

2/03

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur d'état en métallurgie

Thème



ETUDE DE LA CORRELATION
CYCLES THERMIQUES DE SOUDAGE – MICROSTRUCTURE
DANS LES TOLES MINCES SOUDEES
SANS METAL D'APPORT

Proposé et dirigé par:
Mr. M. BOUABDALLAH
Mr. H. MAZA

Réalisé par:
Mr Mohamed Cherif BENOUDIA

Année universitaire 2002/2003

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:
Ma mère et mon père qui ont toujours pensé à moi,
Mes trois sœurs et mes deux frères,
Mes tantes qui m'ont accueilli à bras ouverts,
Mes cousines qui comptent beaucoup pour moi,
Mes collègues de promotion,
Tous mes amis
et tous ceux qui m'ont aidé durant mes études.

CHERIF

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier beaucoup Mr Halim MAZA, responsable du laboratoire mécanique et métallurgie, et mon promoteur au CSC, Mr Maammar, et tous ceux qui m'ont aidé au cours de mon stage.

Aussi, je remercie M^r M. BOUABDALLAH mon promoteur à l'école, M^r M.E DJAGHLAL le chef du département Métallurgie, et tous mes enseignants.

ملخص:

إن دراسة الدورات الحرارية في التلحيم مهم جدا للتعرف على التغيرات التي تطرأ على البنية المجهرية، وعلى الخصائص الميكانيكية، خاصة تلك التي تطرأ بالمنطقة المتأثرة بالحرارة. محاولة منا للتعرف على التغيرات التي تطرأ خلال عملية تلحيم صفائح من الفولاذ القليل الكربون (الفحم)، و الفولاذ الغير متلف (304L)، قمنا بتسجيل الدورات الحرارية خلال هذه العملية بالنسبة لكل صفيحة، ثم دراسة البنية المجهرية (الميتالو غرافية)، بالإضافة إلى معايرة الصلابة. النتائج التي حصلنا عليها أكدت أن المنطقة المتأثرة بالحرارة هي التي تتميز بخصائص ميكانيكية ضعيفة راجعة للتغيرات البنيوية التي تطرأ خلال الدورة الحرارية. سمك هذه المنطقة متعلق بالبنية المجهرية الأصلية للمعدن، بالإضافة إلى نوعية الدورة الحرارية. الإنقطاع يحصل غالبا في هذه المنطقة.

Résumé:

L'étude des cycles thermiques lors du soudage est très importante pour reconnaître les changements de la structure microscopique, et des propriétés mécaniques, surtout celles qui se passent dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

Voulant reconnaître les changements qui se passent lors du soudage des tôles, en acier à bas carbone, et en acier inoxydable (304L), nous avons enregistré les cycles thermiques pour chaque tôle, puis on a effectué une étude métallographique, des essais de dureté, et des essais mécaniques.

Les résultats que nous avons obtenus, ont montré que la zone affectée thermiquement, est la zone où les caractéristiques mécaniques sont les moins bonnes, ceci est dû aux changements structuraux qui se passent dans cette zone lors de son cycle thermique. L'épaisseur de cette zone dépend de la structure initiale du métal, et du cycle thermique subit. La rupture se passe généralement dans cette zone.

Mots clés: acier à bas carbone, acier inoxydable, soudage, cycle thermique, caractérisation structurale, caractérisation mécanique.

Abstract:

The study of thermic cycls in welding is very important to know changes of microscopic structure, and mechanical proprieties, particularly in the thermic affected zone.

To know changes wich are produced in welding of low carbon, and stainless steel (304L) sheets, we have registred thermic cycls for the two sheets, then we have done metallographic study, hardness and mechanical tests.

The results we obtained, show that thermic affected zone has the worst mechanical proprieties, this lasts are caused by the changes of structure in thermic cycl. The thikness of this zone depends of initial structur of metal, and thermic cycl sudden. The break is made generally in this zone.

Key words: low carbon steel, stainless steel, welding, thermic cycl, structural characterization, mechanical characterization.

SOMMAIRE



Introduction

Partie Bibliographique

I Présentation générale des Aciers

I.1 Les aciers au carbone.....	1
I.1.1 Introduction aux alliages Fer-Carbone.....	1
I.1.2 Structures des aciers.....	2
I.1.3 Impuretés et éléments d'addition.....	2
I.2 Les aciers inoxydables.....	3
II.2.1 Introduction.....	3
II.2.2 Eléments constitutants des aciers inoxydables.....	3
II.2.3 Structure des aciers inoxydables.....	4

II Soudage

II.1 Principes généraux de soudage.....	7
II.1.1 Classement des types de soudage.....	7
II.1.2 Classification des principaux procédés de soudage.....	7
II.2 Le soudage à l'arc.....	8
II.2.1 Conditions d'établissement de l'arc.....	9
II.2.2 Soudage à l'arc avec électrode fusible et réfractaire.....	9
II.2.3 Protection du joint soudé contre l'action de l'air en présence de l'arc.....	9
II.3 Soudage TIG (Tungsten Inert Gas).....	10
II.3.1 Introduction.....	10
II.3.2 description du procédé.....	10
II.3.3 Caractéristiques du couple électrode/protection gazeuse.....	12
II.3.4 Conditions de soudage.....	13
II.3.5 Domaines d'applications.....	15

III. Etude thermique du soudage

III.1 Présentation des différentes formes de transfert de chaleur.....	16
III.1.1 Conduction.....	16
III.1.2 Convection.....	16
III.1.3 Rayonnement thermique.....	17
III.2 les cycles thermiques du soudage.....	17
III.2.1 Introduction.....	17
III.2.2 Notion de cycle thermique.....	18
III.2.3 Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique.....	19
a) Notion d'état quasi-stationnaire.....	19
b) Cycle thermique du soudage.....	20
c) Répartition thermique du soudage.....	21
d) Facteurs influençant la répartition thermique.....	22
e) Formulation mathématique.....	22

IV Transformations de phases lors du soudage

IV.1 Transformations de phases à l'échauffement.....	24
IV.1.1 Recristallisation après écrouissage.....	24
IV.1.2 Phénomène de surchauffe.....	25
IV.1.3 La coalescence.....	25
IV.1.4 Modification de la constitution.....	25

IV.2 Transformations de phases au refroidissement.....	25
IV.2.1 Retour à l'état d'équilibre.....	25
IV.2.2 Transformation perlitique en soudage.....	25
IV.2.3 Transformation martensitique en soudage.....	26

Matériaux et techniques expérimentales

I Définition des matériaux utilisés

I.1 Composition chimique.....	27
I.2 Structure métallographique.....	27
I.3 Méthodes d'observation.....	28
I.4 Essais de dureté et microdureté.....	28
I.5 Essais de traction.....	29

II Procédé de soudage et dispositif expérimental

II.1 Procédé de soudage.....	30
II.2 Dispositif de prise des cycles thermiques.....	31

Résultats et interprétations

I Evolution du gradient de température

I.1 Cycles thermiques enregistrés sur la plaque 2 (304L).....	34
I.2 Cycles thermiques enregistrés sur la plaque 3 (Acier au carbone).....	35

II Observation métallographique

Echantillon de faisabilité.....	39
Echantillon de la tôle n°2 (304L).....	40
Echantillon de la tôle n°3	42

III Propriétés mécaniques

III.1 Microdureté.....	44
III.2 Dureté.....	48
III.3 Essais de traction.....	52

Conclusion générale

INTRODUCTION

Le soudage est la méthode d'assemblage des pièces métalliques la plus efficace, et son utilisation dans l'industrie à une échelle très importante favorise les chercheurs à essayer de comprendre les phénomènes qui sont engendrés par ce procédé, pour essayer de maîtriser tous ses paramètres afin d'améliorer la qualité et les propriétés des soudures.

Etant donné que le soudage s'effectue en général en fusionnant du métal par un apport de chaleur. La répartition de la chaleur sur les plaques soudées donne beaucoup d'informations sur les changements structuraux qui peuvent se produire et les propriétés mécaniques qui sont engendrés par ces changements structuraux.

C'est dans ce cadre que nous avons effectué ces recherches pour essayer de mieux comprendre l'effet de la répartition thermique sur les zones qui avoisinent la zone de fusion, et quelles sont leurs propriétés structurales et mécaniques.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I Présentation générale des Aciers

I.1 Les aciers au carbone

I.1.1 Introduction aux alliages Fer-Carbone

Les alliages à base de fer, à de rares exceptions près, contiennent tous du carbone comme élément d'alliage et en proportions diverses. Ainsi, les aciers titrent moins de 2% de carbone; les fontes, au contraire, contiennent plus de 2% de carbone. Dans ces deux cas peuvent être ajoutés d'autres éléments d'alliage en quantités très diverses, sous réserve que l'élément fer reste majoritaire.

Cette limite de 2% correspond pratiquement à l'extrémité du palier eutectique γ -Fe₃C du diagramme fer-carbone (figure 1). Ainsi, tout au moins à l'équilibre, les aciers se solidifient sans apparition d'eutectique c'est-à-dire en l'absence de cémentite primaire. Inversement, les fontes contiennent toujours de tels carbures formés à haute température. De même dans les aciers, les carbures pourront toujours être dissoute dans le domaine γ monophasé, à l'inverse des fontes.

Figure 1-11. Diagramme fer-cémentite

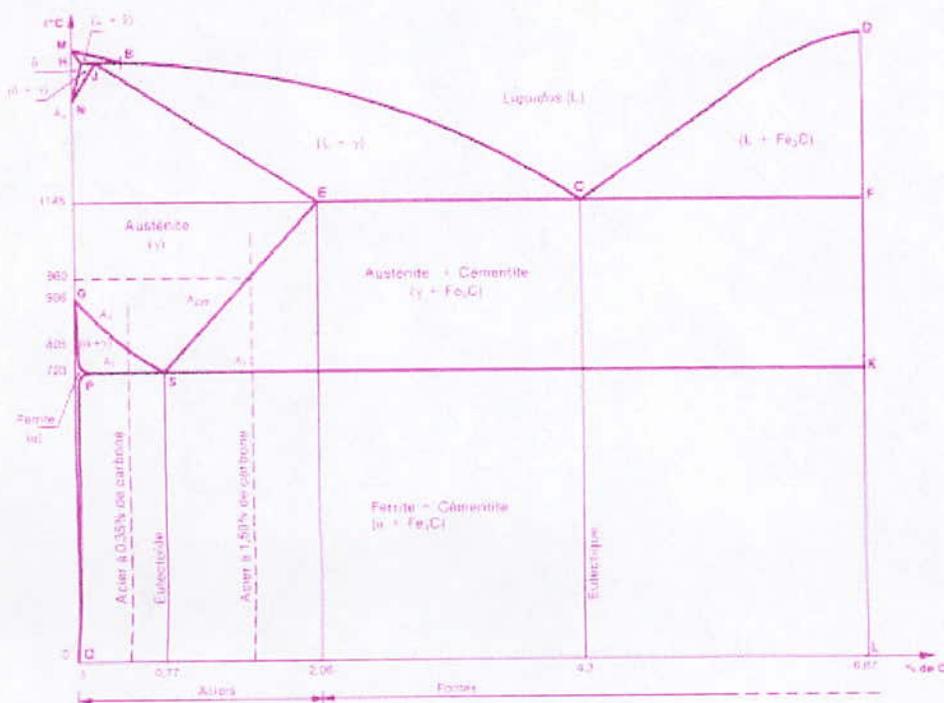


Figure 1 Diagramme fer-carbone [3]

Dans un souci de clarté destiné à faciliter le choix des utilisateurs, les différentes familles d'acier ont été classées en fonction de deux critères, l'un de composition est l'autre de niveau de qualité. Ainsi, distingue-t-on:

- selon l'**analyse chimique**: les aciers **non alliés** (élément d'alliage < 1%), **faiblement alliés** (teneur des éléments d'alliages \leq 5%) et **fortement alliés** (cette dernière distinction n'est pas normalisée);
- selon le **niveau de précision et de sévérité** apporté aux garanties des propriétés d'usage: on distingue les aciers **de base**, de **qualité** et **spéciaux**.

Les aciers spéciaux sont constitués de quatre familles suivantes:

- **les aciers de construction mécanique** utilisés pour la réalisation de machine ou de mécanismes très variés; ils peuvent être ou non alliés; à cette famille ont été associés les aciers pour appareils à pression;
- **les aciers à outils** choisis pour la fabrication de tous les outillages: usinage, mise en forme ...; ils sont non alliés ou alliés;
- **les aciers inoxydables** résistant à la corrosion et toujours très alliés; leur ont été associés les aciers réfractaire;
- **les aciers spéciaux** divers.

Les fontes sont classées uniquement selon leur structure micrographique et plus précisément celle du carbone ou des carbures précipités: fonte à graphite lamellaire, à graphite sphéroïdale, fonte blanche, etc.

I.1.2 Structures de aciers

La très grande majorité des aciers est livrée et employée à l'état ferritoperlitique. Ceci signifie qu'ils sont constitués de grains de ferrite et de particules de carbure de fer Fe_3C .

La ferrite: Elle est constituée essentiellement de fer α (CC) qui ne peut contenir en solution solide d'insertion qu'au maximum 0,02 % de carbone, vers 725°C, et encore bien moins à plus basses températures. Par contre, ce fer α est susceptible d'admettre en solution solide de substitution des éléments d'alliages tels que Mn, Si, Cr, Ni, Mo, Cu... ou des impuretés comme P. Il faut noter que les performances mécaniques de la ferrite sont assez modestes, et dépendent aussi de la taille des grains.

La perlite: Elle contient pratiquement tout le carbone des aciers ferritoperlitique sous forme de carbures précipités. L'agrégat perlitique est ainsi constitué d'une juxtaposition de particules de ferrite et de cémentite. Ces particules sont d'autant plus fines que cette perlite s'est formée:

- à partir d'une austénite à grains fins,
- au cours d'un refroidissement relativement rapide dans son domaine de formation.

D'autres structures sont obtenues des refroidissements plus rapides ou par traitements thermiques, et qui ont des propriétés caractéristiques, on peut citer les structures suivantes:

La martensite: Elle est obtenue quand le refroidissement à partir des hautes températures est suffisamment rapide pour éviter la transformation austénitique. Elle a une structure tétragonale centrée dans laquelle le carbone reste en solution, On doit noter que la martensite est très dure et très fragile, c'est pourquoi on doit procéder à des traitements ultérieurs de revenu pour améliorer ces propriétés mécaniques.

La bainite: Elle se forme dans les aciers au cours de la transformations isothermes à des températures inférieures à celles qui correspondent au domaine perlitique. Les propriétés de la structure bainitique sont très recherchées, car elles offrent une résistance mécanique excellente avec une bonne ductilité.

I.1.3 Impuretés et éléments d'addition

Bien que la définition des aciers comme étant constitués essentiellement de fer et de carbone est vraie, on trouve toujours d'autres éléments d'alliages qui sont présents comme impuretés ou par addition, on peut citer des exemples dans le tableau suivant:

Elément	Effets
Silicium	Désoxydation à l'élaboration, durcissement de la ferrite.
Manganèse	Durcissement de la ferrite, diminution du taux de carbone dans la perlite. Augmentation de la trempabilité, substitution du fer dans la cémentite.
Soufre	Diminution des propriétés mécaniques
Phosphore	Durcissement de ferrite et dégradation de la résistance à la rupture.

