

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MÉMOIRE

DE FIN D'ÉTUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
EN GÉNIE MÉCANIQUE
OPTION : SCIENCES DES MATÉRIAUX

THÈME

***ANALYSE DE L'EFFET D'ECROUISSAGE
SUR UNE PLAQUE METALLIQUE SOUDEE***

Dirigé par :

M^r : FILALI

Étudié par :

M^r : MOUCHENE SALIM

Promotion 2012-2013

Remerciements

Qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma profonde gratitude en premier lieu à Dieu, mon créateur, de m'avoir donné toute la force nécessaire d'accomplir ce modeste travail ainsi mes parents et à Mr. FILALI mon promoteur, pour m'avoir confié un travail aussi intéressant et pour ses conseils, ses encouragements et son suivi attentif.

Que Mr le président de jury, trouve ici mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Et enfin sans oublier le chef du département mécanique.

Comme je n'oublie pas d'exprimer ma reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail, qu'elles trouvent ici ma profonde reconnaissance.

SOMMAIRE

<u>Introduction générale</u>	1
CHAPITRE I : METALLURGIE DE SOUDAGE	
<u>I-Introduction :</u>	4
<u>I-1-Définition de soudage :</u>	4
<u>I-2- Étude thermique du soudage</u>	5
<u>I-2-1-Différentes zones de soudages</u>	5
<u>I-3-Cycle thermique de soudage</u>	6
<u>I-3-2-Répartition thermique dans le cordon de soudure</u>	7
<u>I-3-3-Notion d'état quasi-stationnaire (soudage avec déplacement de la source de chaleur</u>	8
<u>I-3-4-Distribution de la température au voisinage de la zone soudée</u>	10
<u>I-3-5-Solide thermique</u>	11
<u>I-4-Paramètres influençant le cycle thermique et la répartition thermique dans le cas du soudage</u>	12
<u>I-5-Étude métallurgique du soudage</u>	14
<u>I-5-1-Cas de l'échauffement</u>	14
<u>I-5-2-Cas de refroidissement</u>	19
<u>I-6-Localisation des transformations</u>	20
<u>Résumé :</u>	21
CHAPITRE II : PROCEDES DE SOUDAGE	
<u>II-1-Introduction</u>	23
<u>II-2-Classification des procédés de soudage</u>	25
<u>II-3-Procédés de soudage</u>	25
<u>II-3-1-soudage à l'arc électrique</u>	25
<u>II-3-2-Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée</u>	28
<u>II-3-3-Soudage sous gaz inerte avec électrode de tungstène TIG (Tungsten Inert Gaz)</u>	30
<u>II-3-4-Soudage sous protection gazeuse M.I.G (Metal Inert Gaz) [14] :</u>	32
<u>Schéma du procédé :Figure II-7</u>	32
<u>II-3-5-Soudage sous protection gazeuse M.A.G (Metal Activ Gaz)</u>	33
<u>II-3-6-Soudage au gaz ou au chalumeau</u>	34
<u>II-4-Soudabilité</u>	38
<u>II-4-3-Soudabilité constructive</u>	38
<u>II-5-défauts de soudure</u>	39

II-5-1-Fissurations	39
II-5-2-Soufflures	42
II-5-3-Pollution ferreuse	42
II-5-4-Inclusions	43
II-5-5-Retassures et criques de solidification	43
II-5-6-Morsures et caniveaux	43
II-5-7-Défauts géométriques du cordon	44

CHAPITRE III : DEFORMATION PLASTIQUE

III-1-Introduction	47
III-2-Mécanismes de déformation	48
III-2-1-Dislocations	48
III-3-Comportement mécanique	54
III-3-1-Essai de traction uni-axiale	54
III-4-Influence du chauffage sur la microstructure et les propriétés d'un métal déformé	57
III-4-1-Restoration	57
III-4-2-Recristallisation	60
III-5-Matériaux écrouis	60
III-5--1- Notions d'écrouissage et de recristallisation	60
III-5-2-Soudage des matériaux écrouis	62

CHAPITRE IV : PARTIE PRATIQUE

IV.1. Identification du Métal de base	65
IV.1.1. Présentation de l'acier NF A36 301	65
IV.2. Présentation du métal d'apport (fil pour soudage MAGER70S-6)	66
IV.2.1. Composition chimique AWS:ER70S-6	66
IV.2.2. Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS:ER70S-6	66
IV-3-Réalisation des éprouvettes	67
IV-3-1-préparation de la plaque de métal	67
IV-3-2-Assemblage de la plaque	68
IV-3-3-Prélèvement des éprouvettes	69
IV-4-Essais réalisés	69
IV-4-1-Essai de dureté	69
IV-4-2-Essai de traction	70
IV-4-3-Microstructure	71

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V-1-Introduction	75
V-2- Déformation des éprouvettes	75
V-3-Bilan générale	77
V-4- Observation microscopique	79
V-4-1- Microscopie	79
V-5-Essai de dureté	81
V-5-Essai de traction après soudage	82
Remarque	85
CONCLUSION GENERALE	
Conclusion générale	87

LISTE DES SYMBOLES

Liste des symboles

θ_m : Température maximale à la quelle est porté le point étudié [C°].

$\theta_m(x, t)$: Température à une distance x et un temps t [C°].

θ_0 : Température initiale du métal à souder [C°].

q : Puissance effective du procédé utilisé [W].

v : Vitesse de soudage [cm/min].

E : Énergie de soudage [J/cm].

Cp_1 : Capacité thermique de volume [J/cm³.K].

a : Coefficient de diffusion thermique [cm²/s].

λ : Coefficient de conductibilité thermique [W/cm.K].

t_r : Temps de refroidissement [s].

y_0 : Distance du point considéré [mm].

δ : Épaisseur des pièces à souder.

δ^* : Épaisseur de transition [cm].

I : Intensité [A].

U : Tension [V].

α : La ferrite.

γ : austénite.

δ : la ferrite δ .

M : Martensite.

C+F : Bainite.

Fe₃C : Cémentite.

P : Perlite.

MB : Métal de base.

ZL : Zone de liaison.

ZF : Zone fondue.

ZAT : Zone affectée thermiquement.

TIG : Tungstène Inert Gaz.

MIG : Metal Inert Gaz.

MAG : Metal Activ Gaz.

T_f : Température de fusion.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Le développement, depuis 60 ans, de nouvelle technique de soudage applicable à des matériaux autres que les aciers, exigeait une remise à jours des connaissances fondamentales concernant le soudage. Celles-ci sont non seulement d'ordre thermique, thermo-mécanique et chimique mais surtout métallurgique. On peut en effet souder des matériaux aussi divers que les aciers inoxydables, le zirconium, le titane, l'uranium, etc.

Comme l'on soudait le fer et les aciers ordinaires par le chalumeau oxyacétylénique il y a 60 ans. Il faut en effet, pour ces matériaux, connaître non seulement leur réaction chimique vis-à-vis de l'atmosphère présidant au soudage, leur possibilité de volatilisation de certaines additions, mais aussi leur comportement métallurgique, c'est-à-dire les transformations structurales provoquées par les traitements thermo-mécaniques que provoque le soudage.

L'érouissage d'un métal, est le durcissement d'un sous l'effet de sa déformation plastique (définitive). Par exemple, lorsque l'on tord un fil de fer, il est impossible de le remettre complètement à plat : la partie coudée garde une déformation car elle s'est durcie.

Ce mécanisme de durcissement explique en grande partie les différences entre les pièces métalliques obtenues par corroyage et les pièces de fonderie. Cela explique également que les tôles sont plus résistantes dans le sens de la longueur que dans le sens transverse.

L'érouissage correspond aux modifications qu'il subit lorsque les contraintes qui lui sont appliquées sont suffisamment fortes pour provoquer des déformations plastiques, permanentes. Ces modifications sont d'ordre métallurgique (modification de la structure interne du métal) et ont généralement une influence sur ses propriétés mécaniques, il ne se produit que sur les matériaux ductiles, dans le domaine plastique.

Ce travail fait l'objet d'une étude, de l'effet du soudage sur l'érouissage d'un acier à doux faiblement allié, à qui on a attribué de différents taux d'érouissage, afin de déceler le comportement de l'acier après soudage, les changements structuraux, et les caractéristiques mécaniques.

Ce travail comporte quatre chapitres :

- Chapitre I : qui concerne l'étude de la métallurgie de soudage
- Chapitre II : qui parle des procédés de soudage et les défauts qui l'en découlent
- Chapitre III : la grande partie de ce chapitre traite le mécanisme de déformation
- Chapitre IV : la partie pratique qui a été menée et la discussion des résultats enregistrés par cette dernière

CHAPIRE I : METALLURGIE

DE SOUDAGE
DE SOUDAGE

Métallurgie de soudage

I-Introduction :

Pour de nombreuses applications industrielles il est nécessaire d'assembler par soudage des Matériaux dissemblables (Aciers ferritiques avec des aciers inoxydables austénitiques, ou alliages à base de nickel...). La métallurgie de soudage nécessite une large connaissance aussi bien de la métallurgie du procédé que celle de la métallurgie physique.

I-1-Définition de soudage :

Le soudage, tout simplement, est l'opération qui permet de lier quasiment tous les matériaux, des matériaux métalliques jusqu'aux matières plastiques ; en assurant la continuité de la matière à assembler et en préservant les propriétés mécaniques, ainsi que métallurgiques et physiques.

Le soudage est une opération métallurgique mettant en évidence l'opération de soudure qui est une forme d'assemblage de deux parties d'une pièce métallique subissant différents changements structuraux lors de l'opération de soudage.

Il consiste à assembler deux éléments métalliques, par fusion et ré-solidification. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un apport permettant un meilleur lien entre les pièces. [1]

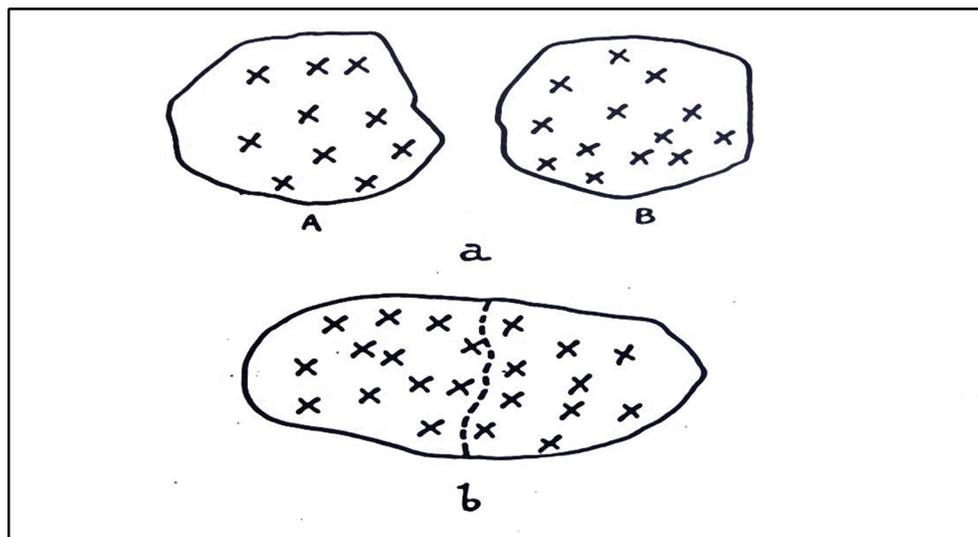


Figure I-1: Illustration du déroulement de l'opération de soudage [1]

Durant la phase de soudage, le métal de base ainsi que le métal d'apport sont portés à la température de fusion permettant ainsi un mélange des éléments

Un examen plus attentif de ce qui se passe à l'échelle de la structure cristalline nous éclairera mieux sur la nature de la continuité métallique qu'établit le soudage. Avant l'opération, les atomes de chaque partie à assembler sont groupés en deux ensembles distincts. Après soudage, la continuité métallique se manifeste quand deux ensembles se réunissent en un seul, sans interposition d'aucun atome étranger aux deux ensembles initiaux.

I-2- Étude thermique du soudage :[1]

I-2-1-Différentes zones de soudages :

Tous les procédés de soudage se traduisent par un échauffement local

a-Zone fondue : C'est la région de l'état liquide au moment de l'exécution de la soudure, et cela avec ou sans la contribution du métal d'apport. La zone fondue d'une soudure à l'arc présente pour les premières passes centrales une structure fine, avec , soit formation de perlite ou joints des grains, soit précipitation de la cémentite, or la dernière couche présente une structure grossière , orientée et dendritique , appelée structure basaltique

b- Zone affectée thermiquement (ZAT) :C'est la partie comprise entre la zone du métal fondue et celle correspondant à la disparition de tout effet de chauffage sur la structure métallurgique du métal de base. Dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation, on distingue différentes zones :

b-1-Zone de surchauffe ($\theta_s > 1100^\circ\text{C}$) : Qui se trouve au voisinage de la soudure (zone fondue) et dans laquelle la température a été suffisante pour entraîner une transformation allotropique de la structure ce qui implique une modification des propriétés physiques du métal, sans changement de sa composition chimique.

b-2-Zone austenitisé (zone de recuit) ($\theta_s > \theta > \text{Ac3}$) : La température est suffisante pour les transformations allotropique, mais on constate aussi des modifications de point de vue propriétés physiques tell que grosseur et forme de grain du métal.

b-3-Zone d'austenisation partielle ($\text{Ac3} > \theta > \text{Ac1}$) : elle concerne les températures inférieur à celle de recuit

b-4-Zone de liaison (ZL) :C'est la limite entre la zone fondue et la zone affecté thermiquement (ZAT). Comme elle est le siège de l'amorçage de la solidification du métal fondu (elle est mise en évidences par la différence de structure constatée de part et d'autre).

c-Métal de base (MB) :Le métal de base subit des traitements thermiques variable suivant le point considéré, de ce fait, il est le siège de transformations en fonction d'une part du cycle thermique et d'autre part de la nature même du métal

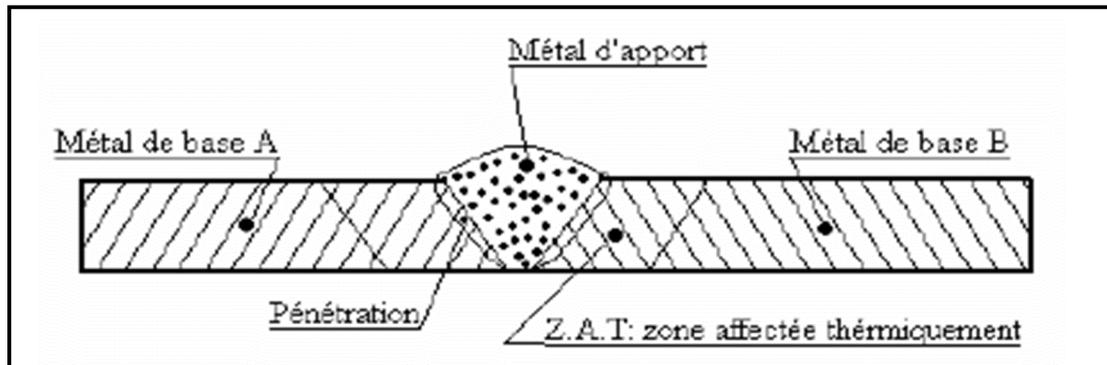


Figure I-2 : les différentes zones de soudage

I-3-Cycle thermique de soudage:[1]

I-3-1-Notion de cycle thermique :

L'interprétation métallurgique de tout phénomène résultant d'un effet thermique requiert, comme condition nécessaire, la connaissance de la température atteinte. À cette condition de température s'ajoute une ou plusieurs conditions de temps, qu'il s'agisse de l'échauffement, du séjour à température ou du refroidissement. Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance, durant l'opération de soudage. On considère la variation de température θ en fonction du temps t . la courbe correspondante $\theta=f(t)$, tracé en un point **A** voisin d'une soudure (**Fig I-3**) nous renseigne sur les grandeurs dont nous avons besoin, à savoir :

- la température maximale atteinte T_m ;
- le temps t_s de séjour au-dessus d'une température ;
- la loi du refroidissement, traduite par le temps de refroidissement t_r entre deux températures θ_1 et θ_2 (généralement $\theta_1=800^\circ\text{C}$ ou 850°C et $\theta_2=500^\circ\text{C}$) ou par la vitesse de refroidissement V_r a une température θ_r

À partir de ce cycle thermique on décèle deux grandeurs (temps et températures) en un point donné à l'assemblage, On peut accéder aisément à la courbe représentant la répartition thermique au voisinage de la soudure ; en donnant la variation de température maximale atteinte en chaque point en fonction de la distance X ($T_m=f(x)$), (**Fig I-4**). Grâce à cette courbe, on peut délimiter les limites de la Z.A.T.

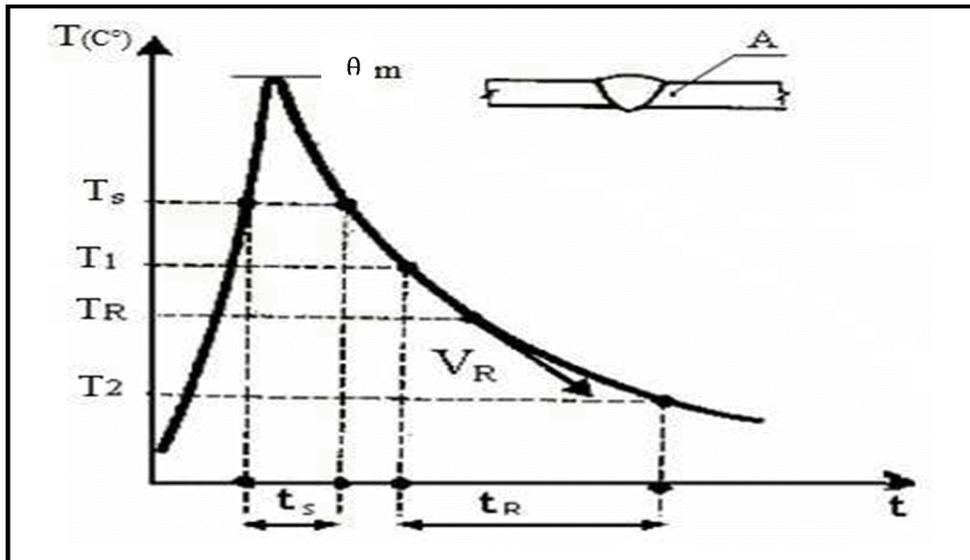


Figure I-3: cycle thermique d'un point A d'une soudure. [1]

$$T_{\max} = \frac{0484 \cdot \eta \cdot E}{2 \cdot C \cdot \rho \cdot y \cdot S} + Ta \quad (I-1)$$

$$tr_{800/500} = \frac{1}{4\pi\lambda\rho c} \left[\frac{E}{e} \right]^2 \left[\left(\frac{1}{500 - Ta} \right) - \left(\frac{1}{800 - Ta} \right) \right]^2 \quad (I-2)$$

I-3-2-Répartition thermique dans le cordon de soudure [1]

On peut également déterminer à travers ces données la répartition thermique aux alentours du Cordon de soudure, qui représente la variation de la température maximale atteinte θ_m en fonction de la distance x qui nous permettra de délimiter les étendues des différentes zones

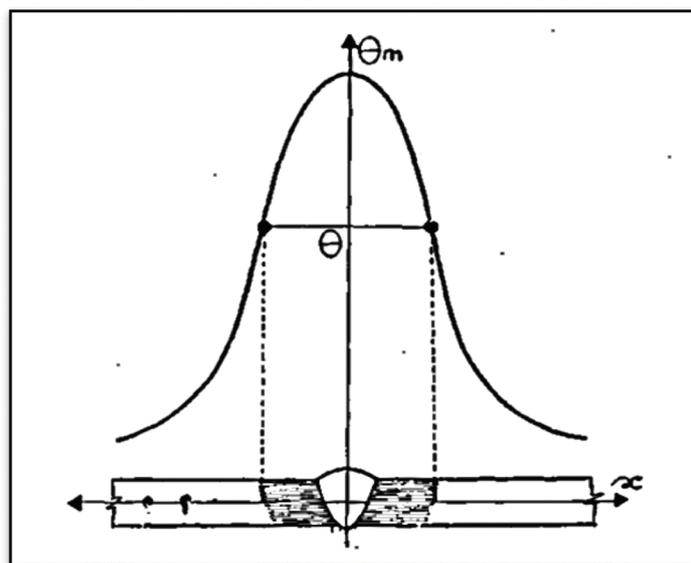


Figure I-4 : Répartition thermique dans une soudure [1]

L'allure des cycles thermiques varie en fonction du positionnement du point x par rapport à la ligne de soudure S comme montre dans la figure ci-dessus

I-3-3-Notion d'état quasi-stationnaire (soudage avec déplacement de la source de chaleur).[1]

Si nous relevons , au moyen de couples thermoélectrique , les courbes $T=f(t)$ en des points A_1, A_2, A_3, \dots etc, situé à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et a des distances croissantes de l'origine O de ce même 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 figure II-4 ,qui nous conduit aux remarques suivantes :

- a) La température maximale atteinte T_m croit 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 constante.
 - b) En même temps, les lois de refroidissements, mesurées par les temps de refroidissement entre deux températures, deviennent identiques, comme le sont les temps de séjour (non illustrés sur la figure). Autrement dit, les courbes $T=f(t)$ deviennent superposables dès que la source de chaleur a franchi un certain parcours q . La disposition ainsi décrite rend compte de l'état quasi-stationnaire, qui résulte du fait qu'à partir d'une certaine distance, parcourue d'un mouvement uniforme par la source de chaleur, l'énergie dénoncée par conductibilité dans la pièce est à chaque instant compensée par l'énergie fournie au niveau de la source de chaleur. Ceci peut encore se traduire en disant que, par rapport à la source de chaleur en mouvement. Au-delà du parcours q , les isothermes demeurent identiques à celles mêmes et se déplacent avec la source .Leurs enveloppe sont des lignes parallèles au cordon.
- Enfin, bien entendu, rien de tout ceci ne s'applique aux procédés de soudage qui ne font pas intervenir de déplacement de la source de chaleur.

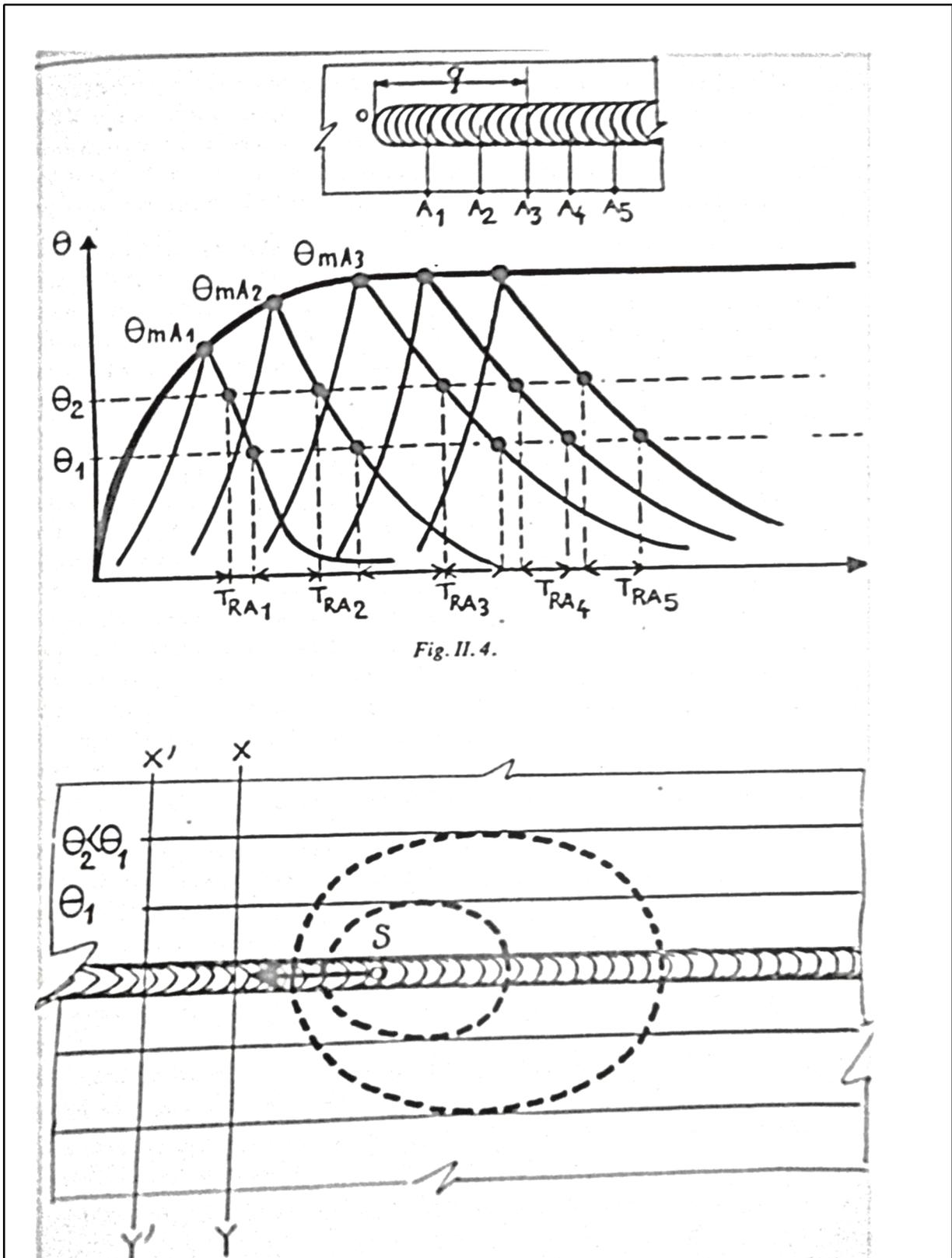


Fig. II. 4.

