 500mm×300mm×6mm

Repérage de éprouvette : 6c

Traitement avant soudage

Pré- chauffage(Métal de base): sans
Température d'étuvage: (métal d'apport): entre 200° C et 300° C
Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures
Température d'utilisation: (métal d'apport): entre .80° C et 150° C

Paramètres de soudage

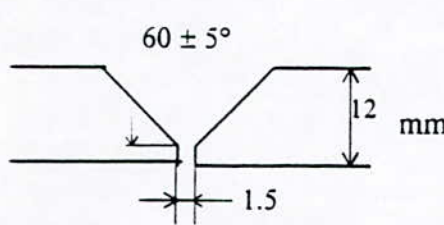
procédé	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	90	24	2' 30"	2.5	électrode à relier au pole positif
	N° 2	120	21	3' 06"	3.25	

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N°4

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S EL-EULMA
JOINT 	POSITION : à plat

Chanfrein : en V à $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Dimension de éprouvette:500mm×300mm×12mm

Repérage de éprouvette : 12_A

Traitement avant soudage

Pré- chauffage(Metal de base): sans
Température d'etuvage: (metal d'apport): entre 200° C et 300° C
Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures
Température d'utilisation: (métal d'apport): entre .80° C et 150° C

Paramètres de soudage

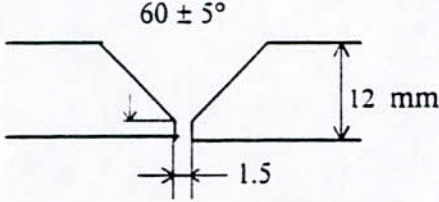
procède	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	100	26	3' 20"	2.5	électrode à relier au pole positif
	N° 2	140	24	4' 09"	3.25	
	N°3	190	24	3' 29"	4	
	N°4	160	22	4'16"	4	

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N° 5

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S EL-EULMA
JOINT 	POSITION : à plat

Chanfrein : en V à $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Dimension de éprouvette: 500mm×300mm×12mm

Repérage de éprouvette : 12 B

Traitement avant soudage

<p>Pré- chauffage(Metal de base): sans Température d'étuvage: (metal d'apport): entre 200° C et 300° C Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures Température d'utilisation: (métal d'apport): entre .80° C et 150° C</p>

Paramètres de soudage

procède	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	90	22	5' 28	2.5	électrode à relier au pole positif
	N° 2	130	22	4' 12	3.25	
	N°3	170	22	2' 52	4	
	N°4	170	21	2' 51	4	

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N° 6

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S EL-EULMA
JOINT	POSITION : à plat

Chanfrein : en V à $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Dimension de l'éprouvette: 500mm×300mm×12mm

Repérage de l'éprouvette : 12_C

Traitement avant soudage

Pré- chauffage(Metal de base): sans
Température d'étuvage: (metal d'apport): entre 200° C et 300° C
Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures
Température d'utilisation: (métal d'apport): entre .80° C et 150° C

Paramètres de soudage

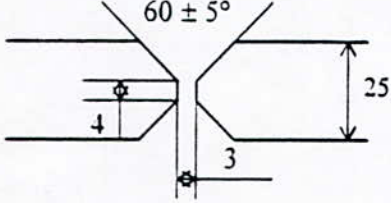
procordé	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	90	24	3' 28	2.5	électrode à relier au pole positif
	N° 2	130	22	2' 44	3.25	
	N°3	180	23	2' 39	4	
	N°4	170	22	4' 09	4	

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N° 7

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S EL-EULMA
JOINT 	POSITION : à plat

Chanfrein : en X à $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$

Repérage de éprouvette : 25A

Dimension de l'éprouvette:500mm×300mm × 25mm

Traitement avant soudage

Pré- chauffage(Metal de base): sans
Température d'étuvage: (metal d'apport): entre 200° C et 300° C
Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures
Température d'utilisation: (métal d'apport): entre .80° C et 150° C

Paramètres de soudage

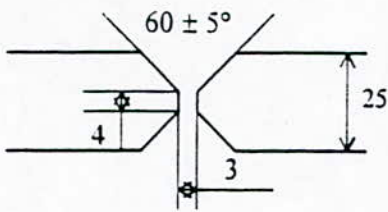
procède	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	120	20.5	5'33"	3.25	électrode à relier au pole positif
	N°2	190	22.5	3'56"	4	
	N°3	150	24	4'03"	3.25	
	N°4	180	24	4'09"	4	
	N°5	180	23	5'08"	4	
	N°6	170	21	5'19 "	4	
	N°7	170	21	4'20"	4	
	N°8	170	21	4'43"	4	

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N° 8

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S EL-EULMA
JOINT 	POSITION : à plat

Chanfrein : en X à $60^\circ \pm 5^\circ$
Dimension de éprouvette: 500mm×300mm×25mm

Repérage de l'éprouvette: 25_B

Traitement avant soudage

Pré- chauffage(Metal de base): sans
Température d'étuvage: (metal d'apport): entre 200° C et 300° C
Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures
Température d'utilisation: (métal d'apport): entre .80° C et 150° C

Paramètres de soudage

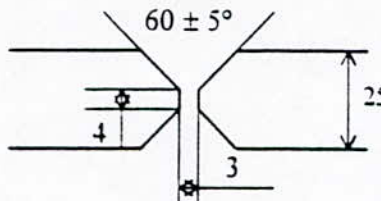
	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	140	23	5'14"	3.25	électrode à relier au pole positif
	N° 2	190	22.5	4'47"	4	
	N°3	160	24	4'51"	3.25	
	N°4	190	23	3'43"	4	
	N°5	190	23	4'13"	4	
	N°6	190	22	4'03"	4	
	N°7	190	22	4'35"	4	
	N°8	185	22	4'59"	4	

FICHE TECHNIQUE DE SOUDAGE

PROCEDE DE SOUDAGE : Arc manuel à électrode enrobée
F.T.S N° 9

ATELIER: Soudo-mecanique
 C.S.C Chéraga

POSTE DE SOUDAGE : S.A.F

METAL DE BASE	METAL D'APPORT
Nuance : E 24 Fournisseur: E.N.C.C Cote -rouge ; Hussein- Dey	Électrode : à enrobage basique :OK-48.00 Fil: Flux: FOURNISSEUR: S.N.S EL-EULMA
JOINT 	POSITION : à plat

Chanfrein : en X à $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Dimension de l'éprouvette:500mm×300mm×25mm

Repérage de éprouvette : 25 C

Traitement avant soudage

<p>Pré- chauffage(Metal de base): sans Température d'étuvage: (metal d'apport): entre 200° C et 300° C Durée de maintien: (Métal d'apport) 02 heures Température d'utilisation: (métal d'apport): entre .80° C et 150° C</p>

Paramètres de soudage

procède	passe	Intensité (A)	Tension (V)	Temps de soudage (mn)	Diamètre de électrode	Observation
manuel à électrode enrobée	N°1	130	20.5	5' 44"	3.25	électrode à relier au pole positif
	N° 2	170	22	4' 46"	4	
	N°3	150	23	4' 25"	3.25	
	N°4	170	22	4' 56"	4	
	N°5	180	22	5' 34"	4	
	N°6	180	23	4' 09"	4	
	N°7	180	22	4' 49"	4	
	N°8	180	22		4	

1-7 CALCUL DE L'ÉNERGIE DE SOUDAGE

1-7-1 ÉNERGIE NOMINALE : (E_n)

C'est l'énergie fournie au niveau de l'arc pour exécuter une soudure elle est fonction de la tension d'arc entre les deux électrodes (U), de l'intensité du courant de soudage (I) et de la vitesse de soudage (V) vitesse à laquelle s'effectue le cordon de soudure.

$$E_n = \frac{U \cdot I}{V} \quad (7)$$

E_n : [joule/cm]

U : [V]

I : [A]

V : cm/sec

Dans un cordon de soudure effectué en plusieurs passes, l'énergie totale est exprimée par la relation :

$$E_n = \sum_i^n E_i \quad (9)$$

tel que n : nombre de passe

$n=2$ pour $e=6\text{mm}$

$n=4$ pour $e=12\text{mm}$

$n=8$ pour $e=25\text{mm}$

1-7-2 ÉNERGIE 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, convection et conduction.

Le rendement énergétique de l'arc varie en fonction :

- Du procédé de soudage.
- De la nature de courant.
- Du matériau.
- De l'épaisseur des pièces à souder.

En effet le rendement d'arc (η) sera différent si l'on soude avec le procédé sous flux solide (arc submergé) ou avec le procédé avec électrodes enrobées, ou si l'on soude de l'acier ou de l'aluminium (phénomène de réflexion).

Pour l'énergie dissipée (E_d) dans le cordon de soudure, on aura :

$$E_d = E_n \cdot \eta \quad (10)$$

Pour les aciers soudés avec le procédé de l'arc électrique $\eta=0.70$ à 0.85 . [12]

Nous avons pris $\eta=0.75$

1-7-3 ÉNERGIE ÉQUIVALENTE (E_q): Elle est définie par la relation

$$E_q = E_n \cdot K \cdot \eta \quad (11)$$

où « K » est un coefficient de correction qui tient compte de la géométrie du joint à souder. d'après la norme N.F A 36.000 [16] :

- $K = 1.5$ pour un chanfrein en V d'un angle de 60° .
- $K = 0.75$ pour un chanfrein en X d'un angle de 60° .

1-7-3 Résultats

En appliquant les formules (7) (8) et (9) on trouve les énergies correspondantes pour chaque tôles qui sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

échantillon.	6A	6B	6C	12A	12B	12C	25A	25B	25C
énergie(KJ/cm)	22.85	21.65	18.27	69.74	59.03	62.25	91.47	99.38	99.91

Tab. 9 énergies de soudages des tôles

1-8 Découpage des tôles

Chaque tôle soudée a été découpée en plusieurs éprouvettes selon le schéma suivant:

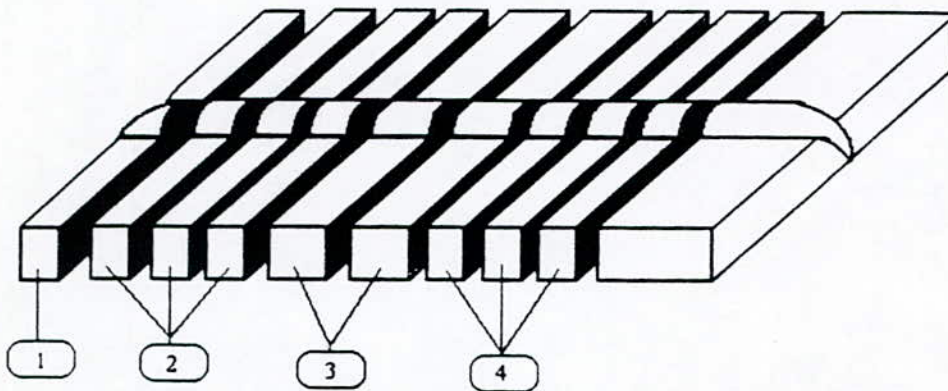


Fig 22 mode de découpage des tôles

1- Epreuve à rejeter: état non stationnaire

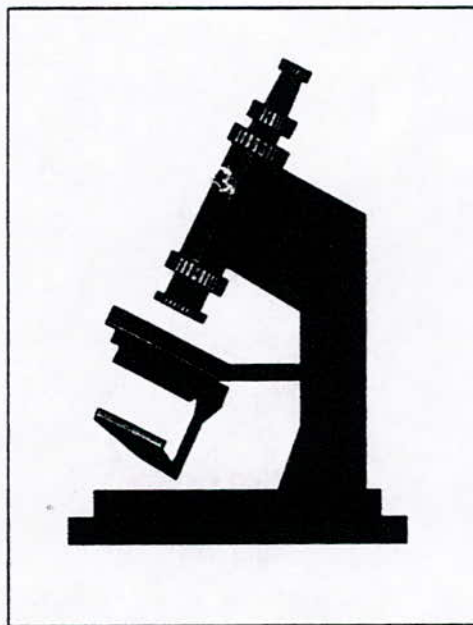
2- Epreuves destinées à :

- la macrographie
- la micrographie
- taille moyenne des grains
- profil de carbone
- microduretés

3- Epreuves de traction

4- Epreuves de résilience.

CHAPITRE 2
INVESTIGATION
METALLOGRAPHIQUE



2-1 EXAMEN MACROGRAPHIQUE

2-1-1 INTRODUCTION

L'attaque chimique d'un échantillon pour relever la structure macrographique fait apparaître entre autre les zones constitutives de la soudure qui se manifestent par des intensités d'attaque ou de coloration différentes les unes des autres. Ces différences traduisent les variations de constitution et de structure engendrés par l'opération de soudage.