Tableau 1 – Effet des impuretés et des éléments d'addition dans les aciers [1]

I.2 Les aciers inoxydables

II.2.1 Introduction

Les aciers inoxydables ont été mis au point pour résoudre les problèmes de corrosion humide posés par les alliages ferreux. Développés industriellement à partir du début du vingtième siècle, la croissance de leur production se poursuit régulièrement jusqu'à nos jours.

Ces alliages à base de fer sont définis comme étant des aciers titrant plus de 10,5% de chrome, moins de 1,2% de carbone et contenant éventuellement d'autres éléments d'alliage (selon la norme européenne NF EN 10088-1)[1]

Il faut souligner que, si les aciers inoxydables ont connu l'extraordinaire développement que nous connaissons, cela est dû à la disponibilité à grande échelle des métaux entrant dans leur composition, c'est-à-dire le chrome, le nickel, le molybdène et le manganèse, ce dernier pouvant être utilisé comme substitut au nickel.

De plus ces métaux doivent être économiquement rentables de manière à pouvoir produire l'acier inoxydable à un coût compétitif.

II.2.2 Eléments constitutants des aciers inoxydables

En plus du fer et du carbone les aciers inoxydables contiennent les éléments suivants:

Le chrome: Il occupe le 13^e rang des éléments présents dans la croûte terrestre. Sa concentration moyenne y est de l'ordre 400 ppm. Son principal minerai, connu sous le nom de *chromite* dont la formule chimique est: $(Mg, Fe^{++})(Cr, Al, Fe^{+++})_2O_2$. Environ 80 % du chrome sont utilisés dans la métallurgie, principalement dans la fabrication des aciers inoxydables. Grâce à l'avènement du *procédé AOD* (argon-oxygène-décarburation), la matière première de base utilisée pour la fabrication des aciers inoxydables est la charge chrome (HC-FeCr : 50-55 % Cr, 6-8 % C).

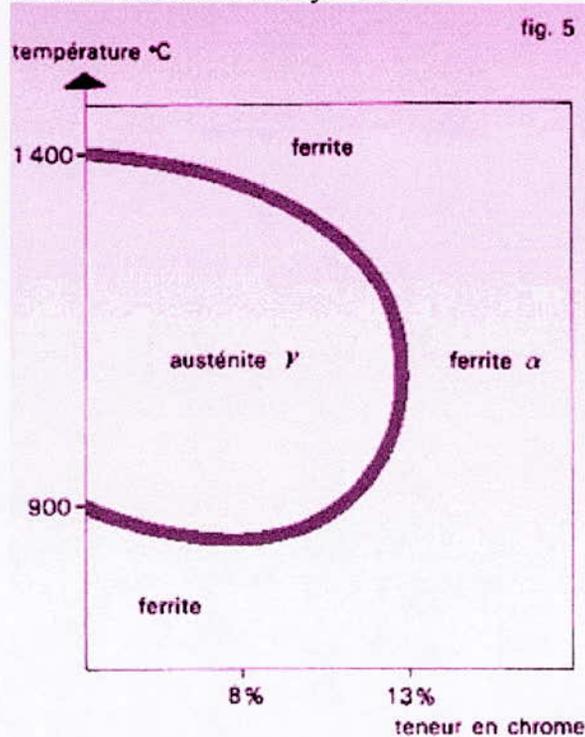
Le nickel: Son cas est plus complexe que celui du chrome. Cet élément occupe le 24^e rang des éléments présents dans la croûte terrestre. Sa concentration moyenne y est de l'ordre de 80 ppm. Il existe deux grandes familles de minerais: *les sulfures et les latérites*. Aujourd'hui le nickel est utilisé à 65 % dans la fabrication des aciers inoxydables alors qu'il ne l'était qu'à environ 45 % il y a une dizaine d'années.

Le manganèse: Certains pays producteurs ont tenté de trouver un substitut au nickel en le remplaçant, autant que faire se peut, par le manganèse. C'est dans ce contexte que se sont développées les nuances austénitiques de la série 200 de l'AISI aux USA et en Inde (87% du marché national).

Le titane, niobium, vanadium, molybdène: Ces métaux sont insérés dans les aciers inoxydables comme deuxièmes ou troisièmes éléments d'addition, et ce suivant la nuance recherchée. [4]

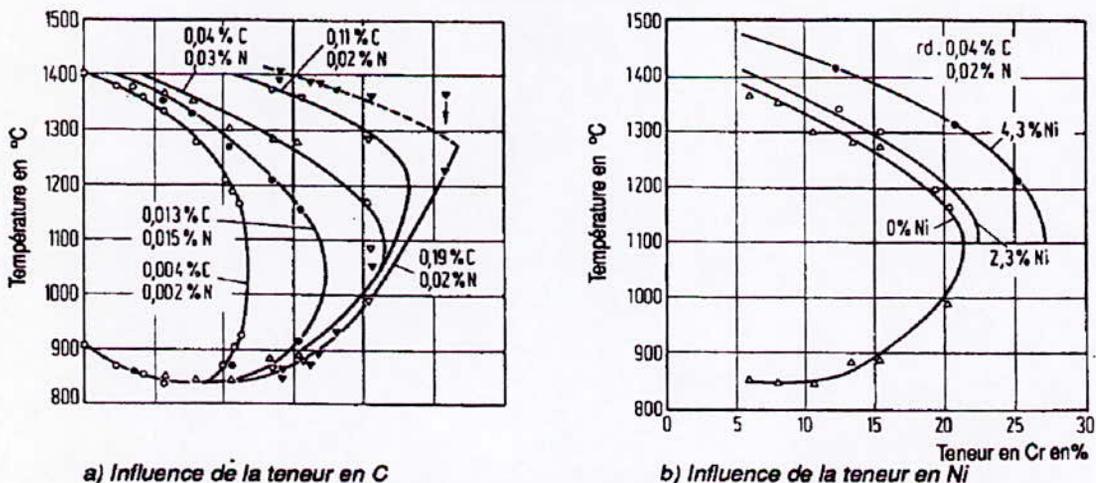
II.2.3 Structure des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base de fer ou plus exactement à base d'acier qui doivent contenir au moins 10,5 % de chrome (selon la norme européenne EN 10088-1 [1]) et souvent d'autres éléments d'addition tels que le nickel (ou son substitut le manganèse) et dans une moindre mesure le molybdène.



Le chrome a pour effet de diminuer le domaine d'existence de l'austénite qui disparaît totalement au-dessus d'une certaine teneur en chrome. La figure correspond au cas d'aciers peu carbonés.

Figure 2: Diagramme fer-chrome [3].



- Déplacement de la boucle γ et du domaine mixte $\alpha+\gamma$ dans le système fer-chrome sous l'influence des teneurs croissantes en C et Ni
D'après E. Baerlecker, W.A. Fischer et K. Lorenz

Figure 3: Influence du carbone et du nickel sur la boucle $\alpha+\gamma$ du diagramme Fe-Cr [11].

La structure d'un acier inoxydable peut être ferritique, martensitique, austénitique ou encore austéno-ferritique. Le tableau 2 donne les principales familles des aciers inoxydables.

Familles	Traitement de référence	Caractéristiques principales
Aciers ferritiques		Bonne à très bonne résistance à la corrosion. Insensible à corrosion sous tension. Absence de nickel. Fragilité à chaud $\theta < 250-300^{\circ}\text{C}$.
Groupe 1 C < 0,08%; Cr = 11,5-13,5% X6Cr13 (Z8C12) (AISI 403) X6CrAl13 (Z8CA12) (AISI 405)	Trempe à l'air depuis 800°C	Limite élastique > 230MPa. Résistance à la corrosion limitée. Soudable. Nuances économiques.
Groupe 2 C < 0,10%; Cr = 16-18% X6Cr17 (Z8C12) (AISI 430) X6CrMo17-1 (Z8CD17-1) X2CrTi17 (Z4CT17)	Trempe à l'air depuis 800°C	Limite élastique > 250MPa. Résistance à la corrosion bonne à excellente. Soudable. Nuances haut de gamme.
Groupe 3 C+N < 0,015%; Cr = 18 à 30% X2CrMoTi18-2 (Z3CDT18-2) X2CrMoTi29-4 (Z3CDT29-4)	Trempe à l'air depuis 800°C	Limite élastique > 250MPa. Résistance à la corrosion bonne à excellente. Soudable. Bonne résilience. Nuance haut de gamme.
Aciers martensitiques		Dureté élevée. Ductilité limitée. Résistance à la corrosion moyenne à bonne.
Groupe 1 C = 0,15%; Cr = 11,5-13,5% X12Cr13 (Z10C13) (AISI 410)	Trempe et Revenu	Résistance moyenne: R = 600-900MPa. Soudables. Résistance à la corrosion limitée.
Groupe 2 C = 0,2-0,4%; Cr = 12,5-14,5% X20Cr13 (Z20C13) (AISI 420) X30Cr13 (Z33C13)	Trempe et Revenu	Résistance élevée: R = 600-900MPa. Soudage difficile ou impossible. Résistance à la corrosion moyenne.
Groupe 3 C = 0,6-1,2% Cr = 16-18% X105CrMo17 (Z100CD17) (AISI 440C)	Trempe et Revenu	Grande dureté. Fragile. Non soudable.
Groupe 4 C < 0,10% Cr = 16-18% Ni = 2-4% X5CrNiCu16-4 (Z7CNU17-4) X4CrNiMo16-5-1 (Z6CND16-5-1)	Trempe et Revenu	Dureté moyenne. Limite d'élasticité élevée: 600-800MPa. Résilience acceptable. Soudable. Bonne résistance à la corrosion.
Aciers austénitiques		Grande ductilité à chaud et à froid. Soudables. Très large plage de résistance à la corrosion. Sensible à la corrosion sous tension. Propriétés mécaniques faibles à moyennes. Présence de nickel.
1) Nuances de type 18-10		

Nuances de base X5CrNi18-10 (Z7CN18-09) (AISI 304)	Hypertrempe 1050-1150°C	Sensible à la corrosion intergranulaire. Limite élastique limitée (>196 MPa).
Nuances bas carbone X2CrNi18-9 (Z3CN18-09) (AISI 304L)		Bonne résistance à la corrosion intergranulaire. Limite élastique faible (>176 MPa)
Nuances stabilisées X6CrNiTi18-10 (Z6CNT18-10) (AISI 321)		Insensible à la corrosion intergranulaire. Limite élastique améliorée (>176 MPa).
Nuances haut carbone X10CrNi18-8 (Z11CN18-09) (AISI 302)		
2) Nuances de type 17-12-Mo		
Nuances de base X5CrNiMo17-12-2 (Z7CND17-12) (AISI 316) X3CrNiMo17-13-3 (Z6CND18-12) (AISI 317)	Hypertrempe 1050-1150°C	Meilleure résistance corrosion. Sensible à la corrosion intergranulaire. Limite d'élasticité limitée (>196MPa).
Nuances bas carbone X2CrNiMo17-12-2 (Z3CND17-12-2) (AISI 316L)		Bonne résistance à la corrosion intergranulaire. limite élastique faible (>176MPa)
Nuances stabilisées X6CrNiMoTi17-12-2 (Z6CNDT17-12) X6CrNiMoNb17-12-2 (Z3CNDNb17-12)		Insensible à la corrosion intergranulaire. Limite élastique améliorée (>216 MPa).
3) Nuances à l'azote X2CrNiN18-7 (Z3CN18-07-Az) X2CrNiMoN17-11-2 (Z3CND17-11Az) (AISI 316LN)	Hypertrempe 1050-1150°C	Limite élastique élevée. Bonne résistance à la corrosion intergranulaire.
4) Super austénitiques X1CrNi25-21 (Z1CN25-20) X1NiCrMoCu25-20-5 (Z1NCDU25-20) X1CrNiMoCuN25-25-5 (Z2NCDU25-25Az) X1NiCrMoCu31-27-4 (Z2NCDU31-27)	Hypertrempe 1050-1150°C	Résistance à la corrosion très élevée. Milieux spéciaux.

Tableau 2 –Principales familles d'aciers inoxydables ferritiques, martensitiques et austénitiques. Dans chaque cas ne sont indiquées que les nuances typiques. Pour obtenir l'ensemble des nuances normalisées, on peut se reporter à la norme NF EN 10088-1,2 et 3. [1]

Aciers inoxydables à hautes caractéristiques: Pour des applications particulières, entre autres dans l'aéronautique, il était utile de développer des nuances inoxydables à très hautes caractéristiques. Dans ce but ont été développées des nuances martensitiques, à teneur en carbone relativement basse, pour ne pas être trop dures et fragiles à l'état trempé. Les propriétés mécaniques finales sont ensuite obtenues par traitement de durcissement structural, à partir de précipités de type Ni₃Al, Ni₃Ti ou Ni₃Cu.

II Soudage

II.1 Principes généraux de soudage

"On appelle *soudage* l'opération qui permet d'obtenir des assemblages permanents en mettant à profit l'aptitude à la liaison des atomes des pièces à souder" [5]. On utilise à cette fin l'échauffement localisé ou global de ces pièces, la déformation plastique ou bien en mettent en œuvre simultanément ces deux facteurs. Les propriétés du matériau sont fonction de sa structure intérieure (structure atomique). A l'état solide, tous les métaux sont corps à structure cristalline. La disposition des atomes dans les corps à structure amorphe (verre, polymères, etc.) est chaotique. Pour obtenir une seule pièce à partir des éléments à souder, il faut rapprocher leurs particules élémentaires (ions, atomes) jusqu'à ce que l'on voie s'établir entre elles des liaisons interatomiques.

II.1.1 Classement des types de soudage

En fonction des conditions qui président au soudage des particules de métal, on distingue le *soudage par fusion* et le *soudage par pression*.

Soudage par fusion: Son principe consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder à l'aide d'une source calorifique puissante qui peut être: un arc électrique, une flamme de gaz, une réaction chimique, un laitier fondu, l'énergie d'un faisceau électronique, un jet de plasma, l'énergie des rayons laser. Dans tous ces cas, le métal d'un bord fondu sous l'action de la chaleur établit une liaison intime avec le métal en phase liquide de l'autre bord, formant ainsi une certaine quantité de métal à l'état liquide appelée bain de fusion, on obtient un joint soudé (appelé encore soudure, cordon de soudure, cordon soudé ou cordon tout court).

Le métal constituant le cordon soudé ne peut provenir que de la fusion des Bords ou du métal d'apport introduit dans le bain de fusion.

La zone contenant des grains de métal partiellement fondus à la frontière séparant le bord de la pièce à souder et le cordon est appelée *zone de liaison*. C'est dans cette zone qu'il y a lieu la liaison interatomique. Le métal du cordon se joint fortement au métal des pièces à souder, alors que les salissures éventuelles présentes sur ces dernières remontent à la surface sous forme de laitiers.