Figure I-5: courbes $\theta=f(t)$ de plusieurs points du cordon de soudure.[1]

I-3-4-Distribution de la température au voisinage de la zone soudée :[1]

Grace à l'existence de l'état quasi-stationnaire, nous pouvons limiter notre détermination des courbes températures-temps aux points A.B.C. réparties sur une droite 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'état quasi-stationnaire, les résultats seront les mêmes schématisés par la disposition de la (figure I-6), qui conduit aux remarques suivantes :

- 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 ;
- Les températures maximales atteintes sont décroissantes à partir de la ligne de soudure ;
- Toutes les courbes se rejoignent au niveau de la température initiale du métal de base ;
- Les températures maximales qui sont décroissantes $T_m(A)$, $T_m(B)$... sont franchies pour des temps $t_m(A)$, $t_m(B)$... , qui sont croissants. Ce décalage se traduit par la courbe $T_m=\varphi(t)$ qui sépare le domaine des températures croissantes de celui des températures décroissantes.
- 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 pourra parler de vitesse ou de temps de refroidissement entre 800°C et 500°C , intervalle de température particulièrement critique dans ce cas. [1]

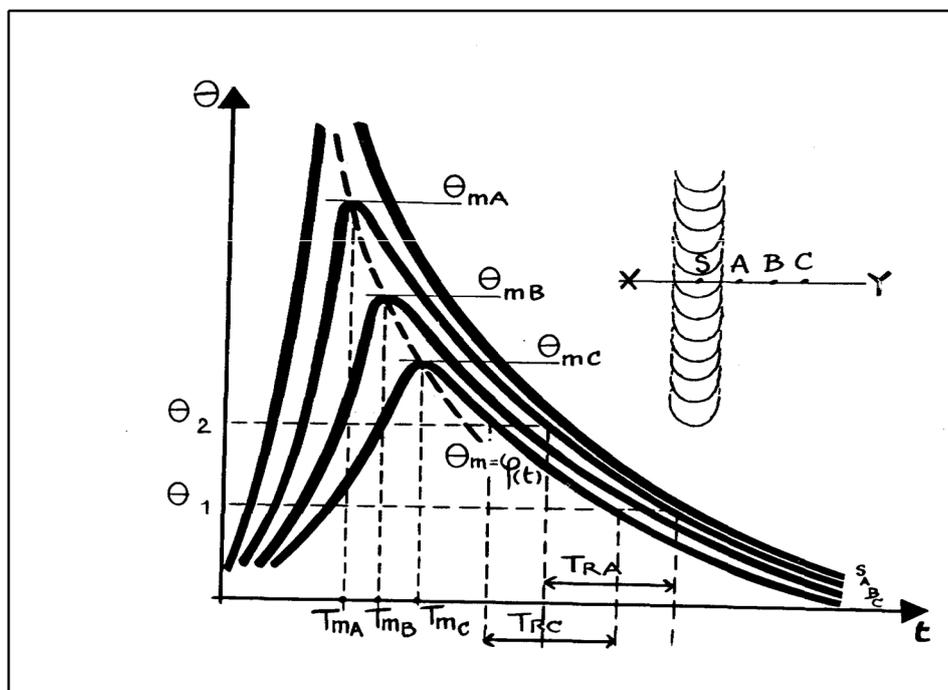


Figure I-6 : Cycles thermiques de différents points situés à une distance x du cordon de soudure.[1]

I-3-5-Solide thermique :[10]

Pour décrire la répartition spatiale des cycles thermiques de soudage, PORTEVIN et SAFARIAN ont proposé sous le nom de solide thermique une représentation qui tient compte 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 du 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 a lui-même tout le long de la soudure. Les courbes $T = f(t)$ en des points 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 décalé dans le temps, ce dont rend compte la courbe gauche

$T_m = \varphi(x, t)$ qui figure sur le solide, alors que la courbe $T = \varphi(t)$ on a souligné l'intérêt n'est que la projection sur le plan XOY .

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

Selon le procédé utilisé, le solide est plus ou moins aigu, mais les procédés de soudage avec déplacement de la source de chaleur sont tributaires de cette représentation.

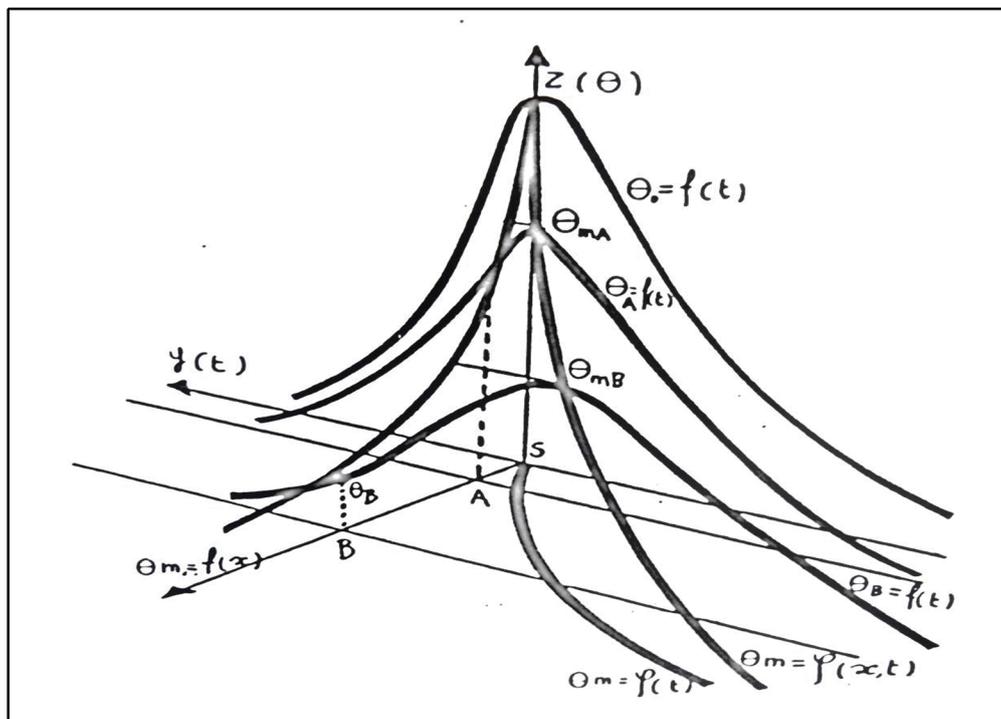


Figure I-7 : Solide thermique.[1]

La projection du solide thermique sur le plan xoy donne la répartition des isothermes comme elle est représentée sur la figure ci-dessous:

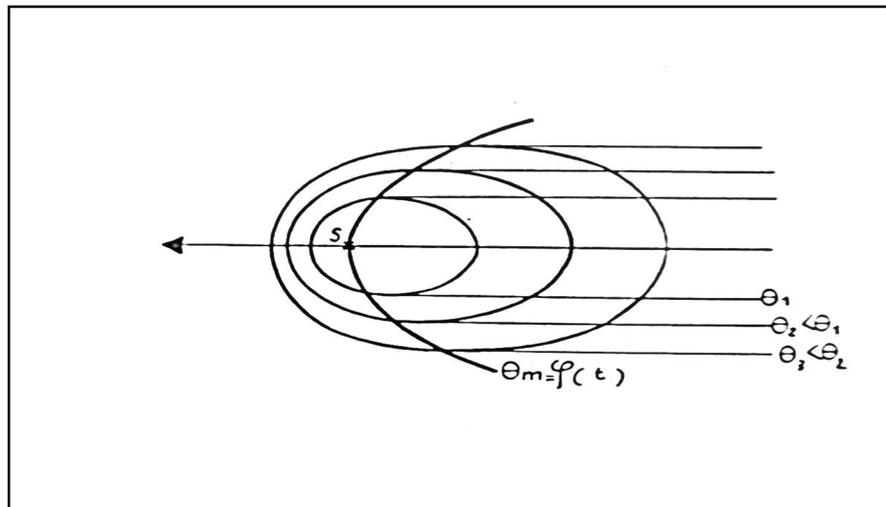


Figure I-8 : Les isothermes. [1]

Elles donnent une indication sur le passage de la source de chaleur et permet de délimiter l'étendue des différentes zones au sein du cordon de soudure.

I-4-Paramètres influençant le cycle thermique et la répartition thermique dans le cas du soudage [1]:

Le procédé de soudage utilisant l'arc électrique comme source d'énergie nécessitent un nombre de variables indépendantes ou non sur lesquelles on peut plus ou moins agir en fonction du résultat recherché. Parmi ces paramètres on citera comme suit :

α -Le métal de base et ses caractéristiques thermiques

La nature du métal de base et la géométrie du joint et son épaisseur ont un effet direct sur la vitesse de refroidissement. Le métal est caractérisé par sa conductibilité calorifique : la nature du métal nous renseigne sur sa capacité calorifique dont son augmentation accroît le gradient de température, chose qui explique la réduction du temps de séjour à haute température et par conséquent l'augmentation de la vitesse de refroidissement.

Pour mieux apprécier l'effet des caractéristiques thermiques, on définit le concept de diffusité thermique comme suit :

K : diffusité thermique

k : conductibilité thermique

$$K = \frac{k}{\rho c}$$

(I-3)

ρ : Masse volumique

C : capacité calorifique

Même cas est constaté lorsque l'épaisseur de joint st celle des tôles à souder est importante.

b-La température initiale de la pièce (température de préchauffage)

Sachant que le gradient de température est dû à l'énergie emmagasinée dans le métal. Cela montre l'importance de la température initiale du métal de base par rapport au cycle et à la répartition thermique en soudage. En effet l'augmentation de celle-ci (préchauffage) a pour conséquence :

- L'augmentation de la température maximale ;
- L'augmentation du temps de séjours à haute températures ;
- L'augmentation du temps de refroidissement ; $t_{r_{800/500}}$

Un autre effet est lie aux courbes $\theta_m = f(x)$ ou l'on constate que le préchauffage augmente l'étendue de la zone affecté thermiquement (ZAT) , d'où la naissance de constituants modérés.

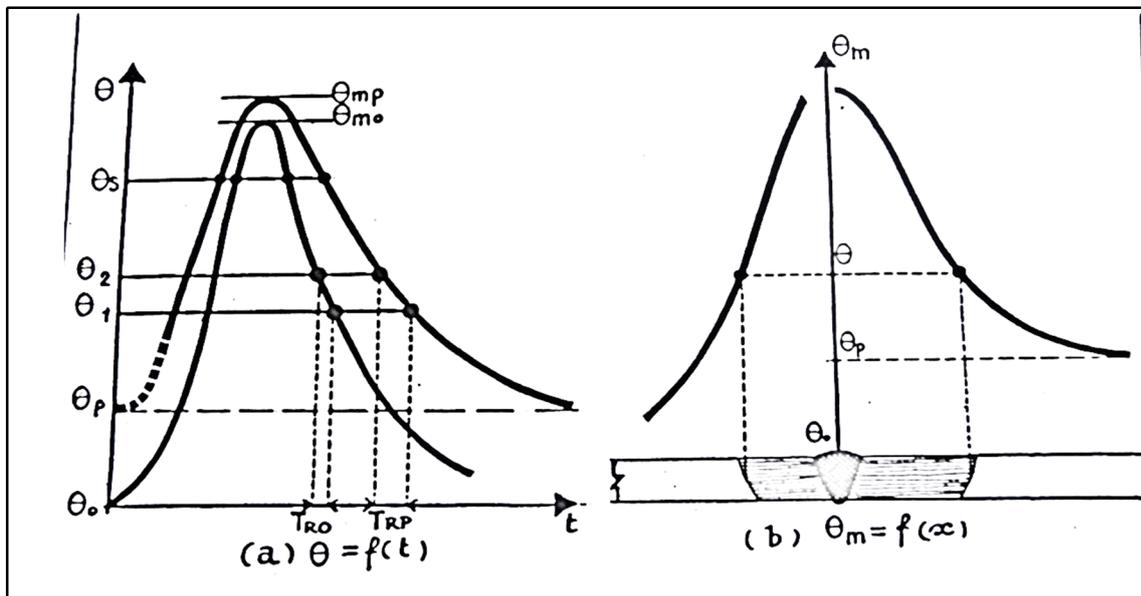


Figure I-9 : influence de température de préchauffage sur le cycle thermique et la répartition thermique [1]

c-L'apport énergétique [1]

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

$$E = U I 60 / V \quad (I-4) \quad \text{OU} \quad E : \text{Joule/centimètre}$$

U : Volte

I : Ampère

V : Centimètre/minute

d-Soudage multi passes

Jusqu'ici l'étude s'est portée sur une soudure en une seule passe. Concernant le soudage multi passes ou poly passes il y a lieu de prendre en considérations d'autres paramètres tels que :

- La température thermique ;
- Le nombre, la disposition des passes et de leurs conditions d'exécution ;
- L'intervalle de temps entre passe ;
- La position par rapport à la soudure du point dont on suit la variation de température .

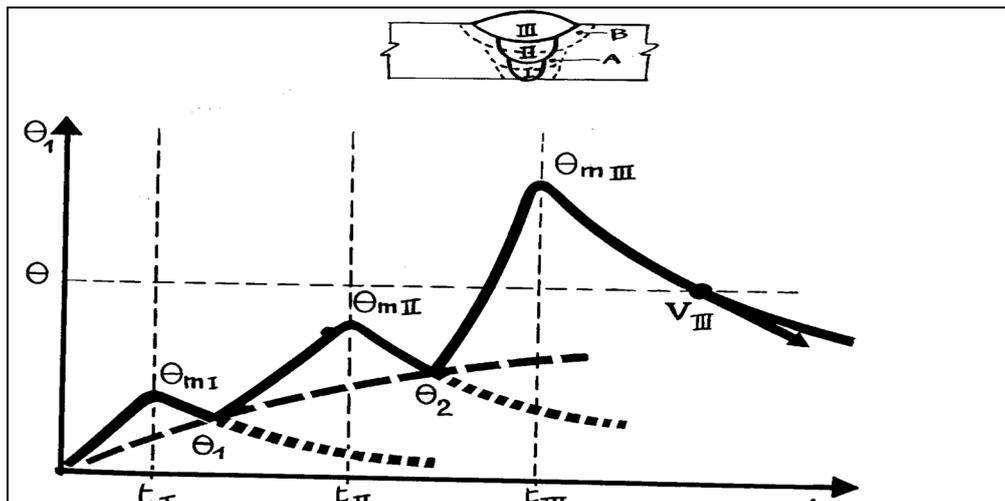


Figure I-10 : Effets thermiques du soudage en plusieurs passes, dans le cas d'une soudure sur bords chanfreinés en V, exécutée en trois passes sans préchauffage [1].

I-5-Étude métallurgique du soudage [1] :

I-5-1-Cas de l'échauffement

Lors de l'échauffement qui accompagne le soudage, le métal de base et éventuellement le métal fondu subit des transformations qui touchent à la fois sa structure micrographique

(répartition et morphologie des constituants présents) et sa constitution (nature et proportion des phases)

I-5-1-1- Changement de structure :

I-5-1-1- a-État écroui (Recristallisation après écrouissage) [1]

Sous l'effet d'un échauffement à partir de l'état écroui d'un métal (l'état ou le métal a subi un travail à froid qui s'est traduit par une modification de sa structure micrographique), les grains ou précisément le réseau cristallin de ce dernier subit une réorganisation qu'on appelle «Recristallisation», dont la (**figure I-12**) schématise les phases successives à l'échelle de la structure micrographique, en relation avec la grosseur du grain et l'évolution des propriétés mécanique. Ces modifications ont un impact direct sur les propriétés mécaniques du métal en question, à savoir l'augmentation de la résistance à la déformation et diminution de l'aptitude à la déformation (Résilience, Allongement...), or pendant que la recristallisation progresse, les propriétés mécaniques évoluent en sens inverse des effets de l'écrouissage.

Schema-1 : Structure écrouie

Schema-2 : Apparition des germes aux joints de grains

Schema-3 : Développement de ces germes en une structure équi-axe dont les grains sont d'autant plus fins que le degré d'écrouissage initial est élevé. Structure de recristallisation primaire qui se stabilise avec un léger grossissement jusqu'à θ_s ou commence la surchauffe (recristallisation secondaire)

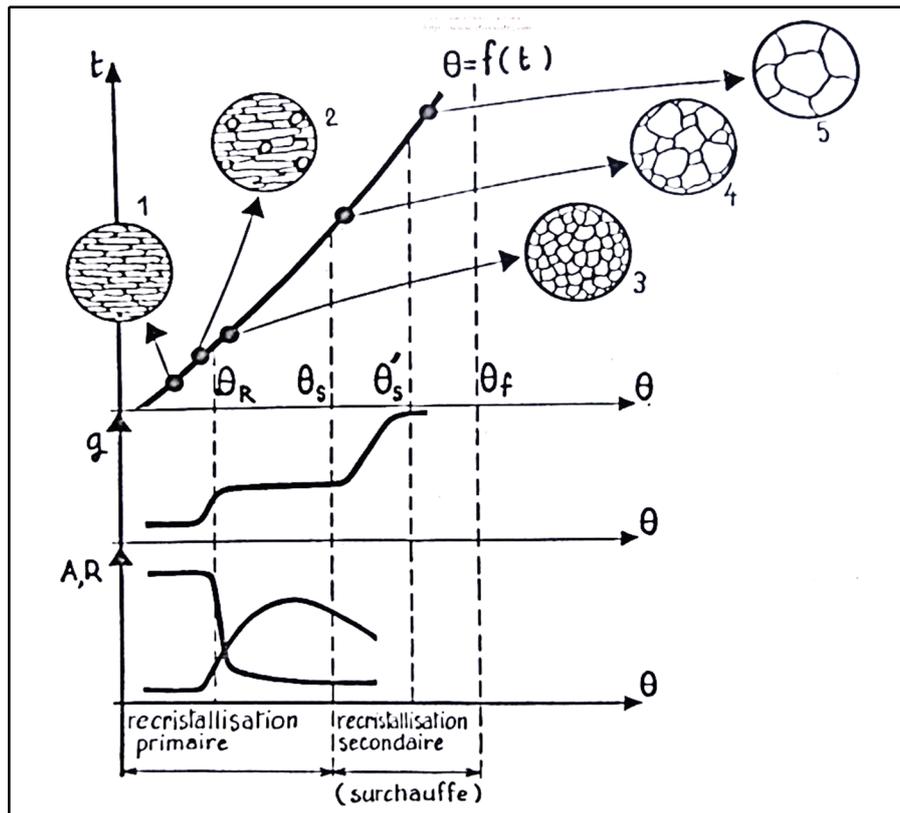


Fig-I-11: Phénomène de recristallisation après écrouissage. [1]

Le phénomène de recristallisation après écrouissage trouve son application directe dans le cas du soudage sur produit écroui : toute opération de soudage entraîne dans ce cas, un adoucissement du métal de base jusqu'au niveau de l'isotherme de la température de recristallisation. Cet effet, apparent sur les filiations de dureté (**fig-I-112**) se manifeste plus ou moins vis-à-vis des caractéristiques de traction relevées sur éprouvette soudée usinée perpendiculairement au joint, selon la largeur de la zone affectée (ZAT).

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 parce que la déformation peut s'y développer. Si cette zone est étroite, elle ne s'y localise que pour une charge plus élevée, parce que le métal voisin raidit la zone adoucie, ou même ne s'y localise pas du tout, et l'effet de l'adoucissement ne se manifeste pas. La zone fondue a aussi son rôle à jouer, par son éventuel effet de raidissement, selon le cas elle-même douce comme le métal recristallise ou dure comme le métal de base écroui. Ainsi se présente le phénomène de recristallisation engendré par le soudage[

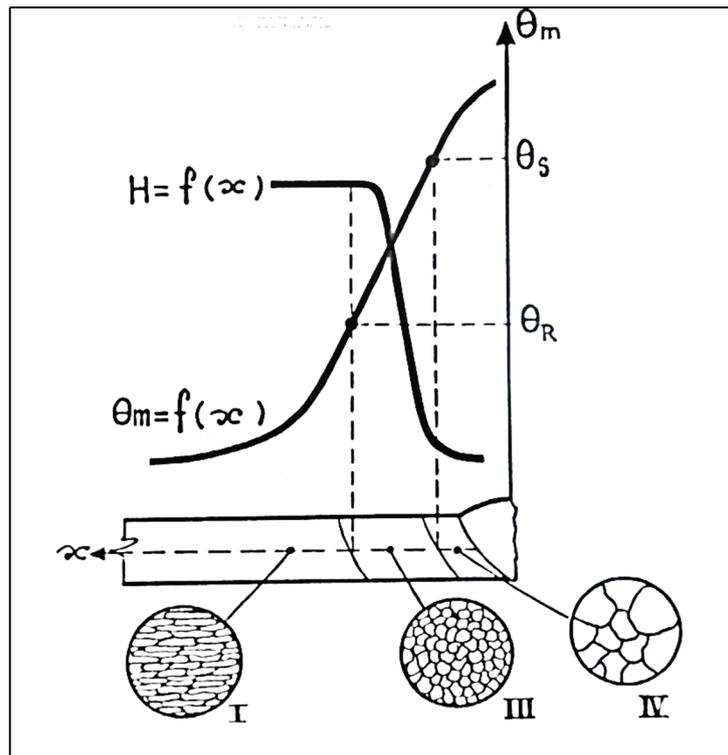


Fig-I-12-Evolution de la structure d'un produit écroui du au chauffage [1]

I-5-1-1-b-Surchauffe : «recristallisation secondaire»[3]

On constate (figure-I-12) qu'à partir d'une température θ_s , certains grains disparaissent au bénéfice des autres qui grossissent davantage. Ce phénomène (constate avant la fusion) est associé à l'énergie des joints de grains et au déplacement de ces joints. Par ailleurs, la dimension du grain de surchauffe est fonction de la température et du temps de séjour à cette dernière température. Ainsi que du degré d'écrouissage initial.

I-5-1-1-c-Coalescence [1]

C'est un phénomène selon lequel des particules d'un constituants présents au sein d'une solution solide sont susceptible, sous l'influence des force interrassiale, de se rassembler et de se globaliser lors d'un traitement thermique. Ce phénomène est assez lent, or, lorsque les particules sont finement dispersées, un cycle thermique même bref comme celui de soudage est susceptible de provoquer la coalescence.

I-5-1-2-Changement de constitution : Cessation des états d'équilibre : «remise en solution» [12]

a-Nature de phénomène

Dans l'échelle des températures croissantes, la première conséquence d'un échauffement, vis-à-vis de la constitution d'un alliage, est le retour, à partir d'un état hors d'équilibre à un état plus proche de l'état d'équilibre, ou même à l'état d'équilibre.

Une telle évolution peut se produire, cas d'un alliage binaire ou pseudo-binaire, lorsque le diagramme d'équilibre montre une variation de solubilité en fonction de la température, d'un constituant B dans une solution solide A, la variation qui se traduit par une ligne oblique du diagramme d'équilibre. Dans ces conditions, pour un alliage de composition C%, un chauffage au-dessus de θ_s permet la mise en solution du constituant B dans la phase A.

Inversement, un refroidissement lent permet la précipitation de B, alors qu'un refroidissement rapide maintient B en solution sursaturée dans A, A partir de cet état dit « état trempé », un nouveau chauffage tend à faire réapparaître la phase B selon des modalités que le cycle thermique de soudage est susceptible de provoquer. Pour mieux comprendre ce comportement, on cite le cas des aciers inoxydables austénitiques.

I-5-1-2-b-Vieillessement de l'acier doux

Le vieillissement de l'acier est associé à la précipitation du nitrure de fer Fe_4N (qui joue le rôle du constituant B) dans la ferrite : A l'état recuit, le nitrure y demeure en solution sursaturée, mais un chauffage à température modérée ($250^\circ C$) est susceptible d'en provoquer la précipitation ultrafine, surtout si une déformation à froid est intervenue auparavant, ou bien intervient au même temps que le chauffage. Cette précipitation est fragilisant, mais un nouveau chauffage, à température un peu plus élevée ($650^\circ C$) en élimine les effets, grâce à la coalescence du nitrure de fer. Transposées au cas du soudage, ces informations montrent qu'il y a possibilité de vieillissement de l'acier doux chaque fois que l'on soude sur ou à proximité de zones déformées a froid, du fait d leurs fabrication (profilé laminé à froid) ou des conditions de mise en œuvre des produits : toute zone ainsi déformée, portée par le cycle thermique a quelques centaines de degrés , est susceptible de vieillissement. C'est la raison pour laquelle il est déconseillé de situer des soudures au voisinage des zones déformées à froid du métal de base.

I-5-1-3-Zone de liaison :

Pour un alliage, il existe un intervalle de température entre le début et la fin de fusion (solidus et liquidus du diagramme d'équilibre). À partir du solidus, une phase augmente jusqu'à l'état liquide complet. La composition de cette phase et son évolution sont indiquées par le diagramme d'équilibre correspondant. Si le cycle thermique est rapide, l'homogénéisation par diffusion requise par l'état d'équilibre est incomplète, ce qui provoque le phénomène de liquation inter-granulaire nommé aussi « brulure », perceptible après refroidissement, car il entraîne une hétérogénéité irréversible : on trouve par exemple une phase riche en constitution B, dans le cas d'un état initial constitué par une solution solide AB. La **liquation (*)** inter-granulaire est évidemment favorisée par la préexistence d'une phase fusible aux joints des grains. Dans le cas du soudage, ce phénomène se produit assez rarement, du fait que le soudage par fusion fait intervenir une source de chaleur en mouvement : à l'avant du bain de fusion, la liquation peut sans doute intervenir, et un certain nombre de grains se trouvent momentanément entourés de phase liquide. Il en résulte une décohésion de ces grains, qui ne demande qu'à tomber et se diluer dans le bain de fusion. Il ne reste donc plus trace des grains ainsi déchaussés et on ne trouve plus à la zone de liaison que les grains qui, sur le côté du bain de fusion, n'ont subi qu'en partie la liquation et qui n'ont pas été arrachés au passage.

I-5-2-Cas de refroidissement [15] :

L'étude des transformations à l'échauffement nous a montré que le stade final de l'échauffement au cours du soudage d'un alliage biphasé constitué à l'ambiante et à l'état d'équilibre par une phase B soluble à chaud dans une phase A comporte une solution solide unique A, que l'on trouve dans la ZAT. Le retour à l'état d'équilibre a normalement lieu, et on voit réapparaître l'état biphasé A+B. Cette situation est plus favorable si le métal de base est lui-même ainsi constitué. Tel est le cas, par exemple, pour les alliages Al Mg, constitués à l'état d'équilibre, sous lequel on les emploie, par une solution A riche en aluminium, le composé $Mg_2 Al_3$ jouant le rôle du constituant B.

() : Séparation par fusion de métaux de fusibilité différentes*

I-6-Localisation des transformations [10]

La localisation au chauffage entraîne au niveau du joint une succession de zones présentant des transformations métallurgiques diverses. Pour les aciers, en partant de la zone fondue vers le métal de la zone de surchauffe on observe :

- La zone austénitisée totale avec transformation martensitique totale ou partielle,
- La zone austénitisée partielle,
- La zone non austénitisée.

L'importance et la structure de ces zones dépendent du cycle thermique et de la répartition thermique dans l'assemblage.