De plus, l'examen macrographique fournit des informations sur les anomalies géométriques ou physiques des soudures, et d'autre part, sur leurs conditions d'exécutions. [17]

Compte tenue des renseignements qu'il fournit, l'examen macrographique des soudures est utilisé pour diverse raisons. Tout d'abord, l'examen Macrographique précède et guide l'examen micrographique quel que soit l'objet de dernier (recherche, expertise, contrôle ou renseignement). De même, la macrographie est indispensable pour situer les éprouvettes d'essais, ainsi est-il des essais de dureté sous cordon et des divers essais mécaniques [9].

2-1-2 DÉCOUPE DES ÉCHANTILLONS

De chaque éprouvette soudée nous avons prélevé, à l'aide d'une coupe transversale (à froid) au cordon de soudure, un échantillon de 50 mm . 10mm (Fig. 23).

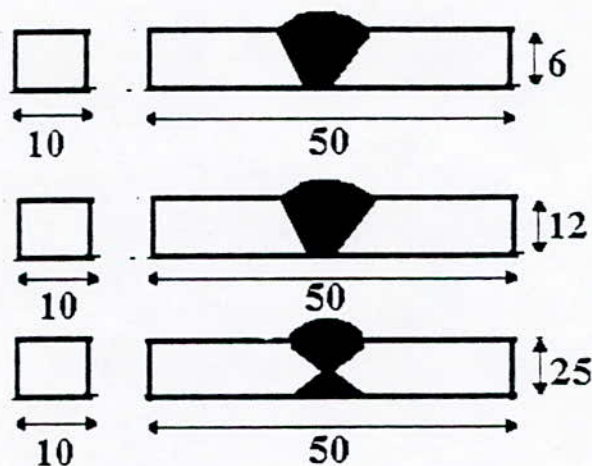


Fig .23 dimension des éprouvettes de la macrographie

2-1-3 POLISSAGE:

Nous avons procédé à un polissage grossier des échantillons avec du papier abrasif de granulométrie croissante 80 puis 120 et enfin 180.

2-1-4 ATTAQUE CHIMIQUE

Une solution d'attaque chimique spécifique a été choisit pour l'observation macroscopique, il s'agit d'un réactif composé de 20ml d'acide nitrique (HNO_3) dilué dans 100 ml d'eau distillée. La durée d'attaque est de 2min suivie d'un rinçage à l'eau distillée.

2-1-5 RÉALISATION DES MACROGRAPHIES

Grâce à un appareil photographique standard, nous avons pris des macrographies de chaque échantillon d'éprouvette attaquée avec un grossissement de 3.28, soit 27 macrographies. Pour des raisons d'espace on retiendra seulement ces trois macrographies représentatives représentées ci-dessous (Fig 24).





Fig 24 : macrographie des joints soudés pour les échantillons d'épaisseur 25, 12, et 6 mm respectivement

2-1-6 INTERPRÉTATION DES MACROGRAPHIES

La macrographie relève l'existence de 4 zones (Fig 25), à savoir :

- 1- la zone fondue : Z.F.
- 2 - La zone de liaison : Z.L.
- 3 - La zone affectée thermiquement : Z.A.T.
- 4 - Le métal de base : M.B.

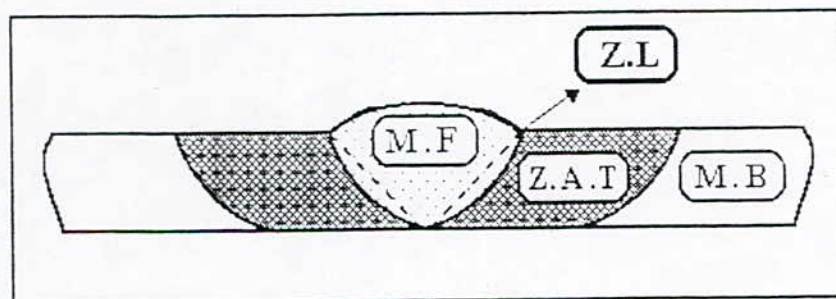


Fig 25 macrographie d'un joint soudée

2-1-7 CALCUL DE L'ÉTENDUE DE LA Z.A.T

Grâce aux macrographies, on a calculé sur chaque échantillon l'étendue de la Z.A.T. Le tableau ci-dessous donne la valeur moyenne de cette étendue pour chaque échantillon

éprouvette	6A	6B	6C	12A	12B	12C	25A	25B	25C
étendue (mm)	2.23	2.02	1.74	1.39	0.92	1.13	0.95	1.04	1.06
énergie (kJ/cm)	22.85	21.65	18.27	69.74	59.03	62.25	91.47	99.38	99.91

Tab 10 Variation de l'étendue de la ZAT en fonction de l'énergie

2-1-8 CALCUL DE LA SURFACE DE LA ZAT

A l'aide d'un planimètre, nous avons pu mesurer la surface de la Z.A.T de chaque échantillon. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

éprouvette	6A	6B	6C	12A	12B	12C	25A	25B	25C
surface (cm ²)	34.95	34.85	26.5	59	36.5	57	75	91.5	93
énergie (kJ/cm)	22.85	21.65	18.27	69.74	59.03	62.25	91.47	99.38	99.91

Tab. 11 surface de la ZAT

2-2 INVESTIGATION MICROSCOPIQUE.

2-2-1 POLISSAGE

Nous avons procédé à un polissage des échantillons avec du papier abrasif de granulométrie croissante 120-180-320-400-600-800-1000 et enfin 1200, puis nous avons continué le polissage avec de l'alumine dont la dimension est 1µm puis 0.05µm.

2-2-2 ATTAQUE CHIMIQUE

Une attaque chimique au nital (4.5ml d'acide nitrique +100ml d'alcool éthylique) suivie d'un rinçage à l'eau distillée.

2-2-3 REALISATION DES MICROGRAPHIES

A l'aide d'un microscope optique de marque (ZEISS), nous avons pris les microstructures des différentes régions d'un joint de soudure de nos échantillons avec des grossissements de 50, 200, 400, et enfin 1000. La Fig 26 schématise les différentes microstructures d'un joint de soudure .

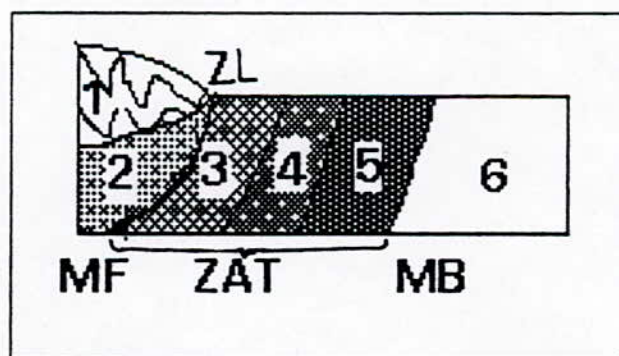


Fig .26 microstructure d'un joint soudé

-METAL FONDU (MF)

- 1-zone basaltique : structure dendritique .
- 2-zone initialement basaltique normalisée par la dernière passe .

-ZONE AFFECTEE PAR LA CHALEUR (ZAT)

- 3-zone de surchauffe : structure de ferrite aciculaire .
- 4-zone austénitisée : structure ferrito - perlitique à grains fins .
- 5-zone partiellement austénitisée : structure ferrito - perlitique à grains fins (perlite régénérée) .

-METAL DE BASE (MB)

- 6-zone non affectée par la chaleur .

-ZONE DE LIASON (ZL)

- 7- interface ZF / ZAT .

Ceci est en parfait accord avec la théorie, notamment la microstructure d'un joint soudé décrite par Ashby et Easterling [18] .

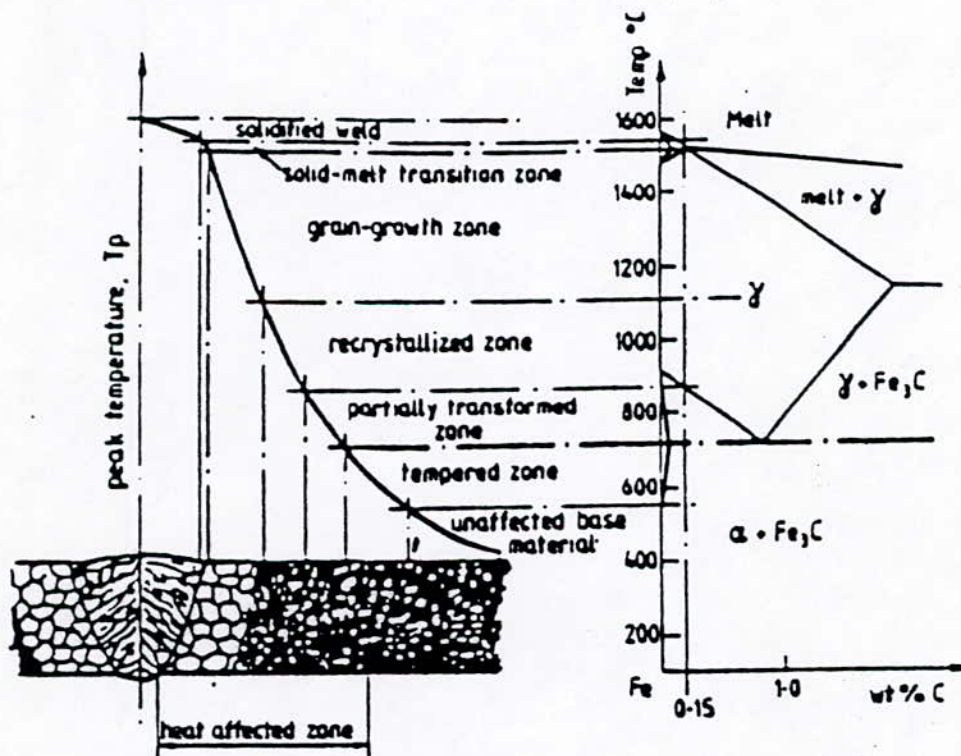
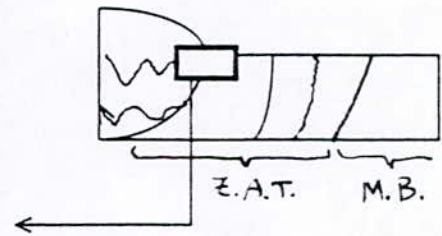


Fig26 -bis- Microstructure d'un joint soudé selon Ashby et Easterling [18]

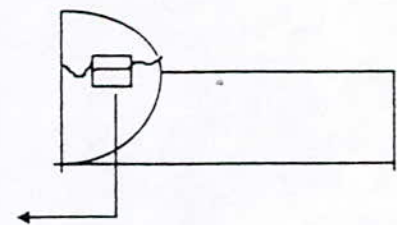
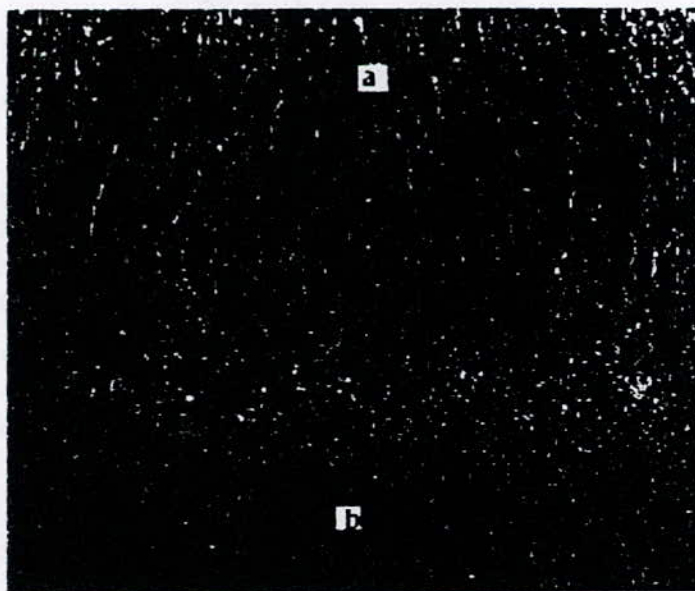
Les photos ci-dessous montre bien ces microstructures :