Soudage par pression: Son principe réside dans la déformation plastique du métal obtenue au niveau du joint sous l'action d'une force p . Les salissures que pourraient présenter les surfaces en contact étant expulsées, les surfaces intéressées des pièces à souder restent propres, lisses et rapprochées sur toute la section à la distance d'action des forces de cohésion atomique. La zone où l'on voit s'établir la liaison atomique est appelée *zone de soudage*. Sa largeur ne mesure que quelques dizaines de microns.

Il est plus facile d'obtenir la déformation plastique des bords des pièces à souder si l'on procède à l'échauffement du joint. Dans le cas où cet échauffement est localisé, on utilise comme source de chaleur le courant électrique, la flamme de gaz, les réactions chimiques, le frottement mécanique. Si l'on chauffe entièrement les pièces à souder, on utilise pour source calorifique le feu de forge ou le four.

II.1.2 Classification des principaux procédés de soudage

Toute tentative de classification des différents procédés de soudage est rendue difficile au regard des nombreuses variantes d'un procédé à l'autre. Par exemple, certains procédés où

la pression est utilisée au cours du processus de soudage (soudage électrique par résistance par points) sont en fait, des procédés en phase liquide.

Le tableau 3 classe à partir de la source d'énergie et des éléments de protection les principaux procédés de soudage.

Source d'énergie	Eléments de protection du joint soudé				
	Flux solide	Gaz inerte	Gaz actif	Sous vide	Sans protection
<i>Arc électrique</i>	Electrodes enrobées Automatique sous flux solide MAG avec fil fourré	TIG MIG avec fil électrode fusible Electrogaz Plasma	MAG avec fil électrode fusible		Soudage des goujons Avec électrode au carbone Par décharge de condensateur
<i>Résistance électrique</i>					Par point Par bossage Par étincelage En bout, résistance pure
<i>Optique</i>		Laser		Bombardement électronique	Laser
<i>Thermochimique</i>	Aluminothermie	Plasma-arc non transféré	Oxyacétylénique Oxypropane Oxydrique		
<i>Mécanique</i>				Par pression à froid	Par friction Par pression à froid Par ultra sons Par explosion A la forge

Tableau 3 -Classification des principaux procédés de soudage. [6]

II.2 Le soudage à l'arc

Le soudage à l'arc met en œuvre l'arc électrique. L'arc électrique est un flux continu d'électrons qui se forme dans l'espace entre deux électrodes qui est accompagné d'un dégagement de chaleur et de l'émission de la lumière. "Ce phénomène a été découvert par le savant russe Vassili Vladimirovitch Pétrov (1761-1834 Saint-Pétersbourg). Sous sa direction, on a réalisé une pile électrique (pile voltaïque) assurant le jaillissement de l'arc." [5]

Pendant de longues années l'arc n'a trouvé d'utilisation pratique. Ce ne fut qu'à partir de 1849 que l'on commença à l'utiliser progressivement pour l'éclairage et pour le soudage.

II.2.1 Conditions d'établissement de l'arc

Pour amorcer un arc électrique, il faut disposer d'un circuit électrique et d'une source d'énergie. L'alimentation de l'arc se fait à partir d'un transformateur de soudage si l'on soude en courant alternatif, ou bien avec l'utilisation d'un convertisseur de soudage, d'un groupe électrogène à combustion interne ou d'un redresseur de soudage si l'on met en œuvre le courant continu. A partir de la source d'énergie, le courant est amené par les câbles de soudage, par le porte-électrode à l'électrode et à la pièce à souder entre lesquelles se produit un arc.

II.2.2 Soudage à l'arc avec électrode fusible et réfractaire

Lors du soudage avec électrode fusible, le cordon de soudure s'obtient par suite de la fusion de l'électrode et des bords des pièces à souder (métal de base), alors qu'en cas d'utilisation des électrodes réfractaires, le joint soudé est rempli par le métal fondu provenant uniquement des pièces à souder.

Les électrodes fusibles sont en général en acier, en cuivre ou en aluminium; par contre les réfractaires sont en graphite ou en tungstène.

Pour maintenir l'arc, au fur et à mesure de la fusion de l'électrode, on doit assurer son avancement permanent dans la zone de soudage, en faisant de la sorte que la longueur de l'arc reste constante.

On appelle *longueur d'arc L*, la distance qui sépare la pointe de l'électrode de la surface du cratère (creux) du bain de fusion. La longueur d'un arc obtenu avec une électrode réfractaire avec le temps, et une correction s'impose durant le soudage.

II.2.3 Protection du joint soudé contre l'action de l'air en présence de l'arc

Durant le soudage à l'arc, le bain de fusion alimenté par le métal de base et le métal d'apport doit être protégé des gaz de l'air (Oxygène, Azote, Hydrogène) afin que ceux-ci ne pénètrent pas dans le métal fondu ce qui pourrait affecter les propriétés mécaniques du joint de soudure. C'est pour cela que l'on prévoit la protection de la zone d'arc (l'électrode mise à chaud, l'arc proprement dit et le bain de fusion). Suivant la méthode adoptée de la protection du métal contre l'action de l'air, on distingue les procédés suivants de soudage à l'arc:

- Le soudage avec l'électrode enrobée;
- Le soudage au fil fourré;
- Le soudage sous gaz protecteur;
- Le soudage sous flux;
- Le soudage au fil autoprotégé;
- Le soudage à la protection mixte.

Une électrode enrobée est constituée par une âme en acier revêtu d'un mélange de substances pulvérulentes tenues en place par un liant. Le soudage avec électrodes enrobées assure une meilleure qualité du métal constituant la soudure. La protection du métal contre l'action de l'air est obtenue grâce à la formation d'un laitier et des gaz qui se dégagent lors de la fusion de l'enrobage. Les électrodes enrobées sont destinées au soudage manuel où deux opérations sont obligatoirement effectuées par le soudeur à la main: l'amenée continue de l'électrode dans la zone de soudage et le déplacement de l'arc le long de la ligne de soudure. Le soudage manuel avec électrodes enrobées permet de réaliser des soudures dans n'importe quelle position et dans des endroits d'accès difficiles.

S'il s'agit du soudage sous flux, l'arc est maintenu sous le flux pulvérulent qui recouvre l'arc et la zone de soudage. En qualité l'électrode on utilise le fil métallique nu. Le flux protège le métal fondu contre les gaz extérieurs, assurant ainsi une bonne qualité du joint soudé. Le soudage à l'arc sous flux est utilisé sur des machines automatiques et semi-automatiques.

Le soudage sous gaz protecteur est caractérisé par l'amenée d'un jet de gaz de protection, à travers le porte-électrode, dans la zone d'arc. Le soudage peut s'effectuer aussi bien avec une électrode fusible qu'avec une électrode réfractaire, à la main, en semi-automatique ou sur des machines automatiques. En qualité de gaz de protection on utilise des le gaz carbonique, l'argon, l'hélium ou de mélanges de gaz. Les gaz inertes sont surtout utilisés pour le soudage des aciers alliés, des métaux réactifs (aluminium, titane, etc.) et de leurs alliages.

II.3 Soudage TIG (Tungsten Inert Gas):

Caractères principaux: *Électrode:* tige de tungstène non fusible. *Protection:* gaz inerte. *Nature du courant:* alternatif ou continu. *Apport de métal:* pas d'apport ou apport séparé.

II.3.1 Introduction

On peut assimiler le soudage comme étant un collage de deux pièces métalliques par un apport d'énergie, cette énergie peut être mécanique ou thermique, c'est pour cela qu'on distingue les soudages par pression et par fusion. Les procédés de soudage par fusion sont les plus répandus, surtout ceux qui utilisent l'arc électrique comme source de chaleur.

II.3.2 description du procédé

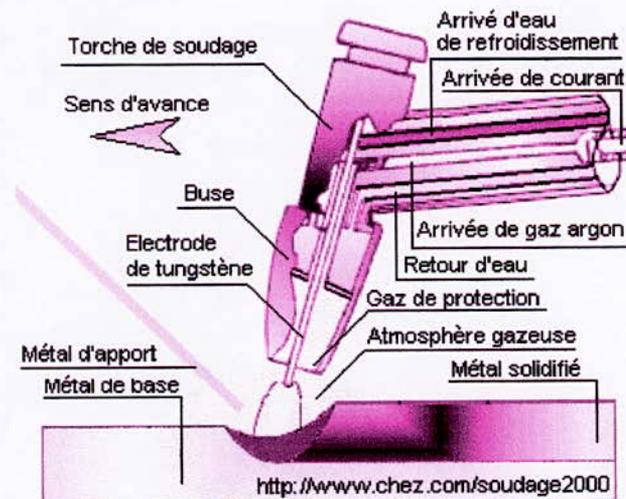


Figure 4: Principe du soudage TIG. [7]

Le soudage à l'électrode réfractaire communément appelé soudage TIG (*Tungsten Inert Gas*). Dans les pays anglo-saxons on le désigne également par *GTAW* (*Gas Tungsten Arc Welding*). On le désigne souvent dans les pays francophones par soudage à l'argon. Le soudage électrique à l'arc avec électrode réfractaire est un procédé de soudage à l'arc électrique dans lequel :

- l'arc jaillit entre la pièce à souder et une électrode,
- l'électrode est une électrode réfractaire, donc non fusible généralement en tungstène,
- la protection du bain de fusion est assurée par un gaz de protection neutre, généralement de l'argon ou un mélange à base d'argon, ou encore de l'hélium,
- la stabilisation de l'arc électrique et son déplacement le long du joint peuvent être assurés manuellement ou automatiquement.

Ainsi, en soudage à l'arc avec électrode réfractaire, l'électrode ne fond pas, donc ne participe pas à la formation de la soudure. L'arc électrique ne sert que comme source de chaleur et s'il est nécessaire d'apporter un métal, de fusion tout comme dans le cas du soudage oxyacétylénique. Dans ce procédé, il n'y a pas de transfert de métal dans l'arc.

Le principe du soudage TIG est représenté sur la figure 4. L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires.

Le soudage TIG produit une simple fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration. On réalise un apport de métal en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Ce fil qui fond dès son arrivée n'a aucune liaison avec le circuit de soudage. Il n'est pas une électrode et son taux de dépôt est indépendant de la puissance de l'arc. Ce fait est une des caractéristiques importantes du procédé TIG qui le distingue des procédés à électrodes fusibles.

De même que les procédés à fils fusibles, le procédé TIG peut s'automatiser facilement.

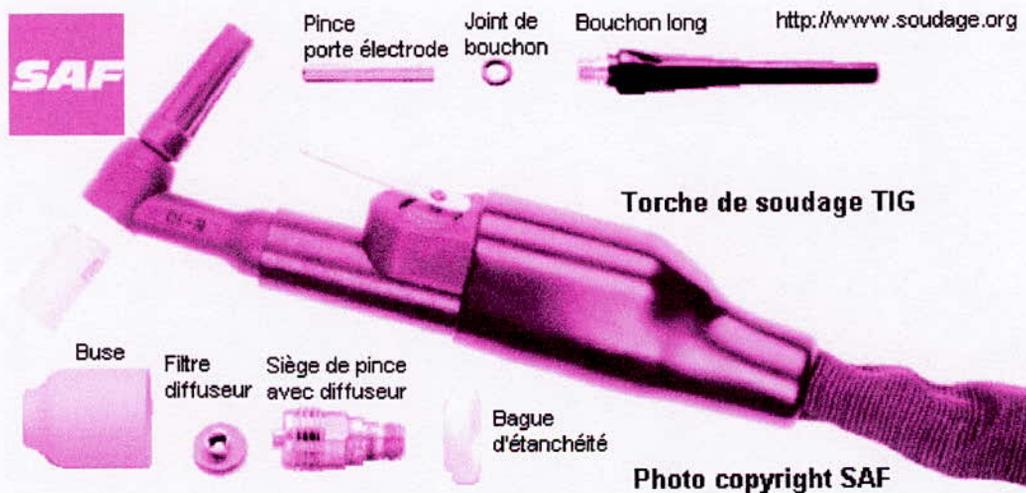


Figure 5: Description de la torche TIG. [8]

Le procédé TIG s'applique à tous les métaux soudables. Les courants généralement employés vont de quelques ampères à 400 G environ en courant continu (par exemple: pour le soudage du cuivre, les intensités nécessaires sont de l'ordre de 600 à 800 A). En courant alternatif, la gamme utile est comprise entre 5 et 525 A. Sa puissance limitée une vingtaine de kilowatts et son apport de métal séparé le réservent à des épaisseurs généralement faibles, de quelques millimètres. Son coût élevé, relativement aux autres procédés et dû essentiellement au coût du gaz de protection, fait qu'on le réserve aux applications requérant qualité et précision comme pour les aciers inoxydables où on cherche la meilleure efficacité contre la corrosion des joints soudés.

II.3.3 Caractéristiques du couple électrode/protection gazeuse

Electrode: Le tungstène, pur ou additionné de thorium (1 à 2%) et/ou de zirconium (0,5 %), est l'unique matériau susceptible de constituer l'électrode réfractaire du procédé TIG (tableau 4).

Compte tenu des densités de courant admissibles, les électrodes de tungstène ont des diamètres de quelques millimètres. Les longueurs, de quelques décimètres, sont déterminées par les dimensions des torches.

L'addition de thorium fournit à l'électrode une meilleure émissivité, une meilleure densité de courant, une meilleure résistance à la contamination et par suite une plus longue durée d'emploi.

Le tableau 4 donne les intensités recommandées selon le diamètre, le type d'électrode et la nature du courant. Ces conditions permettent de maintenir chaque électrode dans le domaine thermique optimal de fonctionnement et d'obtenir une bonne stabilité et un bon amorçage.

En service, l'électrode se pollue plus ou moins vite selon les impuretés existant sous forme de traces dans le gaz de protection ou du fait d'une protection défectueuse provenant d'un mauvais réglage du débit de gaz, ou de fuites dans le circuit ou à la torche.