Il faut noter également le fait que dans le soudage multi passe, ces zones peuvent être totalement ou partiellement détruites.

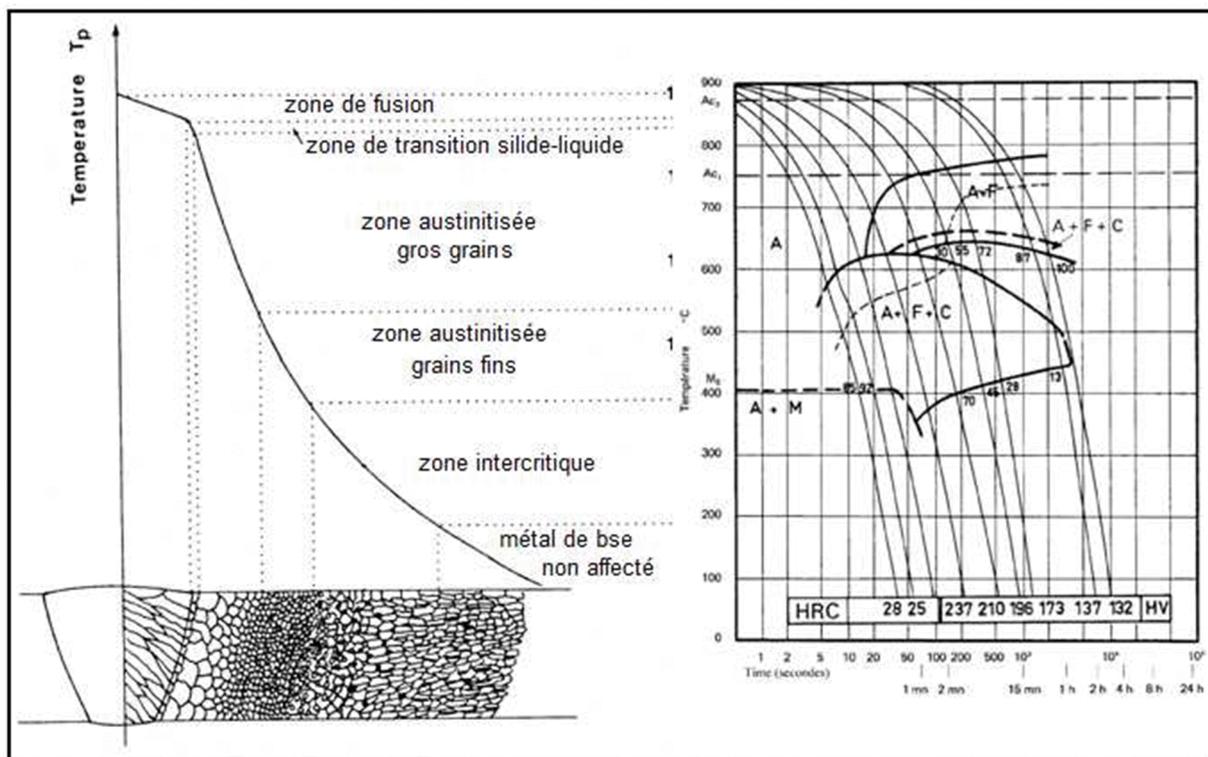


Figure 1-13: Identification des différentes structures métallurgiques d'un joint soudé selon le gradient des températures maximales atteintes et le diagramme d'équilibre Fer-Fe₃C [1]

Résumé :

Les explications précitées, concernant les caractéristiques généraux de l'opération de soudage, a dès à présent montré que la continuité métallique, qui est le but de l'opération est obtenue au prix de conditions qui ne sont pas sans effet, du point de vue métallurgique et thermomécanique, au niveau et aussi en dehors des joints. Ces effets et leurs conséquences vis-à-vis du comportement, durant l'exécution et en service, de ces joints et des constructions qui leurs contiennent sont à la base de ce qu'on est convenu d'appeler la soudabilité. La métallurgie de soudage a pour objet d'étudier ces effets et d'interpréter leurs conséquences, en vue de servir de fondement aux exigences concernant aussi bien les produits dit soudables que la mise au point des modes opératoires relatifs à l'application des procédés. On pourrait dire alors qu'étudier la métallurgie du soudage consiste à se préoccuper de ce que le métal « pense » de l'opération de soudage et du souvenir qu'il en garde, car c'est de ce souvenir que dépend la soudabilité.

À ce point, il convient de préciser ce qu'on appelle déformation à froid et à chaud, en métallurgie, et soudage avec pression à froid et à chaud. En métallurgie, on dit qu'une déformation a lieu à froid lorsqu'elle intervient à une température assez basse pour entraîner l'écrouissage, c'est-à-dire un déplacement des atomes. La déformation est dite à chaud lorsqu'elle a lieu au-dessus d'une certaine température, dite de recristallisation, à partir de laquelle la structure cristalline se régénère spontanément. En soudage par pression, on parle de soudage à froid lorsqu'aucune source de chaleur n'intervient directement pour faciliter la recristallisation et de soudage à chaud dans le cas contraire.

CHAPITRE II :

PROCEDES DE SOUDAGE
PROCEDES DE SOUDAGE

Procédés de soudage

II-1-Introduction

Le soudage relève de la métallurgie. Il faut connaître le matériau pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que l'ouvrage sera fortement sollicité. C'est pourquoi le soudage est régi par des cahiers des charges et des modes opératoires précis. Le soudage est une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces. Il constitue un moyen d'assemblage privilégié pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques.

Quels sont les avantages du soudage par rapport aux autres techniques d'assemblage ?

Le soudage assure une continuité métallique de la pièce lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (Caractéristiques mécaniques, thermiques, chimiques, électriques d'étanchéité, de durabilité...). Il répond à des sollicitations élevées. Il est durable car insensible aux variations de température, aux conditions climatiques... pour finir il garantit l'étanchéité de la pièce à souder.

Le soudage trouve des applications dans des secteurs d'activité très diversifiés comme la production, la construction, la réparation et la maintenance.

Ses principaux domaines d'application dans le domaine de l'acier sont la mécanique au sens large et la construction, pour lesquels il constitue de loin le moyen d'assemblage prioritaire.

En construction métallique, lors de la préfabrication des éléments en atelier, on assemble systématiquement par soudage. Sur les chantiers on aura plutôt recours au boulonnage des éléments préfabriqués. En France dans les ponts métalliques, on utilise le soudage dans 100% des cas.

Le résultat du soudage dépend à la fois des caractéristiques de l'acier (composition chimique, épaisseur) du type de métal d'apport et des réglages adoptés pendant le soudage. On parle de réponse au soudage d'un matériau.

Par exemple, si un acier allié carbone/manganèse a une forte teneur en carbone, il est nécessaire de le préchauffer pour éviter sa fissuration, voire de mettre en œuvre des énergies de soudage plus élevées, ce qui pourra nuire aux caractéristiques de résilience de l'acier, si l'on dépasse une certaine énergie.

Plusieurs procédés de soudage différents sont en usage. Nous ne décrivons que les plus fréquemment utilisés actuellement. Chacun, selon ses spécificités propres, est privilégié pour des applications particulières.

Tout d'abord il convient de : Différencier le soudage manuel du soudage mécanisé Pour lequel on ne parle pas de soudeurs mais d'opérateurs de soudage.

Ces opérateurs ne sont pas obligatoirement formés aux techniques de soudage.

Leur rôle se limite à la commande manuelle des machines.

Ils doivent néanmoins parfois effectuer des «reprises» de soudure.

Soudure hétérogène: métal différent avec point de fusion plus bas

Soudure autogène: pas d'apport de métal ou apport d'un métal identique

a-La soudure hétérogène comprend

La soudure tendre à l'aide d'un mélange de plomb et d'étain qui fond à basse température (moins de 450 °C)

Le brasage à l'aide de cuivre ou de laiton, nécessitant une plus haute température, utilisant le procédé de soudage au chalumeau

b-La soudure autogène comprend

- La soudure au chalumeau ;
- La soudure à l'arc électrique avec ou sans couverture de gaz inertes ;
- La soudure électrique par point ou par résistance.

Actuellement, en raison du développement des caractéristiques métallurgiques des métaux d'apport, quasiment tous les procédés de soudage permettent le soudage hétérogène (par exemple acier-inox).

II-2-Classification des procédés de soudage [5]

Il existe à l'heure actuelle des dizaines de procédés de soudage. Le plus souvent, ils sont classés à partir de type d'énergie utilisée ; par Exemple : énergie électrique, énergie chimique, etc ; ensuite les procédés sont classés plus particulièrement suivant la forme de l'énergie directement utilisable pour le soudage ; par exemple : soudage à l'arc électrique avec électrode enrobées, soudage par résistance à la molette, etc.

Les principaux procédés de soudage sont :

- Soudage à l'arc électrique :
 - Avec électrode enrobée
 - Avec électrode réfractaire (non fusible) : TIG ;
 - Avec fil électrode sous protection gazeuse : MIG/MAG ;
 - Avec fil électrode sous flux en poudre.

- Soudage par résistance électrique :
 - Par points ;
 - Par étincelage ;
 - À la molette ;
 - Par bossage ;

- Soudage par faisceau d'électrons ;
- Soudage au plasma ;
- Soudage par Laser ;
- Soudage par friction ;
- Soudage oxyacétylénique, etc....

II-3-Procédés de soudage :

II-3-1-soudage à l'arc électrique [6] :

II-3-1-1-L'arc électrique

a-Description :

Si l'on porte deux électrodes à un potentiel différent et qu'on fait le contact, un courant passe. Mais vu le mauvais contact, la résistance est grande d'où une élévation de température par effet joule : c'est l'amorçage (**FIG II-1**) .

Si on les écarte le courant passe toujours et il apparaît une lumière éblouissante : L'arc électrique se mobilise. Les électrodes émettent des électrons, s'ils sont animés d'une énergie

suffisante (polarité directe). Ils excitent l'atome de gaz rencontré, ces électrons reviennent ensuite à leur niveau d'énergie en mettant émettant des photons (lumière).

Pour une énergie encore plus intense, l'électron arrache un électron de l'atome et à la place de l'atome neutre, on a un ion positif et un électron négatif : l'arc ionise donc le gaz qu'il traverse.

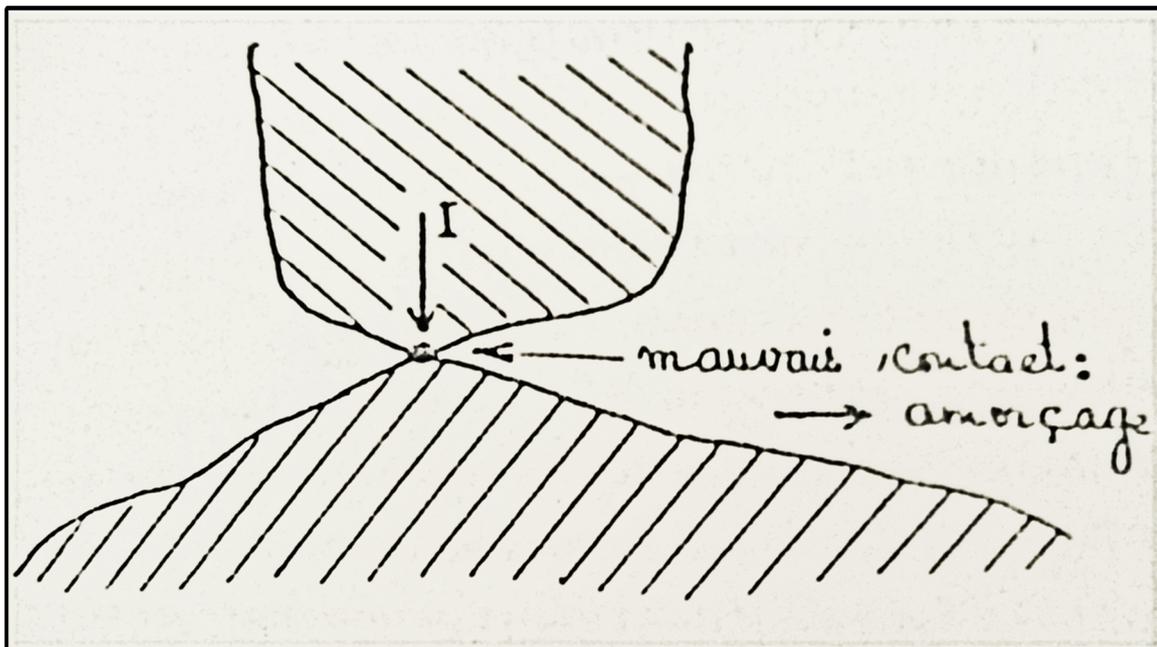


Figure II-1 : mauvais contact en soudage [6]

La haute température de l'arc permet la fusion du métal : il y a soudure, (**Fig II-2**) ;

L'anode est plus chaude que la cathode en raison du bombardement électronique :

-cathode(-) : 2400°C

-anode (+) : 3200°C

L'énergie dissipée dans l'arc dépend de la tension U entre les électrodes et l'intensité I du courant.

L'équivalent calorifique du Watt étant de 0.24 calories ; l'énergie dissipée dans l'arc est :

$$E = 0.24 \times U \times I \quad (\text{II-1}) \quad -E = \text{cal/sec}$$

- $U = \text{Volt}$

- $I = \text{Ampère}$

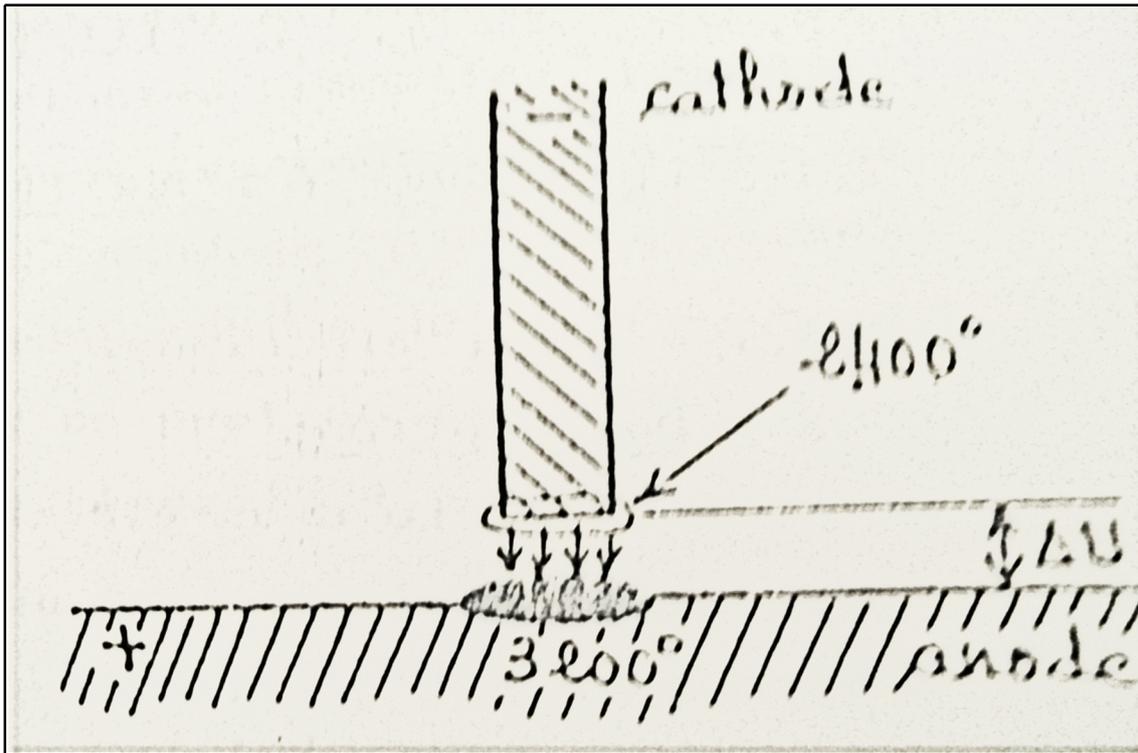


Figure II-2 : L'arc électrique [6]

b-Caractéristiques de l'arc[14] :

Si on maintient un entrefer constant entre deux électrodes, en faisant varier le courant I de l'arc on s'aperçoit que la variation de la tension U ne suit pas la loi d'OHM. Le graphe de

$$U_a = f(I)$$

N'est pas une droite de pente R , (R étant la résistance de l'arc), mais sur la courbe expérimentale de la figure (FIG II-3), on peut distinguer trois zones caractéristiques :

[I]– Pour les faibles intensités, les électrodes ne sont pas chauffées au maximum. De A à B on augmente l'intensité de ΔI , il s'en suit une élévation de température, ce qui facilite l'émission des électrodes qui diminue la différence de potentiel U nécessaire pour l'émission cathodique.

[II]– De B à C la diminution de la résistance de l'arc est moins rapide, le produit $U = R \cdot I$ est presque invariable.

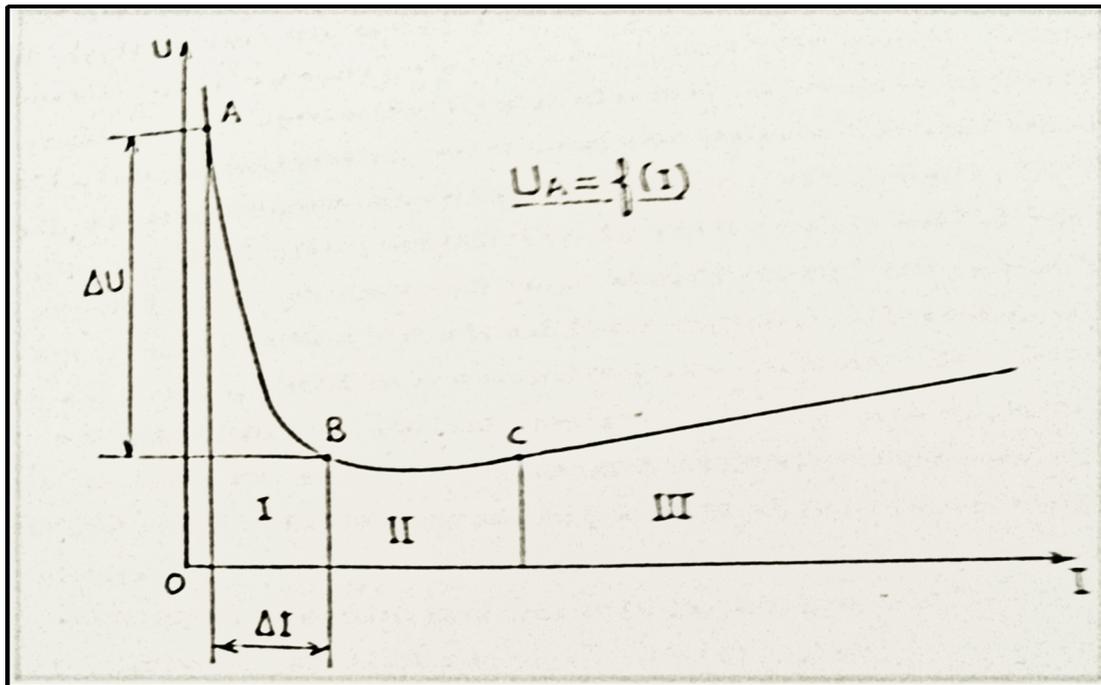


Figure II-3 : courbe tension en fonction du courant [6]

[III]– mais à partir de C, l'émission et l'ionisation des gaz ne peuvent guère augmenter d'avantage ; le pouvoir émissif de la cathode atteint son maximum, la résistance de l'arc devient pratiquement constante et la relation $U_A = R \cdot I$ est presque linéaire :

- $U_A = F(I)$, avec e comme variable : **fig II-4**
- $U_A = F(e)$, avec I variable : **fig II-5**
- e : Longueur de l'arc.

II-3-2-Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée [6]

Schéma du procédé: **fig II-6**

a- Poste de soudage

Ce sont des appareils qui permettent de transformer le courant du réseau (tension élevée et intensité faible) en courant de soudage (tension faible et intensité élevée), qui doit être stable et permet la fusion de l'électrode dans la limite de puissance de l'appareil.

b- Principe du procédé

Source d'énergie : elle est du type électrique ; courant alternatif ou continu. I varie de 30 à 500 Ampères et E de 1 à 15 Kw.

Métal d'apport : électrode enrobée, dans le diamètre de l'âme varie de 1,5 à 8 mm et la longueur de 40 cm à 1m

Le passage du métal de l'âme jusqu'au bain de fusion s'opère par gouttes de métal en fusion. Ces gouttes sont plus au moins fines suivant la nature de l'âme et la nature de l'enrobage, dans tous les cas, la finesse des gouttes croît avec l'intensité du courant de soudage.

La pénétration croît avec le diamètre de l'électrode et l'intensité du courant.

c-Électrodes enrobées

Définition : une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette composée de deux parties bien distinctes :

- *L'âme* : partie centrale en fil rond, généralement en acier doux (parfois en cuivre ou en bronze...) dans le rôle est de concourir à « conduire le courant électrique et à constituer le métal déposé.
- *Une partie extérieure* : cylindrique, concentrique à l'âme dénommée enrobage. L'enrobage est constitué par un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant.

Compte tenu des effets nombreux et variés que ces différents corps peuvent produire grâce à leurs comportements physico-chimiques pendant le soudage et dans les soudures elles-mêmes. On parlera d'enrobage basique, rutilé, cellulosique....

II-3-3 Soudage sous gaz inerte avec électrode de tungstène TIG (Tungsten Inert Gaz)[12]

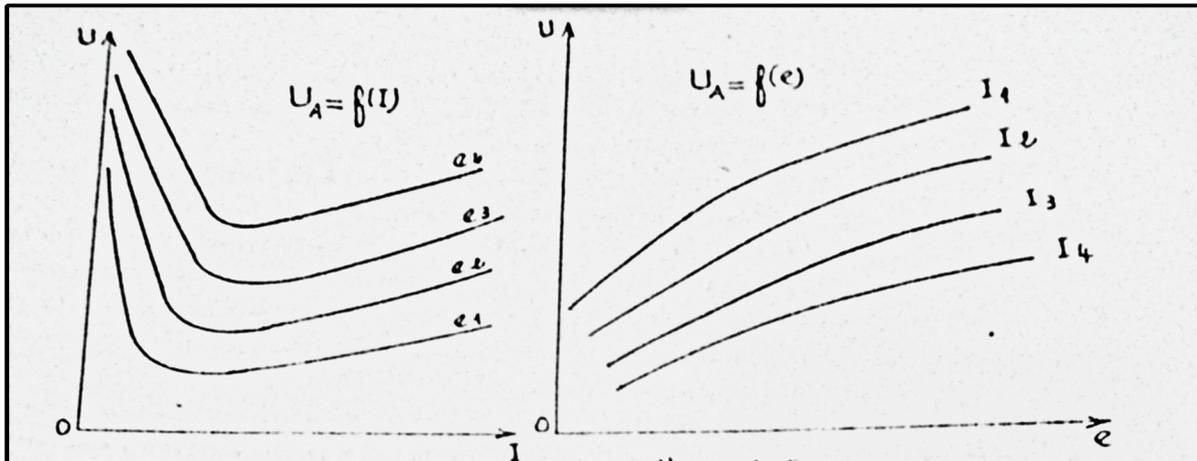


Figure II-4

Figure II-5

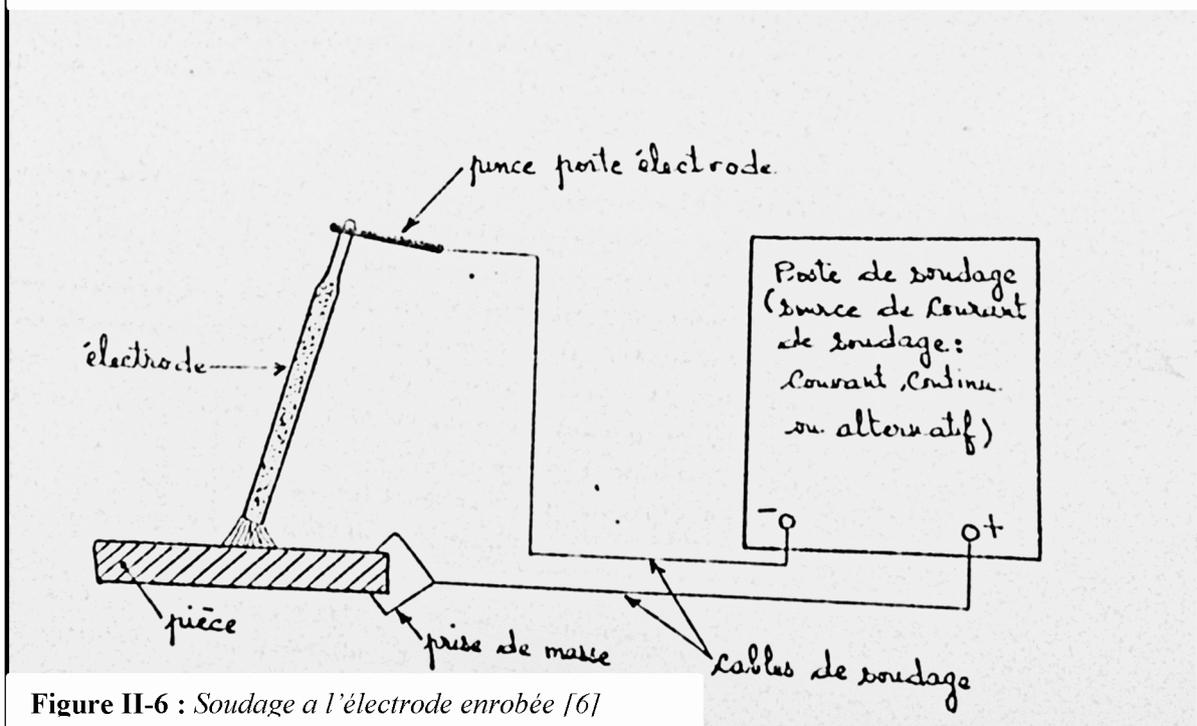


Figure II-6 : Soudage à l'électrode enrobée [6]

a-Source d'énergie

Elle est de type électrique

La chaleur est produite par un arc électrique amorcé entre une électrode de tungstène réfractaire et les pièces à assembler.

Le courant peut être continu ou alternatif ; I varie entre 10 et 400 Ampères, E entre 0.2 et 8 Kwatt.

b-Métal d'apport

Il est indépendant de la torche de soudage et se présente sous d'un fil ou d'une baguette.

c-Éléments de protection

Gaz inertes : -argon ou hélium

-argon +helium+H2 en faible quantité.