N° 1

G=50

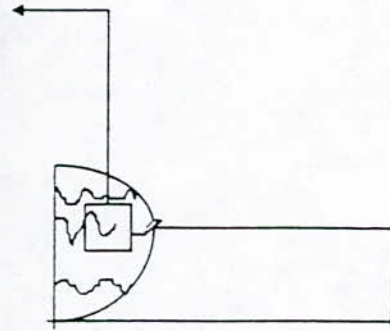
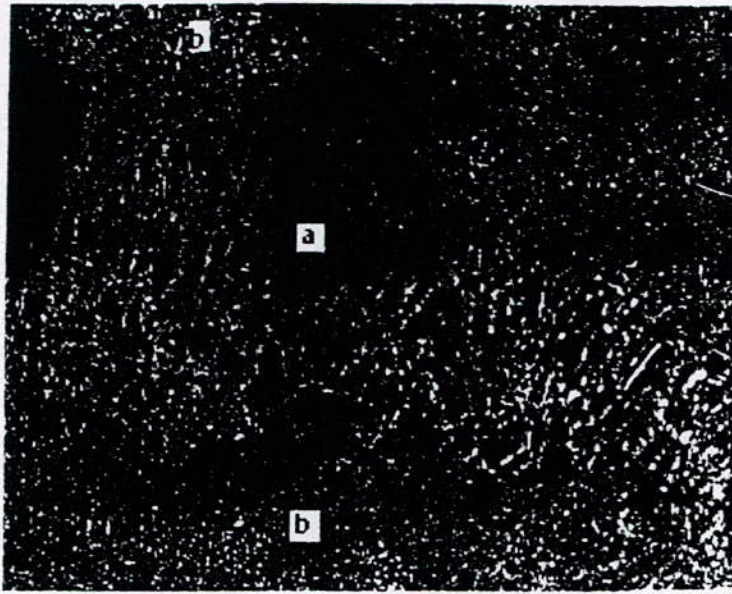
- a- zone basaltique : (Z.F)
- b- zone surchauffée : (ZAT)
- c- zone austénitisée : (ZAT)
- d- zone partiellement austénitisée : (ZAT)



N° 2

G=50

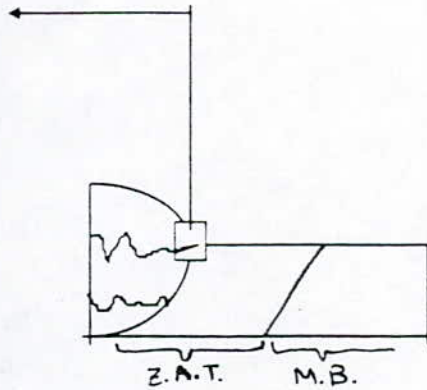
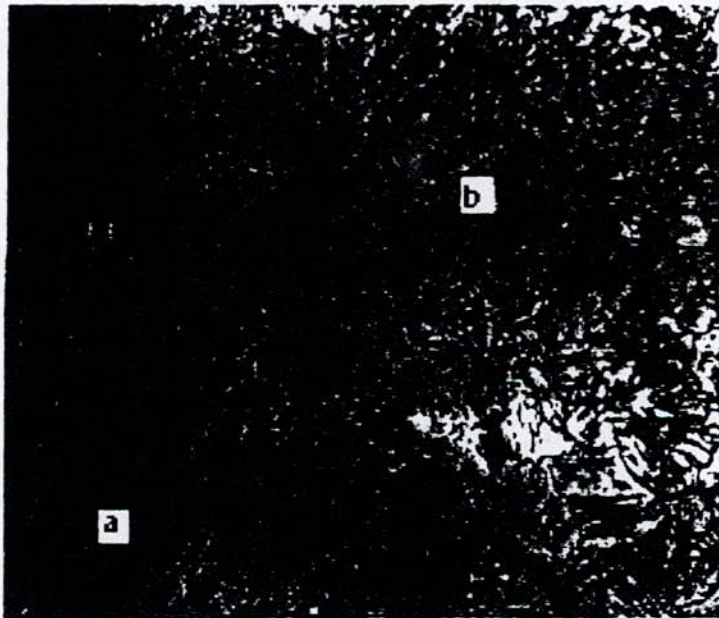
- a- zone basaltique (Z.F.)
- b- zone initialement basaltique normalisée par la dernière passe (Z.F.)



N°3

G=50

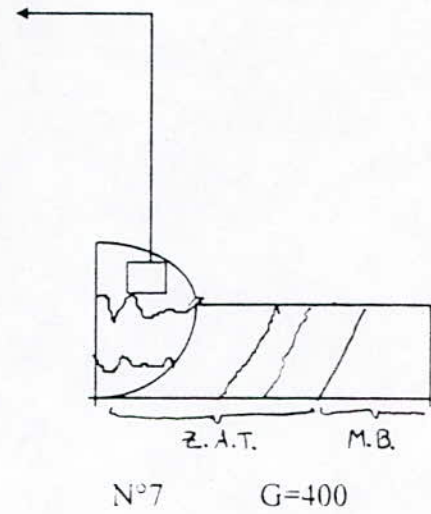
a- zone basaltique (z.f.)
 b- zone normalise par la passe suivante (z.f.).



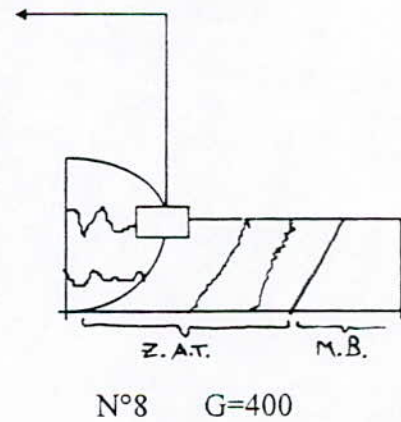
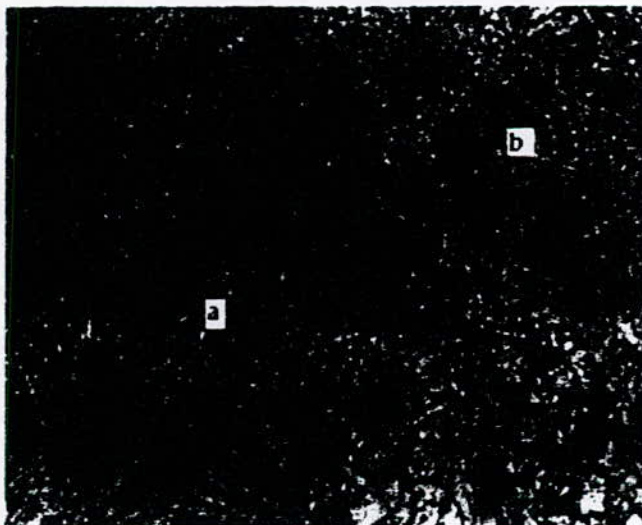
N°4

G=200

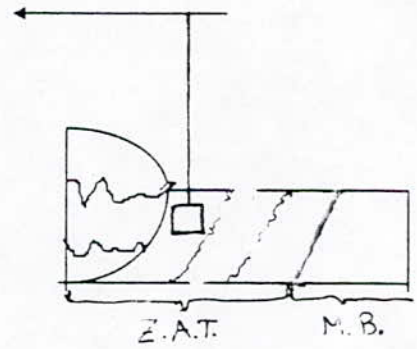
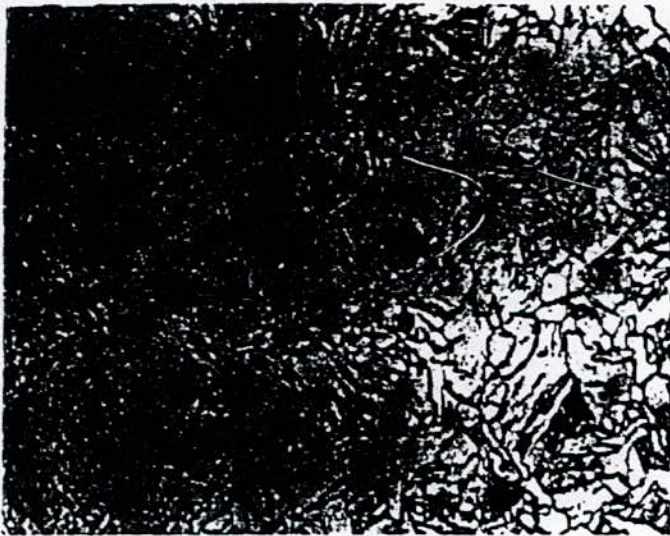
a- zone basaltique (z.f.)
 b- zone surchauffée (z.a.t.)



Zone fondue : structure basaltique(structure dendritique),



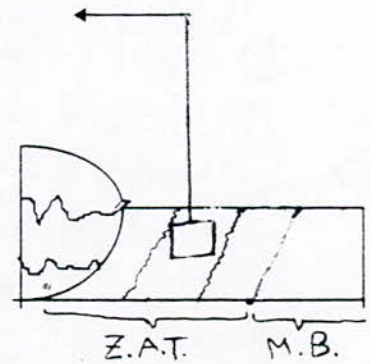
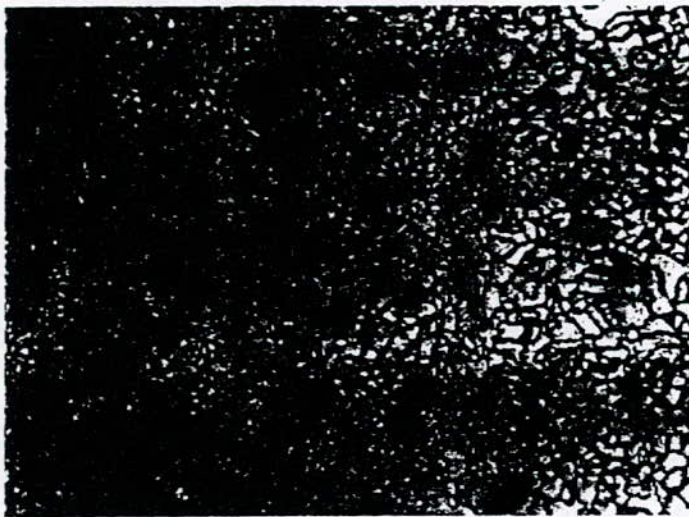
a.-ZF: structure dendritique .
 b.- ZAT : zone de surchauffe : gros grains .



N°9

G=400

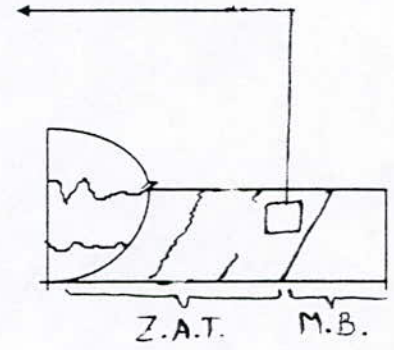
ZAT / zone surchauffé (gros grains) .



N° 10

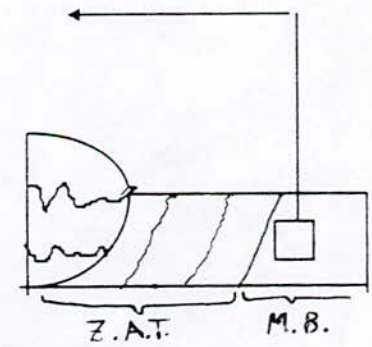
G=400

ZAT / zone austenitisée
(grains fins)



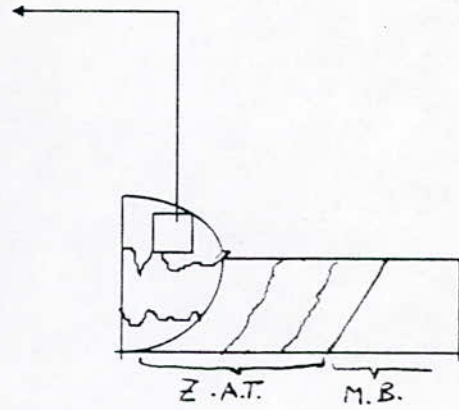
N°11 G=400

ZAT/ zone partiellement austenitisée : structure ferrito - perlitique
(perlite régénérée)