Diamètre de l'électrode (mm)	Courant continu		Courant alternatif	
	Polarité directe tungstène pur ou thorié (A)	Polarité inverse tungstène pur ou thorié (A)	Tungstène pur (A)	Tungstène pur (A)
0,5	5 à 20	-	10 à 20	5 à 20
1,0	15 à 18	-	20 à 30	20 à 60
1,6	70 à 150	10 à 20	30 à 80	60 à 120
2,4	150 à 250	15 à 30	60 à 130	100 à 180
3,2	250 à 400	25 à 40	100 à 180	160 à 250
4,0	400 à 500	40 à 55	160 à 240	200 à 320
4,8	-	-	190 à 300	290 à 390
6,4	-	-	250 à 400	340 à 525

Tableau 4 – Emploi des électrodes en tungstène en soudage TIG. [9]

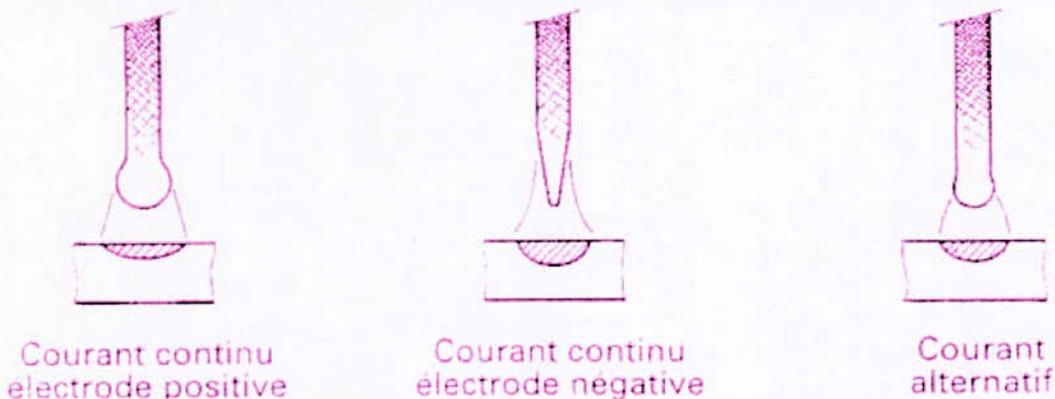


Figure 6: Formes des électrodes pour soudage TIG. [9]

Tout contact fortuit de l'électrode avec le métal, pendant le soudage, est également une cause de pollution.

La qualité et la pureté de l'électrode sont des éléments essentiels dans l'obtention et le maintien des conditions de soudage. Tout incident en encrassement doit donner lieu à un réaffûtage.

Protection gazeuse: Les seuls gaz inertes utilisables du fait de leurs caractéristiques dans le procédé TIG sont l'argon et l'hélium (tableau 5). On peut également employer un mélange des deux et obtenir un compromis entre leurs effets respectifs, ou les additionner d'un réducteur.

L'argon et l'hélium utilisés ont une pureté de 99,95 %. L'hélium existant sous forme naturelle aux États-Unis, son emploi s'y trouve généralisé. Ailleurs, ces gaz sont obtenus par distillation et de ce fait l'argon, moins cher, y est préféré.

La pression de gaz peut avoir un effet sur la pénétration en creusant davantage le bain fondu.

Dans la majorité des applications, les débits de gaz ramenés à la pression atmosphérique sont de l'ordre de 10 à 20 L/min ou 40 à 70 m³ /h. Les vitesses de soudage étant généralement de 0,3 m/min.

Par rapport à l'hélium, l'argon a les avantages suivants: arc plus calme, meilleure action décapante du soudage alternatif des alliages d'aluminium, nécessité d'un débit moindre pour une protection identique et amorçage plus facile.

En revanche, l'hélium fournit une puissance plus élevée et donne une meilleure pénétration.

Gaz	Qualité du gaz	Applications en soudage
Argon	Inerte	Toutes les applications
Hélium	Inerte	Aluminium et cuivre
Argon – hélium (20-80% ou 50-50%)	Inerte	Aluminium et cuivre, avec arc plus stable que le cas précédent
Argon – azote (75-25%)	Réducteur	Cuivre essentiellement
Argon – hydrogène (1%)	Réducteur	Aciers inoxydables

Tableau 5 –Emploi des gaz en soudage TIG

Métal d'apport: Les soudures en chanfrein nécessitent un apport de métal. Celui-ci est introduit directement à l'avant du bain, soit à partir de baguettes nues, en soudage manuel, soit par un dispositif mécanisé semblable à celui du soudage MIG.

II.3.4 Conditions de soudage

Le Courant d'arc: on peut employer en soudage TIG l'un des trois arrangements suivants (figure 6):

- *courant continu-électrode négative*, le plus employé, appelé également soudage en polarité directe (*DCSP, direct current straight polarity*) ;
- *courant continu-électrode positives*, rarement utilisé, appelé également soudage en polarité inverse (*DCRP, direct current reverse polarity*) ;
- *courant alternatif*, utilisé pour les alliages d'aluminium et de magnésium.

Du fait de l'absence de transfert de métal, il n'y a pas d'interaction entre le phénomène et la source, et la stabilité de l'arc est remarquable.

L'emploi de sources à caractéristiques externes verticales rend le courant indépendant de la tension d'arc ($\Delta i \sim 0$). On dispose d'un procédé particulièrement souple et très facile d'emploi, riche en possibilités.

Courant continu, polarité directe

Le courant peut être continu ou pulsé.

- continu: c'est en réalité un courant constant affecté d'une ondulation caractérisée par son taux T, qui résulte de la technologie du générateur, surtout lorsqu'il est un redresseur polyphasé. C'est alors une fonction périodique alternative à la fréquence du réseau ou à l'un de ses multiples. La présence d'une ondulation de courant se traduit par l'apparition d'ondulation de fusion à la surface du cordon; elle n'est pas gênante lorsqu'elle est limitée. Dans le cas contraire, elle peut correspondre à un élargissement inutile en surface de la zone thermiquement affectée;

- pulsé: l'intensité prend la forme de créneaux successifs ou pulsations dont on règle la durée, l'intensité et la fréquence. La soudure s'effectue par fusions successives superposées et parfaitement contrôlées grâce à un gradient de température plus élevé. On maîtrise mieux la fusion, car on est moins sensible à l'environnement thermique des montages

La modulation est utilisée avec bénéfice dans les cas suivants soudage d'épaisseurs inégales, en position, d'alliages d'aluminium ou en accostage difficile.

Les générateurs modernes à transistors sont dotés de la fonction courant pulsé. De plus, il est également possible de pulser l'arrivée de d'apport à la même fréquence et cela apporte de nouveaux paramètres dans l'emploi de ce procédé.

Courant continu, polarité inverse

La pièce devient cathode. Son pouvoir émissif est essentiel dans la conduite de ce type de soudage. Dans le cas des alliages d'aluminium, la polarité inverse a un effet décapant par destruction des oxydes, libération d'oxygène et d'électrons de liaison. La température à pièce est moindre, et cela permet de diminuer ses effets, si besoin, (métaux tendres, microsoudage).

Courant alternatif

Il allie les deux effets précédents et se justifie essentiellement dans le soudage des alliages d'aluminium et de magnésium. En fait, jusqu'à ces derniers temps, cette situation a été facilement obtenue par l'emploi de générateurs alternatifs à 50 Hz et pouvant fournir, grâce à des concepts électrotechniques, des ondes carrées. Actuellement, l'électronique de puissance permet de réaliser des générateurs délivrant une polarité variable plus appropriée. La séquence la plus efficace consiste à diminuer le temps inverse autour 3 ms, d'augmenter le courant correspondant à 1,3 fois l'intensité directe, réglée elle pour une durée de 20 ms. L'effet décapant est tenu sans affecter l'effet thermique principal.

Tension d'arc: si l'on peut gouverner le courant avec beaucoup de précision et de souplesse, il faut se rappeler que l'effet thermique résultant est également fonction de la longueur d'arc; celle-ci doit donc être maintenue constante et/ou régulée avec précision. Cela est possible et nécessaire en utilisation automatique. Les machines sont pour cela équipées d'un système de régulation de tension d'arc qui est un système motorisé agissant sur la position de torche par rapport à la pièce et par suite sur la longueur d'arc, en vue de maintenir la tension constante pour un courant donné.

Amorçage: la nécessité d'un amorçage particulier à distance est une des caractéristiques du soudage TIG. Des dispositifs à éclateurs produisant à l'électrode des décharges sont généralisés car ils sont peu coûteux.

Dans les installations spéciales, ils sont remplacés par des circuits à impulsions, plus puissants, plus efficaces et ne perturbant pas, par rayonnement électromagnétique, l'espace avoisinant.

II.3.5 Domaines d'applications

Le soudage par procédé TIG doit se comparer au soudage MIG/MAG car, bien que différent dans le principe, il développe la serre puissance et devrait par suite donner lieu à des résultats comparables. Mais ses avantages et ses inconvénients font qu'il trouve s applications dans des domaines distincts.

Ses avantages technologiques sont essentiellement dus au fait que échauffement et l'arrivée de fil sont indépendants. Par suite ;

- une torche TIG est un chalumeau puissant et précis permettant des fusions sans métal d'apport, impossibles à traiter autrement que par plasma,
- l'apport de métal peut être réglé indépendamment de la puissance de l'arc et de l'énergie dispensée.

L'emploi de gaz onéreux, comme l'argon ou l'hélium, fait que ses applications sont **réservées aux métaux et assemblages nobles**: aciers inoxydables et réfractaires, alliages de nickel, alliages d'aluminium et de magnésium, de titane, de cuivre, etc.

D'exécution lente à des vitesses ne dépassant pas quelques dizaines de centimètres par minute, il autorise, par un excellent dosage thermique, les **travaux de haute qualité** et, par un contrôle facile des paramètres les travaux de grande précision. C'est le procédé de soudage à l'arc de la **construction aéronautique**.

A l'inverse, la productivité est médiocre et n'est pas un facteur qui puisse intervenir.

III Etude thermique du soudage

III.1 Présentation des différentes formes de transfert de chaleur

Elles se résument en trois formes élémentaires : *conduction* - *convection* - *rayonnement* illustrées par les figures 7, 8 et 9.

III.1.1 Conduction

Une barre (figure 7) d'une certaine longueur est chauffée à l'une de ses extrémités. À l'autre extrémité, un thermomètre est implanté au cœur de la barre. Au bout d'un certain temps, le thermomètre manifeste un échauffement dont l'importance et la rapidité dépendent de la nature et de la longueur de la barre. L'échauffement, imposé à l'origine de la barre, s'est transmis par **conduction** à son extrémité.

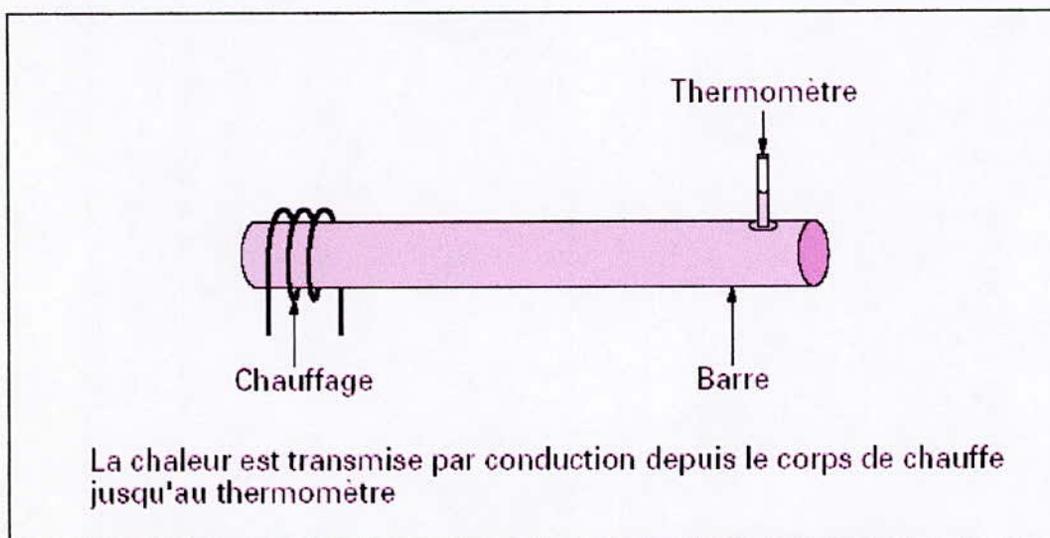


Figure 7 – Mise en évidence de la conduction d'un matériau. [10]

III.1.2 Convection

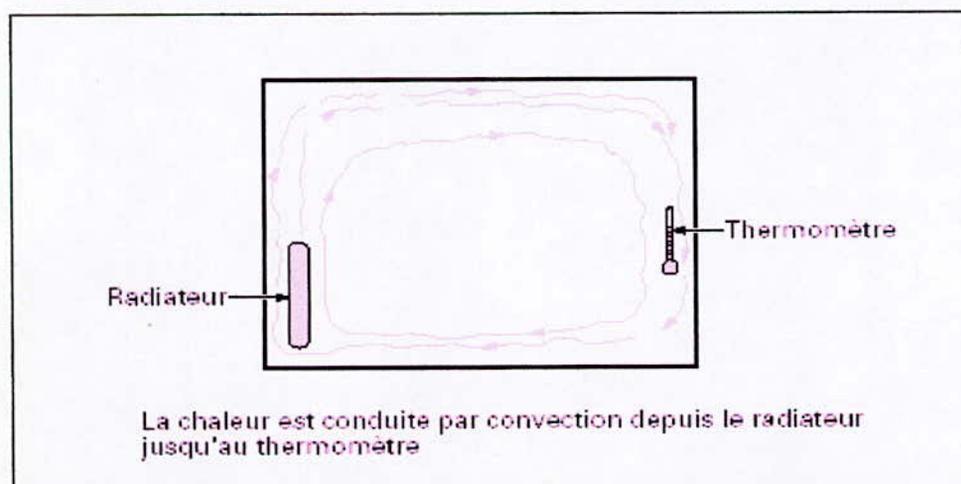


Figure 8 – Mise en évidence du transfert de chaleur par convection. [10]

Dans un local fermé (figure 8), un radiateur dissipe à partir de l'instant t_0 un certain flux de chaleur. Un thermomètre est placé à l'opposé du radiateur. Un écran dissimule au thermomètre la vue du radiateur. Le thermomètre s'échauffe. Le radiateur a chauffé localement l'air à son contact, la variation de masse volumique qui en est résultée a entraîné une circulation de l'air échauffé qui a contribué par son mouvement à élever la température du thermomètre, mettant ainsi en évidence le phénomène de **convection naturelle ou libre**.

Si l'on avait utilisé un ventilateur pour souffler sur le radiateur, le phénomène aurait été accéléré par la **convection forcée**.

III.1.3 Rayonnement thermique

Une source de chaleur de faibles dimensions (figure 9) est placée au foyer d'un miroir parabolique. Vis-à-vis, on dispose un autre miroir parabolique et un thermomètre en son foyer image. La température du thermomètre s'élève dès que la source de chaleur est activée, même si aucun rayonnement visible n'est perceptible, que l'on soit dans l'air ou dans le vide pour éliminer les effets de convection.

La chaleur s'est propagée par **rayonnement**.