Seuls les gaz inertes peuvent être employés car le tungstène s'oxyde très facilement.

d-Mise en œuvre

L'alimentation en métal d'apport est assurée par un fil ou une baguette périodiquement dans le bain de fusion. Les soudures bout à bout peuvent être réalisées automatiquement ou manuellement, tandis que celles qui font intervenir un métal d'apport sont généralement exécutées manuellement.

L'amorçage de l'arc s'effectue généralement par une décharge à haute fréquence ou à haute tension.

e-Domains d'utilisation

-métaux ferreux et non ferreux ;

-tous les types de joints ;

-toutes positions ;

-toutes épaisseurs à partir de 0.1mm jusqu'à 12 mm

f-Avantages

Joint de haute qualité ;

Automatisé dans le cas de soudage nucléaire, aéronautique, chimique.

g-Inconvénients

Préparation soignée des joints, grande précision dans la réalisation des chanfreins et la propreté des pièces à souder.

II-3-4-Soudage sous protection gazeuse M.I.G (Metal Inert Gaz) [14] :

Schéma du procédé :Figure II-7

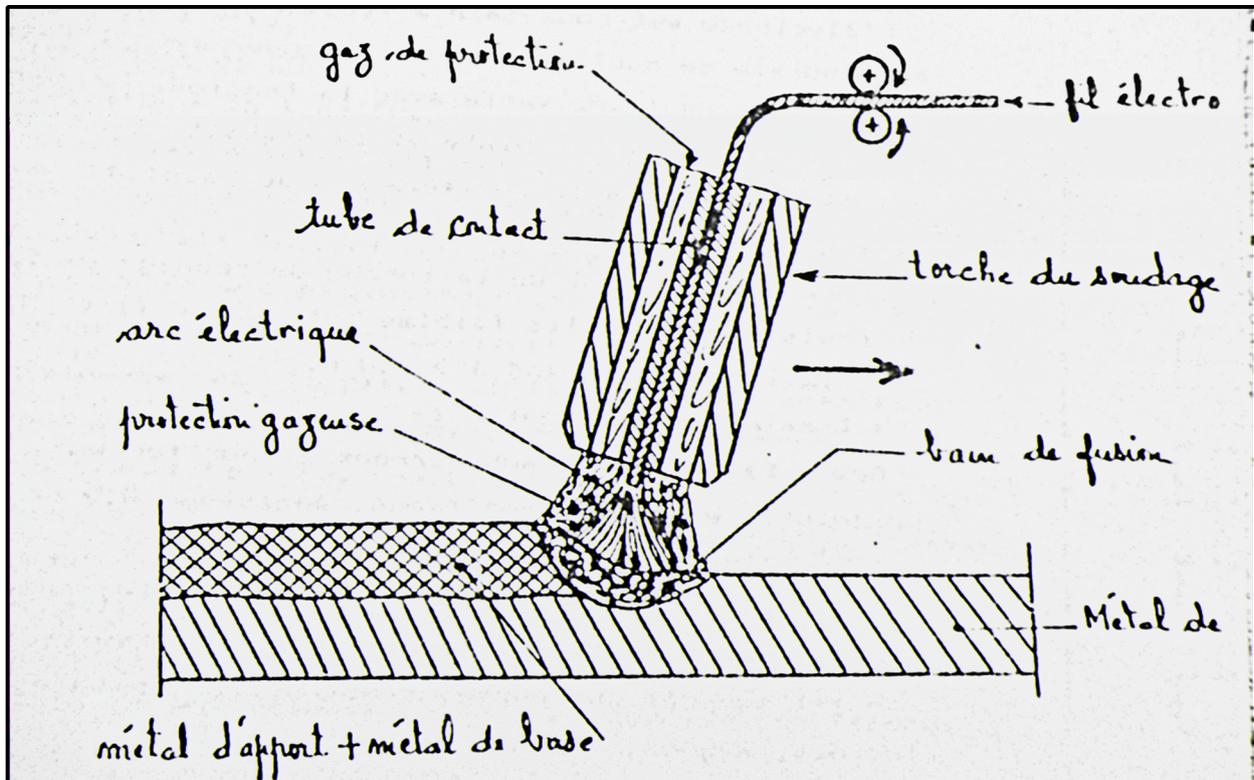


Figure II-7 : Procédé MIG [6]

a-Source d'énergie

Elle est du type électrique. La chaleur est fournie par un arc électrique amorcé entre un fil électrique et les pièces à assembler.

Le courant est continu, I varie entre 60 et 500 Ampères, U varie 16 et 40 volts tandis que E est compris entre 1 et 20 Kwatt.

La polarité est inversée (indirecte).

b-Métal d'apport

Il se présente sous forme d'un fil électrode plein ou fourré dont le diamètre varie entre 0,5 et 3,2 mm

Le fil fourré est une électrode continue de section tubulaire, dont l'intérieur est rempli de composants analogues à ceux d'un enrobage des électrodes.

c-Domains d'application

Assemblage des métaux ferreux et non ferreux, tous les types de joints, en toutes positions, épaisseur 0.5 mm et plus

d-Avantages

- procédé semi-automatique ou automatique ;
- soudage de l'acier et de l'aluminium en toutes positions ;
- productivité nettement supérieur à celle de l'arc ;

e-Inconvénients

- le soudage ne peut être effectué à une grande distance de la source du courant à cause de l'alimentation en fil électrode
- l'intensité est liée au débit du fil électrode, ce qui peut conduire à des difficultés dans le choix des paramètres de soudage.

II-3-5-Soudage sous protection gazeuse M.A.G (Metal Activ Gaz) [7]

Le procédé est identique à celui du M.I.G, mais :

- l'atmosphère protectrice est active
- le transfert du gaz se fait par grosse goutte
- la pénétration est différent (plus profonde : réactions chimiques importantes ;effervescence du bain de fusion),
- résistance et aspect moins bon

a- Éléments de protection

Les gaz protecteurs utilisé en soudage sont :

- CO₂ pure;
- CO₂ + 5 à 20 % de O₂;
- Ar + 15 à 30 % de CO₂ ;
- Ar + 5 % O₂ +15 % de CO₂ ;

Le CO₂ est un gaz actif, de ce fait, le transfert de métal se fait pas par pulvérisation axiale mais par grosse goutte . Le CO₂ réagit comme suit dans le bain de fusion :

- À haute température au voisinage de l'arc : $CO_2 \rightarrow CO + \frac{1}{2}O_2$, (réaction endothermique : consomme la chaleur)
- Au voisinage de la pièce : $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$; (réaction exothermique : dégagement de chaleur)
- Le fer s'oxyde : $Fe + CO_2 \rightarrow FeO + CO$
- Le carbone de l'acier réagit : $C + FeO \rightarrow Fe + CO$; l'acier soudé est décarburé.

Le volume de CO formé par ces réactions représente 2 à 3 % du volume de CO₂ utilisé. le CO en se dégageant du bain de fusion maintient celui-ci en effervescence : risque de soufflure au refroidissement.

II-3-6-Soudage au gaz ou au chalumeau :[7]

Le soudage au gaz ou à la flamme, consiste à assembler des pièces de métal à l'aide d'un métal d'apport amené en fusion par la chaleur de la flamme d'un chalumeau.

Selon le type de pièces à assembler et la résistance de l'assemblage que l'on souhaite obtenir, on utilise différentes techniques.

II-3-6-1-Soudage oxyacétylénique

a-Principe

Les deux pièces de métal sont chauffées jusqu'à fusion. Le métal d'apport qui constituera la soudure est identique au métal de base, la soudure est dite autogène.

La température de chauffe se situe entre 2 850°C et 3 200°C.

Le métal d'apport viendra combler l'espace entre les deux pièces à souder.

Des points de soudure (c'est le pointage) permettront de stabiliser les deux pièces, puis l'espace sera comblé au fur et à mesure par le dépôt du métal d'apport en fusion.

Ce qui donnera cet aspect caractéristique, avec effet de vague, du cordon de soudure au chalumeau.

Ce type de soudure s'apparente à du «grand art» en soudage du fait de son aspect caractéristique.

Généralement, La chaleur nécessaire est apportée par une flamme obtenue par un mélange de deux gaz, Oxygène et Acétylène.

L'un, l' O₂, le comburant du mélange, a pour rôle d'activer la flamme ; l'autre, l'acétylène, le combustible.

La densité de l'acétylène est plus faible que l'air. A l'intérieur des bouteilles, il est obtenu à l'aide d'un mélange d'acétone : 1 litre d'acétone permet de fournir 24 litre d'acétylène.

Ce mélange gazeux est à l'origine de la flamme la plus intense, 3200 °C à la pointe du dard. A cette température tous les métaux sont en fusion.

Les deux gaz sont utilisés en basse pression, à l'aide d'un détendeur au poste du mélange gazeux à bonne pression.

En soudage, le contact avec l'air ambiant empêche la soudure de se faire, car il entraîne immédiatement une oxydation des métaux à son contact.

C'est pourquoi, le soudage doit toujours se faire sous protection, ici protection gazeuse, qui crée une enveloppe gazeuse entre les métaux et l'air ambiant, ennemi du soudeur.

b-En pratique

L'opérateur commence par mettre à nu (procédé mécanique ou chimique) le métal des deux pièces à souder.

Puis il allume l'acétylène, il règle le débit pour que la flamme touche juste la buse (en augmentant le débit, la flamme se crée plus en avant) Ensuite il allume l'oxygène et règle le débit pour ne voir qu'un seul dard. Le dard doit être assez court.

Après quoi, il chauffe les deux pièces à souder sur une zone assez large, d'environ 2 cm, en faisant des petits cercles, ceci sans que le dard ne touche le métal. Jusqu'à ce que le métal prenne une couleur rouge cerise, 1 à 2 minutes en fonction de l'épaisseur du métal et de sa température de fusion.

Une fois que la température de soudage atteinte, la baguette de soudage est amenée au niveau de l'espace entre les deux pièces à souder et on commence par le pointage : c'est-à-dire faire des points de soudure avant de les souder complètement. Ceci permet de stabiliser les deux pièces l'une par rapport à l'autre et confère au cordon de soudure une meilleure résistance aux forces de traction et de torsion.

Dans le soudage dit « au chalumeau » deux techniques doivent être décrites :

Le brasage et le soudobrasage

a-Brasage [7]

Le brasage permet l'assemblage de deux pièces métalliques à l'aide d'un métal de nature différente. Ce métal a une température inférieure à celle des pièces à assembler et lui seul participe à la constitution du joint d'assemblage, en se fusionnant au contact du métal de base plus chaud.

L'assemblage des pièces se fait par recouvrement, comme pour un collage.

Ce procédé permet de créer un joint d'étanchéité par pénétration du métal d'apport par capillarité entre les deux tuyaux de métal.

a-1-En pratique :

Après avoir chauffé les deux parties à souder sur une zone large d'environ 2 cm autour de la jonction, la baguette de brasure est amenée à la jonction des deux pièces. Celle-ci fond, au contact du métal de base chauffé et comble l'interstice. Il n'y a pas de nécessité de protection gazeuse ou autre, car il n'y a pas, à proprement parlé, de cordon de soudure.

Le métal d'apport est un alliage, on parle de procédé hétérogène.

Il s'agit généralement d'un alliage binaire voire ternaire, avec divers métaux comme le plomb, l'argent mais aussi le cuivre, l'antimoine, le bismuth l'indium, le cadmium, le zinc, l'or . . .

L'alliage le plus couramment utilisé est composé d'environ 60% d'étain et 40% de plomb. La teneur en plomb peut cependant varier de 15 à 95% en fonction de l'utilisation envisagée.

Les alliages d'apport se présentent sous des formes diverses : baguettes, tiges, fils, pastilles, poudres, crèmes...

On parlera de brasage fort ou tendre en fonction de la température appliquée.

L'application d'une température plus élevée augmente la résistance mécanique du métal d'apport.

Selon l'utilisation, on choisira donc un brasage tendre ou fort.

- En dessous de 220 °C, le brasage est dit tendre, Il trouve son application en plomberie, sanitaire, zinguerie, pour la création d'une étanchéité à l'aide de joints brasés au niveau de tuyauterie d'alimentation d'eau sur laquelle ne sera pas appliqué de contraintes mécaniques fortes.

Mais aussi en électronique (circuits imprimés), en électricité (connexion de fils) ou encore en zinguerie.

- Entre 780 et 800 °C on parlera de brasage fort, Ce procédé est utilisé pour étanchéfier ou assembler les conduites de gaz, en cuivre, offrant une bonne résistance aux contraintes mécaniques. Il permet des assemblages résistants sur cuivre, laiton, métaux ferreux, aluminium, argent, or (au-delà de 920 °C, point d'Eutexie, il y aura transformation du métal) Le brasage ne se fait pas sur l'acier on parlera alors de soudobrasage.

b-Soudobrasage [7]

Il s'agit d'un assemblage ayant une haute résistance mécanique. La température de chauffe est supérieure à 950°C. Il est surtout utilisé pour les métaux ferreux, mais aussi le cuivre, nickel, chrome...

On utilise un chalumeau butane propane ou un chalumeau oxygaz. Ce procédé permet de déposer le métal d'apport à l'angle formé par deux pièces disposées à la perpendiculaire l'une de l'autre et de les solidariser.

Les pièces soudées peuvent être de nature différente (par exemple acier et cuivre).

Le brasage amène une pénétration du métal d'apport par capillarité.

La soudure se fait sous protection de l'enrobage de la baguette fournissant le métal d'apport.

b-1-En pratique

Les outils qui fournissent la chaleur pour la mise en œuvre du brasage, du soudobrasage et du soudage à la flamme sont :

-Le fer électrique qui peut atteindre une température de 250°C, voir 450°C pour les fers utilisés en ferblanterie et en chaudronnerie.

-Le fer à gaz ou la lampe à souder à cartouche de Butane, qui atteint une température de 350°C à 600°C.

Le chalumeau atteint une température supérieure, il est utilisé lorsque de grandes quantités d'alliage d'apport sont nécessaires ou pour des surfaces importantes de métaux à assembler ou lorsque le point de fusion de l'alliage est élevé (alliage à base d'argent par exemple).

Le chalumeau : est muni d'une buse, il existe différents type de buses qui permettent de faire varier le débit du mélange gazeux, 100 ou 70 litres. Ceci permet alors de faire varier la température de la flamme.

II-4-Soudabilité [8]

II-4-1-Définition de la soudabilité :

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné. Il est possible d'assurer la continuité métallique par la construction de joints soudés qui ; par leurs caractérisations locales et les conséquences de leurs présence, satisfont aux propriétés requises et choisis comme base de jugement.

La soudabilité n'étant pas mesurable car elle dépend de nombreux facteurs tels que :

- la nuance de l'acier (notamment la composition, chimique réelle et complète, les caractéristiques mécaniques).
- les caractéristiques dimensionnelles (l'épaisseur à souder, les formes et les masses des pièces).
 - le mode opératoire de soudage (le procédé de soudage)
 - le traitement thermique éventuel du joint soudé
 - les conditions de service.

II-4-2-Soudabilité métallurgique :

La soudabilité métallurgique a pour but :

- D'examiner la cristallisation ;
- D'examiner les modifications de la structure due aux transformations physique et chimiques, telles que l'apparition de constituants durs et fragiles (Martensite)
- D'examiner le taux de dilution

II-4-3-Soudabilité constructive :

Elle définit les possibilités de résistance du joint dans un ensemble d'une construction ; (répartir les cordons judicieusement, éviter les discontinuités géométriques, éviter le croisement de cordons,.... Etc.)

II-5-défauts de soudure [9]

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Dans cette partie, on vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants.

II-5-1-Fissurations

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport, un préchauffage approprié, une bonne préparation des joints, une énergie optimale et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc prévenir les fissures. Dans un métal, elles sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

-les fissures peuvent se situer dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.

-les fissures peuvent aussi retrouver dans le métal de base, dans la Z.A.T ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations en soudage.

-Fissuration à chaud

Causes : - joints trop étroits ;

-présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) ;

-métal d'apport incompatible avec le métal de base ;

-cordon trop petit ;

- trop de retrait durant ou après l'opération de soudage ;

-Fissuration à froid

Causes : -hydrogène coincé dans la soudure (Z.A.T) ;

-tensions internes résiduelles importantes ;

a-Fissuration à chaud [11]

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impureté dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique. Par ailleurs, le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large.

Dans d'autre cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure (fig II-8).

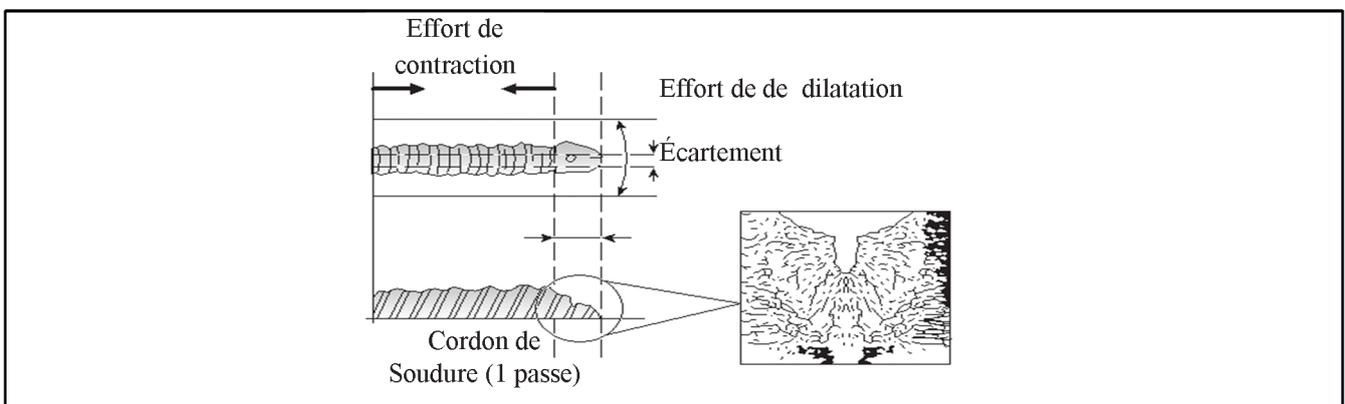


Figure II-8 : Fissuration à chaud [6]

La préparation des joints joue un rôle majeur dans la prévention de la fissuration à chaud. Car des joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur en diminuent les risques.

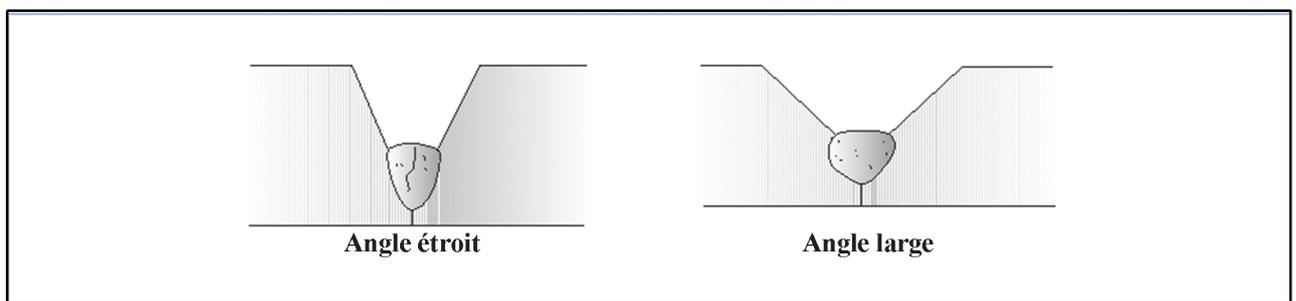


Figure II-9 : Angles de chanfreins [11]

b-Fissuration à froid [11]

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voir des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la Z.A.T (figII-10) et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure additionné aux tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptible de subir la fissuration à froid. Elle se manifeste à des températures basses ($T < 300^{\circ}\text{C}$)

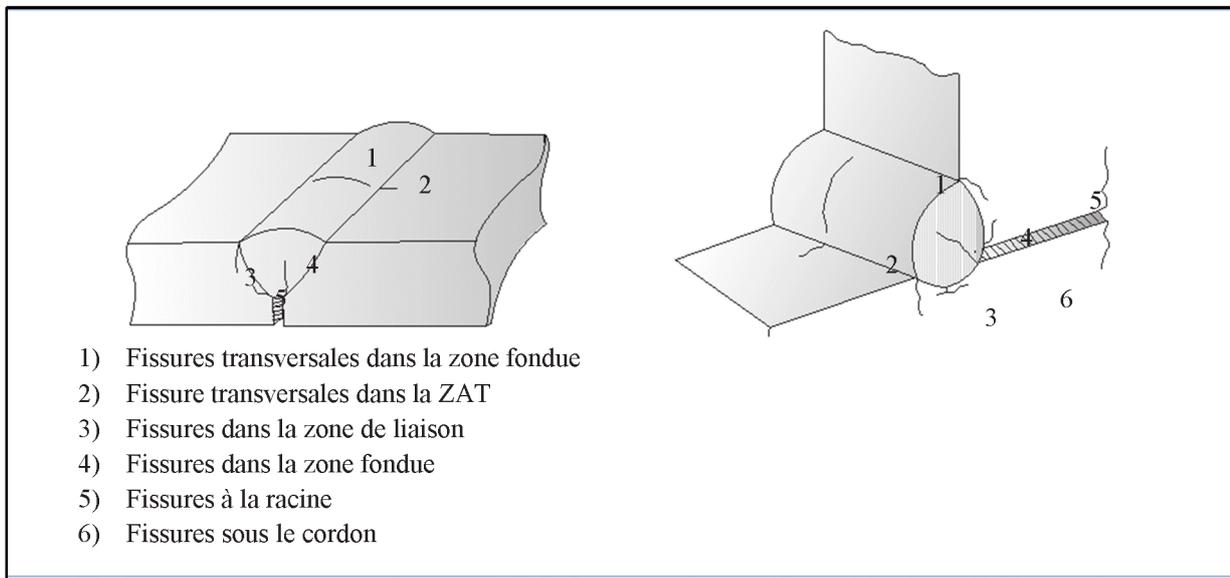


Figure II-10 : types de fissures à froid en soudage [6]

Plusieurs facteurs influent sur la vulnérabilité d'une pièce à la fissuration à froid, dont les suivants :

-la trempabilité reliée au carbone équivalent,

$$Ceq = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} + \frac{(\%Ni + \%Cu)}{15} \quad (\text{II-2})$$

-la présence d'hydrogènes due à l'humidité sur l'enrobage ou sur la pièce ou à certains composés comme la rouille et la calamine ;

-l'humidité dans l'air ;

-le refroidissement rapide de la pièce ;

-la présence de défauts a la surface de la pièce (inclusions, soufflures, grande épaisseur de la soudure, caniveau.....).

La meilleure prévention de la fissuration à froid est un préchauffage approprié des pièces à souder afin d'évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce (le

Préchauffage doit atteindre au moins 100 °C, soit la température d'ébullition de l'eau). On peut aussi choisir des électrodes préchauffées à basse teneur en hydrogène (basiques). On prend soin de refroidir les pièces soudées lentement pour éviter l'apparition de tensions internes.

En général, un choix judicieux d'un régime thermique de soudage est nécessaire.

II-5-2-Soufflures

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Quant aux piqures, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes en surface

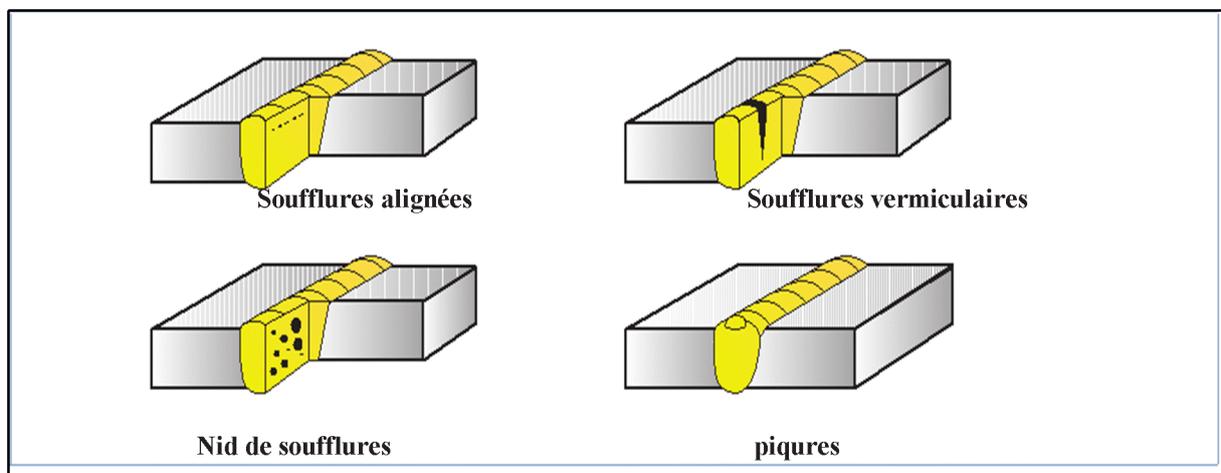


Figure II-11 : différentes formes de soufflures [6]

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance graisseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour prévenir les soufflures, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures.

II-5-3-Pollution ferreuse

La pollution ferreuse est une corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche superficielle. Elle résulte généralement de l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable (brosse ou autres) pendant l'usinage, la mise en forme ou le nettoyage. Dans d'autres cas, elle survient en conséquence des projections de métal fondu lors des opérations de soudage.

II-5-4-Inclusions

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger (fig II-12).

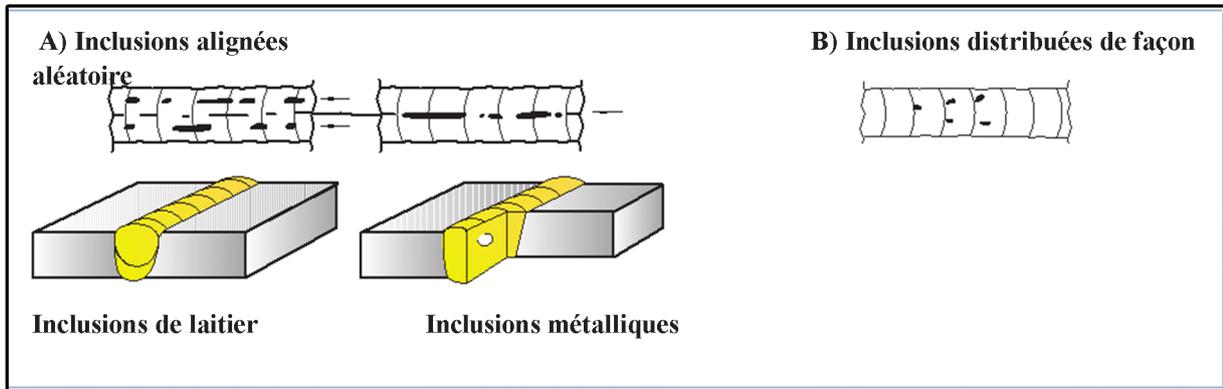


Figure II-12 : types d'inclusions [6]

II-5-4-1-Différents types d'inclusions :

a- Inclusion solide : Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (ex : poussières)

b-inclusion de laitier : résidu de laitier peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.

c-inclusions de flux : résidu de flux emprisonné dans la soudure.

d-Inclusion d'oxyde : Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification

e-inclusion métallique : Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (ex. : le tungstène lors du soudage GTAW*, le cuivre et tout autre métal étranger)

II-5-5-Retassures et criques de solidification

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.