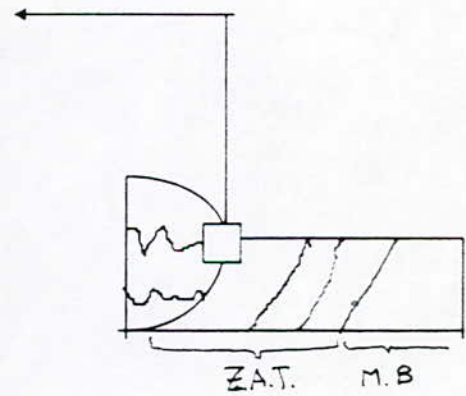
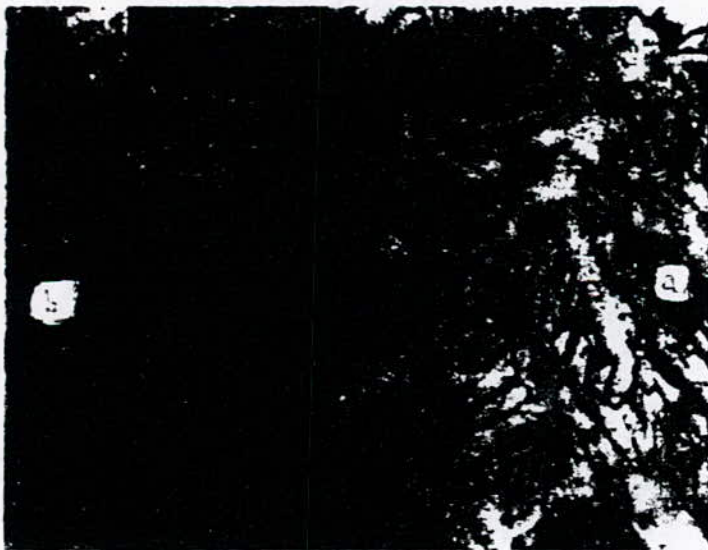
N°12 G=400

MB: structure ferrito-perlitique



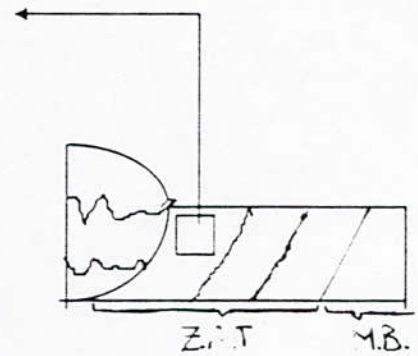
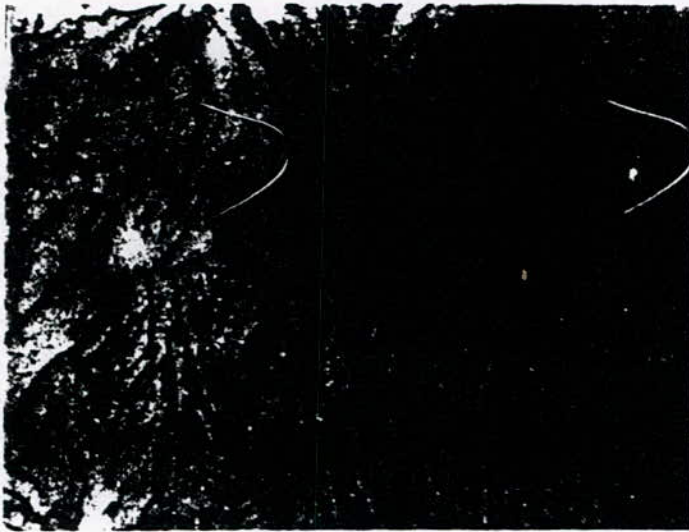
N°13 G=1000

Z.F. / structure basaltique (structure dendritique)



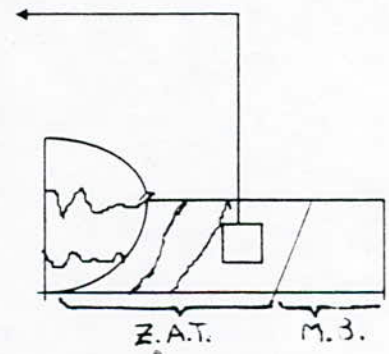
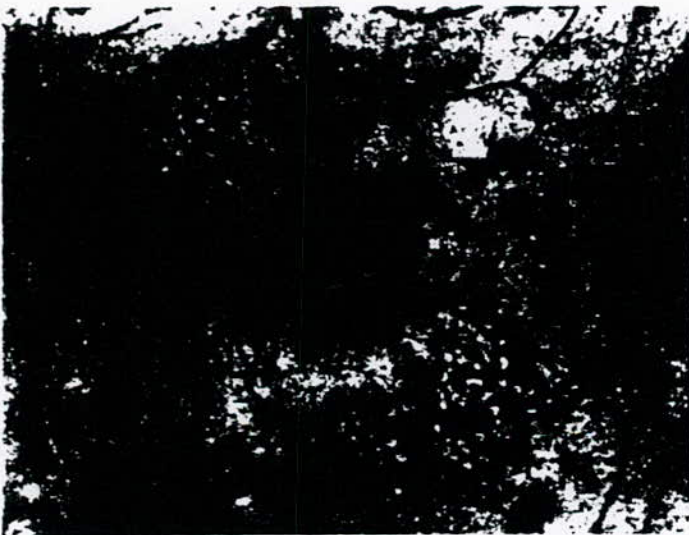
N°14 G=1000

a- Structure basaltique (dendritique)
b- Structure de surchauffe



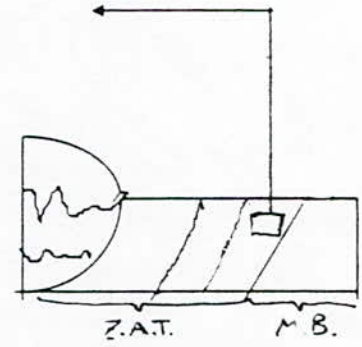
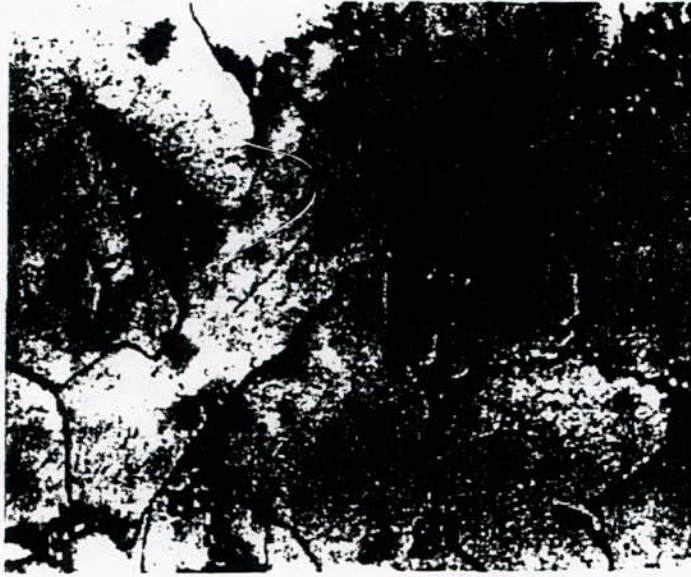
N°15 G=1000

Zone de surchauffe (gros grains)



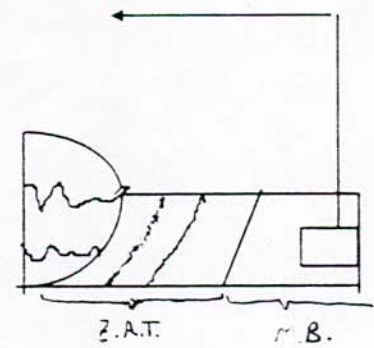
N°16 G=1000

zone partiellement austenitisée (ferrito-perlitique)
grains de ferrite en blanc.
en noir amas de grains ferrito-perlitique (perlite régénérée)



N° 17 G=1000

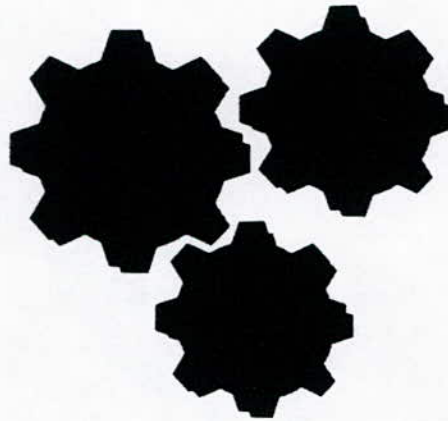
Zone partiellement austenitisée



N° 18 G=1000

Métal de base
grains de ferrite en blanc
grains de perlite en noir

CHAPITRE 3
INVESTIGATION
MECANIQUE



3-1 ESSAI DE TRACTION : NORME N.F. A 89-200

3-1-1 PRINCIPE DE L'ESSAI :

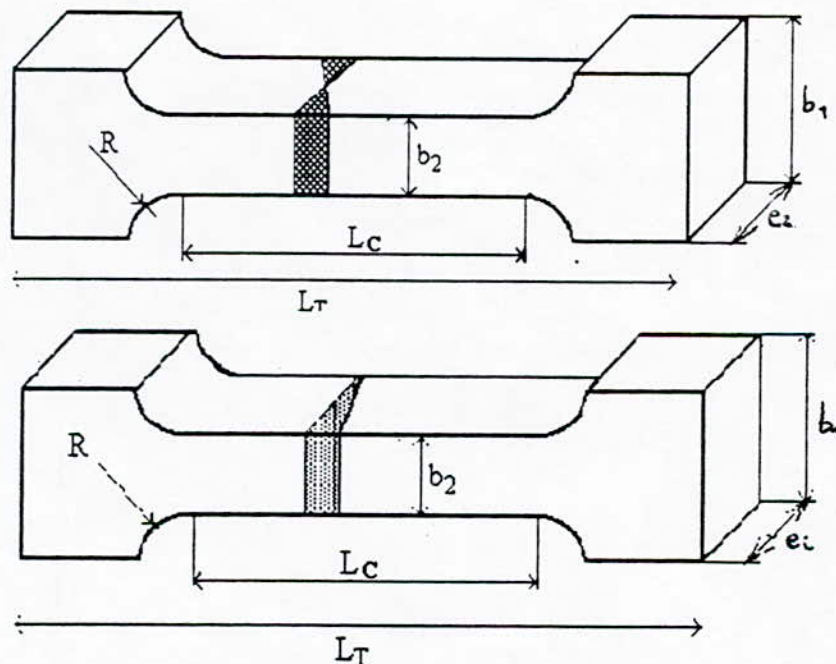
L'essai consiste à soumettre, à un effort de traction, une éprouvette prélevée transversalement au joint soudé.

3-1-2 PRÉLÈVEMENT DES ÉPROUVETTES

- Les éprouvettes sont prélevées transversalement au joint de telle façon qu'après usinage, l'axe de la soudure demeure à mi-longueur de la partie calibrée de l'éprouvette.
- Chaque éprouvette est marquée de telle manière qu'après son prélèvement il est possible de repérer sa position exacte par rapport au joint soudé initial, aucun traitement thermique n'est appliqué à l'éprouvette usinée.

3-1-3 USINAGE DES ÉPROUVETTES

Les éprouvettes sont usinées en utilisant des moyens mécaniques appropriés en prenant les précautions nécessaires pour éviter l'écrasement ou l'échauffement excessif du matériau, les dimensions des éprouvettes fixées par la norme N.F. A 89.200 sont schématisées par la (fig. 27) :



L_t : Longueur totale (selon le type de machine traction) .

b_1 : largeur des têtes de fixation : $b_1 = b_2 + 12 \text{ mm}$.

b_2 : largeur de la partie calibrée : 12.5 mm si $e \leq 2 \text{ mm}$.

20 mm si $e > 2 \text{ mm}$.

L_c : longueur de la partie calibrée : $L_c = L_g + 60 \text{ mm}$.

R : rayon de raccordement : $R \geq 25 \text{ mm}$.

fig. 27 dimensions des éprouvettes selon la norme

3-1-4 Condition d'exécution de l'essai

Avant de procéder à l'essai on peut, si nécessaire, mettre en évidence la forme de la section du joint soudée et sa position dans l'éprouvette par une légère attaque macrographique de la surface de l'éprouvette à solliciter.

La charge devra être appliquée à l'éprouvette progressivement et de façon continue dans la direction perpendiculaire à l'axe de la soudure, jusqu'à la rupture.

3-1-5 RESULTATS

La résistance à la traction R_m est définie comme étant le rapport de la charge maximale supportée par éprouvette pendant l'essai sur la section initiale de la partie calibrée de l'éprouvette, exprimée en MPa.

Après rupture de l'éprouvette, on note la position de la cassure et on examine les surfaces qui peuvent relever l'existence de défauts éventuels, en indiquant le type et la qualité.

L'emplacement de la cassure est rapporté dans le compte rendu de l'essai.

3-1-6 REALISATIONS DES ÉPROUVETTES DE TRACTION

Les éprouvettes ont été réalisées à l'aide d'une scie électrique d'une fraiseuse (de marque P.M.A) au C.S.C., selon la norme N.F. A. 89-200. Le dimensionnement des éprouvettes est schématisé par la Fig. 28.