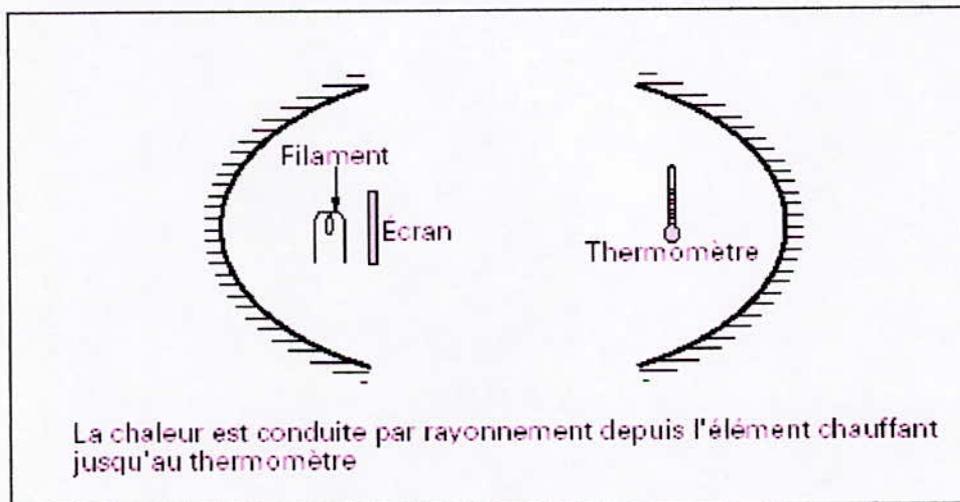


Figure 9 – Mise en évidence du transfert de chaleur par rayonnement. [10]

III.2 les cycles thermiques du soudage

III.2.1 Introduction

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

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

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

III.2.2 Notion de cycle thermique:

L'interprétation métallurgique de tous les phénomènes résultant d'un effet thermique requiert comme condition nécessaire à la connaissance de la température atteinte. A cette condition de température s'ajoute une ou plusieurs conditions de temps. Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance durant l'opération de soudage en un point donné de l'assemblage, il faut donc connaître le cycle thermique du soudage, c'est-à-dire la variation de la température θ en fonction du temps t , la courbe $\theta=f(t)$ tracée en un point A voisin d'une soudure (figure 10).

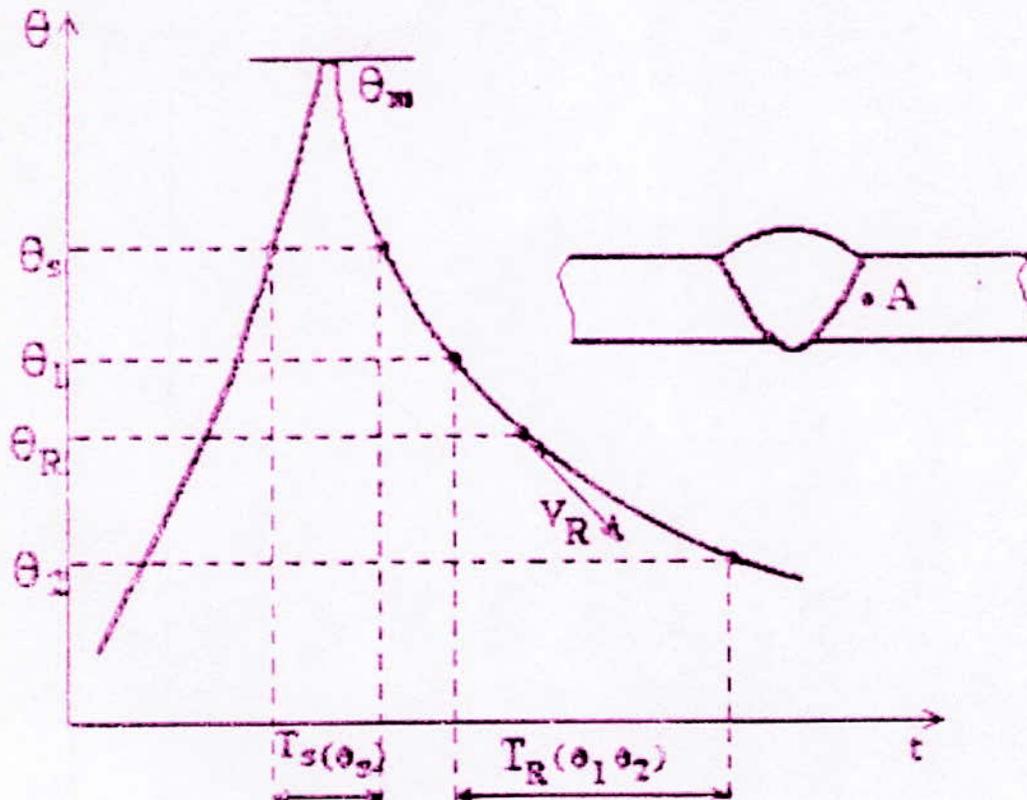


Figure 10: Cycle thermique d'un point A d'une soudure. [12]

La courbe correspondante $\theta=f(t)$ tracée au point A nous renseigne sur les grandeurs suivantes:

- La température maximale atteinte θ_m .
- Le temps T_s de séjour au dessus d'une température θ_s .
- La loi de refroidissement traduite par un temps de refroidissement T_R entre deux températures θ_1, θ_2 , ou par la vitesse de refroidissement V_R à une température θ_R .

Ainsi déterminées en un point de l'assemblage, les grandeurs associées aux cycles thermiques nous permettent d'accéder à la représentation topographiques de ces modifications aux alentours de la soudure, il faut donc connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique en donnant la variation de la température maximale θ_m atteinte en chaque point en fonction de la distance x . Chaque phénomène étant caractérisé comme première condition par la température θ nécessaire. Nous pouvons situer grâce à la courbe $\theta_m=f(t)$, la limite extérieure de la zone où ce phénomène est susceptible de se produire.

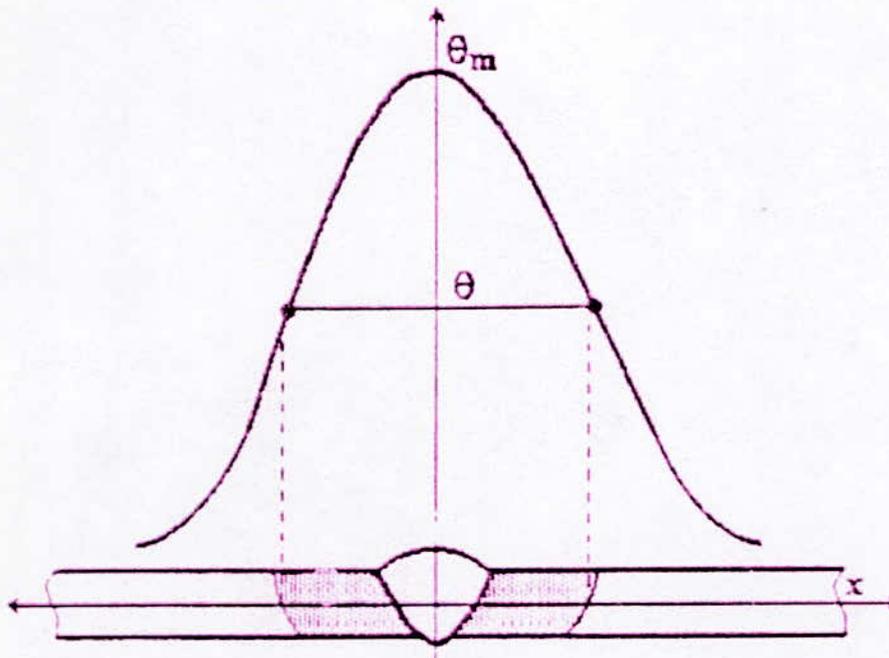


Figure 11: Répartition thermique dans une soudure. [12]

Ainsi on définit la zone affectée thermiquement (ZAT) où ce phénomène a lieu, pour les soudures sur acier, cette ZAT est réservée à la zone austénitisée par le cycle thermique, c'est-à-dire: celle qui est limitée par les isothermes aux points de transformation A_3 (austénitisation complète) et A_1 (austénitisation partielle).

III.2.3 Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique

a) Notion d'état quasi-stationnaire

Si nous relevons au moyen de thermocouples, les courbes $\theta=f(t)$ en des points A_1 , A_2 ...etc, situés à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et à des distances croissantes de l'origine O de ce cordon, supposé amorcé en plaine tôle, nous obtenons pour chaque parcours expérimenté, par rapport à l'origine O du cordon, la disposition décrite par la figure 12 qui conduit aux remarques suivantes:

- La température maximale atteinte θ_m croît avec la distance parcourue à partir du début du cordon, puis se stabilise à une valeur qui devient constante, tant que la source de chaleur progresse à une vitesse uniforme (l'énergie demeurant uniforme).
- En même temps, les lois de refroidissement mesurées par le temps de refroidissement entre deux températures deviennent identiques (comme le sont les temps de séjour non illustrés sur la figure 12). Autrement dit, les courbes $\theta=f(t)$ deviennent superposables dès que la source de chaleur a franchi un certain parcours (q).

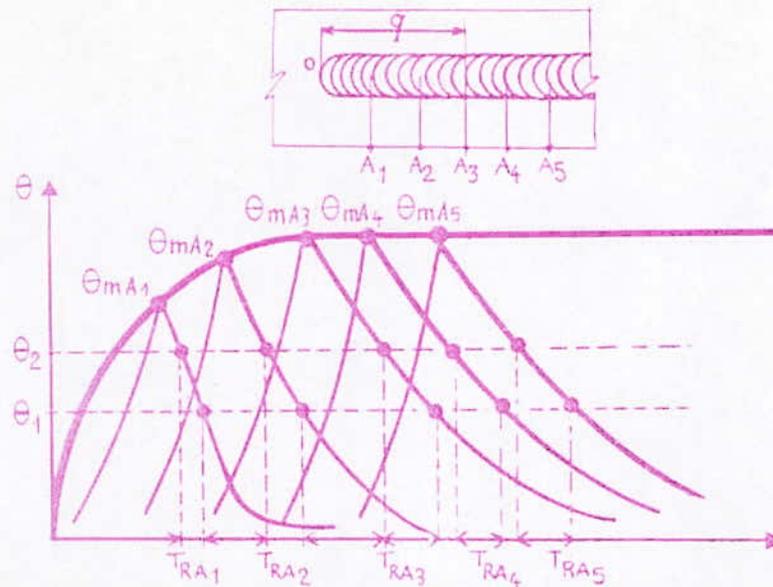


Figure 12: cycles thermiques le long du cordon de soudure. [12]

b) Cycle thermique du soudage

Grâce à l'existence de l'état quasi-stationnaire, nous pouvons limiter notre détermination des courbes températures-temps à des points A,B,C... répartis sur une droite XY perpendiculaire à la ligne de soudure, tracée à partir d'une position S de la source de chaleur. Quel que soit cette position dans la zone d'état quasi stationnaire les résultats seront les mêmes; schématisés par la disposition de la figure 13 qui appelle 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 ligne de soudure. En particulier; les températures maximales atteintes θ_m sont décroissantes de manière plus ou moins abrupte selon le gradient de température qui caractérise le procédé et le mode opératoire étudié. Naturellement toutes les courbes se rejoignent asymptotiquement au niveau de la température initiale du métal de base.
- Les températures maximales atteintes $\theta_{mA}, \theta_{mB} \dots$ etc qui sont décroissantes à partir de la ligne de soudure, sont franchies pour les temps $T_{mA}, T_{mB} \dots$ etc. qui sont croissants; se décalage se traduit par la courbe $\theta_m = \varphi(t)$ qui sépare le domaine des températures croissantes de celui des températures décroissantes, pratiquement ceci exprime le fait qu'au voisinage de la source de chaleur, les points les plus rapprochés sont déjà en train de se refroidir à partir de la température maximale qu'ils ont atteinte, alors que les plus éloignés sont encore à la phase d'échauffement. On conçoit tout l'intérêt de cette observation si on pense aux phénomènes qui sont commandés par une variation de température (transformations d'une part, dilatation et retrait d'autre part) et dont la chronologie est ainsi expliquée. En particulier, lorsque nous examinons la coupe transversale d'une soudure, nous y voyons des aspects métallographiques caractéristiques de ces phénomènes, mais les structures que nous observons ne sont apparues aux mêmes moments.

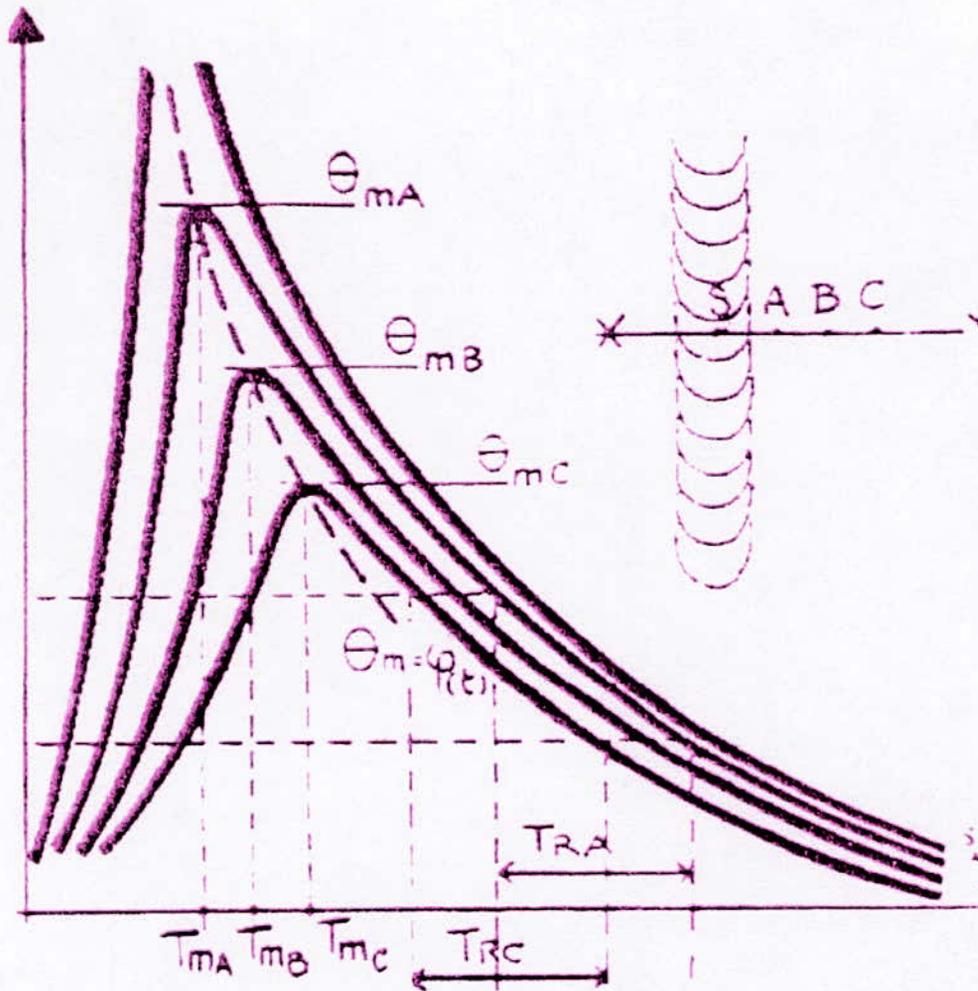


Figure 13: courbes température-temps. [12]

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

c) Répartition thermique du soudage

Pour décrire la répartition spatiale des cycles thermiques de soudage. Portevin et Setarian ont proposé sous le nom de "solide thermique" (figure 18) une représentation qui rend 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 des temps,

S_Z : sur une perpendiculaire au plan S_{XY} ,

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

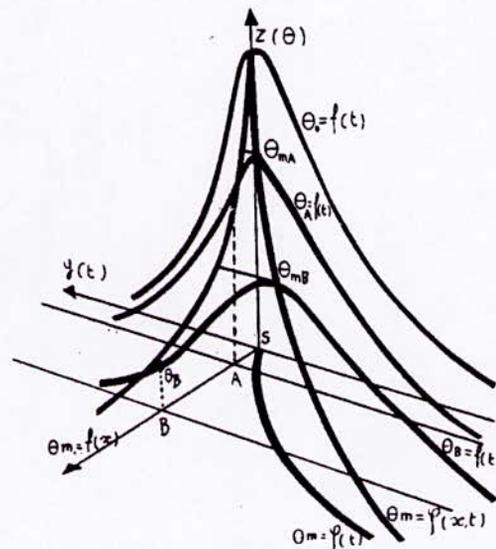


Figure 14: solide thermique. [12]

Du fait de l'état quasi-stationnaire, de solide thermique reste identique à lui-même tout au long de soudure selon laquelle il se place. On engendrant en chaque point les courbes températures/temps décrites sur le solide thermique la (figure 14) dont une moitié seulement est représentée.