(*) : Gas Tungsten Arc Welding (une autre nomination du procédé TIG)

II-5-6-Morsures et caniveaux

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison

d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (figII-13). Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défauts.

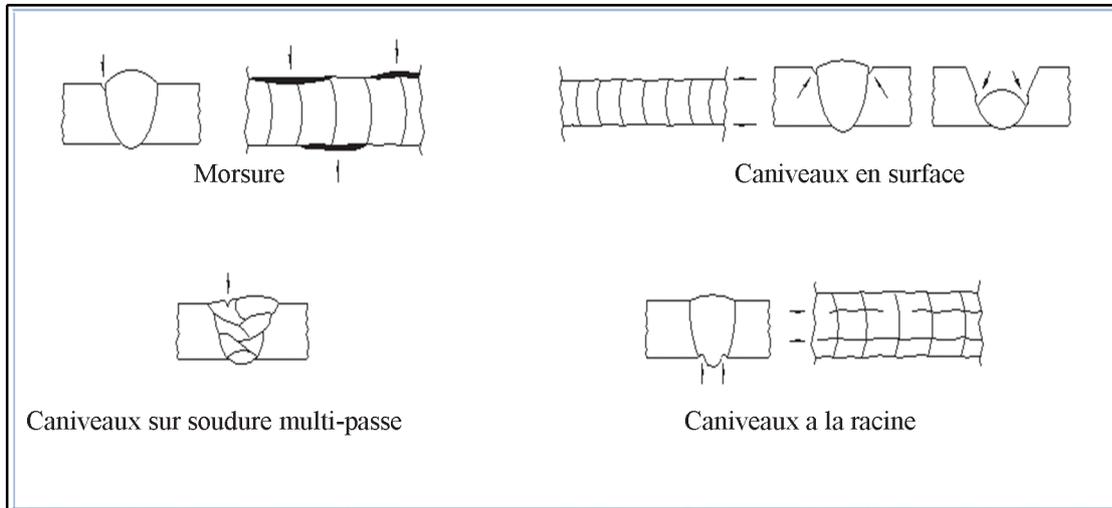


Figure II-13 : différents types de caniveaux en soudage [6]

II-5-7-Défauts géométriques du cordon

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave (figure).

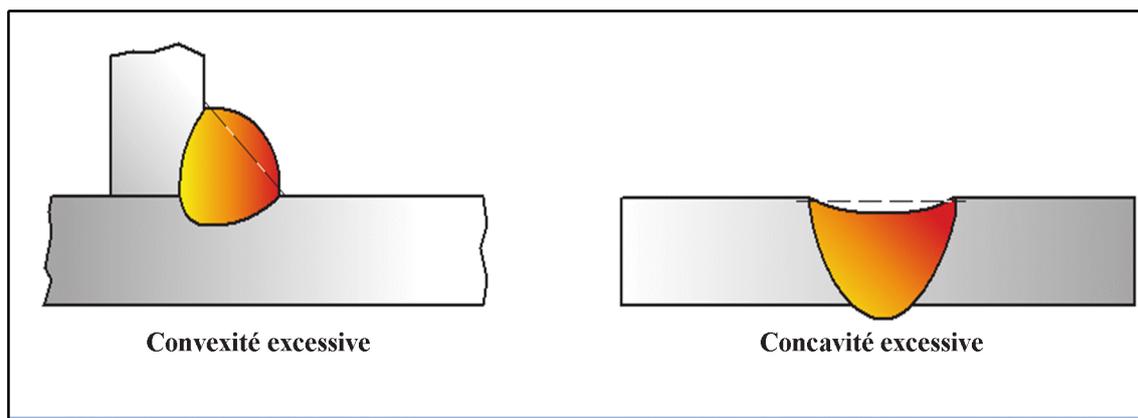


Figure II-14 : défauts géométrique [6]

Aussi, une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées (partie A de la figure). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du

cordon; ce manque peut être localisé (partie B) ou continu.

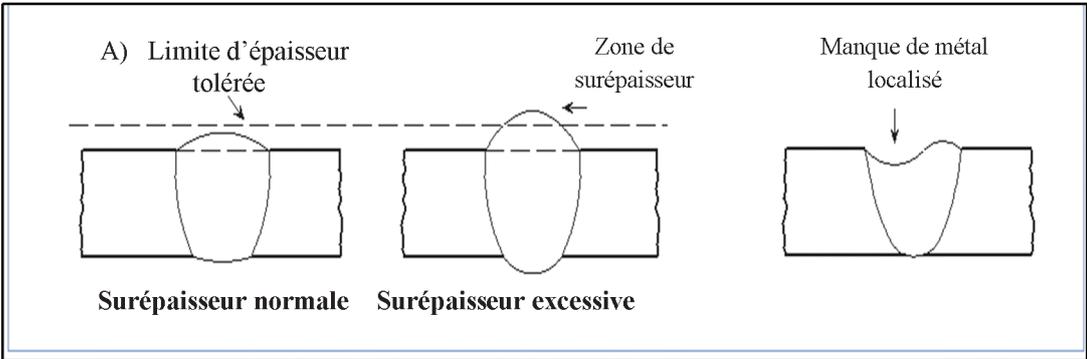


Figure II-15 : Défauts géométriques [6]

L'angle du raccordement du cordon, pour les cordons convexes, ne doit jamais excéder 30° (figure II-16). Un manque de mouillage du cordon peut entraîner un angle de raccordement trop élevé

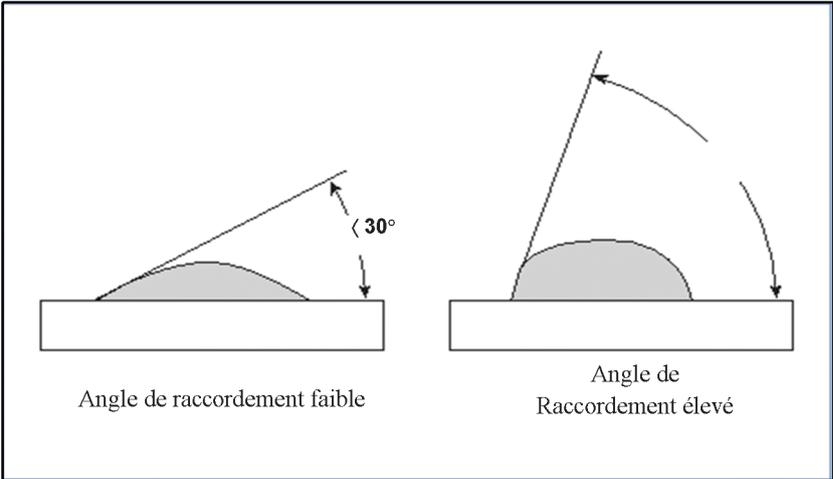


Figure II-16 : Mouillage d'un cordon de soudure

CHAPITRE III

DEFORMATION PLASTIQUE

DEFORMATION PLASTIQUE

Déformation plastique

III-1-Introduction :

L'étude de la déformation plastique a eu sans doute, pour origine le souci de maîtriser le formage et l'utilisation des matériaux, et les métaux. De ce fait, elle a été longtemps empirique et ce n'est que depuis quelques vingtaines d'années qu'ont été élaborés les concepts nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques se produisant lors des écoulements plastiques. Les mécanismes de base sont assez bien compris, la dynamique des écoulements est encore assez mal connue et constitue actuellement un axe de recherche extrêmement actif.

Rappelons que, lorsqu'un solide cristallin est soumis à une contrainte, il se déforme de manière réversible tant que la contrainte est inférieure à une certaine valeur critique, dite limite élastique. Au-delà de cette contrainte critique, la déformation cesse d'être réversible. Lorsque la contrainte est supprimée, il subsiste une déformation, dite déformation plastique. Si l'on poursuit la déformation, le solide finit par se rompre. L'aptitude à tolérer une déformation plastique importante est la ductilité. Celle-ci dépend à la fois de la nature du matériau et de l'essai. Par exemple, il est possible de réduire, par laminage en plusieurs passes, un bloc métallique dont les dimensions sont de l'ordre du mètre à une plaque dont l'épaisseur est de l'ordre de la fraction de millimètre, soit une déformation de l'ordre de 10^3 , alors qu'en traction uni-axiale il est difficile d'atteindre une déformation à la rupture supérieure à 1.

III-2-Mécanismes de déformation [10]

III-2-1-Dislocations

Rappelons d'abord un certain nombre de résultats sur les dislocations.

-Définition

Une dislocation est caractérisée par la position de sa ligne L et par son vecteur de Burgers \vec{b} . Elle correspond à un champ élastique singulier : les contraintes, les déformations et les rotations varient avec la distance r à la ligne de dislocation comme b/r pour une ligne isolée, bh/r^2 pour un dipôle de largeur h et $r > h$, bS/r^3 pour une boucle de surface S et $r^2 > S$. Lorsque le vecteur de Burgers est une période du réseau, la dislocation est dite parfaite. Lorsque ce n'est pas le cas, la dislocation est dite imparfaite. Dans ce cas, elle borde un défaut d'empilement (DE). Rappelons que ceux-ci sont définis par une coupure selon une direction de plan et une translation qui n'est pas une période du réseau. En général, à une translation correspond une direction de plan de DE et une seule, exceptionnellement un petit nombre de plans contenant la translation.

Dans les alliages ordonnés, les parois d'antiphase (PA) sont en fait des défauts d'empilement de la structure. Toutefois, contrairement à ces derniers, elles peuvent avoir a priori n'importe quelle orientation.

a-Glisement

Une dislocation parfaite peut se déplacer par glissement sur un cylindre de glissement défini par sa ligne (directrice) et son vecteur de Burgers (génératrice). Dans la pratique, il s'agit le plus souvent de plan de glissement (L et \vec{b} sont coplanaires). On note qu'une dislocation vis peut glisser dans n'importe quel plan la contenant, et même changer de plan de glissement (glissement dévié), (mouvement hélicoïdale)

Le glissement est un mouvement conservatif, c'est-à-dire qu'il se fait sans transport de matière, donc sans nécessiter de diffusion. On vérifie facilement qu'il en est ainsi (figure 1) en considérant le mouvement d'un segment de dislocation balayant une aire dA . Puisque la surface de coupure définissant la dislocation est arbitraire, on peut considérer que dA en fait partie. Si le vecteur de Burgers est contenu dans dA , c'est-à-dire si dA fait partie du cylindre de glissement, alors le déplacement des lèvres de la coupure est un glissement pur, n'entraînant pas de variation de volume. Dans le cas contraire, le déplacement de la dislocation nécessite l'apport de matière par diffusion. Le mouvement est non conservatif et est dénommé montée ou en descente.

Lorsqu'une dislocation glisse en balayant complètement son plan de glissement, le résultat est un glissement unitaire, avec apparition d'une marche, ou ligne de glissement, sur la surface (figure 2). Il est important de noter que le glissement ne dépend que de b et de l'aire balayée dA . Par analogie, on définit un glissement élémentaire $d\gamma$ comme :

$$d\gamma = b dA / V = b dl dl' / V \quad (\text{III-1})$$

ou encore une vitesse de glissement plastique élémentaire :

$$d\dot{\gamma} = (b dl / V) v \quad (\text{III-2})$$

ou V : volume du cristal

v : vitesse de déplacements du segment de

dislocation

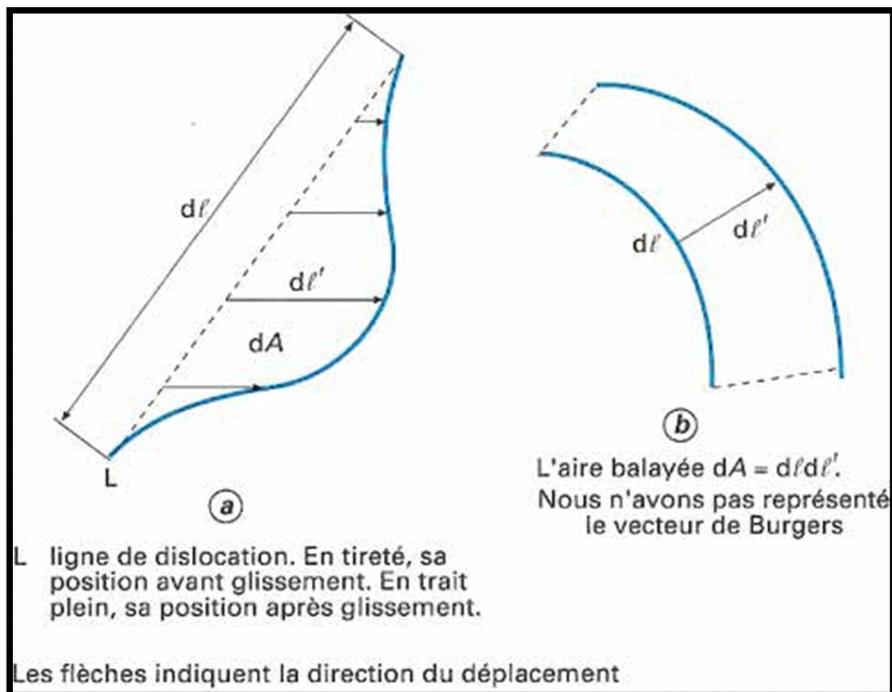


Figure III-1 [10]: Cylindre de glissement

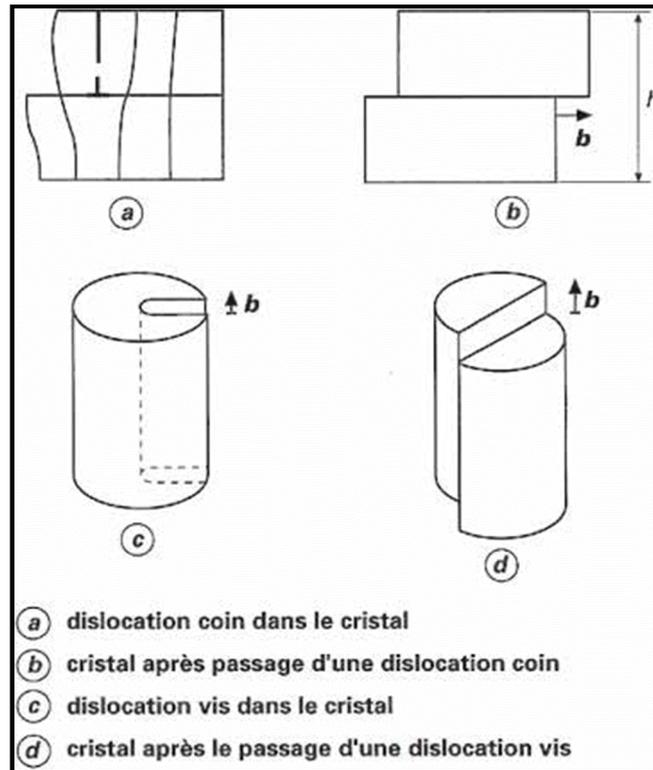


Figure III-2 : Glissement macroscopique.[10]

Pour une dislocation imparfaite, la différence essentielle est qu'elle ne peut se déplacer que sur le plan du DE qu'elle borde. Si celui-ci coïncide avec le plan de glissement, la dislocation peut glisser, elle est dite glissable, et les résultats précédents s'appliquent. Dans le cas contraire, la dislocation ne peut pas glisser.

b-Maillage

Les phénomènes de maillage (qui conduisent parfois à la rupture fragile) jouent également un rôle important, particulièrement à basse température ($< T_f / 2$). Du point de vue purement géométrique, le maillage peut se décrire comme résultant du glissement de dislocations, dites dislocations de macle, dont le vecteur de Burgers n'est pas une période du réseau. Pour cette raison, tous les plans successifs doivent être balayés par une dislocation de macle. La macle est limitée par un joint soit cohérent, soit incohérent avec la matrice (figure 3).

Considérons (figure 3), une bande maillée d'épaisseur h et progressant à la vitesse v , la vitesse de glissement plastique correspondante est :

$$\dot{\epsilon} = hbv/HdL$$

Avec d distances entre plans de macle,

b module du vecteur de Burgers de la dislocation de macle,

H hauteur de l'éprouvette,

L largeur de l'éprouvette.

On a typiquement : $b \approx d$, h de l'ordre de quelques micromètres, H de quelques centimètres, d'où $\varepsilon' \approx 10^{-4} v/L$. Dans la pratique, les macles se propagent à des vitesses de plusieurs dizaines de mètres

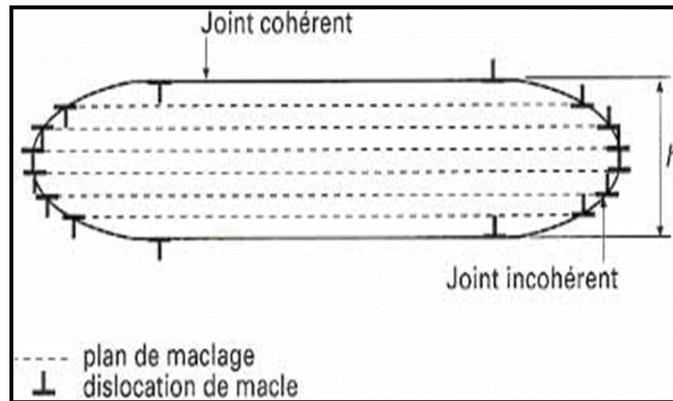


Figure III-3: Macle [10]

c-Montée

La montée d'une dislocation peut se faire par absorption ou émission de défauts ponctuels.

La succession des figures 4[a, b, c, d] illustre les aspects géométriques de la montée : 4a cristal parfait, 4b création de lacunes dans le cristal avec variation de volume extérieur ΔV , 4c rassemblement de lacunes formant une cavité sur un plan, 4d transformation de la cavité en boucle de dislocation prismatique avec variation de volume extérieur $-\Delta V$.

On constate que globalement entre a et d ni la concentration de lacunes ni le volume extérieur n'ont varié. En revanche, il y a eu changement de forme, donc déformation du cristal. Un raisonnement analogue peut être fait pour l'émission de lacunes par la dislocation.

La description thermodynamique du phénomène est plus complexe : il faut alors raisonner sur des flux de lacunes fonction de la concentration locale et du gradient de concentration, ou du potentiel chimique des lacunes.

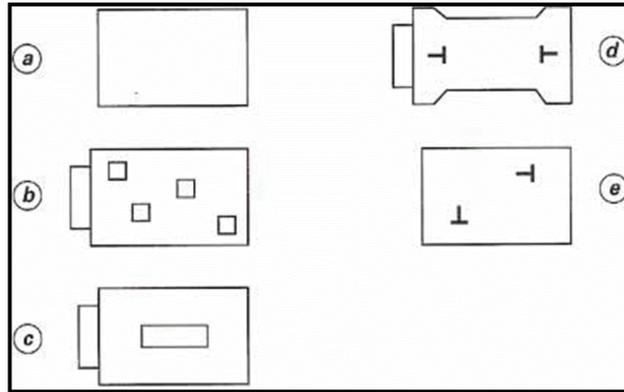


Figure III-4: *Géométrie de la montée des dislocations [10]*

III-2-1-2 Force s'exerçant sur une dislocation [10]

À basse température ($T < T_f / 2$), sous l'effet d'une contrainte appliquée suffisamment forte, un cristal se déforme plastiquement par glissement plan sur plan. Si le cristal ne contient pas de dislocations (cristal parfait), on peut estimer la contrainte de cisaillement σ_{th} nécessaire à ce glissement (limite d'élasticité théorique) à $\mu / 2\pi$. Le principe du calcul de σ_{th} est le suivant : soit x le déplacement relatif de deux plans voisins (figure 5) ; la contrainte de cisaillement doit être une fonction périodique de x , ayant la période a du réseau dans la direction du déplacement. De plus, pour $x < a$, la contrainte doit être de l'ordre de $\mu x / a$. La fonction la plus simple satisfaisant à ces conditions est :

$$\sigma = (\mu/2\pi) \sin (2\pi x/a) \quad (III-3)$$

dont la valeur maximale est bien σ_{th} .

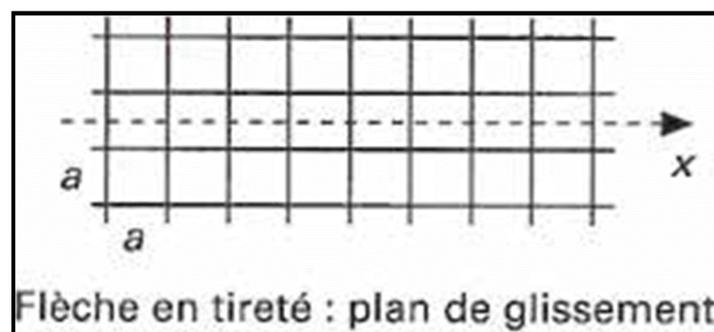


Figure III-5 : *cristal se déformant plastiquement par glissement plan sur plan : calcul de la limite d'élasticité théorique [10]*

Supposons maintenant que le cristal contienne une dislocation rectiligne (figure 4a) ; lorsque celle-ci, sous l'effet des efforts appliqués, balaie la surface du cristal, il en résulte un glissement. On peut donc dire que tout se passe comme si une force F était appliquée sur la

ligne de dislocation. Cette force F par unité de longueur de la dislocation doit présenter les caractéristiques suivantes :

- le travail de la force F lors du déplacement de la dislocation doit être égal à celui des forces appliquées sur la surface extérieure ;
- la force F et la ligne de dislocation sont perpendiculaires.

Calculons l'intensité F de la force dans le cas simple d'une traction uni-axiale selon l'axe Oz [$\sigma_{zz} = \sigma$ seul différent de zéro avec $\sigma = F/s$ où s est la section du cristal normale à Oz et F la force appliquée (figure 6)], le travail effectué par les forces agissant sur la dislocation est égal à :

$$F \cdot \ell \cdot \ell' / \cos \phi \quad (\text{III-4})$$

avec :

- ℓ Longueur de dislocation
- $\ell' / \cos \phi$ Déplacement

Le travail effectué par la force F vaut : $Fb \cos \lambda$, d'où la relation :

$$F = \sigma b \cos \phi \cos \lambda = b \sigma_{\text{eff}} \quad (\text{III-5}) \quad \text{avec : } \sigma_{\text{eff}} \text{ contrainte efficace}$$

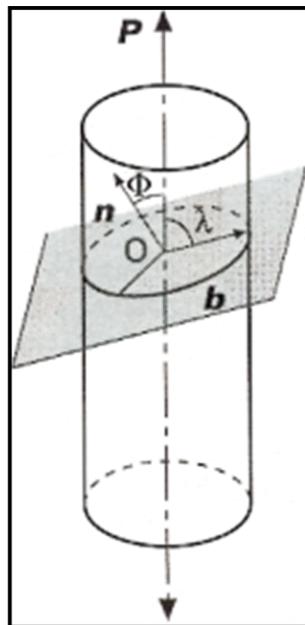


Figure III-6 : Force s'exerçant sur une dislocation : loi de Schmid[10]

$$\tau = \frac{F}{s_0} \cos \Phi \cos \lambda \quad (\text{Loi de Schmid}) \quad (\text{III-6})$$

III-3-Comportement mécanique : [4]

III-3-1-Essai de traction uni-axiale :

L'essai de traction est le moyen le plus couramment utilisé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. Des éprouvettes des matériaux concernés, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section S_0 et longueur L_0 raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction. La machine impose un allongement croissant à l'éprouvette, et enregistre simultanément l'effort appliqué F et l'allongement $\Delta L = L - L_i$. Selon l'équipement utilisé, L_i est soit la longueur totale initiale L_0 , soit une longueur initiale de référence L_0 entre deux repères tracés sur l'éprouvette (**Figure III-7**).

L'essai est généralement poursuivi jusqu'à rupture, après quoi, on mesure un allongement

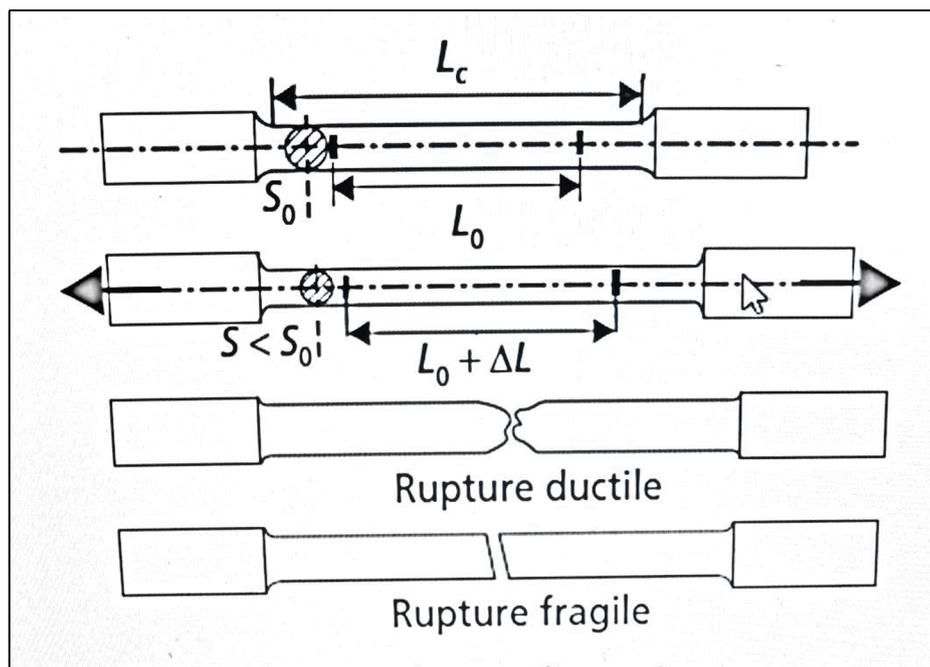


Figure III-7: Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai [7]

a-Courbe de traction conventionnelle : c'est la courbe obtenue à partir de l'enregistrement $F \times \Delta L$ effectuée en cours d'essai en rapportant la force à la section initiale pour raisonner en termes de contrainte $R = F/S_0$, et en rapportant l'allongement à la longueur initiale pour raisonner en termes d'allongement relatif $e = \Delta L/L_0$. On obtient ainsi une courbe intrinsèque aux matériaux, indépendante des dimensions de l'éprouvette utilisée.