3-1-7 REALISATIONS DES ESSAIS DE TRACTION

Les essais de traction ont été réalisés au laboratoire des essais non-destructif et destructif de l'entreprise G.T.P unité de REGHATA, avec une machine d'une puissance maximale de 600 daN/mm² le compte rendu des tests effectués est indiqué dans le tableau 12 :

ÉPROUVETTE	ESSAI DE TRACTION	
	RÉSISTANCE MAXIMALE A LA TRACTION R_m (daN/mm ²)	LIEU DE RUPTURE
6A ₁	38.97	HS
6A ₂	40.56	HS
6B ₁	41.12	HS
6B ₂	50.21	HS
6C ₁	38.91	HS
6C ₂	36.79	HS
12A ₁	44.73	HS
12A ₂	44.31	DS
12B ₁	44.39	HS
12B ₂	44.93	HS
12C ₁	40.58	DS
12C ₂	38.56	DS
25A ₁	43.99	HS
25A ₂	41.27	HS
25B ₁	41.99	HS
25B ₂	42.89	HS
25C ₁	43.65	HS
25C ₂	42.82	HS

Tab.12 compte rendu de l'essai de traction

HS: hors soudure.

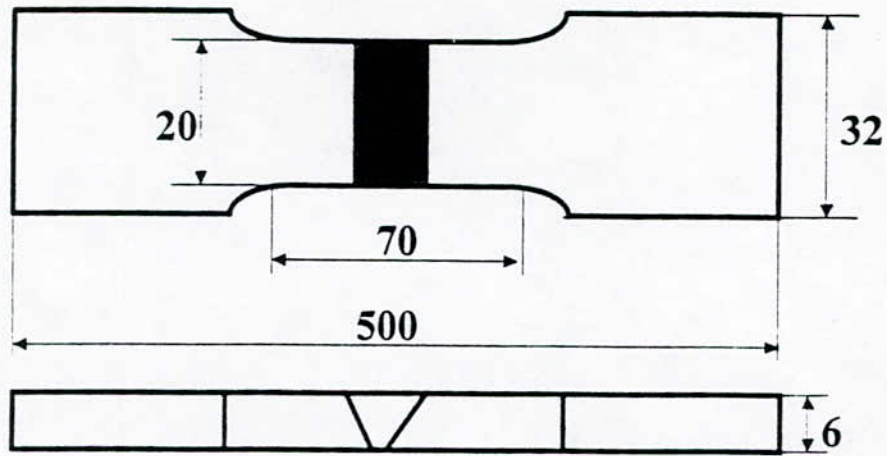
DS: dans la soudure.

3-1-8 Moyenne des valeurs obtenues

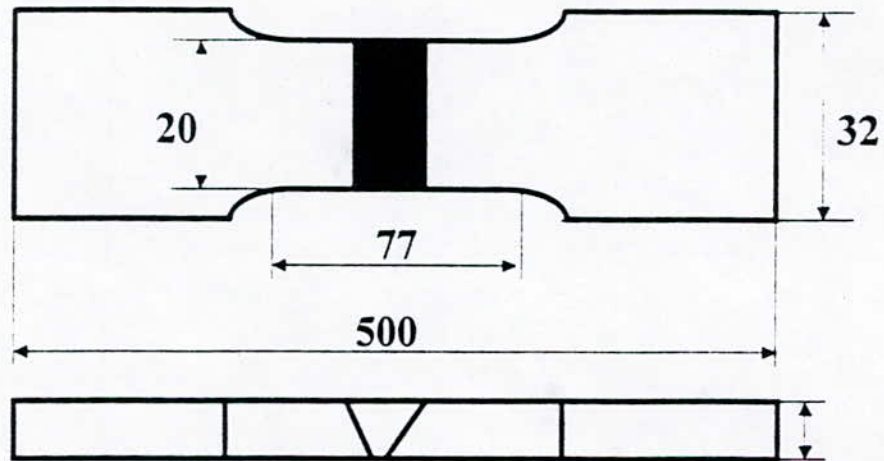
Le tableau 13 donne les valeurs moyennes des résistances à la traction de chaque éprouvette:

<i>éprouvette</i>	<i>moyenne des R_m</i>
6A	39.76
6B	45.66
6C	37.85
12A	44.52
12B	44.66
12C	39.57
25A	42.63
25B	42.44
25C	43.25

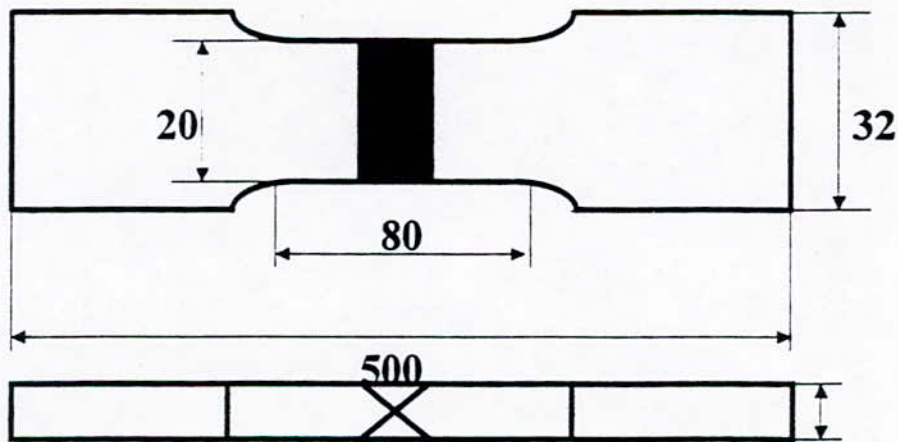
Tab.13 valeurs moyennes des résistances à la traction



éprouvettes de 6 mm d'épaisseur



éprouvettes de 12 mm d'épaisseur



éprouvettes de 25 mm d'épaisseur

Fig. 28 dimensionnement des éprouvettes de tractions réalisées

3-2 L'ESSAI DE RÉSILIENCE : N.F. A 89-202

3-2 -1 PRINCIPE DE L'ESSAI

L'essai consiste à soumettre, à un essai de flexion par choc, une éprouvette bi - appuyée (entaillée en V) prélevée transversalement au joint soudé (selon la norme N.F A 03-161).

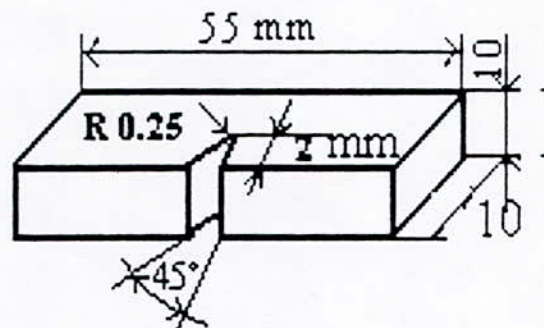
3-2-2 PRELEVEMENT DES EPROUVETES

3-2-2-1 REPERAGE DES ÉPROUVETTES

Les éprouvettes sont marquées de telle manière qu'après leur prélèvement il est possible de repérer leur position exacte par rapport au joint soudé initial. Aucun traitement thermique n'est appliqué aux éprouvettes usinées.

3-2-2-2 TYPES D' ÉPROUVETTES

Les éprouvettes de résiliences (à entaille en V) sont celles définies par la norme N.F A 03- schématisées par la Fig. 29 :



2

Fig. 29 éprouvette de résilience
conforme
à la norme N.F A 03-161

Cependant, pour les assemblages plans ou tubulaires d'épaisseur inférieure à 10 mm, il est admis de relever des éprouvettes dites « à sections réduites » de (10 mm x 7.5 mm) ou de (10 mm x 5 mm) schématisées par la Fig. 30 :

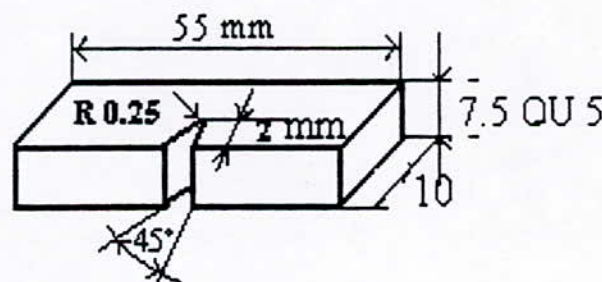


Fig. 30 éprouvette dite à section réduite

3-2-3 PRELEVEMENT DES ÉPROUVETTES

Les éprouvettes sont prélevées perpendiculairement à l'axe de la soudure et parallèlement à la surface de l'assemblage.

3-2-4 POSITION ET ORIENTATION DE L'ENTAILLE

La position et l'orientation de l'entaille sont régies par les conditions suivantes :

- la génératrice de fond de l'entaille est perpendiculaire à la surface de l'assemblage,
- prélèvement près d'une peau de laminage
- entaille en zone thermiquement affectée à 2 mm au plus de la zone de liaison (Fig. 31).

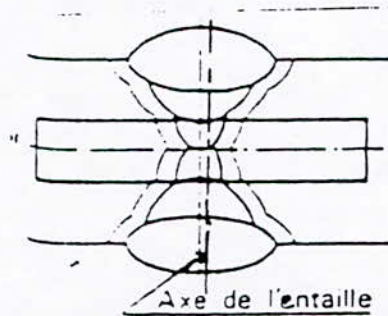


FIG. 31 Orientation de l'entaille

3-2-5 USINAGES DES ÉPROUVETTES

Les éprouvettes sont usinées par des moyens mécaniques appropriés en prenant les précautions nécessaires pour éviter l'écrouissage ou l'échauffement excessif du matériau.

Les tolérances d'usinages sont celle de la norme N.F A 03-161.

Les éprouvettes sont entaillées dans la zone affectée thermiquement, la distance à la zone de liaison est \leq à 2 mm (Fig. 32).

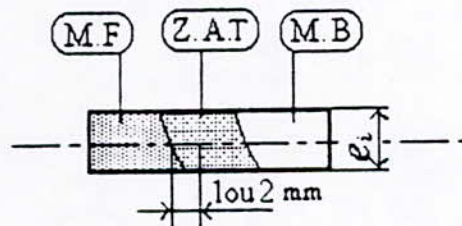


Fig. 32 position de l'entaille

3-2-6 CONDITION D'EXECUTION DE L'ESSAI

Les conditions sont celle définies par la norme N.F A.03-161

3-2-7 RÉSULTATS

Les résultats de résiliences sont exprimées en joule par centimètre carré (symbole KCV), tenant compte que la section des éprouvettes au droit de l'entaille est de 0.8 cm^2 . Pour les cas d'éprouvettes à section réduites (largeur 7.5 mm ou 5 mm), il convient de spécifier la section au droit de l'entaille. Bien entendu, seul peuvent être comparés les éprouvettes de dimension identique et dont la génératrice d'entaille à la même orientation par rapport à la surface de l'assemblage.

3-2-8 REALISATIONS DES ÉPROUVETTES DE RÉSILIENCES :

Les éprouvettes ont été réalisées à l'aide d'une scie électrique et d'une fraiseuse au laboratoire de mécano - soudage du C.S.C en respectant la norme N.F A 03-161 •

3-2-9 REALISATION DES ESSAIS DE RÉSILIENCES :

Les essais de résilience ont été réalisés dans l'entreprise ANABIB gros tubes de REGHAIA , Le compte rendu de cet essai est donné dans le tableau 14 ci - dessous:

ESSAI DE RÉSILIENCE

ÉPROUVETTE	SECTION(mm ²)	ENERGIE (Joule)	RÉSILIENCE (Joule/ mm ²)	MOYENNE DES RÉSILIANCES
6A ₁	0.48	15.6	32.5	25.27
6A ₂	0.48	9.4	19.58	
6A ₃	0.48	11.4	23.75	
6B ₁	0.48	7.6	15.38	20.12
6B ₂	0.48	11	22.91	
6B ₃	0.48	10.6	22.08	
6C ₁	0.48	8.6	17.91	18.25
6C ₂	0.48	8.5	17.70	
6C ₃	0.48	9.2	19.16	
12A ₁	0.8	10.8	13.5	14.41
12A ₂	0.8	14	17.5	
12A ₃	0.8	9.8	12.25	
12B ₁	0.8	11.2	14	17.25
12B ₂	0.8	14.8	18.5	
12B ₃	0.8	15.4	19.25	
12C ₁	0.8	14	17.5	18.54
12C ₂	0.8	13.1	16.37	
12C ₃	0.8	17.4	21.75	
25A ₁	0.8	17	21.25	21.42
25A ₂	0.8	17	21.25	
25A ₃	0.8	17.4	21.75	
25B ₁	0.8	14.8	18.5	17.67
25B ₂	0.8	13.4	16.75	
25B ₃	0.8	14.2	17.75	
25C ₁	0.8	18	22.5	23.17
25C ₂	0.8	19	23.75	
25C ₃	0.8	18.6	23.25	

Tab 14 résultats des essais de résiliences

3-2-10 Moyenne des résultats

Le tableau 15 donne les valeurs moyennes des résiliences des éprouvettes :

éprouvette	RÉSILIENCE joules/mm ²
6A	25.27
6B	20.12
6C	18.25
12A	14.41
12B	17.25
12C	18.54
25A	21.42
25B	17.67
25C	23.17

Tab. 15 valeurs moyennes des essais de résiliences

3-3 Essai de dureté sous cordon (N.F A 81-460)**3-3-1 Introduction**

la mesure de la dureté est d'un emploi général pour caractériser le matériau, qu'il s'agisse de résistance mécanique ou de vérifier l'absence de fragilité ou de fragilisation par suite de différents traitements mécaniques ou thermiques qu'il a pu subir.