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

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

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

d) Facteurs influençant la répartition thermique

Le métal de base: la nature des pièces à souder influe sur le processus thermique du soudage par leurs propriétés, leurs caractéristiques thermiques (conductivité et donc de résistivité), par leurs masses, leurs formes, leur disposition, et enfin par la température initiale de ces pièces.

Les conditions de soudage: L'influence des conditions de soudage peut s'exprimer en fonction de l'énergie mise en jeu durant l'opération; d'autres part, l'environnement et ses paramètres ont un important impact sur la répartition thermique (la pression et la composition de l'entourage direct de l'arc électrique). Par exemple, si on augmente la pression, une constriction de l'arc aura lieu, et par suite la température augmentera.

e) Formulation mathématique:

L'influence conjuguée de la nature du métal, de la masse et de la température initiale des pièce, et enfin de l'énergie mise en jeu, a été traduite par des formulation dont nous

retiendrons celles de Rykaline, pour ce qui concerne le temps de séjour à haute température et la loi de refroidissement.

Pour un produit épais (ou sens que nous avons déjà indiqué) sur lequel on dépose un cordon de soudure, le temps de séjour t_s et la vitesse de refroidissement V_θ s'écrivent:

$$(1) t_s = K_1 (E/(\lambda(\theta_m - \theta_0))) \quad (2) V_\theta = 2\pi\lambda(\theta - \theta_0)^2/E$$

Pour le soudage bout à bout en une passe, ou dépôt d'un cordon sur une tôle ses de grandeur s'écrivent:

$$(3) t_s = k_2 E^2 / (\lambda C_\gamma (\theta_m - \theta_0)^2) \quad (4) V_\theta = 2\pi\lambda C_\gamma (\theta_m - \theta_0)^2 / E^2$$

Dans ces deux formules;

λ est la conductibilité thermique.

C_γ la capacité calorifique volumique.

E l'énergie mise en jeu (énergie nominale affectée du coefficient de rendement),

θ_0 la température initiale.

θ la température à laquelle est calculée la vitesse de refroidissement.

θ_m la température maximale atteinte au point considéré.

k_1, k_2 sont des coefficients eux-mêmes fonction de la température θ à laquelle s'applique le calcul.

Nous n'entrons pas ici dans le détail des solutions proposées pour le soudage en une passe de produits d'épaisseurs intermédiaires; nous nous contenterons de commenter les formules ci-dessus qui explicitent quantitativement les facteurs d'influence que nous avons étudié d'une manière qualitative dans ce qui précède.

En ce qui concerne la nature du métal, on voit figurer la conductibilité thermique λ dans les deux types de formules, alors que la capacité calorifique volumique C_γ n'intervient que pour les produits minces. Ceci résulte de la différence entre produits minces et épais. Du point de vu de la disposition des isothermes et des conditions d'obtention de l'état quasi-stationnaire. D'ailleurs, s'il n'en était pas ainsi, il serait impossible de déposer un cordon de soudure sur une tôle épaisse.

Quant à l'influence de la masse des pièces et de leurs dispositions, il suffit de rappeler que l'énergie mise en jeu doit être affectée d'un coefficient rendant compte de la géométrie du point

L'influence de la température initiale θ_0 est traduite par sa présence au dénominateur pour les temps de séjours à haute température et au numérateur pour les vitesses de refroidissement. Dans les deux cas, cette influence s'accroît pour les produits épais comme l'élévation au carré pour les temps de séjour et au cube pour les produits minces. C'est l'occasion de se rappeler que les produits minces requièrent moins de préchauffage que les produits épais et que l'excès de préchauffage favorise la surchauffe.

De même, l'énergie qui intervient au numérateur pour les temps de séjour et au dénominateur pour les vitesses de refroidissement, a plus d'influence pour les produits minces que pour les produits épais, puisqu'elle intervient au carré pour les premiers.

IV Transformations de phases lors du soudage

Le terme "transformations de phases" concerne aussi bien la structure que la constitution de l'alliage ; la structure métallographique englobe la répartition et la morphologie des constituants en présence, ceci veut dire la taille et la forme ainsi que l'orientation des grains et des précipités . La constitution, quant à elle, est décrite par la nature et les proportions des phases, la variation de cette composition et l'effet de la température (qui peut être réversible).

IV.1 Transformations de phases à l'échauffement

IV.1.1. Recristallisation après écrouissage

La recristallisation désigne une réorganisation du réseau cristallin puis des grains par l'effet d'une température croissante.

L'écrouissage est un travail à froid qui entraîne une déformation au sein du métal et un changement de sa structure micrographique (déformation des grains dans le sens imposé par le traitement mécanique) et de sa structure cristalline (distorsion des plans de plus grande densité atomique). Ces changements se traduisent par une évolution des propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté et limite élastique) qui est elle même fonction du taux de déformation.

Sous l'effet de la température, un métal à l'état écroui peut recristalliser.

Le soudage des produits écrouis peut être considéré comme une application directe de la recristallisation après écrouissage, on note dans ce cas un adoucissement du métal de base (diminution de la dureté) et en un degré moindre les caractéristiques de traction. La zone fondue quant à elle, peut se voir durcir ou s'adoucir (douce comme le métal recristallisé ou dure comme le métal de base écroui).

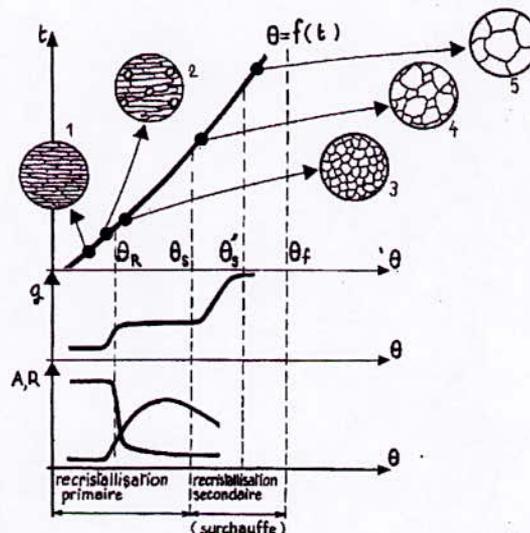


Figure 15 – Phases successives du phénomène de recristallisation. [12]

IV.1.2 Phénomène de surchauffe (recristallisation secondaire)

Ce phénomène intervient directement avant la fusion, il suit la recristallisation et le faible grossissement des grains qui l'accompagne; l'apparition des effets de la surchauffe ou de la recristallisation secondaire est notée à partir d'une certaine température, de nouveaux grains apparaissent en lieu et à la place d'autres et augmentent en taille; et passer une autre température il ne restera que les nouveaux grains (ceux qui ont subi le grossissement).

Au voisinage des soudures, le métal de base étant au départ supposé non écroui, les grains croîtront lorsque la distance avec la zone de soudure diminuera.

Dans le cas des aciers, l'évolution des grains est coupée par la transformation allotropique ferrite/austénite ($\alpha \rightarrow \gamma$), le fer γ de structure CFC succédera au fer α qui lui à un arrangement de type CC, donc c'est le grain austénitique qui subira la recristallisation secondaire jusqu'à la fusion. L'étendue de cette zone de surchauffe obéit à la répartition thermique précédemment exposée, elle dépend du gradient de température et du temps de maintien à haute température.

IV.1.3 La coalescence

La coalescence est le regroupement ou le rassemblement lors d'un traitement thermique des particules d'un constituant en présence dans une solution solide; lorsque les particules sont finement dispersées sur toute la structure, un bref cycle thermique (comme dans le cas du soudage) est susceptible de déclencher la coalescence, généralement comme cycle final d'un effet de revenu (cas des aciers inoxydables).

3.1.4 Modification de la constitution

La plus importante conséquence de l'échauffement par rapport à la constitution d'un alliage est le rapprochement vers un état d'équilibre, si ce n'est l'atteinte de cet équilibre (forme de revenu) on peut également assister à une mise en solution d'un constituant dans une solution solide. Ainsi, dans les aciers inoxydables on a une précipitation de carbures ($Cr_{23}C_6$); le cycle de soudage provoque la coalescence de ce précipité puis sa remise en solution.

VI.2 Transformations de phase en refroidissement

Ces transformations à l'état solide, impliquent toutes les zones de soudage (la zone affectée thermiquement ZAT ou la zone fondue ZF après la solidification) et concernent la constitution physico-chimique du métal.

IV.2.1 Retour à l'état d'équilibre

Si le refroidissement qui suit l'opération de soudage n'est pas trop rapide, le retour à l'état d'équilibre a normalement lieu et de la même manière que pour les transformations en échauffement, on peut également assister à des transformations allotropiques (cas des aciers) mais dans des intervalles de températures décroissantes.

IV.2.2 Transformation perlitique en soudage

Lorsqu'un acier est soudé dans des conditions qui permettent au mode perlitique d'intervenir au cours du refroidissement, l'apparition des constituants ferrite et cémentite se

fait suivant un processus particulier et mène à une structure qui dépend à la fois de la vitesse de ce refroidissement, de la composition chimique de cet acier (en particulier la teneur en carbone) et de la grosseur initiale des grains de l'austénite en cours de transformation.

IV.2.3 Transformation martensitique en soudage

D'après les diagrammes de transformation en refroidissement continu TRC la transformation martensitique a lieu à partir d'une loi critique de refroidissement, c'est à dire au dessous d'un temps critique de refroidissement se produit plus bas que la température de début de transformation de la martensite M_s (la plus basse température de transformation).

Le problème rencontré ou alors l'inconvénient d'une transformation martensitique est la fragilisation par l'hydrogène, car il est présent dans l'austénite mère au moment où elle se transforme en martensite d'où une bonne dureté mais une importante fragilité; pour y remédier, on effectue un revenu qui a pour but de décomposer la martensite qui est un constituant hors d'état d'équilibre (donc instable) en ferrite et cémentite à une température inférieure à A_1 le résultat escompté étant une amélioration de la ductilité.

MATERIAUX

ET TECHNIQUES

EXPERIMENTALES

I Définition des matériaux utilisés

Les produits utilisés lors des expériences sont:

Une tôle d'épaisseur 1,5 en acier inoxydable du type 304L ayant une structure austénitique.

Une tôle de même épaisseur en acier au carbone ayant une structure ferritique.

I.1 Composition chimique

L'analyse chimique de ces matériaux a été effectuée par spectrométrie de fluorescence des rayons X, elle a donné les résultats suivants:

Elément	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ti	Nb	Ni	Cr	Mo	V	Sn
1	0,017	1,96	0,41	0,016	0,003	0,748	0,014	0,005	0,010	7,59	18,71	0,29	0,069	0,005
2	0,017	0,28	0,01	0,002	0,006	0,035	0,014	0,002	0,001	0,16	0,26	0,004	/	/

Tableau 6: Désignation de la composition chimique des échantillons

I.2 Structure métallographique

- Pour le 304L, on voit clairement la structure austénitique en macle sur la figure 15:

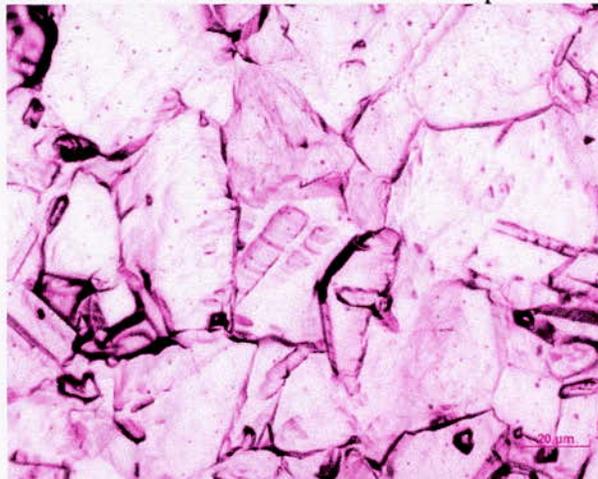


Figure 15: Structure de l'acier inoxydable 304L X500

- Pour l'acier au carbone, la structure ferritique nous confirme que c'est un acier à bas carbone, la figure 16 illustre cette hypothèse:

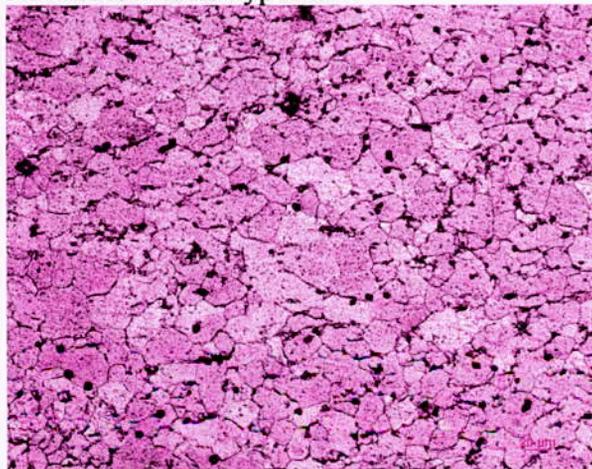


Figure 16: Présentation de la structure de l'échantillon en acier X500

I.3 Méthodes d'observation

La macrographie et la micrographie constituent deux méthodes optiques d'examen direct de la surface des métaux. Elles présentent un très grand intérêt car elles fournissent à une échelle différente de nombreux renseignements sur la texture et la structure des métaux et alliages. Elles sont utilisées dans tous les laboratoires de recherche et de contrôle.

Macrographie: C'est l'étude des surfaces polies à l'oeil nue, à faibles grossissements (<10).

Micrographie: L'étude micrographique se fait par réflexion par microscope métallographique.

Les surfaces à examiner doivent être polies, jusqu'à avoir un état miroir, ceci se fait avec un polissage de bonne qualité, avec du papier abrasif avec différentes granulométries, du plus grossier au plus fin, ensuite la finition se fait avec de la poudre d'alumine diluée dans l'eau avec des tailles de 0,3 ensuite 0,05µm.