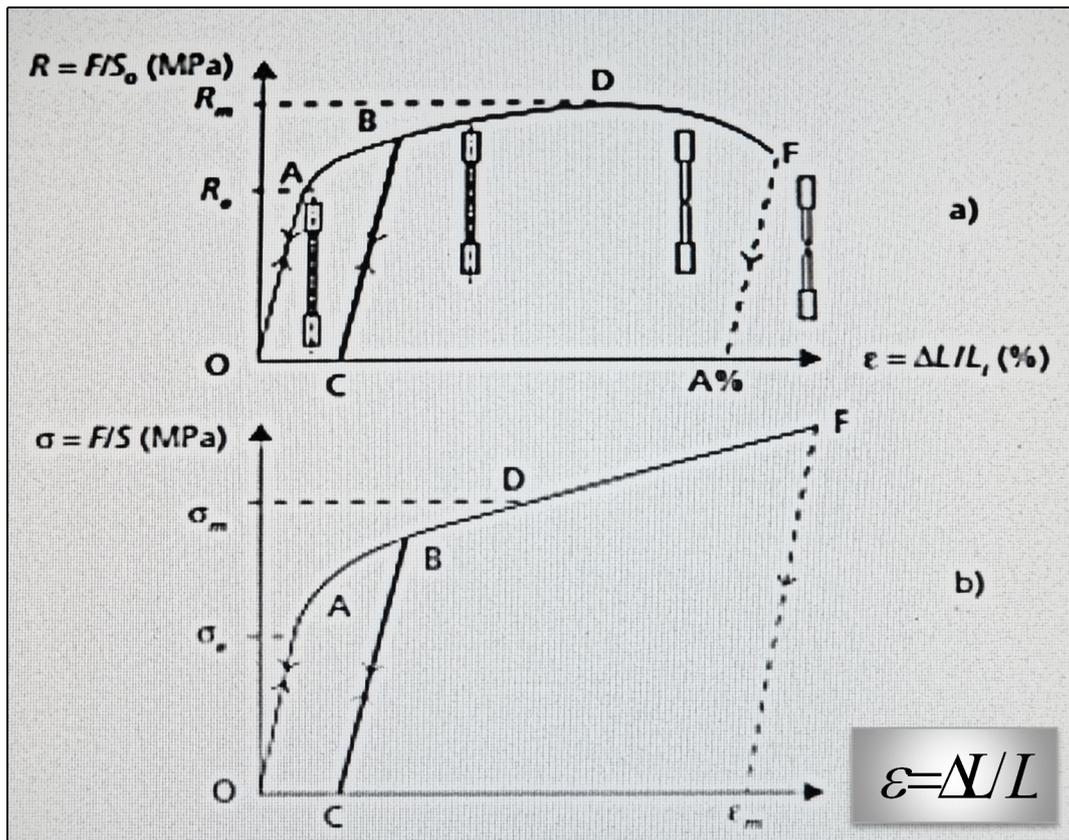


Figure III-8 : Courbe de traction [7]

a) Courbe conventionnelle $R \times \epsilon$; b) courbe rationnelle $\sigma \times \epsilon$

- **OA** : allongement élastique linéaire, réversible.
- **Au-delà de A** : déformation plastique permanente + déformation élastique. La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent (OC). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).
- $R_e = F_e / S_0$: limite apparente d'élasticité (MPa).
- $R_{p0,2}$: limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique. Sa détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.
- **AD** : allongement élastique + allongement plastique réparti.
- $R_m = F_m / S_0$: résistance à la traction (MPa).
- **DF** : apparition et progression d'une **striction** (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles.
- **F** : rupture.
- $A \% = \Delta L_u / L_i$: allongement pour cent après rupture (%).

- E : module de Young; en pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extensométrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E .

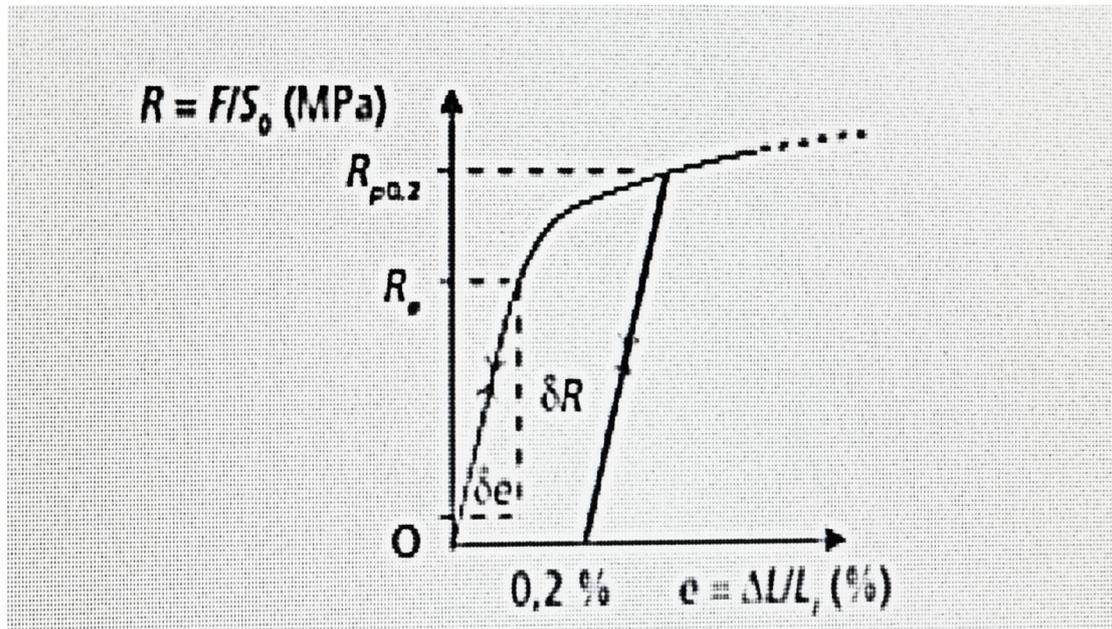


Figure III-9 : exploitation du début d'une courbe de traction pour la détermination de $R_{0,2}$ et de E

b-Courbe de traction rationnelle : c'est la courbe obtenue en rapportant la force à la section minimale instantanée S , pour raisonner en termes de contraintes vraie $\sigma = F / S$, Et en rapportant l'allongement à la longueur instantanée pour raisonner en termes de déformation rationnelle. La courbe ainsi obtenue est croissante, même pendant la striction. Le volume de l'éprouvette restant constant et la déformation étant uniformément répartie de O à D, on a :

$$\sigma = F \left(\frac{1+e}{S_0} \right) = R(1+e) \quad \text{Et} \quad \varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln(1+e) \quad (\text{III-6})$$

De D à F pendant la striction, des corrections plus complexes sont nécessaires pour calculer σ et ε dans la zone de déformation localisée.

III-4-Influence du chauffage sur la microstructure et les propriétés d'un métal déformé[3] :

Le travail de la déformation plastique $T < T_{pr}$ (température de recristallisation) représente :

- 95% qui se transforment en chaleur ;
- 95% restant s'accumule sous forme d'énergie potentielle élevée des atomes chassés de leur état d'équilibre

Ce dernière se traduit par l'accroissement des défauts cristallins (lacunes, dislocations, surfaces de séparations et etc..) et l'élévation des contraintes résiduelles. L'état thermodynamique d'un métal écroui est donc instable (énergie interne est grande). Le chauffage d'un tel matériau déclenche des processus de restauration et de recristallisations qui rétablissent toutes ou presque ses propriétés intrinsèques initiales avant la déformation.

III-4-1-Restauration : $T < T_{pr}$ [T_{pr} (température de recristallisation primaire) = $0.4T_f$]

La restauration est un chauffage d'un matériau préalablement déformé à $T = 0.2a \text{ à } 0.3T_f$ représentant deux étapes :

a- Détente ($T < 0.25T_f$)

La détente déclenche les processus suivants :

- Diffusion des lacunes et de atomes interstitiels vers les dislocations environnantes ;
- Redistribution des dislocations (sans formation de nouvelles surfaces de séparation) dans la matrice et leurs cheminement vers les joints de grains.

La détente est provoquée aussi par l'effet de compensation quand les lacunes rencontrent les atomes interstitiels ainsi que par la suppression partielle des dislocations (dislocations de signes opposés s'attirent et s'annihilent).

Conclusion : Les défauts cristallins diminuent en parti ce qui conduit à l'abaissement des micro-contraintes (II^{ème} Type) et des distorsions du réseau.

b- polygonisation ($0.25 T_f \leq T < T_{pr}$)

La polygonisation s'applique sur des matériau faiblement déformé. C'est un mécanisme de fragmentation des grains en petits grains sans dislocations (recristallisation sur place). Sous l'effet de chauffage. Les dislocations en excès de mêmes signes forment un écran qui sépare les monocristaux de joints de légèrement incurvés.

Conclusion : La restauration $T < T_{pr}$ (seuil thermique de recristallisations) des métaux faiblement déformés contribue à ;

- la diminution de concentration des lacunes
- la redistribution des dislocations

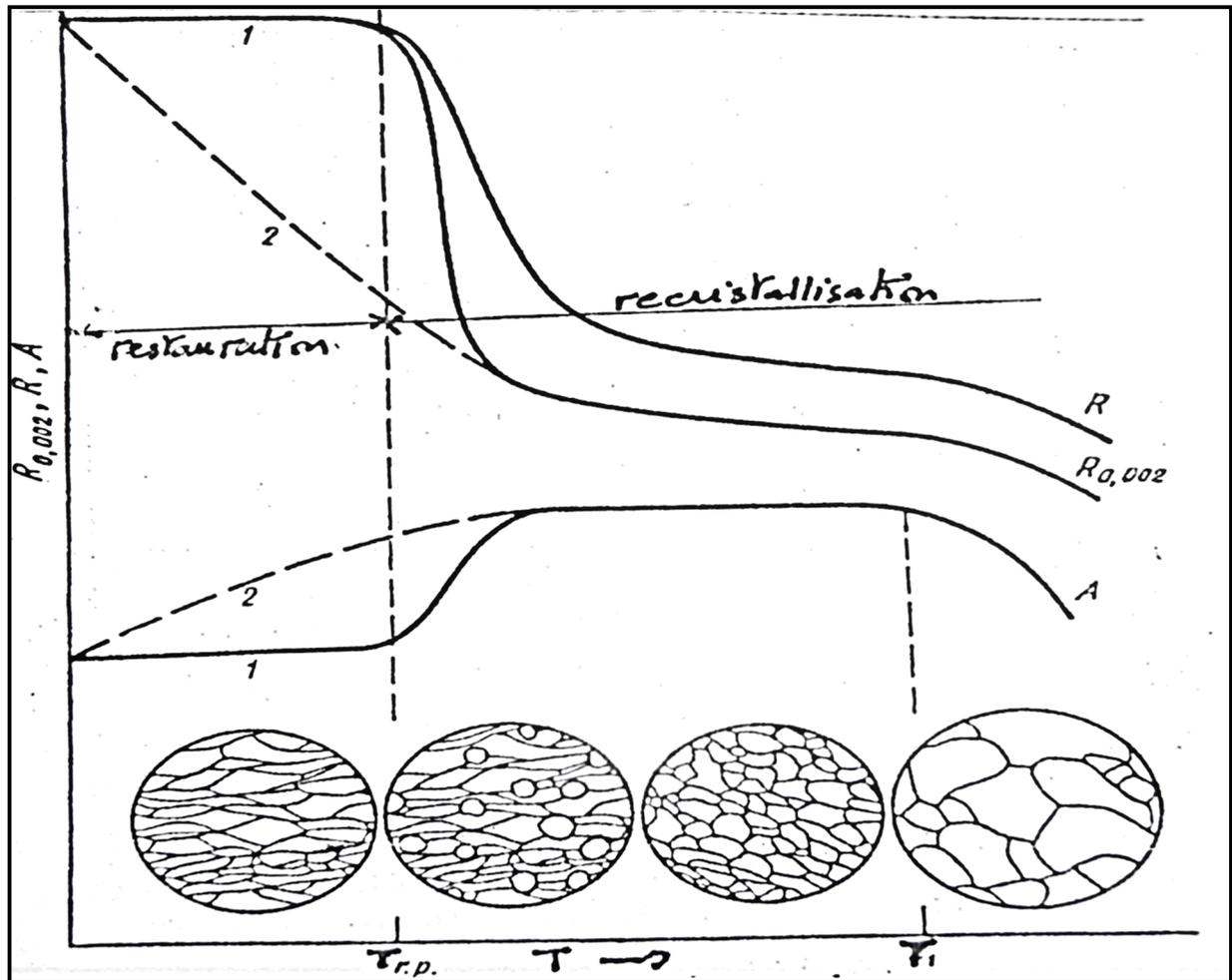


Figure III-10 : Propriétés et structures en fonction de la température de restauration de recristallisation[3]

Remarque :

- La restauration ne forme pas des nouveaux germes (grains) et en générale ne modifie pas l'ensemble des propriétés mécaniques . Toutefois, la résistance de certains métaux tels que : Al, Ti, Mo et W diminue alors que la plasticité croit . Leur résistance à chaud se stabilise du fait de la polygonisation momentanée.

_ La dureté HV, σ_e , Re et la plasticité du Cu, du Ni et leurs alliages s'améliorent du fait de la consolidation résultant de la fixation des dislocations mobiles par les atomes appartenant aux inclusions et par les parois.

- Le grossissement des sous-joints, résultant de l'élévation du temps t , de la température T , et de la suppression des dislocations dans leur volume conduisent à la diminution de la résistance de matériau (polygonisation sur place).

- La polygonisation d'Al, de Mo et de W est très rapide ce qui conduit à la déconsolidation du fait de la croissance des sous-joints \rightarrow recristallisation secondaire.

a-recristallisation primaire (formation de nouveaux grains fins)

Avec l'élévation de T , la mobilité des atomes augmente. À ce niveau de T , la formation de nouveaux grains équi-axiaux se déclenche. Selon la (**figure 10**), jusqu'à T_{pr} le grain reste déformé, A T_{pr} , il y'a apparition et augmentation des germes de nouveaux grains (sans distorsion) séparés par des joints fortement désorientés dans le métal déformé.

Les germes naissent dans des secteurs à densité forte en dislocations, ou se concentrent les plus fortes distorsions du réseau (joints de grains déformés) et dans des plans de translation à l'intérieur des grains, ensuite, le germe s'accroît par apport d'atomes des secteurs déformés.

-Effets de la recristallisation primaire [3]:

- formation de nouveaux grains de faible degré d'anisotropie (grain stable thermodynamiquement $\Delta G < 0$) (**G enthalpie libre**)

- Le matériau retrouve presque ses propriétés initiales, **voir fig9** :

- R (charge de rupture) diminue brusquement notamment R_e ;

- La plasticité S' améliore A, Z.

L'adoucissement résulte de la suppression des distorsions du réseau et de la diminution des dislocations de 10^{12} à 10^8 cm.

-Température de recristallisation primaire T_{pr} :

Son choix dépend :

-du type de matériaux ;

-de la durée de chauffage t ;

-du degré de déformation préalable ε ;

-de la grosseur du grain avant la déformation ;

Remarque : T_{pr} est d'autant plus basse que le degré de déformation est plus élevé, la durée de chauffage plus grande et le diamètre du grain plus petit avant déformation. Pour supprimer complètement l'effet de l'écroutissage, le métal doit être mené jusqu'à T_1 (**voir fig 10**)

b-recristallisation secondaire (plasticité) :

C'est un mécanisme de croissance préférentielle de quelques nouveaux grains. Se fait conduit

à la formation d'une structure à grains fins en quantité et d'un petit nombre en gros grains. Les grains susceptibles de croissance sont ceux ayant peu de défauts et ayant une meilleure mobilité des joints (suite à la précipitation des inclusions).

III-4-2-Recristallisation ($T > T_{pr}$)

La recristallisation est un recuit des matériaux fortement déformés plastiquement à froid à des températures supérieures à T_{pr} et ce, en vue de formation de nouveaux grains qui contribueront à l'amélioration des propriétés.

Selon **Botchvar**, on choisit la température de recristallisation des matériaux comme suit :

- $T_{pr} \approx 0.4 T_f$ (pour métaux techniques)
- $T_{pr} \approx 0.1 \text{ a } 0.2 T_f$ (pour métaux purs)
- $T_{pr} \approx 0.5 \text{ a } 0.6 T_f$ (pour alliages métalliques)(comparativement, T_{pr} est élevée du fait que la diffusion des élément d'accompagnement nécessite une grande énergie).

Exemples de T_{pr} de certains matériaux pour temps de recuit de recristallisation $t = 1$ à 2 heures :

Pb, $T_{pr} \approx 33$ °C

Cu, $T_{pr} \approx 270$ °C

Aciers non et faiblement alliés $T_{pr} \approx 450$ a 700 °C

Aciers fortement alliés $T_{pr} \approx 600$ à 800 °C

III-5-Matériaux écrouis :

III-5--1- Notions d'écrouissage et de recristallisation :

La déformation plastique à froid d'un matériau entraîne une déformation au niveau des grains du métal. Ainsi, la réduction d'épaisseur d'une tôle par laminage par exemple provoquera un allongement des grains parallèlement au sens du laminage.

Après déformation, les grains deviennent plus forts et donc plus difficile à déformer. En fait on observe en fonction du taux d'écrouissage une augmentation de la limite d'élasticité et de la charge à la rupture du matériau et une diminution de la caractéristique de ductilité (allongement et striction) .

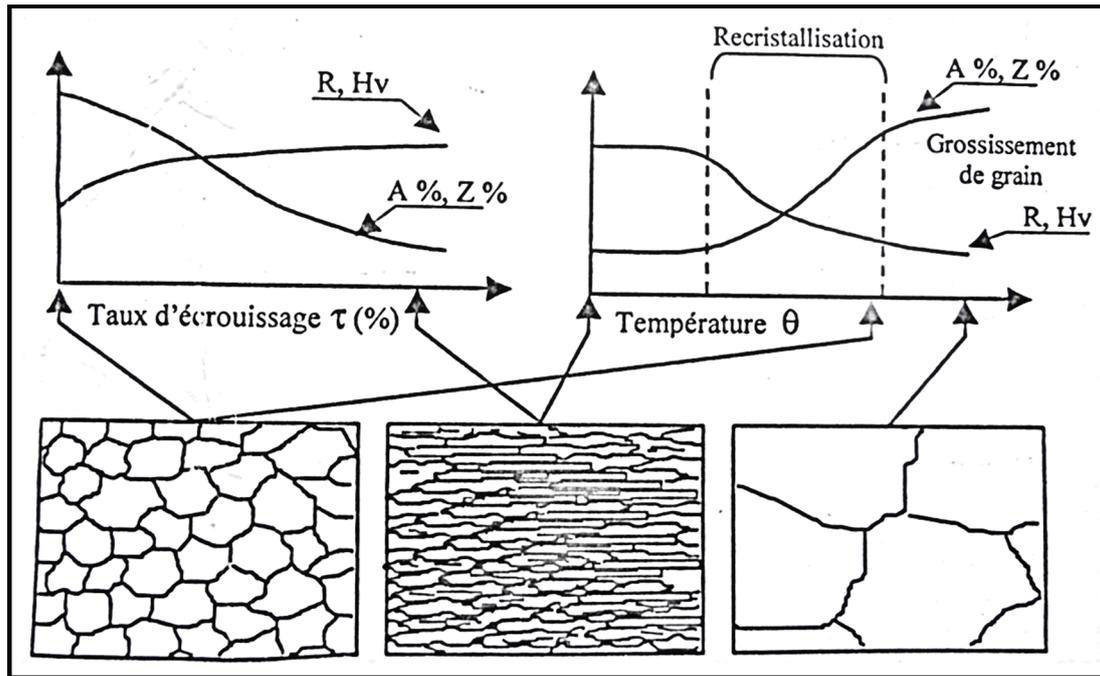


Figure III-11 : *Effet de l'écrouissage et de la recristallisation sur la microstructure et caractéristiques de traction*

Le taux d'écrouissage résultant d'une déformation plastique est défini par :

$$\tau(\%) = \frac{\text{Section initiale} - \text{section finale}}{\text{section initiale}} \times 100 \quad (\text{III-7})$$

Si après écrouissage le métal est chauffé progressivement, plusieurs phénomènes vont se succéder :

_ À basse température les contraintes internes diminuent et l'on peut observer en microscopie un réarrangement des dislocations mais la microstructure ne change pratiquement pas. Durant cette phase dite de restauration. La charge à la rupture ne diminue que très peu la ductilité a plutôt tendance à baisser,

_ À plus haute température, des modifications structurales importantes se produisent. Les grains déformés par l'écrouissage sont progressivement remplacés par de nouveaux grains de telle sorte qu'à la fin de ce processus, on retrouve la microstructure que présentait l'échantillon avant l'écrouissage. Le matériau est adouci et plus ductile, il y a eu recristallisation

_ Si l'on augmente encore la température, on observe un grossissement des grains d'autant plus important que la température est élevée. Ce phénomène entraîne une dégradation des caractéristiques mécanique

III-5-2-Soudage des matériaux écrouis[16]

Dans la zone affectée thermiquement le matériau initialement écroui va subir des modifications structurales plus ou moins profondes selon la distance a la zone de liaison et le cycle thermique de soudage mais quoiqu'il en soit on trouvera toujours, en observant depuis le métal de base vers le métal fondu, une zone restaurée puis une zone recristallisée et enfin une zone ou le grain a fortement grossi. De ce fait les évolutions représentées sur la (figure12) sont inévitables.

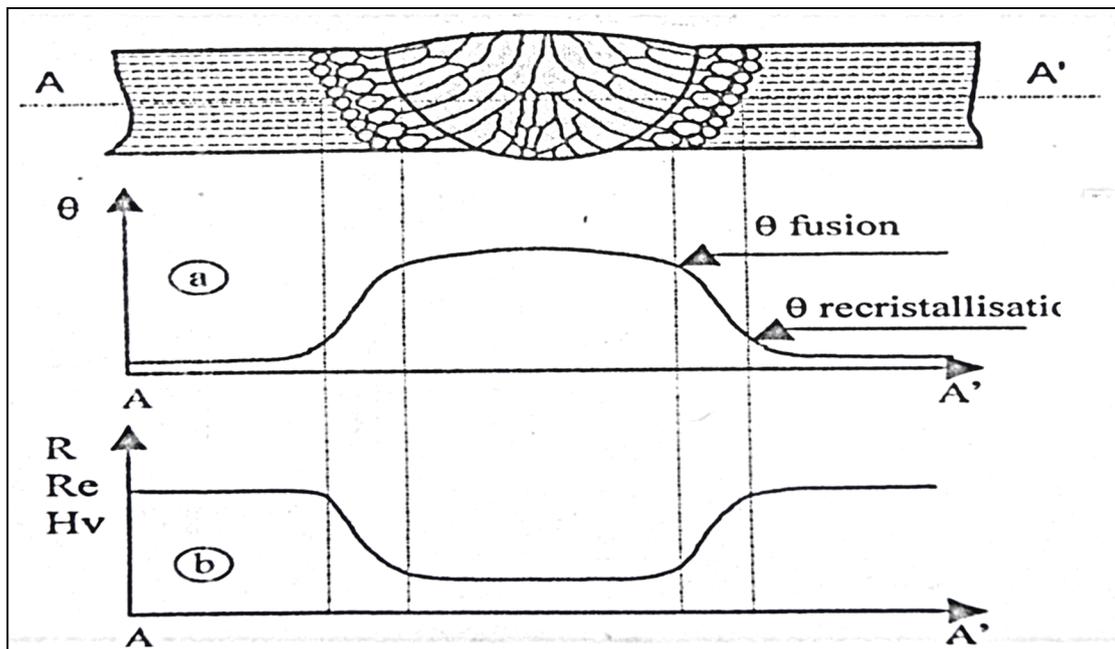


Figure III-12 : température maximal atteinte (a) et variations des propriétés mécaniques (b) dans la ZAT d'un matériau écroui[

Il apparait alors clairement que pour limiter la dimension de la dimension de la zone adoucie (ZAT) ainsi que l'ampleur de l'adoucissement on aura toujours intérêt à utiliser la plus faible énergie de soudage qui soit compatible avec le joint à réaliser.

En ce qui concerne le métal fondu, l'utilisation d'un métal d'apport sur-allié peut souvent permettre d'obtenir une résistance supérieure à celle de la zone affectée thermiquement par effet de solution solide ; néanmoins elle sera généralement inférieure à celle du métal de base écroui,

Cette succession de phénomènes métallurgiques en fonction de la température est tout à fait générale. Seules les températures auxquelles se produisent les différents phénomènes dépendent de la nature du matériau. Pour les aciers inoxydables austénitiques par exemple, la

température de début de recristallisation se situe au voisinage de 800 C alors qu'elle n'est que d'environ 450 C pour les alliages cuivreux et est inférieure à la température ambiante pour un aluminium ultra pur.

CHAPITRE IV :
PARTIE PRATIQUE

qu'a eu l'écrouissage de deux plaques d'acier soudées après déformation. Dans ce qui suit, nous présentons par ordre chronologique les différentes opérations réalisées, ainsi que les caractéristiques mécanique et métallurgique de la nuance (NF A36_301).

IV.1. Identification du Métal de base

IV.1.1. Présentation de l'acier NF A36_301 :

L'acier provient de la S.N.V.I (SOCIETE NATIONAL DE VEHICULE INDUSTRIEL).

Sa référence au sein de la société est : 1613320.

Il se trouve sous forme de tôles et bandes laminées à chaud en acier doux pour emboutissage ou pliage à froid.