Une augmentation de la dureté est généralement associée à une moindre ténacité, aussi l'accroissement de la dureté, observé dans les zones thermiquement affectées par le soudage, peut être l'indice d'un risque de fissuration à froid sous cordon ou de corrosion sous tension, d'où l'intérêt de la détermination de cette dureté.

3-3-2 Définition

C'est la moyenne des trois valeurs les plus élevées obtenues lors des mesures de duretés Vickers (au moins 5 mesures) effectuées sous une charge de 5 Kgf (49.2 N) appelé: H_{V5}

3-3-3 Type d'éprouvette

Section droite du joint contenant le cordon de soudure obtenue par usinage (N.F A 03.154), de plus la section d'examen doit être polie et attaquée au nital (N.F A 03.154). [16]

-3-4 Position de l'empreinte

- La position est dans la zone à gros grains (3) parallèle à la zone de liaison (2) (voir fig.33).
- La distance entre points est définie comme suit : $e \geq 0.6$, $e \geq 3d$
- $e \geq 1$ mm de la zone fondue , des bords et des fissures.

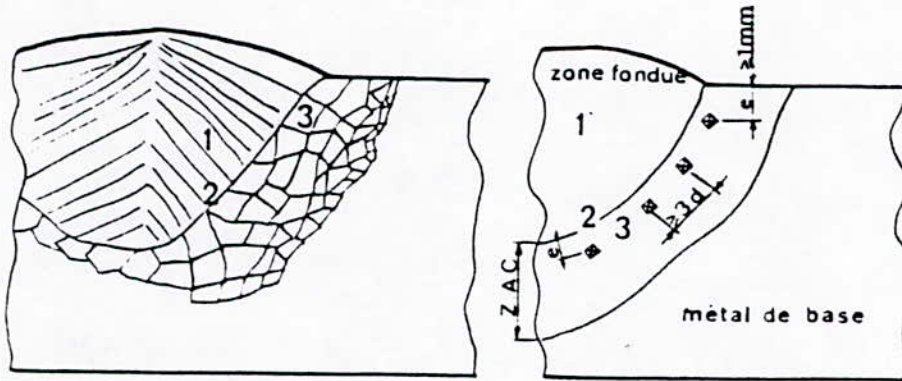


Fig. 33 position de l'empreinte

3-3-5 Normalisation des résultats

La moyenne des trois valeurs doit être comprise entre un intervalle de 25 Hv₅ sinon on effectue un essai supplémentaire et on retiendra la moyenne des trois valeurs maxima de chaque essai

3-3-6 Procès verbal de l'essai

Il doit comporter

- La nature du matériau
- Le schéma du joint et l'emplacement de la zone mesuré
- La valeur de la dureté sous cordon

3-3-7 Résultats des essais

Les essais de dureté effectués au laboratoire de la GTP ont donné les résultats ci-dessous

Eprouvettes	6A	6B	6C	12A	12B	12C	25A	25B	25C
Hv ₅	127.8	129.7	130.0	141.1	150.2	142.0	141.5	140.6	139.8

Tab. 16 Dureté sous cordon des éprouvettes.

3-4 Profil de la micro - dureté

L'établissement du profil de la micro - dureté a pour but de confirmer et de compléter l'examen micrographique et le profil de la taille moyenne des grains.

3-4-1 Preparation des échantillons

La préparation de l'échantillon s'est effectuée de la même manière que pour l'examen micrographique à savoir : polissage avec du papier abrasif de granulométrie (320- 400-600-800-1000-1200- suivie d'un polissage de finition à l'alumine (de granulométrie allant de 1 μm jusqu'à 0.05 μm

3-4-2 Type d'essai et de charge

Le profil de micro - dureté s'est effectuée avec une charge de 0.3 KgF avec un micro - duromètre de marque (ZIESS) ayant une charge maximale de 1 KgF

3-4-3 Mode opératoire

Un balayage de la micro - dureté en allant de la zone fondue jusqu'au métal de base, comme indiqué sur la fig. ci-dessous, avec un pas de 0.5 mm .

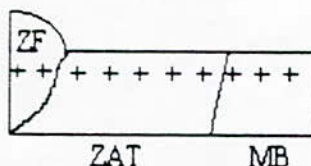


Fig.34 Profil de la micro-dureté

3-4 Résultats:

Les résultats sont regroupés dans les tableaux 17, 18, et 19 ci - dessous:

éprouvette	ZF	ZF	ZAT	ZAT	ZAT	ZAT	ZAT	ZAT	ZAT	ZAT	MB
6A	172.8	171.5	141.7	149.9	150.0	148.2	140.6	135.3	129.8	136.2	125.6
6B	175.2	209.3	156.3	153.5	149.9	139	132.4	138.4	150.0	153.7	134.5
6C	166.5	165	136.8	132.4	141.2	140.3	124.3	127.1	142.7	146.2	131.8

Tab 17 Profil de la micro - dureté : tôle de 6 mm

Eprouvettes	ZF	ZF	ZAT	ZAT	ZAT	ZAT	ZAT	MB	MB	MB
12A	197.4	185.4	186.7	164.1	161.6	158.2	163.6	152.9	147	139.8
12B	190.5	190.5	178.4	170.1	157.9	159.7	159.8	1581	157.3	141.8
12C	182.6	187.1	165.3	148.7	150.9	152.9	145.7	149.0	149.5	136.6

Tab 18 Profil de la micro - dureté : tôle de 12mm

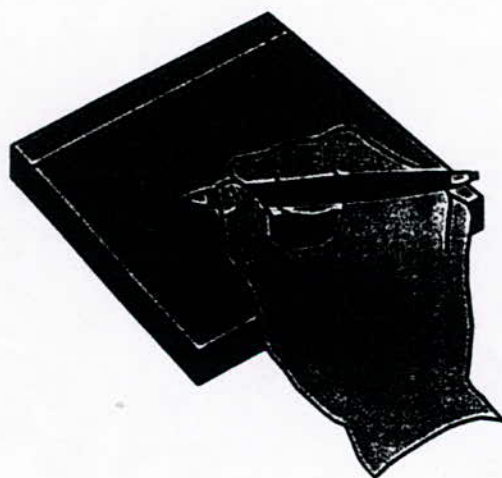
Eprouvettes	ZF	ZF	ZF	ZAT	ZAT	ZAT	MB	MB
25A	191.1	171.8	167.3	146.6	147.8	141.7	143.5	132.1
25B	169.1	166.5	172.7	143.1	132.8	142.8	143.3	133.6
25C	159.5	158.7	156	146.3	145.8	144.7	127.7	132.7

Tab 19 Profil de la micro - dureté : tôle de 25 mm

CHAPITRE 4

INTERPRÉTATION DES

RESULTATS



4-1 MACROGRAPHIE

4-1-1 Étendue de la ZAT

Nous constatons des résultats obtenues pour différentes énergies :

- une augmentation de l'étendue de la ZAT lorsque l'énergie de soudage augmente et ceci pour les trois épaisseurs 6 mm, 12mm, 25 mm (Fig. 35).
- une diminution de l'étendue de la ZAT lorsque l'épaisseur augmente.

4-1-2 Surface de la ZAT

Des différents résultats obtenues nous constatons :

- une augmentation de la surface de la ZAT lorsque l'énergie augmente (Fig. 36) .
- une diminution de la surface de la ZAT lorsque l'épaisseur augmente .

4-1-3 Interprétation

Une élévation de l'énergie de soudage augmente le gradient de température et, par conséquent, le flux de chaleur , une augmentation de ce dernier augmente l'étendue de la ZAT en même temps que la surface de la ZAT ceci est expliqué par la relation de FOURRIER :

$$J = - K \cdot \frac{dT}{dx} \quad (12)$$

J: flux de chaleur [J/cm^2]

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température [sec. C°/cm]

K : conductibilité thermique [$J/ sec. Cm. C^\circ$]

4-1-4 Morphologie des joints soudés

Nous constatons l'apparition de quelques soufflures et de défauts de soudage dus à l'imprécision du soudage manuel .

4-1-5 Nombres de passes

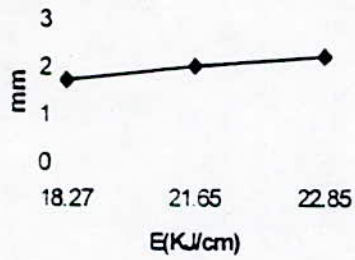
La macrographie laisse apparaître clairement le nombre de passe pour chaque épaisseur à savoir :

- 2 passes pour la 6 mm .
- 4 passes pour la 12 mm .
- 8 passes pour la 25 mm .

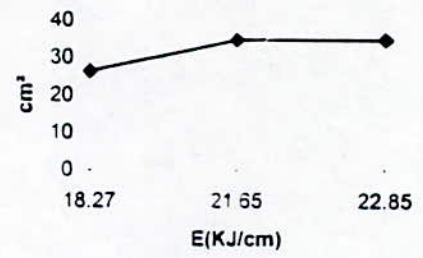
4-1-6 Constituons d'un joint de soudure

La macrographie met en évidence les zones constitutives des joints soudées à savoir :

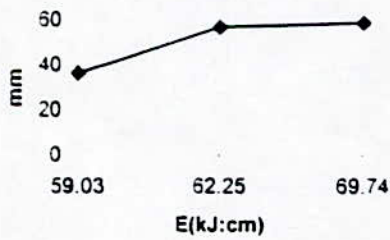
- la zone fondue ZF.
- La zone de liaison ZL .
- La zone affectée thermiquement ZAT.
- Le métal de base MB.



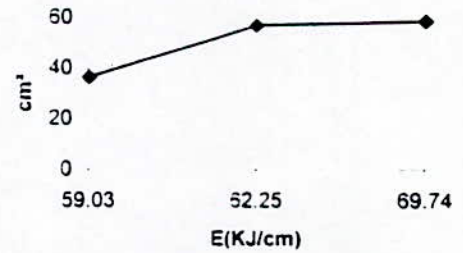
6 mm



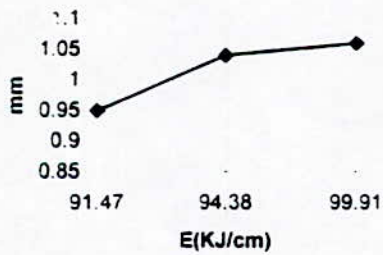
6 mm



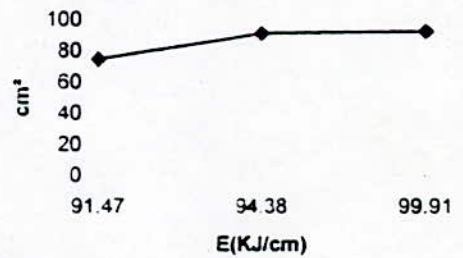
12 mm



12 mm



25 mm



25 mm

Fig. 35 Etendue de la ZAT en fonction de l'énergie

Fig. 36 Surface de la ZAT en fonction de l'énergie

4-2 MICROGRAPHIE

Les micrographies obtenues appelle aux remarques suivantes :

4-2-1 Métal de base : MB

- Une structure ferrito - perlitique pour tous échantillons après l'opération de soudage

4-2-2 Zone fondue : ZF

- Structure basaltique (dendritique) pour la dernière passe pour la 6 mm et la partie restante de la zone fondue est une structure normalisée .
- Par contre pour la 12mm et la 25 mm nous avons alternance de structure basaltique et de structure normalisée dans la zone fondue .

4-2-3 Zone affectée thermiquement : ZAT.