Le polissage terminé, on procède à une attaque chimique avec des réactifs appropriés:

- Le réactif d'attaque pour le 304L est constitué de:
 - 3 volumes de HCl
 - 2 volumes d'acide nitrique
 - 2 volumes d'acide nitrique
 - 1 volume de glycérine
- Le réactif d'attaque pour le cas de l'acier au carbone est le nital

I.4 Essais de dureté et microdureté

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette à mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions des empreintes laissées par le pénétrateur (selon la méthode et donc de la forme du pénétrateur) sur la surface du matériau contrôlé. Ces empreintes sont d'autant plus importantes que le métal est qualifié de mou; en d'autres termes, la dureté peut être définie comme la résistance à la pénétration.

Essai de dureté Vickers (HV) sur les assemblages soudés

Dans le cas de la dureté Vickers le pénétrateur a la forme d'une pyramide droite à base carrée et d'angle de 136° au sommet. La charge de l'essai est pour la micro dureté de 300gf pour la dureté c'est 49.2 N soit 5 Kgf (HV5). Cette charge est appliquée d'une manière progressive et constante jusqu'à ce que la charge choisie soit atteinte, elle est ainsi maintenue pour une période de temps variant entre 10 et 15 s. Enfin, l'essai de dureté se déroule à température ambiante.

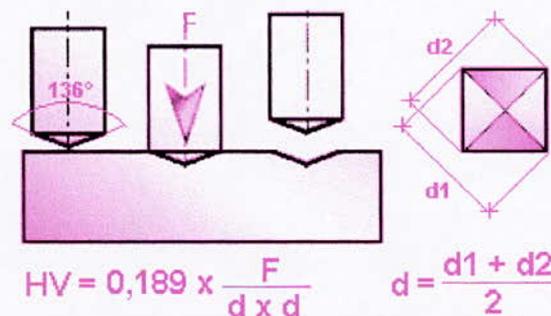


Figure 17: Méthode de calcul de la dureté Vickers.[7]

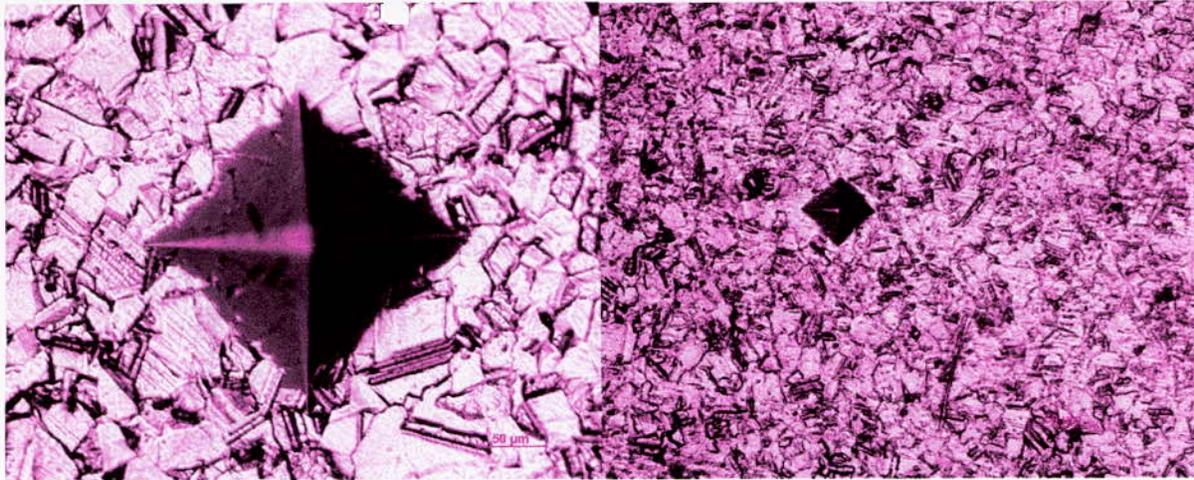


Figure 18: Exemple d'empreinte de dureté (gauche) et de microdureté (droite) X200

On effectue un balayage à partir de l'une des extrémités du cordon en allant jusqu'au métal de base. Avec des pas allant de 100μm pour la microdureté jusqu'à 500μm pour la dureté.

I.5 Essais de traction

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette rectangulaire (dans notre cas) à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de la pièce d'essai. L'essai de traction permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile.

L'obtention des dimensions des éprouvettes de traction passe par un usinage précis et qui prend compte de certaines précautions afin d'éviter un écoulement ou alors un échauffement excessif de notre matériaux.

En suivant les recommandations de la norme qui gère les dimensions des éprouvettes de traction, on prévoit une plaque de 40mm d'épaisseur avec une forme rectangulaire.

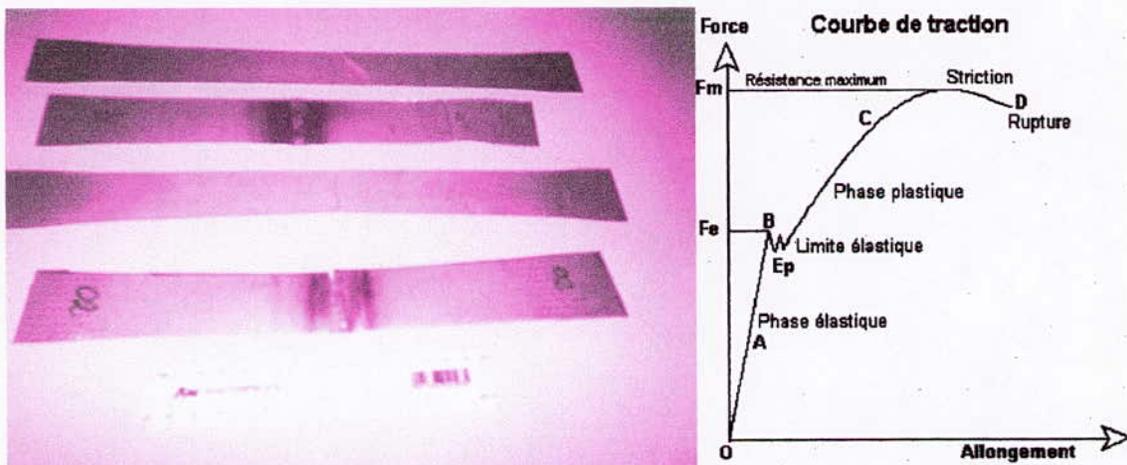


Figure 19: Forme des éprouvettes et du diagramme conventionnel de traction

Type de l'éprouvette		Distance entre mâchoires	Largeur	Epaisseur
304L	Eprouvette n°10 sans soudure	115	40,56	1,46
	Eprouvette n°11 pour faisabilité	112	40,53	1,46
	Eprouvette n°12 pour faisabilité	113	41,45	1,46
	Eprouvette n°13 soudée avec cycle thermique	125	39,53	1,44
	Eprouvette n°14 soudée avec cycle thermique	125,5	40,62	1,45
Acier au C	Eprouvette n°20 sans soudure	140,5	40,36	1,38
	Eprouvette n°21 soudée avec cycle thermique	140	39,44	1,36
	Eprouvette n°22 soudée avec cycle thermique	145,5	40,92	1,36

Tableau 7: Dimensions des éprouvettes de traction

Dans notre étude, les dimensions sont propres à chaque échantillon. A partir du diagramme on peut avoir les valeurs caractéristiques de traction qui se déduisent directement à partir du diagramme de traction sont la limite élastique, la résistance à la rupture. Les autres caractéristiques peuvent être calculées, comme le module de Young, l'allongement à la rupture, ...etc.

Les essais se sont déroulés sur une machine de traction hydraulique pouvant développer une charge maximale de 600KN, cette machine est reliée à un micro-ordinateur et les données sont traitées par le logiciel Merlin. On peut effectuer d'autres essais sur cette machine comme la flexion, le pliage, et on peut aussi développer des essais personnalisés.

II Procédé de soudage et dispositif expérimental

II.1 Procédé de soudage

Le procédé de soudage est le soudage TIG qui a été défini précédemment au cours de l'étude bibliographique, le soudage a été effectué à l'atelier du CSC par un soudeur homologué.



Figure 20: Poste de soudage TIG (atelier du CSC)

Un essai de faisabilité a été fait pour avoir la structure d'un cordon de bonne qualité, avec un dispositif de protection des plaques des deux cotés. Trois essais ont été effectués par la suite pour l'acquisition des cycles thermiques, avec un réglage spécifique pour chacun. Les réglages sont sur le tableau suivant:

Type de tôle	Vitesse cm/mn	Polarité	Gaz de protection	Débit du gaz (l/mn)	Tension (V)	Intensité (A)
304L	6.42	Inverse	Argon	9	10	35
304L	8.14	Inverse	Argon	8.5	9	36
Acier au C	5.79	Inverse	Argon	8	10	33

Tableau 8: Réglage des différentes opérations de soudage

Les plaques sont placées cote à cote sans qu'il y'ait de chanfrein, puisque les tôles sont minces.

II.2 Dispositif de prise des cycles thermique

Pour obtenir les cycles thermiques, on a soudés des thermocouples en chromel – Alumel pouvant supporter des températures allant jusqu'à 1200°C, après soudage on les a couvert d'une patte isolante thermiquement pour éviter le contact avec l'atmosphère extérieure, et se rapprocher des températures exactes des points où sont placés ces thermocouples. Le positionnement de ces thermocouples est illustré sur les figures 22, 23, 24. Ces positions ont été prise pour essayer de tomber sur la ZAT pour essayer d'expliquer les transformations qui ont été subits dans cette zone qui est considérée comme une zone fragile, ayant des propriétés moins bonnes que celles des autres zones.

D'après l'étude de faisabilité, nous avons constaté que l'épaisseur de la ZAT est comprise entre 1 et 1,5mm, et la largeur totale du cordon de soudure est de l'ordre de 7 mm, ce qui nous laisse penser que l'extrémité de la ZAT est à 5mm environ du coté à souder de l'une des plaques. La figure 21 nous donne les dimensions des différentes zones.

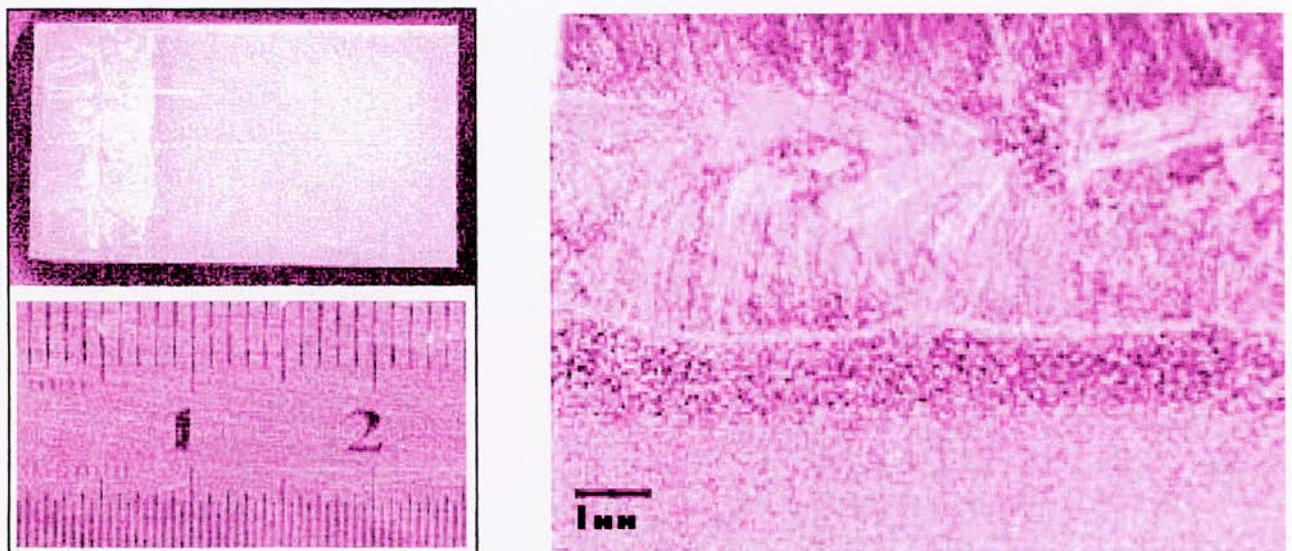


Figure 21: Photo de l'échantillon après attaque (à gauche), et macrographie du même échantillon (à droite) pour l'étude de faisabilité (304L).

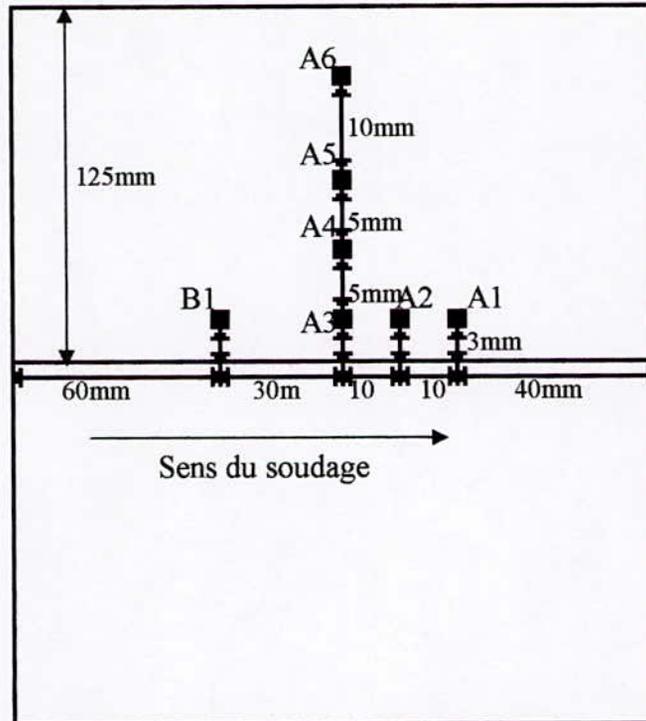


Figure 22: Disposition des thermocouples sur la plaque 1 (304L)

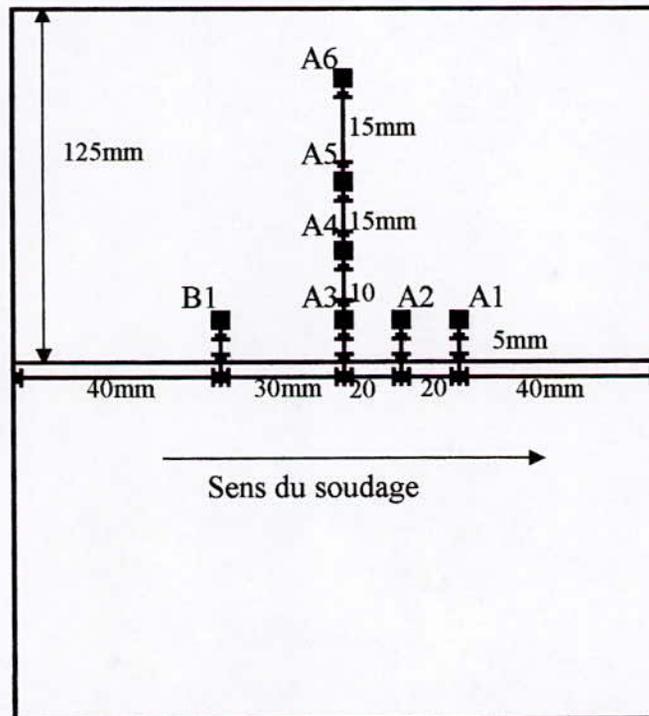


Figure 23: Disposition des thermocouples sur la plaque 2 (304L)