IV.1.1.1. Composition chimique :

Tableau 4.1 : *composition chimique de l'acier*

Éléments chimiques	C	Si	Mn	S	P
Pourcentage (%)	0,065	0 ,1	0,26	≤0,035	≤0,04

L'analyse chimique a été faite au niveau du laboratoire de la S.N.V.I département mécanique

IV.1.1.2. Aptitude au soudage :

L'acier présente une bonne aptitude au soudage : la composition est

-C≤0.10%

-P≤0.040%

-S≤0.035%

IV.1.1. 3.Caracteristiques mécaniques :

Tableau 4.2 : *caractéristiques mécaniques de l'acier*

Essai de traction		Dureté
Rm(N/mm ²)	A% min	HRB max
≤4 30	28	82

IV.2. Présentation du métal d'apport (fils pour soudage MAG ER70S-6)

Les fils ER70S-6 sont des fils de soudage en acier peu allié, destinés au soudage sous protection gazeuse. Ils se distinguent par leur con jonction forte avec une couche cuivrée, leur anticorrosion, leur entraînement stable, leurs projections faibles et leurs excellentes soudures. Les soudures obtenues peuvent résister aux impacts forts issus des basses températures.

Ils conviennent à d'autres aciers de faible teneur en carbone. Servent à souder les structures importantes, par exemple, les conteneurs, les véhicules et les machineries de construction (soudage automatique ou semi-automatique à gaz protecteur)

IV.2.1. Composition chimique AWS: ER70S-6

Le tableau 4.3 représente la composition chimique du métal d'apport selon la norme AFNOR

Tableau 4.3 : *Composition chimique du métal d'apport*

Matières des fils(%)	C	Mn	Si	P	S	Cu
	0.06~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15	≤0.025	≤0.035	≤0.50

IV.2.2. Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6

Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.4 : *Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 (selon AFNOR)*

Emballage	Diamètre	Bobine de fils		Poids net
	∅ =0.8~1.6 (mm)	D100mm, D200mm, D270mm, D300mm, K300mm		1kg, 5kg, 15kg, 18kg, 20kg
Facultés mécaniques du métal	Limite d'élasticité conventionnelle $\sigma_{0.2}$ (Mpa)	Résistance à la traction σ_m (Mpa)	Ratio d'étirage	Énergie d'impact AKV (J)
	≥420	≥500	≥22	≥27 (-29)
Diamètre du fil (mm)	1.2			
Courant de soudage (AMP)	80 à 350			

IV-3-Réalisation des éprouvettes :

IV-3-1-préparation de la plaque de métal:

On a pris une plaque de longueur 20cm et de largeur de 10cm avec une épaisseur de 5mm, on a découpé 4 éprouvettes de même largeur soit 24mm.

On a fait subir aux quatre éprouvettes une déformation uni-axial à l'aide de la machine de traction, avec différentes vitesse de déformation, différentes forces d'attraction et cela dans le but d'obtenir un taux d'érouissage variant entre les quatre pièces.

Après déformation, les éprouvettes sont soudées à l'électrode enrobée avec des points de soudure, dans le but de former une seule plaque en vue d'un soudage ultérieur au MAG.

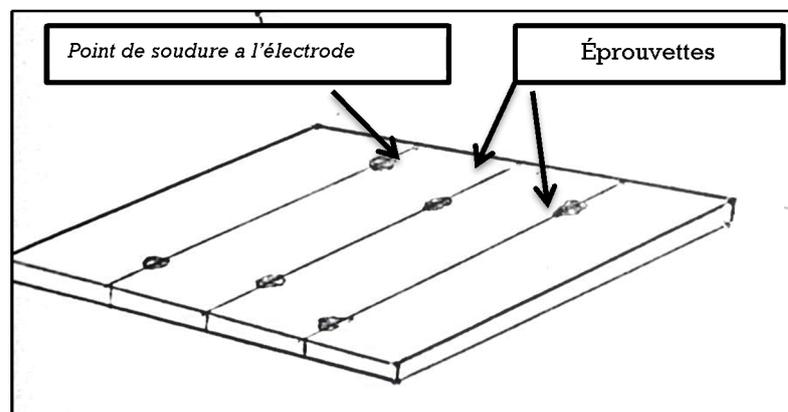


Figure IV-1 : *Disposition des éprouvettes.*

Les éprouvettes forment une plaque unique qu'on coupe en deux selon la largeur des pièces (chaque éprouvette sera coupée en deux). Les deux parties de la pièce seront chanfreinées et prêtes à être soudée.

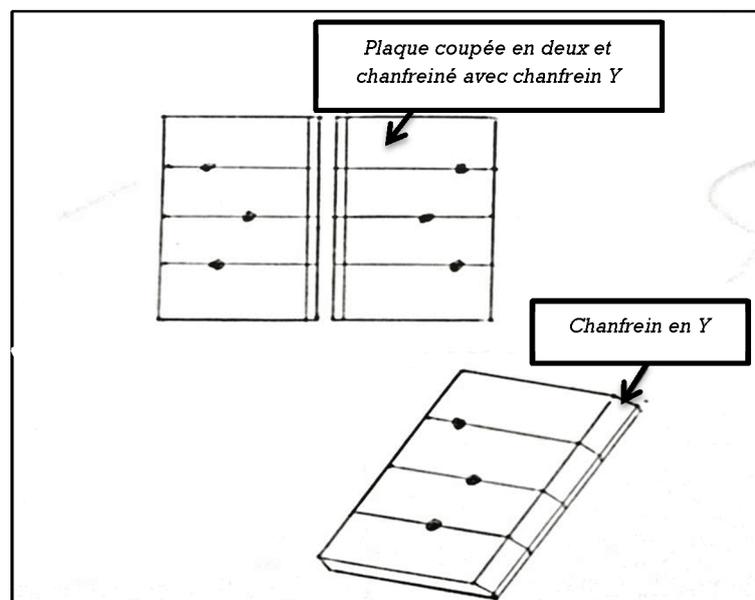


Figure IV-2 : Plaque coupée et chanfreinée en Y.

IV-3-2-Assemblage de la plaque :

Pour cette étape, on a utilisé le soudage semi-automatique avec fil plein (M.A.G).
Vue l'épaisseur mince de la plaque, la réalisation du cordon de soudure n'a pas nécessité plus d'une seule passe :

-Le temps de soudage : $t = 9.84 \text{ sec}$

-la longueur du cordon : $x = 10,1 \text{ cm}$

Ce qui nous donne une vitesse de soudage $V = \frac{x}{t} = \frac{10,1}{9.84} \times 60 = 61,58 \text{ cm/min}$

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

$$Es = \eta \frac{U \cdot I}{v} \cdot 60 \text{ [J/cm]} \quad \text{(IV-1)}$$

Ou

η : rendement thermique du procédé de soudage qui pour M.A.G ($\eta = 0.9$)

U : tension de soudage (U=24 v)

I : Intensité de soudage (I= 140 A)

v : vitesse de soudage (V= 61,58 cm/min)

Gaz de protection : le procédé M.A.G (Metal Activ Gaz) a comme gaz de protection le dioxyde de carbone (CO₂) qui est un gaz actif.

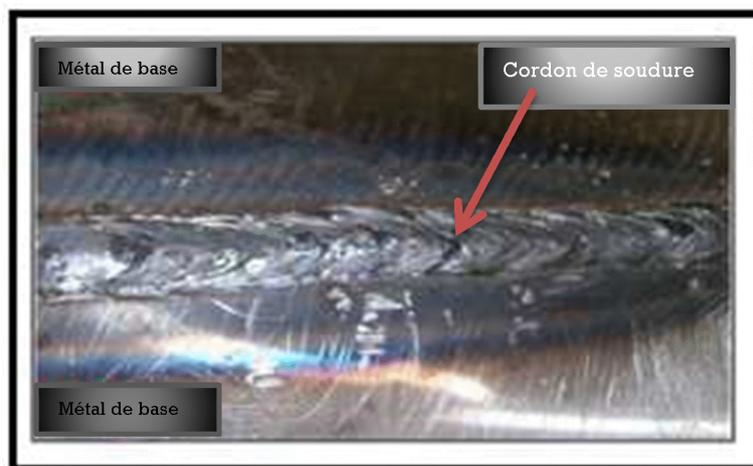


Figure IV-3 : cordon de soudure en une seul passe

IV-3-3-Prélèvement des éprouvettes :

Après réalisation du cordon de soudure, on brise les points de soudure précédemment administrés aux éprouvettes avec électrode enrobée.

IV-4-Essais réalisés :

IV-4-1-Essai de dureté

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre plus dur que lui. Plusieurs types d'essais de dureté sont couramment utilisés, leur principe est le même, ils ne diffèrent que par la forme du pénétrateur et la valeur de la charge appliquée. Pour notre essai, on a choisi l'essai HRB.

-*Essai Rockwell à bille (HRB)* : il consiste en l'application d'une charge de 100 KgF sur un pénétrateur à bille de diamètre 1/8 ou 1/16 de pouce. Avant l'essai la machine applique une pré-charge de 10 KgF de façon à bien appliquer la pièce à essayer sur la table de l'appareil. L'échelle de dureté Rockwell B est graduée de 0 à 130. La dureté se calcule en fonction de la profondeur de l'empreinte. $HRB = 130 - \frac{h - h_0}{0,002}$ $h - h_0$: pénétration rémanente

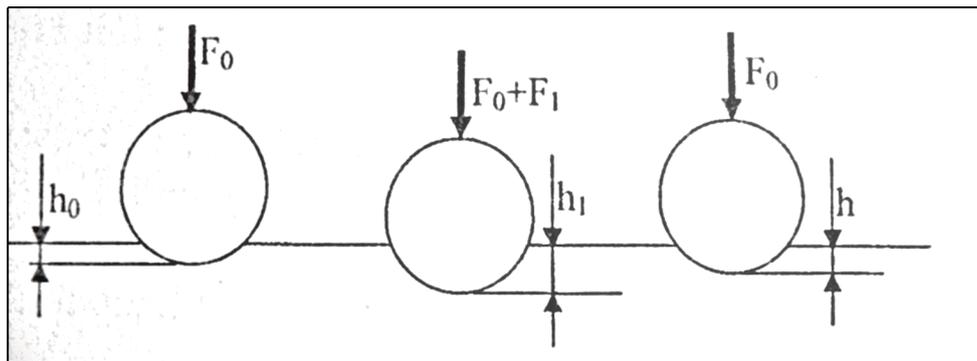


Figure IV-4 : Essai de dureté Rockwell B

IV-4-2-Essai de traction : L'essai de traction consiste à exercer une contrainte croissante sur un barreau prismatique ou cylindrique et à mesurer l'évolution de la force et de l'allongement de la pièce (ou la déformation). La courbe contraintes- déformations contient deux domaines de déformation :

a-Domaine élastique : Domaine qui consiste en une droite passant par l'origine du graphe Force/Allongement ou sa tangente représente le module d'Young (E), Dans cette partie, la déformation est réversible le matériau reprend sa forme initiale après cessation de l'effort

b-Domaine plastique : Domaine ou la déformation est irréversible et conduit vers la rupture de l'éprouvette, Métallurgiquement , la rupture est dû à la concentration des dislocations et

leur emprisonnement sans aucune mobilité, ce qui provoque des strictions et la déchirure de l'éprouvette.

Condition de déroulement de l'essai de traction

Cet essai est réalisé, au sein de laboratoire de département de génie civil dans des conditions ambiantes, sur des éprouvettes réalisées au hall de l'université de Mouloud MAMMERIE (Oued-Aissi).

Les dimensions des éprouvettes obtenues sont données dans le tableau 4.8 ci-après :

Tableau 4-4 : Dimension des éprouvettes de traction

Dimension des éprouvettes	valeurs
Longueur entre repère L	88 mm
Largeur (b)	13 mm
Épaisseur (e)	4,5 mm
Section initiale (S_0)	58,5 mm ²

c-Machine de traction

La machine de traction utilisée est de type IBERTEST. Celle-ci est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe sur laquelle repose un dynamomètre servant à mesurer la force appliquée, et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin mise en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur de la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette. On commande la machine automatiquement par un micro-ordinateur.



Figure IV-6: *Machine de traction*

IV-4-3-Microstructure : elle se fait sous microscope optique. Avant l'observation sous microscope, l'échantillon doit être préparé soigneusement.

IV-4-3-1-Préparation de l'échantillon :

1-Polissage :

Le polissage est un procédé qui consiste à arracher de la matière en utilisant un papier abrasif à granulométrie de plus en plus fine et cela dans le but d'atteindre une surface plane et brillante. On met l'échantillon perpendiculairement sur le disque qui est en rotation, après quelque minute on fait tourner l'échantillon de 90°.

On peut diviser le polissage en deux parties :

-Polissage grossier : Il se fait avec un papier abrasif de granulométrie grossière (P240, P400, P800) qui est mis sur une polisseuse à deux disques, qui tournent avec la même vitesse et qui sont arrosés instantanément pour éviter le chauffage de l'échantillon à cause de l'arrachement de matière et en même temps pour éviter l'endommagement du papier.

-Polissage de finition : le papier utilisé dans cette partie à une granulométrie de plus en plus fine avec un ordre croissant (P1200, P1500, P2000, P4000). Cet ordre a le pouvoir d'éliminer toute rayure provoqué par le papier utilisé précédemment.



Figure IV-7: polisseuse a deux disques

Pour une meilleur finition, et ce, pour l'obtention d'une surface réfléchissante (miroité) sans aucune rayure, on se sert de l'alumine (Al_2O_3) qu'on verse sur le disque de feutre qui est en rotation continue .



Figure IV-8: Polisseuse de finition

3-Attaque chimique : elle se fait généralement avec du *Nital* pour les aciers faiblement alliés. On met quelques gouttes sur l'échantillon pendant quelques secondes et puis on rince avec de l'eau.

Le but de l'attaque chimique est de révéler les différents constituants de l'alliage sous observation sous microscopique.

IV-4-3-2-Observation microscopique : après l'avoir préparé, l'échantillon est mis sous microscope pour voir la forme, la distribution et la quantité des phases le constituant.

Le microscope optique utilisé est de type HUND équipé d'une caméra vidéo de type EyesCora permettant l'acquisition des micrographies sur ordinateur. Sur ce dernier, un

logiciel d'acquisition et de traitement de résultats PicedCora est installé. Ce microscope est équipé de quatre objectifs de grossissement 40, 100, 200 et 400 fois. Il est constitué d'une lampe qui fournit de la lumière transmise horizontalement sur un prisme qui la réfléchit verticalement. Le faisceau lumineux est localisé sur l'échantillon par la lentille d'un objectif qui se trouve au dessus de l'échantillon. La lumière réfléchi par la surface à analyser est transmise à travers la même lentille, l'image est projetée sur un miroir semi transparent qui la renvoie sur la lentille de grossissement 10, ou elle sera observée à l'œil nue. Une acquisition de photo y est ainsi possible sur ordinateur au moyen de la caméra vidéo

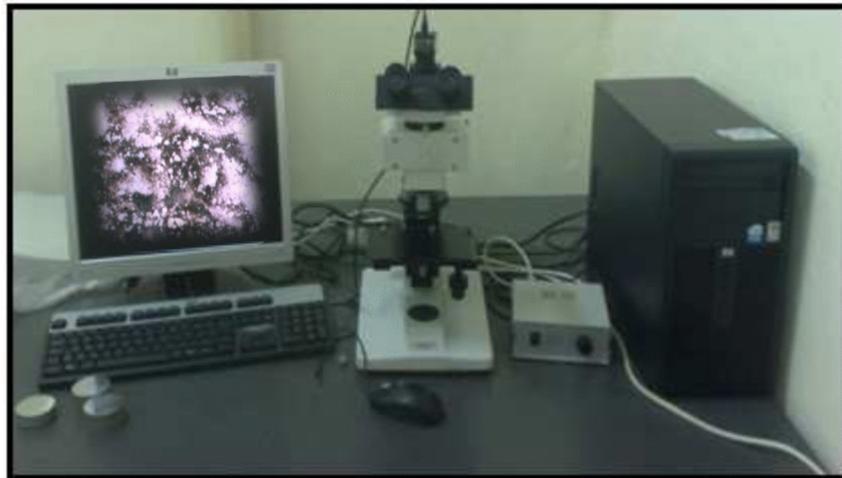


Figure IV-9 : *Microscope optique.*

RESULTATS ET
INTERPRETATIONS
ИЗЪЯВЛЕНИЯ

V-1-Introduction

Dans le but de caractériser l'effet de l'érouissage sur le soudage par le procédé MAG, on a effectué des essais, su des éprouvettes soudées pour déduire le comportement mécanique, physico-chimique et morphologique, tel que l'essai de traction, essai de dureté Vickers (HRB), observation microscopique.

La caractérisation du point de vue mécanique et morphologique a été réalisée en utilisant différentes techniques :

- 1-Examen macrographique pour détecter les différentes zones constituant le joint de soudure ;
- 2- Le Microscope optique pour l'obtention de la morphologie structurale
- 3- Essai de dureté, traction pour la détermination des propriétés mécaniques.

V-2- Déformation des éprouvettes:

Pour administrer un certain degré d'érouissage aux éprouvettes, on a subit a celles-ci une traction jusqu'aux domaines de plasticité.

Les résultats de la traction, sont représentés sous forme de graphe contraintes-déformation $R=f(A)$:

a-Éprouvette I :

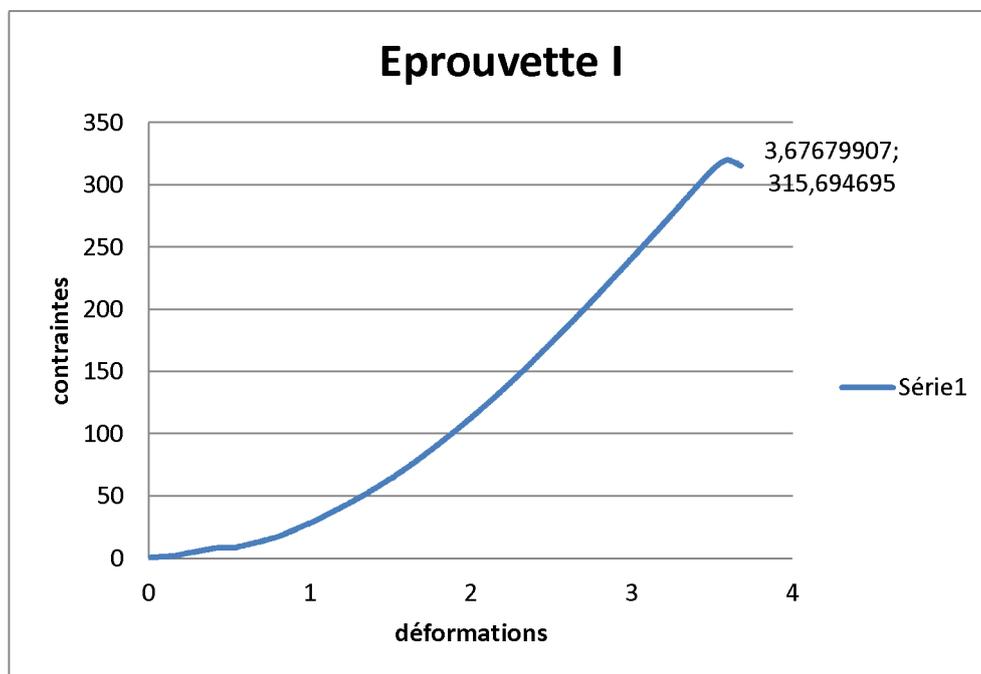


Figure V-1 : Courbe de traction (déformation), éprouvette I

Sur ce graphe, l'allure de la courbe de traction n'étant pas compatible du fait que les différents domaines sont difficiles à distinguer. Toute fois la contrainte limite $R=315,694$

MPa et la déformation correspondant à $A = 3,67\%$, peuvent être localisées. En comparant ces valeurs avec celles du métal de base (voir tableau 4-2), on pourrait conclure que l'éprouvette n'a subi que la déformation élastique

b-Éprouvette II :

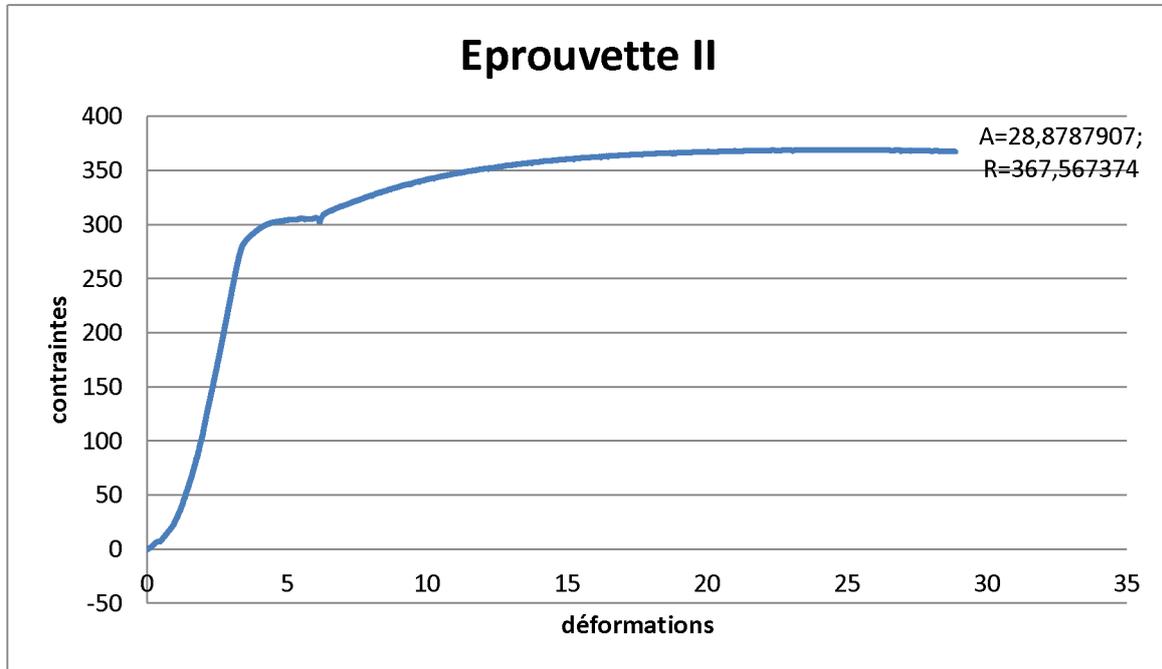


Figure V-2 : *Courbe de traction (déformation), éprouvette II*

Sur cette éprouvette, la déformation est très élevée (28.87%), on remarque sur le graphe que la courbe commence à décliner après une déformation de 28.54%, ce qui signifie qu'on a atteint le seuil du domaine de striction, $R_e = 270$ MPa ; $R_m = 370$ MPa.

c-Éprouvette III :

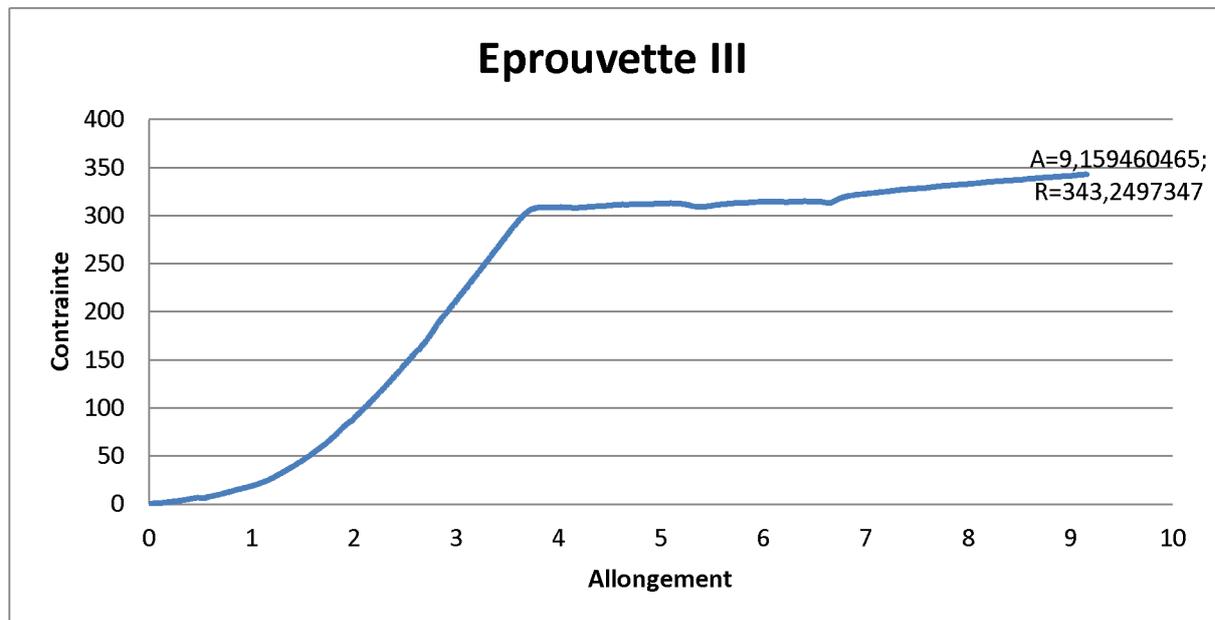


Figure V-3 : Courbe de traction (déformation), éprouvette III

Pour cet essai, le domaine de déformations plastique est atteint, mais avec un taux qui reste minimal et qui est de 9,19%, vu que la courbe est en croissance continue, l'éprouvette reste sans striction. La consolidation du matériau dans le domaine plastique résulte du freinage de mouvement des dislocations.

Vu l'allure de la courbe, la contrainte R_e est difficile à localiser. Le problème est toujours le glissement des mors

V-3-Bilan générale :

Dans cette partie, on a calculé l'énergie de soudage, qui est la même pour les trois éprouvette vu qu'elles étaient prises sur la même plaque soudée.

On a calculé le taux d'écroutissage pour chaque éprouvette, il se diffère de l'une à l'autre selon le taux de déformation acquis par chaque éprouvette.

Aussi, on a calculé le temps de refroidissement $tr_{800/500}$.