- zone de surchauffe : zone à gros grains pour les trois épaisseurs
- zone austenitisé : structure ferrito-perlitique pour les trois épaisseurs
- zone partiellement austenitisé: structure ferrito perlitique régénéré en de grains fins

Seulement nous constatons que plus l'énergie augmente plus la structure devient plus enchevêtré (il devient difficile de distinguer entre les différentes zones)

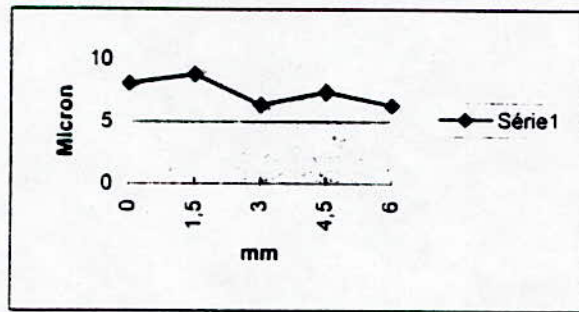
4-3 Taille moyenne des grains

Les Fig. (37) , (38) et (39) montrent le profil de taille moyenne des grains dans un joint soudé respectivement pour les éprouvettes d'épaisseur 6 mm,12 mm,25 mm .

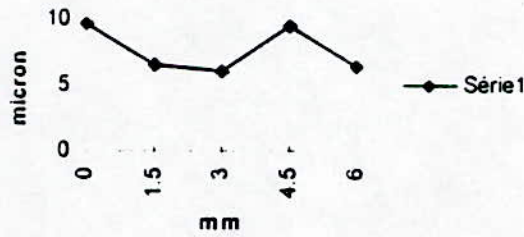
Nous constatons, en premier lieu, que les températures atteintes depuis la zone de liaison vers le métal de base conditionne la taille moyenne du grain de l'austenite mère .

la taille moyenne des grains confirme bien les observations métallographique à savoir :

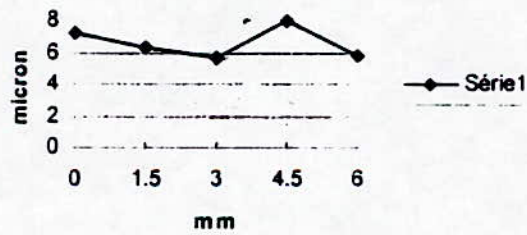
- la taille du grain austénitique diminue en allant de la zone de surchauffe puis vers la zone de surchauffe normalisé puis vers la zone autenitisé car ils ont subit un traitement thermique de température décroissante , et ceci pour les 27 échantillons, sauf le troisième point de la fig.(36 A) dû certainement à une mauvaise manipulation .
- la taille des grains ensuite augmente dans la zone partiellement austenitisé, car la ferrite ne s'est pas transformé et ceci pour les 27 échantillons .
- Pour le métal de base la taille moyenne des grains à diminué et ceci est confirmé que pour 26 sur 27 échantillons .



A

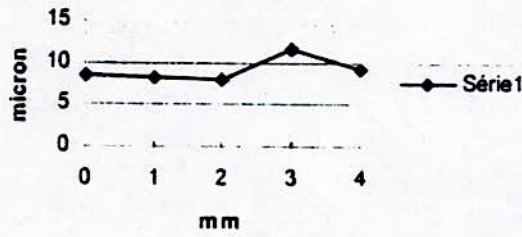


B

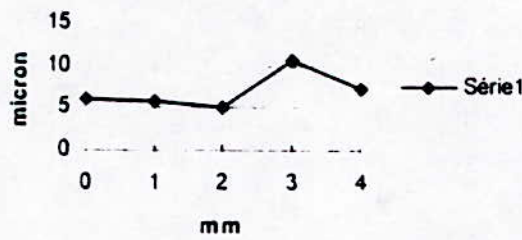


C

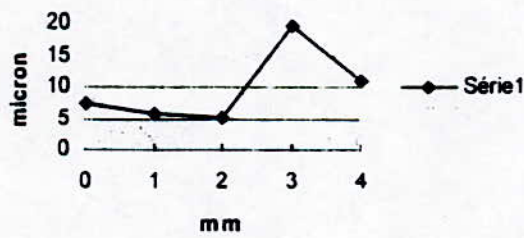
Fig.37 Profil de la taille moyenne des grains de la tôle de 6 mm



A

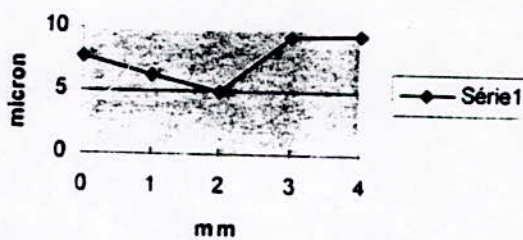


B

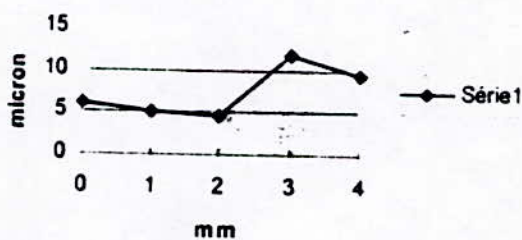


C

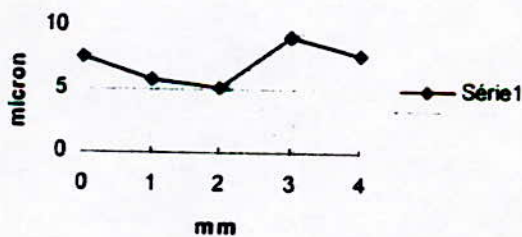
Fig.38 Profil de la taille moyenne des grains pour la pièce de 12 mm d'épaisseur



A



B



C

Fig-39 Profil de la taille moyenne des grains de la tôle d'épaisseur 25 mm

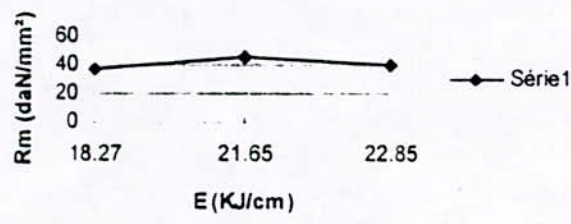
4-4 L 'essai de traction

La résistance mécanique d'une ZAT ne peut être estimée que dans le cadre d'une estimation globale de la résistance mécanique du joint soudé.

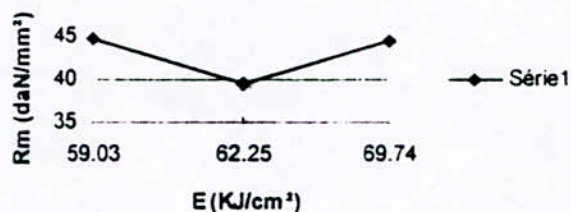
- Nous constatons que les résistances à la rupture des joints soudés sont tous supérieures à la résistance à la rupture du métal de base.

- Nous constatons aussi que pour 15 sur 18 échantillons, la rupture s'est produite hors soudure, 3 seulement des éprouvettes se sont rompues au niveau de la soudure, ce qui, à notre avis, est dû à une concentration de micro - contraintes au niveau de la soudure lors de la solidification ; ou bien à défaut de pénétration lors du soudage.

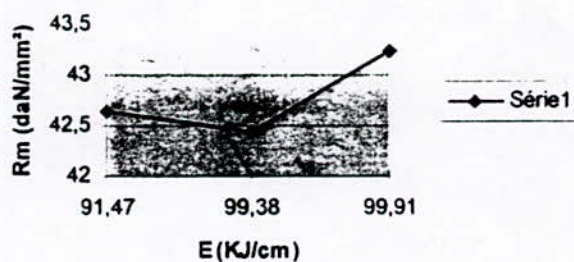
- La variation de résistance à la rupture des éprouvettes en fonction de l'énergie est donnée par la Fig. (40) ci-dessous, a priori aucune relation n'est apparue entre l'énergie de soudage et la limite à la rupture de l'éprouvette, ceci peut aussi être expliqué par les micro-contraintes dans le joints soudé, l'apparition de soufflures, qui influe sur la limite élastique du joint soudé



6 mm



12 mm



25 mm

fig. (40) variation de la limite à la rupture des éprouvettes en fonction de l'énergie

4-5 Essai de résilience

L'évolution de la résilience en fonction de l'énergie est donnée par la fig. (41) ci - dessous. La théorie nous renseigne que plus l'énergie augmente plus la résilience augmente, car à basse énergie on a des structures de trempe alors qu'à hautes énergies des structures de types bainite supérieure ou ferrite + carbure [1], ce qui est confirmé par la tôle de 6 mm, par contre la 12 mm et la 25 mm ne schématisent pas cette évolution (un point aberrant pour chacune).

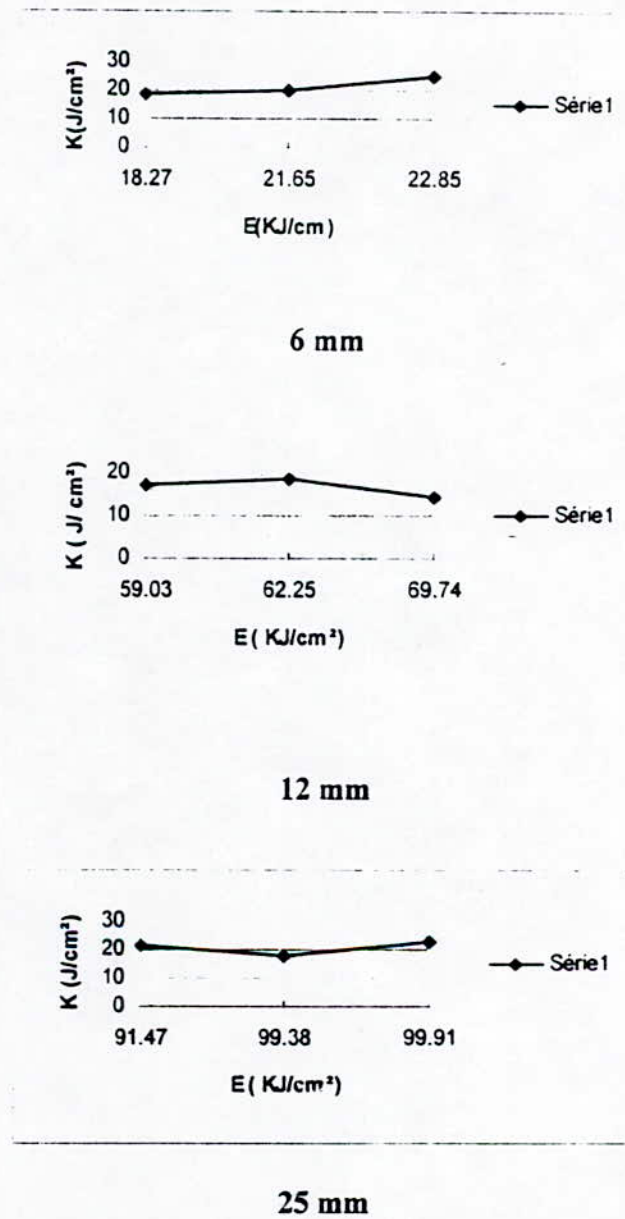


fig. (41) Evolution de la résilience en fonction de l'énergie

4-6 Dureté sous cordon .