Les relations utilisées, sont comme suit :

$$\text{-Énergie de soudage (Joule/cm)} : E = \eta \frac{UI}{V} 60 \quad (\text{J/cm}) \quad (\text{V-1})$$

$$\text{-Degré d'écroutissage(\%)} : \tau(\%) = \frac{\text{Section initiale} - \text{section finale}}{\text{section initiale}} 100 \quad (\text{V-2})$$

$$\text{-Temps de refroidissement } tr \text{ (s)} : tr_{800/500} = \frac{1}{4\pi\lambda\rho c} \left[\frac{E}{e} \right]^2 \left[\left(\frac{1}{500 - T_a} \right) - \left(\frac{1}{800 - T_a} \right) \right]^2 \quad (V-3)$$

$$\rho = 7,87 \text{ g/cm}^3$$

$$C = 0,52 \text{ (J/cm}^3 \cdot \text{K)}$$

$$\lambda = 0,38 \text{ (w/cm.K)}$$

$$\pi = 3,14$$

$$T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

-Énergie de soudage (E) :

$$\eta = 0,9 \quad (\text{pour procédé M.A.G}),$$

$$U = 24 \text{ V (tension de soudage)}$$

$$I = 140 \text{ A (intensité de soudage)}$$

$$V = 61,58 \text{ cm/min (vitesse de soudage)}$$

$$\text{Donc } E = 0,9 \frac{24 \times 140}{61,58} \times 60 = 2946,41 \text{ J/cm}$$

$$\text{-Degré d'écrouissage } \tau : \tau_1(\%) = \frac{(29 \times 5,2) - (29 \times 5)}{(29 \times 5,2)} \times 100 = \mathbf{3,84\%}$$

$$: \tau_2(\%) = \frac{(29 \times 5,2) - (4,1 \times 31)}{(5,2 \times 29)} \times 100 = \mathbf{18,43\%}$$

$$: \tau_3(\%) = \frac{(29 \times 5,2) - (29 \times 4,7)}{(29 \times 5,2)} \times 100 = \mathbf{9,61\%}$$

-Temps de refroidissement $tr_{800/500}$: avant de pouvoir calculer le temps de refroidissement, on calcul préalablement l'épaisseur de transition, celle-ci indique quelle loi doit-on suivre (a2d ou 3d):

$$e^* = \sqrt{\frac{E}{2\rho c} \left(\frac{1}{500 - T_a} + \frac{1}{800 - T_a} \right)} = 0,53 \text{ cm} \quad (V-4)$$

$S < S^*$ donc on va utiliser la deuxième loi qui est (a 2 dimensions):

$$\boxed{tr} = \frac{1}{4\pi\lambda c \rho} \left[\frac{E}{e} \right]^2 \left[\left(\frac{1}{500 - T_a} \right) - \left(\frac{1}{800 - T_a} \right) \right]^2$$

Pour: $S = 0,52 \text{ cm}$

$S = 0,47 \text{ cm}$

$S = 0,41 \text{ cm}$

$tr = 1,053 \text{ s}$

$tr = 1,28 \text{ s}$

$tr = 1,69 \text{ s}$

Le tableau suivant regroupe les résultats précédemment calculés :

Tableau V-1 : bilan énergétique, taux d'écrouissage et temps de refroidissement.

	Éprouvette I	Éprouvette II	Éprouvette III
Taux d'écrouissage (%)	3,84	18,43	9,61
Énergie de soudage (Joule/cm)	2946,41	2946,41	2946,41
Temps de refroidissement (s)	1,053	1,69	1,28

NB : selon les résultats de temps de refroidissement, on remarque que plus l'épaisseur augmente, et plus le temps de refroidissement diminue

V-4- Observation microscopique

Après préparation des échantillons, polissage mécanique et attaque chimique, on a réalisé des observations microscopiques. À l'aide d'un microscope optique équipé d'une caméra reliée à un ordinateur.

V-4-1- Microscopie :

Pour la microstructure, on a pris deux échantillons pour faire une comparaison, le premier provient d'une éprouvette qui n'a pas subi de déformation et le deuxième échantillon a été pris sur l'éprouvette III

Éprouvette I $\tau=3,84\%$

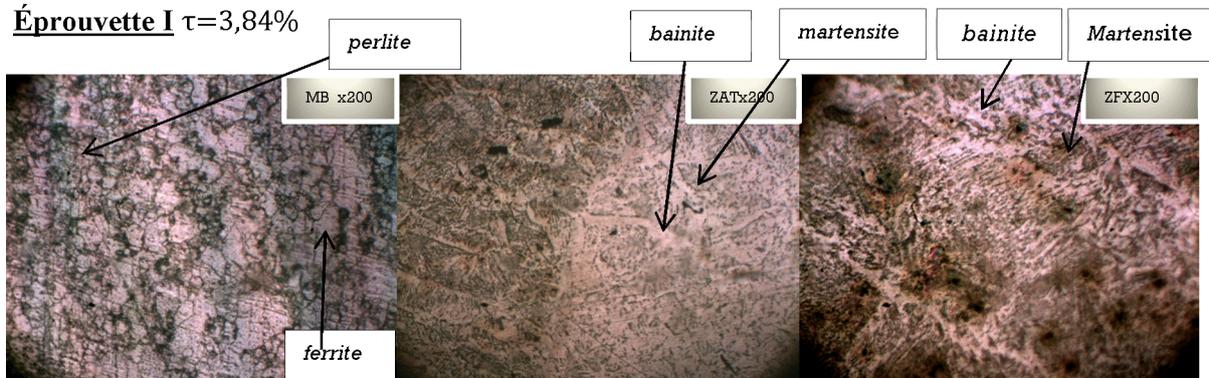


Figure V-4 : Micrographie de l'éprouvette I (métal de base, ZAT, métal fondue)

-Métal de base : La microstructure de l'acier a une structure ferrito-perlitique, avec une

faible proportion de perlite qui est due à la faible teneur en carbone en présence. Les grains n'ont pas de sens de direction privilégié ce qui indique l'absence d'érouissage.

-*Zone thermiquement affectée (ZAT)* : la sous-zone a gros grains détermine, en général, la fiabilité de la soudure. Cette zone se situe juste devant la zone de liaison qui sépare le métal fondu du métal de base, elle est constituée de la martensite et de la bainite [% Martensite prédomine devant le % bainite].

-*Métal fondu* : la microstructure montre que cette zone a une structure bainitique qui est en couleur grise, avec des îlots de Martensite.

Éprouvette III $\tau=9,61\%$

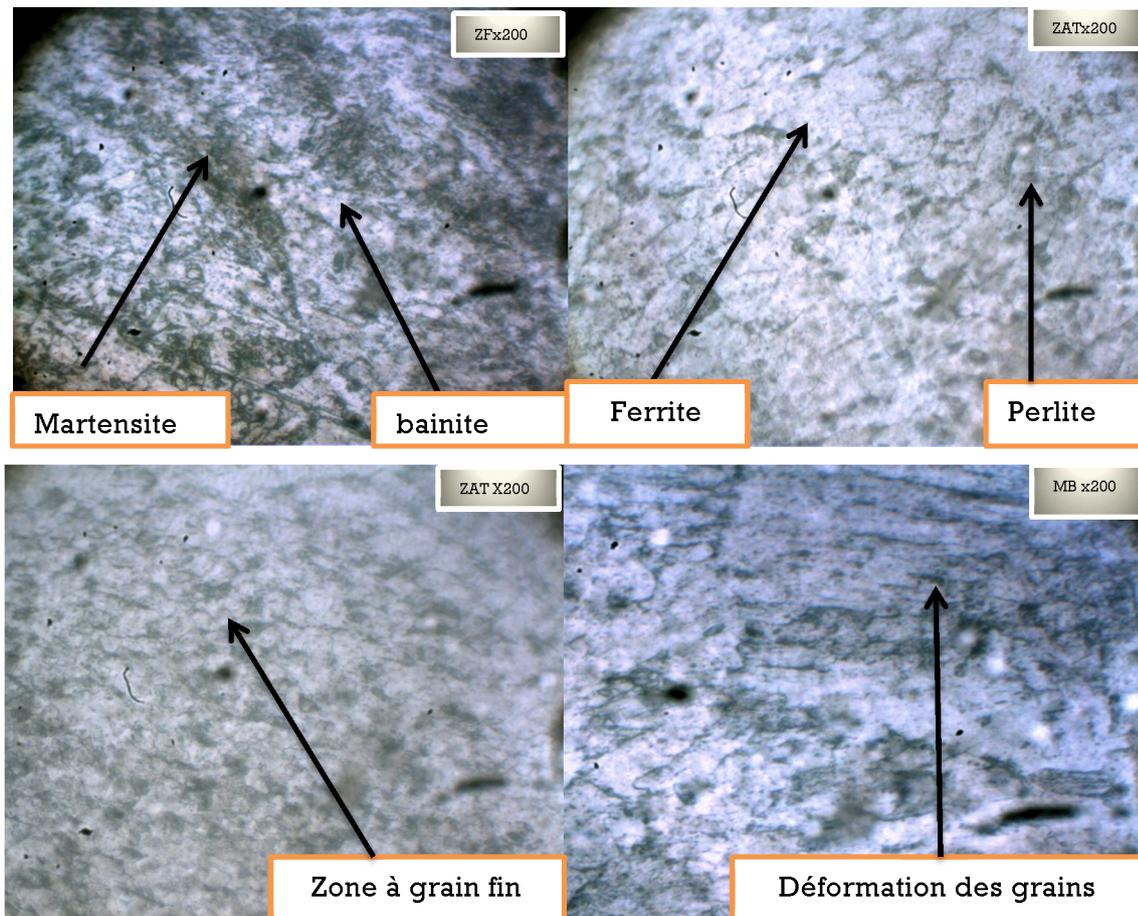


Figure V-5 : micrographie de l'éprouvette III (ZF, ZAT, métal de base)

-*Métal de base* : sur la micrographie du métal de base qui est constitué de perlite (en gris) et de ferrite (qui est majoritaire), on constate qu'il y a une orientation des grains dans le sens de la déformation.

-*Zone à gros grains (ZAT)* : Cette zone est prédominée par la bainite devant la martensite

-*Zone de recristallisation (ZAT)* : Dans cette zone, on relève un affinage du grain et une tendance à reprendre l'état structural initial, ce phénomène est dû à la germination et création

de nouveaux grains affinés.

-*Métal fondu* : Le métal fondu est composé principalement de bainite avec quelques ilots de martensite

V-Essai de dureté : l'essai de dureté sur trois échantillons nous a donnés les résultats suivants :

Tableau V-2 : résultats d'essai de dureté Rockwell B (HRB) sur trois échantillons

	Éprouvette I	Éprouvette II	Éprouvette III
Métal de base	82	113	106
ZAT	96	117	110
Zone fondue	89	110	92
ZAT	98	115	109
Métal de base	85	109	107

Pour les trois éprouvettes, on a réalisé un essai de dureté HRB pour chaque zone de soudage (métal de base, Z.A.T, métal fondue). Les résultats sont regroupés sur le graphe ci-dessous:

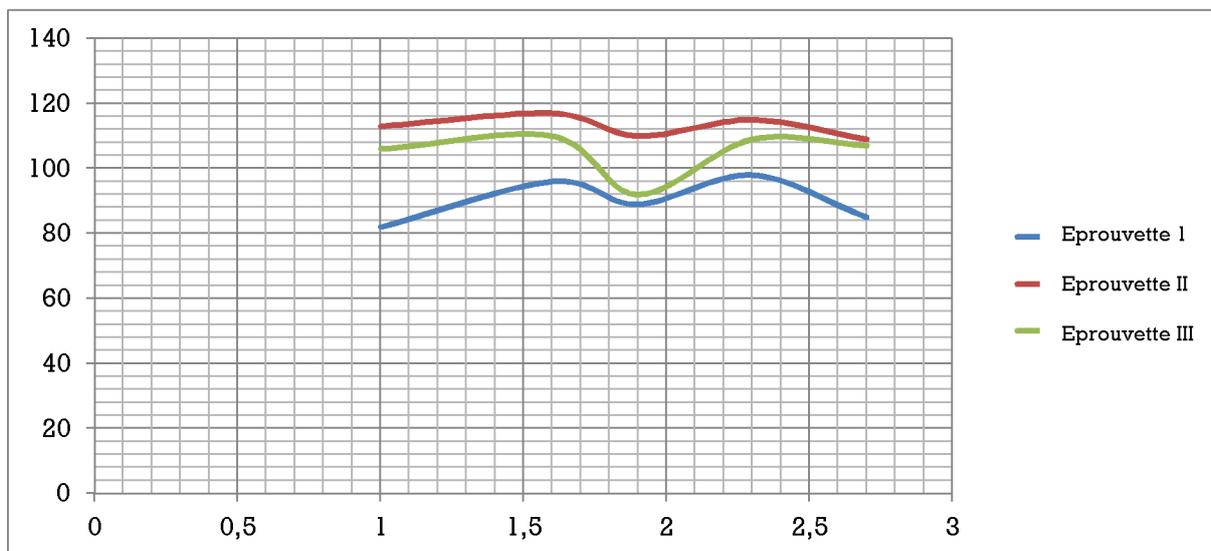


Figure V-6 : Courbe essai de dureté Rockwell B

D'après les courbes ci-dessus, les duretés augmentent graduellement en partant des aciers de base (82 à 113 HRB) pour atteindre un maximum au niveau des zones affectées thermiquement et diminuer légèrement au niveau de la zone fondue (89 à 110HRB). Cette variation de dureté s'appuie sur les changements structuraux qui s'y opèrent au niveau des différentes zones après refroidissement. La dureté maximale est atteinte au niveau de la ZAT des deux éprouvettes. Ceci s'explique par le taux élevé de la martensite en cette

zone.

La chute de dureté dans la ZF s'explique par la composition chimique du métal fondu ainsi formé qui obéit aux taux de dilution des éléments constituant l'assemblage et de la présence en force de la bainite.

La différence au niveau de la dureté entre les trois éprouvettes dans les différentes zones s'explique par l'influence de l'érouissage.

La recristallisation s'opérant en soudage favorise la formation de structures modérées telle que la bainite qui se caractérise par son grain fin et qui a son tour favorise la diffusion.

V-5-Essai de traction après soudage :

L'essai de traction a été réalisé au laboratoire de génie civil de l'université de Mouloud MAMMERIE. On a fait 3 essais pour trois éprouvettes, les résultats sont comme suit :

Éprouvette I : vu que l'éprouvette n'a pas subi de déformation majeure, sa courbe de déformation montre une droite de déformation élastique qui ne s'arrête qu'aux alentours d'une contrainte de $\sigma=400$ MPa et une déformation totale atteignant 34%. La rupture s'opère juste à côté du cordon de soudure au niveau de la ZAT.

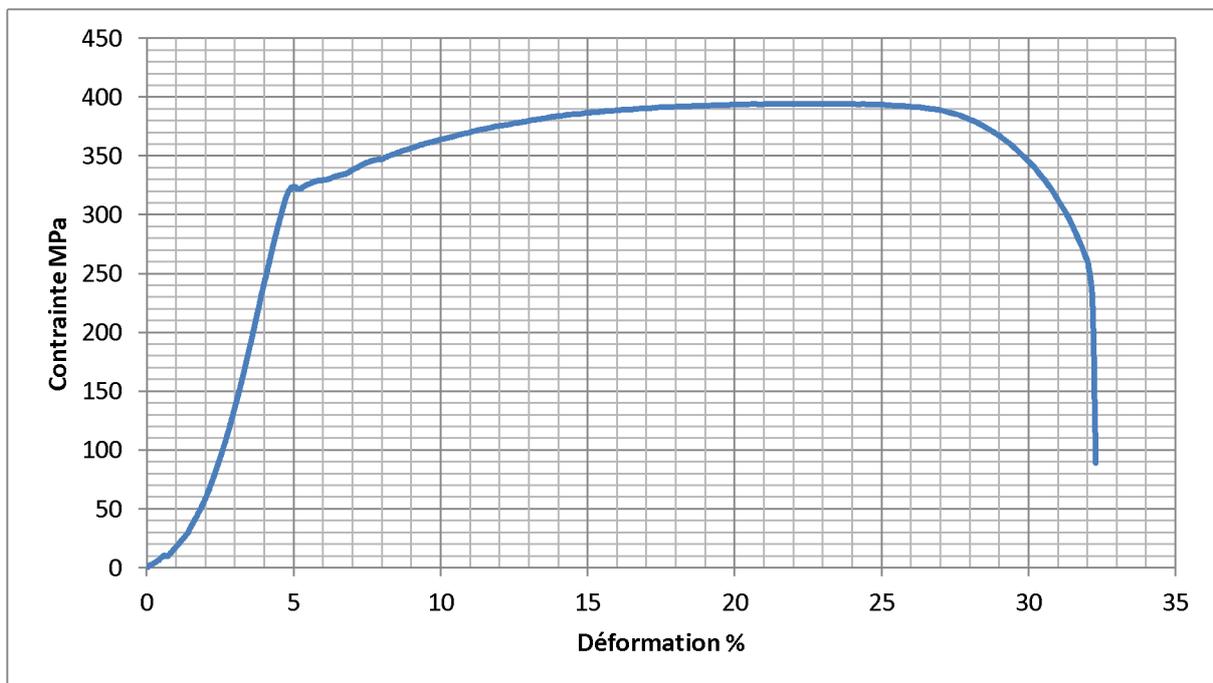


Figure V-7 : Courbe de traction, éprouvette I

Éprouvette II : cet essai a présenté une courbe de traction différente de la courbe conventionnelle. La rupture s'est opérée au niveau du métal de base, très loin de la ZAT et du

cordon de soudure. La courbe a présenté une déformation totale de 11%, provoqué suite à l'application d'une contrainte maximale de 500 MPa.

L'anomalie constatée revient au glissement des mors sur l'éprouvette lors de l'essai



Figure V-8 : Rupture d'éprouvette II

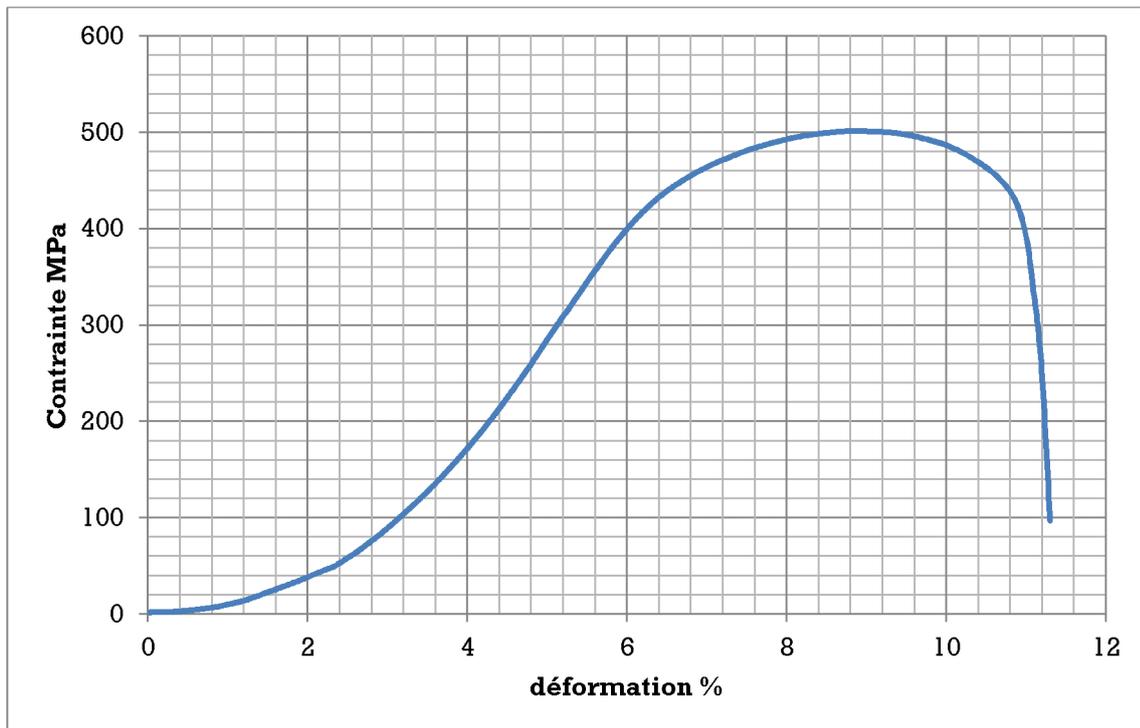
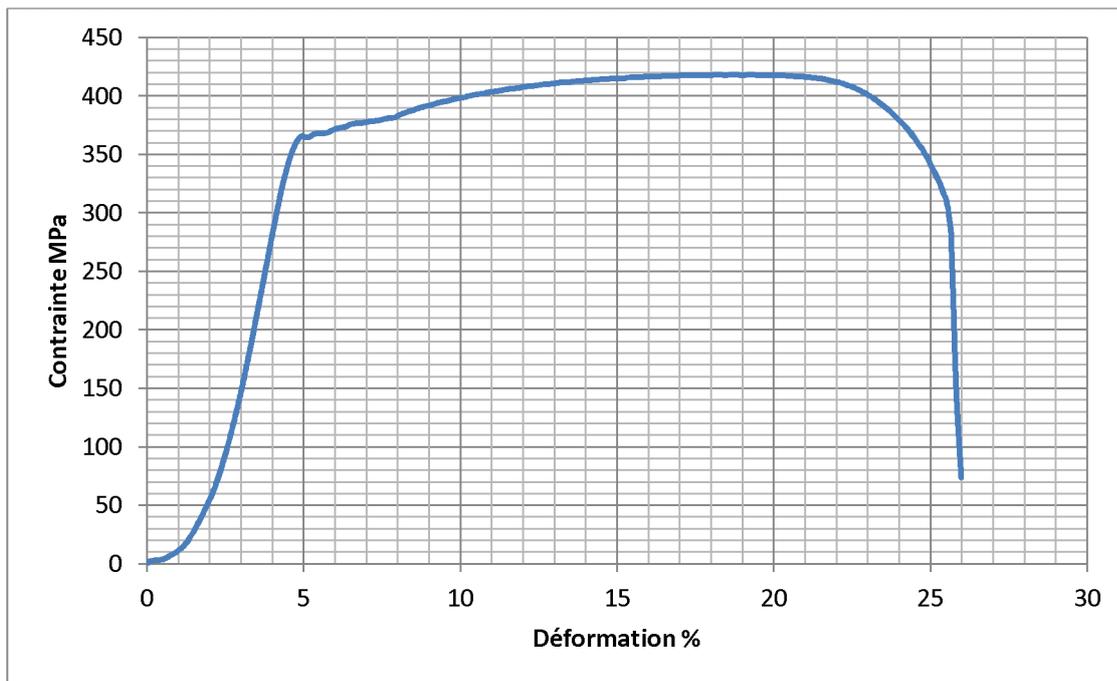


Figure V-9 : Courbe de traction, éprouvette

-Éprouvette III : La courbe présentée par l'éprouvette III est conforme à la courbe conventionnelle, elle présente une déformation élastique qui tend jusqu'à une contrainte de 360 MPa, une déformation plastique et une striction qui débute après un taux de déformation allant jusqu'à 26%. La contrainte maximale atteinte st de 410MPa



Figure V-10 : rupture de l'éprouvette III



Remarque :

- Les ruptures des éprouvettes soudés se produit en dehors du cordon de soudure, ce qui atteste de la bonne réalisation de la soudure (vitesse de soudure constante, métal d'apport adéquat et bonne pénétration du métal d'apport au niveau du chanfrein)
- Une contrainte maximale élevée est observée sur l'éprouvette II, ce qui explique l'effet bénéfique de l'état écrouis avant soudage. Le fait que le grain a une granulométrie fine, la structure recristallisée est amplement améliorée, de par sa résistance et sa ductilité du fait d'une meilleure diffusion (plus la surface des joints augmente et plus la diffusion augmente) en formant des carbures finement dissipés dans la matrice ferritique

CONCLUSION

GENERALE
GENEBATE

Conclusion général :

Le travail réalisé nous a fourni les caractéristiques essentielles d'une soudure au MAG d'un acier faiblement allié et précédemment écrouis.

Pour se faire, on a réalisé une étude métallurgique, soutenu par une caractérisation des propriétés mécanique, réalisée par des observations microscopique et des essais mécanique telle que, l'essai de traction et l'essai de dureté HRB.

A la lumière des résultats obtenus, on a remarqué :

Que les assemblages soudés représentent trois zones hétérogènes qui sont la zone affectée thermiquement, la zone fondue et le métal de base. La zone la plus sensible du cordon de soudure est la zone affectée thermiquement (ZAT), ou elle présente un maximum de dureté ce qui influe sur la ténacité de celle-ci et la fissuration à froid.

Qu'une bonne réalisation de soudure empêche la rupture au niveau du cordon

Que la dureté augmente remarquablement au niveau de la ZAT dans la zone de recristallisation, ce qui est du à la diffusion qui provoque la germination qui a son tour augmente la surface des joint, ce qui mène systématiquement à l'augmentation de la dureté.

Que la contrainte maximale augmente avec l'augmentation du degré d'écrouissage, ce qui atteste de l'effet bénéfique de l'écrouissage avant soudage.

D'une façon globale, on conclut que l'écrouissage avant soudage influence les caractéristiques mécaniques des matériaux, et les améliore dans un sens bénéfique.

Comme perspective, il serait intéressant de :

- Réaliser d'autres essais mécaniques tels que la résilience, la flexion et le pliage
- Prévoir un nombre considérable d'éprouvettes afin d'avoir plus de précisions dans les résultats.
- Faire une observation microscopique au MEB.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIE

БИБЛИОГРАФИЕ

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Base métallurgique du soudage « H.GRANJON »
- [2] : IRSID « courbes dureté -paramètres de refroidissement en condition de soudage, recueil établi en 1977
- [3] : B. Thomas, J.H.Schmitt.
Durcissement des Aciers : Role de la microstructure, Techniques de l'ingénieur, m 4341, 2002.
- [4] : Aide-mémoire science des matériaux
- [5] : SAF « Soudure autogène française »
- [6] : Application du soudage aux constructions « R. Baus et W. Chapeau »
- [7] : Théorie et pratique du soudage « S. Belakhowsky »
- [8] : Métallurgie et mécanique du soudage « RÉGIS BLONDEAU »
- [9] : Techniques de l'ingénieur « M45, M4340, M715 »
- [10]: EASTERLING K: " Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", second edition, ed. Butherworks, 1992.
- [11] : Patrick Isac : « compléments au précis de construction mécanique-procédé de fabrication » I- IND2103-tome II.
- [12] : CHRISTIAN BONNET : « Le Soudage ; Métallurgie et Produits » Air Liquide /CTAS 2001
- [13] : P. MACQUET : Ingénieur Européen en Soudage (EWE). CTICM « Construction Métallique », Département Construction Métallique n°1-1999.
- [14] : VALENSI Flavien : « Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG ». UNIVERSITE D'ORLEANS 2007
- [15] :J. PHILIBERT, A. Vignes, Y. Bréchet, P : Combrade, « Métallurgie, du minerai au matériau », Dunod, 2002 .
- [16] : M. Lafrance : Propriétés d'emploi des tôles fortes en aciers. Influence de la composition chimique, Revue de Métallurgie/CIT, n° 10, pp. 1253-1273, (1999).