La variation de la dureté sous cordon en fonction de l'énergie est donnée par la Fig. (42) . Ceci est en parfaite concordance avec la théorie.[1]

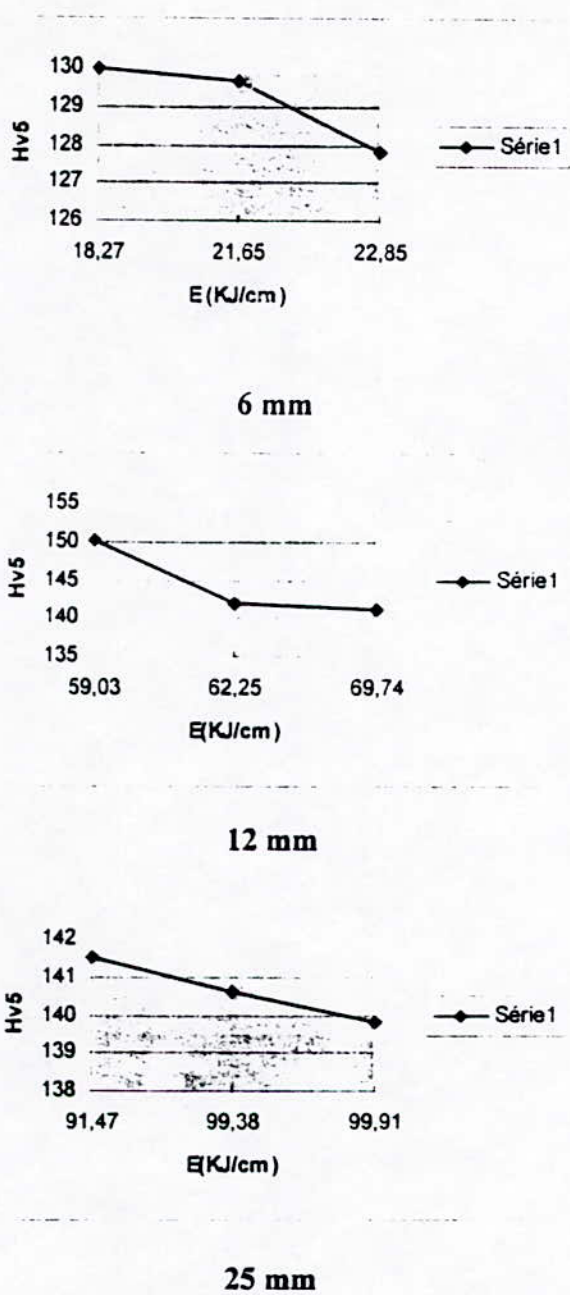


Fig. (42) Variation de la dureté sous cordon en fonction de l'énergie.

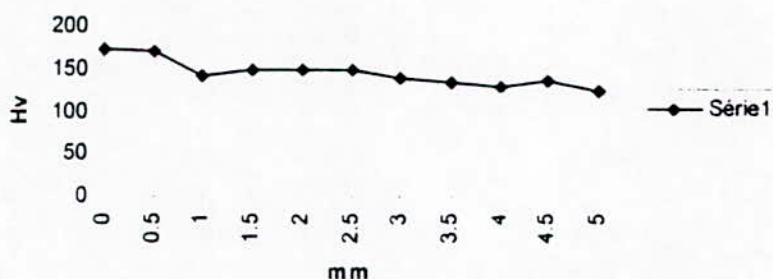
4-7 PROFIL DE LA MICRODURETE

Les courbes des Fig. (43),(44) et (45) décrivant le profil de la micro - dureté le long d'un joint soudé révèlent:

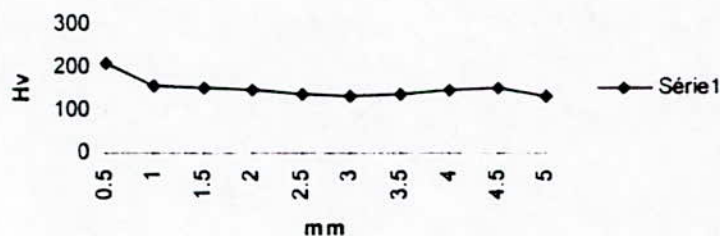
Une diminution de la dureté en allant de la zone fondue jusqu'au métal de base,ceci est confirme par la théorie qui nous renseigne que la dureté croit en fonction de la température maximale atteinte.

Ce profil,cependant,garde globalement la même allure si on fait varier l'épaisseur ou l'énergie.

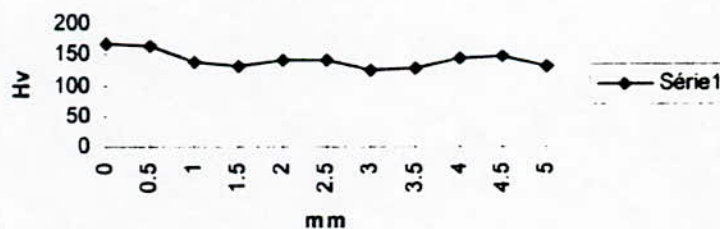
De plus on constate que la plus grande dureté est localisé dans l'interface ZF- ZAT , d'où la fragilité de cette zone .



6A

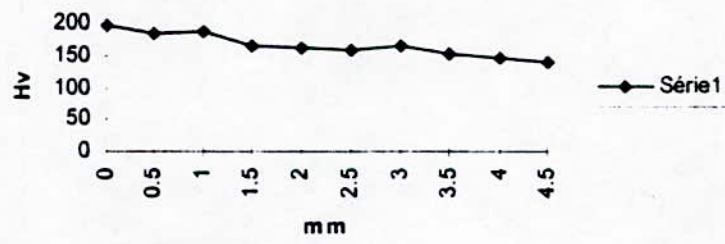


6B

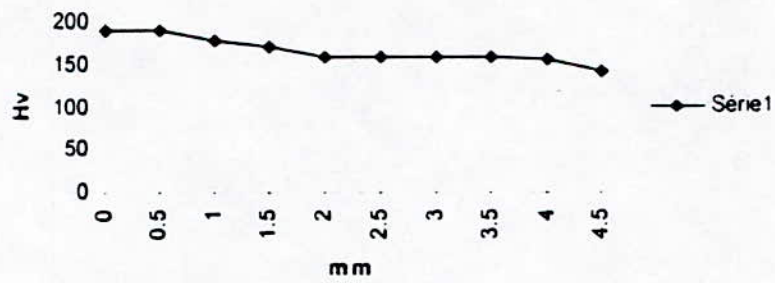


6C

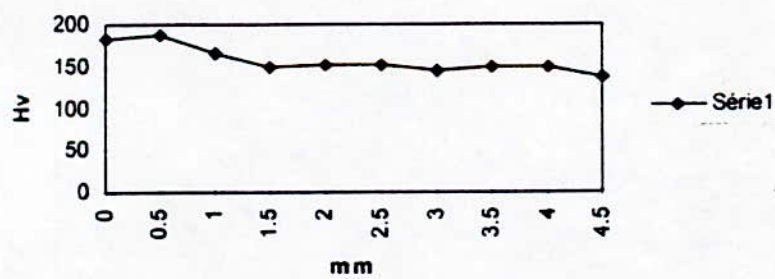
Fig. (43) Profil de la microdureté le long d'un joint de soudure de 6 mm d'épaisseur.



12A

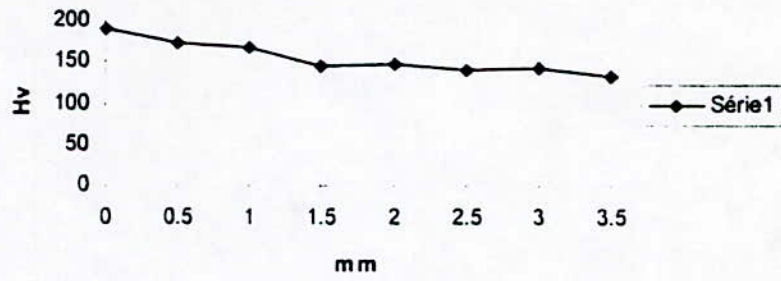


12B

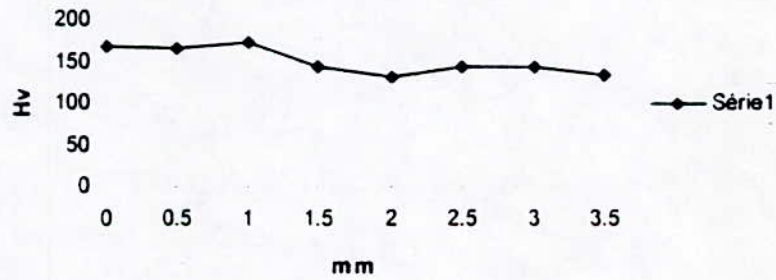


12C

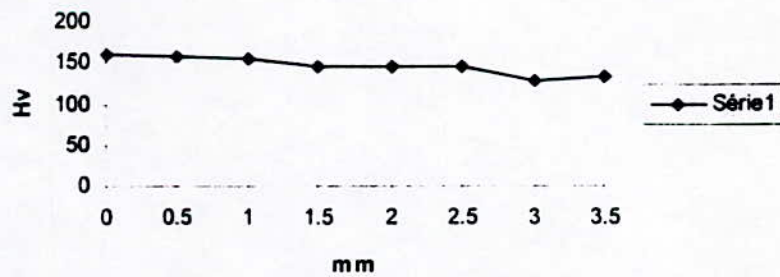
Fig. (44) Profil de la microdureté le long d'un joint de soudure de 12 mm d'épaisseur



25A



25B



25C

Fig. (45) Profil de la microdureté le long d'un joint de soudure de 25 mm d'épaisseur

CONCLUSION GENERALE

L' étude de l'influence des paramètres de soudage sur les caractéristiques de la ZAT est fort complexe, car ces paramètres forment entre eux des fonctions implicites d'où l'impossibilité de varier un seul paramètres sans varier les autres .

Notre étude a relevé en général :

- ◆ Des macro et micrographies en conformité avec la théorie .
- ◆ Une augmentation de l'étendue et de la surface de la ZAT en fonction de l'énergie.
- ◆ Une diminution de la dureté sous cordon en fonction de l'énergie.
- ◆ Un profil de la taille moyennes des grains conforme avec les microstructures.
- ◆ Un profil de la microdureté conforme aux microstructures.
- ◆ Une variation aléatoire de la limite à la rupture.
- ◆ Une variation semi - conforme de la variation de la resiliance en fonction de l' énergie due à
 - un défaut de pénétration due au soudage manuel (contraintes internes) .
 - l'intervalle de variation très courte entre les énergies .

- ◆ Des difficultés survenues au cours de cette étude nous ont empêché de pousser plus notre étude , on peut citer :
 - Difficultés technique d'établir le temps de refroidissement ΔT_{100}^{400} entre 800° et 300° qui est un élément important dans le cycle thermique du soudage.
 - Non disponibilité du diagramme TRCS de l'acier E 24 nécessaire pour prévoir les microstructures
 - Utilisation du soudage manuel ce qui induit inévitablement des défaut -si minimes soit ils - qui entraînent la formation de contrainte interne ou des fissures ,celles-ci influenceront les résultats des essais ultérieurs

- Le nombre insuffisant d'éprouvettes prélevé par soudure ne nous permet pas d'étayer nos confirmations.
- L'investigation s'est faite uniquement sur un seul plan , une investigation sur les autres plans s'avère nécessaire pour compléter les informations sur les caractéristiques de la ZAT
- Pour des raisons techniques et de délai nous n'avons pu procéder à d'autres essais complémentaires tel que :
 - Analyse microscopique électronique , pour détecter d'éventuelles présences de précipitées , leurs natures , et leurs distribution .
 - Profil de la teneur moyenne en carbone car ce lui - ci influe sur les propriétés de la ZAT .
 - Une investigation par la technique des ultra - sons pour analyser les changement structuraux au coeur de la ZAT .

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES



Bibliographie

- [1] Devillers G.Henry "Apport de recherche en soudage à la métallurgie des aciers de construction mécanique " Traitement thermique " N° 222 1988
- [2] M.F Ashby D.R.H Jones "Matériaux" Tome 2 Dunod 1991
- [3] J Niard Y.Renoux F.Bouju "Chimie et Métallurgie" Nathan 1985
- [4] JM Dorlot , J.P.Bailon, J Masounave "Des Matériaux " Édition de l'école Polytechnique de Montréal. 1986
- [5] N.Boudajada "Matériaux" O.P.U Tome 1 1992
- [6] J Troulyere "Procèdes de jonction." Delagrave 1979
- [7] D Sefarian : "métallurgie de la soudure" Dunod 1965
- [8] A Chipman metals handbooks Vol 10 eight edition.
- [9] H. Grangon "Bases métallurgique du soudage" Eyrolles 1989
- [11] N.N Rylakyne "Calculs des processus thermique du soudage" Soudage et Technique connexes N° 1 / 2 .1961
- [12] R.Varrisellaz "Soudage, Éléments de conception et de réalisation" Dunod 1982
- [13] I.R.S.I.D "Atlas des courbes de transformation des aciers français " C.P.S 1974
- [14] I.R.S.I.D "Recueil des courbes de dureté -paramètre de refroidissement "C.P.S 1977
- [15] INSTITUT BELGE DE LA SOUDURE "Cours de métallurgie de soudage" 1972
- [16] A.F.N.O.R Recueil des normes françaises soudage et technique connexe
- [17] H .Grangon " Quelques éléments pour la lecture des macrographies d'assemblages soudées " Soudage et techniques connexes 1950 pp 81-84
- [18] M.F Ashby K E Easterling "a first report on diagramm for grain growth inwelds" Accta metall Vol 30 pp1969 to 1978 PERGMON Press LTD 1982