Il est à noter que les dimensions de chaque plaque 304L sont:

- Longueur: 150 mm
- Largeur: 125 mm
- Epaisseur: 1,47 mm

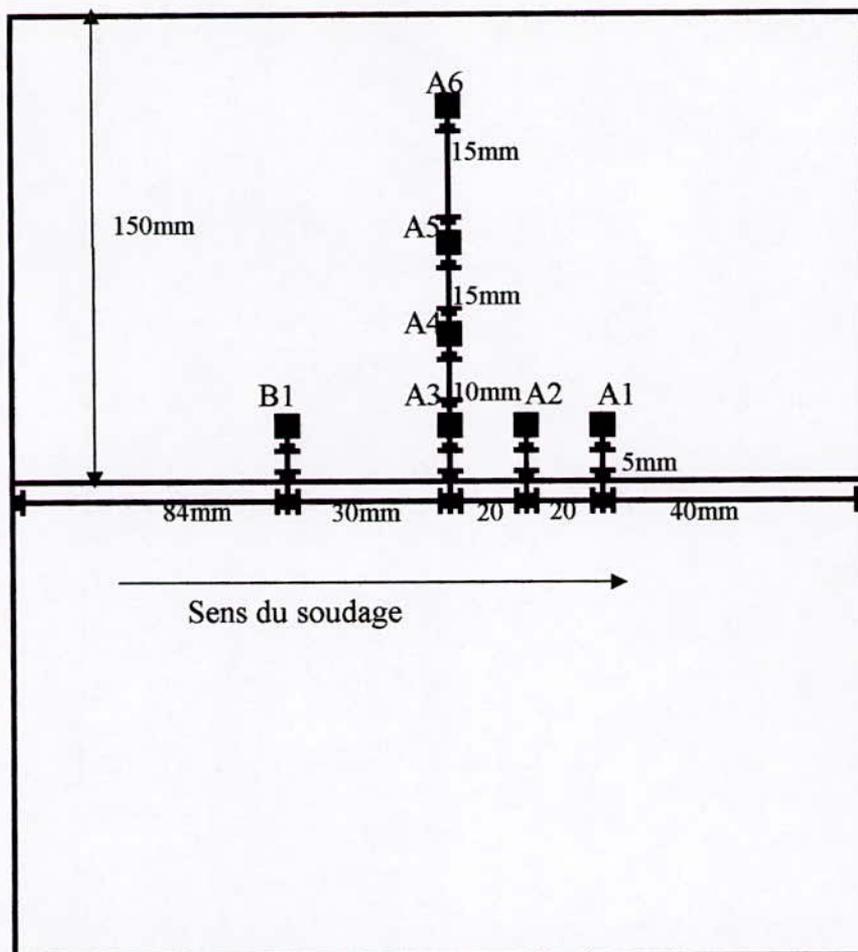


Figure 24: Disposition des thermocouples sur la plaque 3 (Acier au Carbone)

On note que les dimensions de la plaque en acier au carbone sont:

- Longueur: 194 mm
- Largeur: 150 mm
- Epaisseur: 1,37 mm

Les thermocouples sont reliés à une machine qui enregistre l'évolution de la température pour chaque thermocouple avec le temps sur un même graphe. Pour essayer d'éviter toute perte de chaleur due au contact les plaques ont été mises sur des supports de telle sorte que la surface de contact soit minimale.

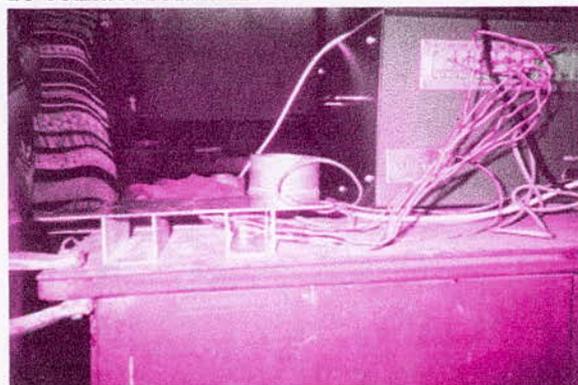


Figure 25: Dispositif d'enregistrement des cycles thermiques

RESULTATS

&

INTERPRETATIONS

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I Evolution du gradient de température

Après obtention des courbes Température-Temps enregistrées sur les plaques 2 et 3 illustrés sur les figures 23 et 24. Pour le cas de la première plaque l'appareil n'a pas enregistré les graphes, car le papier a fait défaut. Le résultat obtenu par cet appareil était sous forme de graphe, il fallait séparer les graphiques qui étaient superposés, alors on a utilisé le logiciel WinDigit pour digitaliser nos courbes et les transférer sur Microsoft Exel, les résultats sont les suivants:

I.1 Cycles thermiques enregistrés sur la plaque 2 (304L)

Les figures qui suivent illustrent l'évolution de la température au cours du soudage enregistrés sur des points donnés par la figure 23:

Cycle thermique du point B1 (Inox 304L)

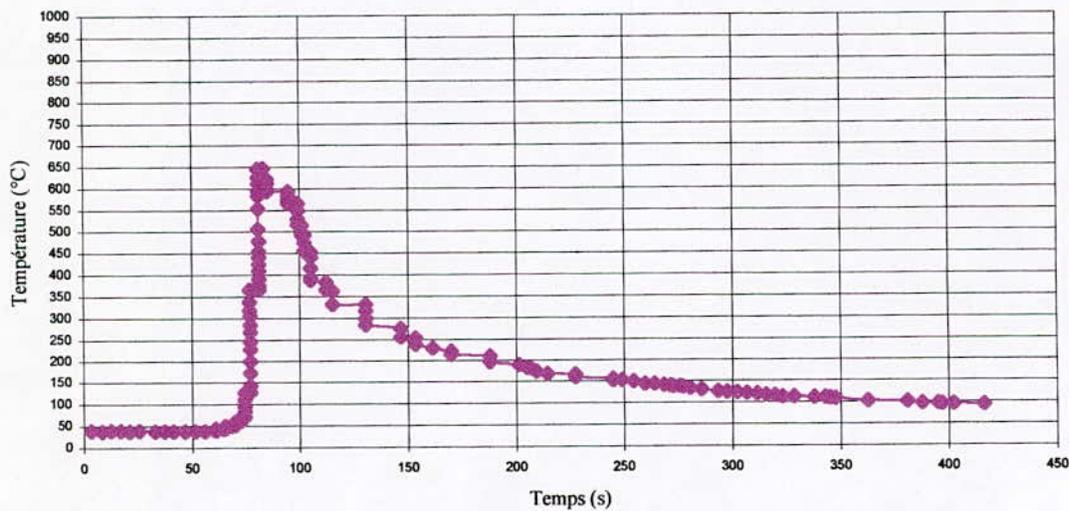


Figure 26 – Courbe Température-Temps au point B1

Cycle thermique des points A3, A4, A5, A6 (acier inox 304L)

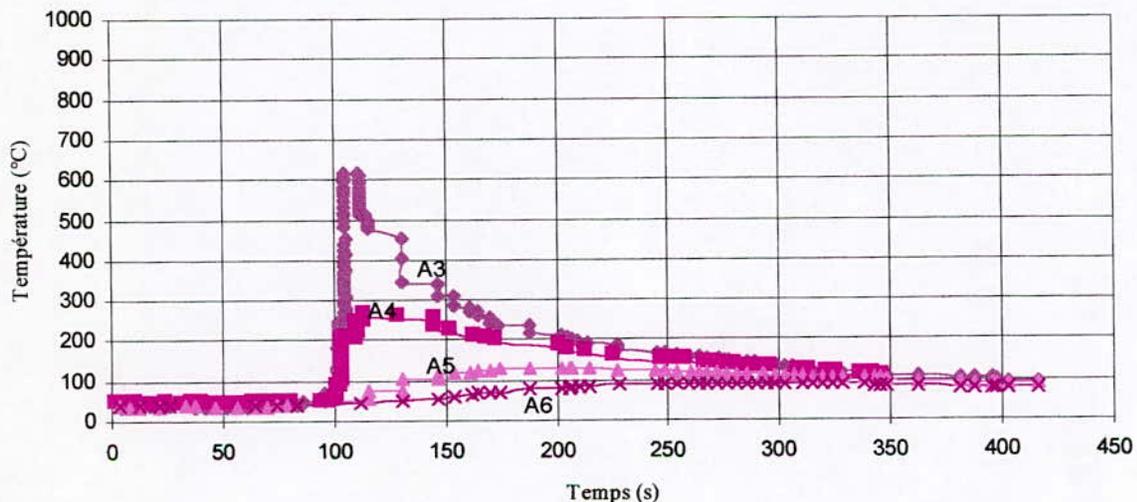


Figure 27 – Courbe Température-Temps aux points A3, A4, A5, A6

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Cycle thermique du point A2 (acier Inox304L)

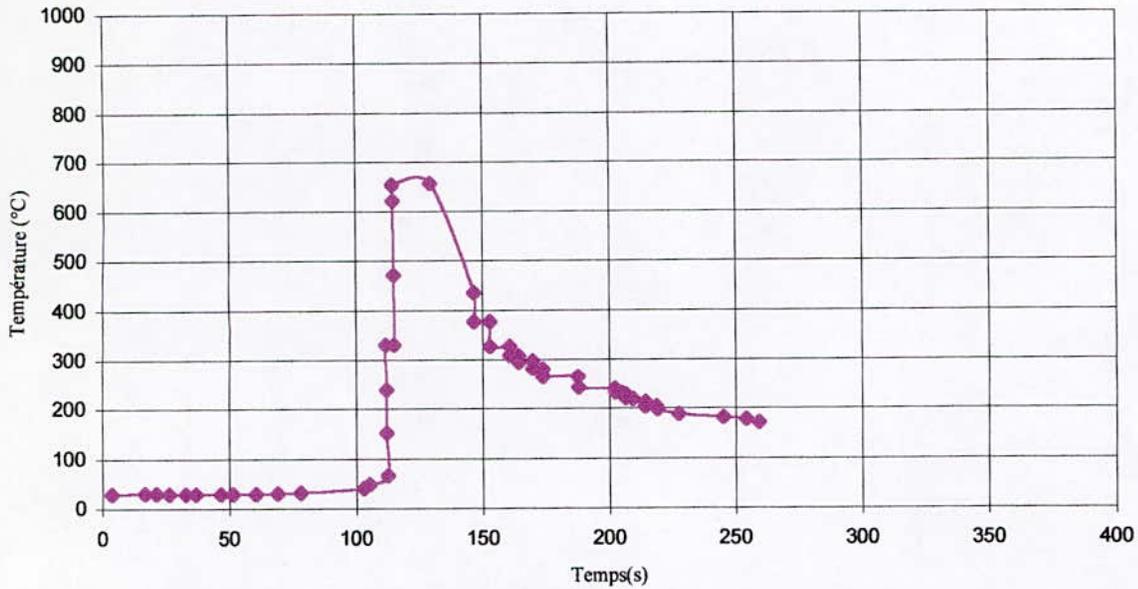


Figure 28 – Courbe Température-Temps au point A2

Cycle thermique du point A1(acier Inox 304L)

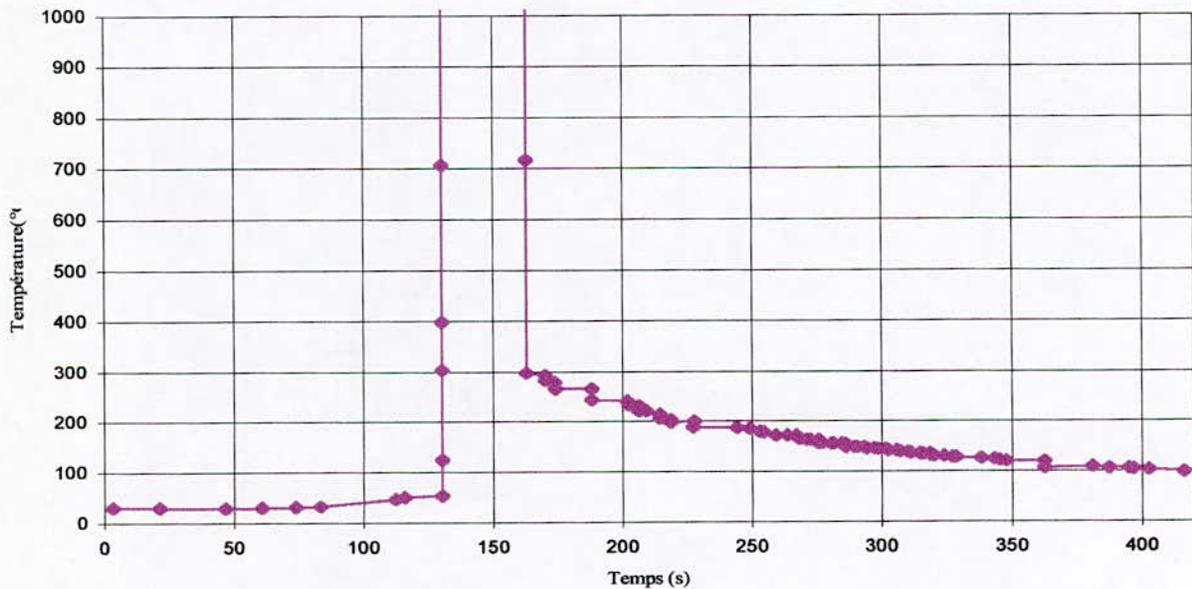


Figure 29 – Courbe Température-Temps au point A1

D'après ces courbes on peut remarquer que la notion d'état quasi-stationnaire est vérifiée pour les points B1, A3 et A2. Pour le cas du point A1, c'est pas le cas. On a essayé de trouver une explication à ce phénomène, la seule explication possible est que la source de chaleur s'est rapprochée à ce point puisque la température a dépassé les 1000°C. Le procédé étant manuel, le contrôle parfait du déplacement de la source de chaleur étant impossible.

A partir de la figure 27 on remarque l'effet de l'éloignement des points de la source de chaleur (figure proche de la figure 13 de la partie bibliographique) sur les transferts de chaleur qui se passent sur la plaque.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I.2 Cycles thermiques enregistrés sur la plaque 3 (Acier au carbone)

Les résultats obtenus dans le cas de l'acier au carbone sont similaires à ceux du 304L, mais il est très important de noter que la soudure a été interrompue une vingtaine de secondes. Donc la source de chaleur s'est arrêtée vingt secondes, puis elle a repris à produire de la chaleur. Comme le soudeur s'est arrêté probablement entre le point A3 et A2, ce qui pourrait expliquer les courbes de Température-Temps sur les figures ci-dessous.

Cycle thermique du point B1 (Acier au Carbone)

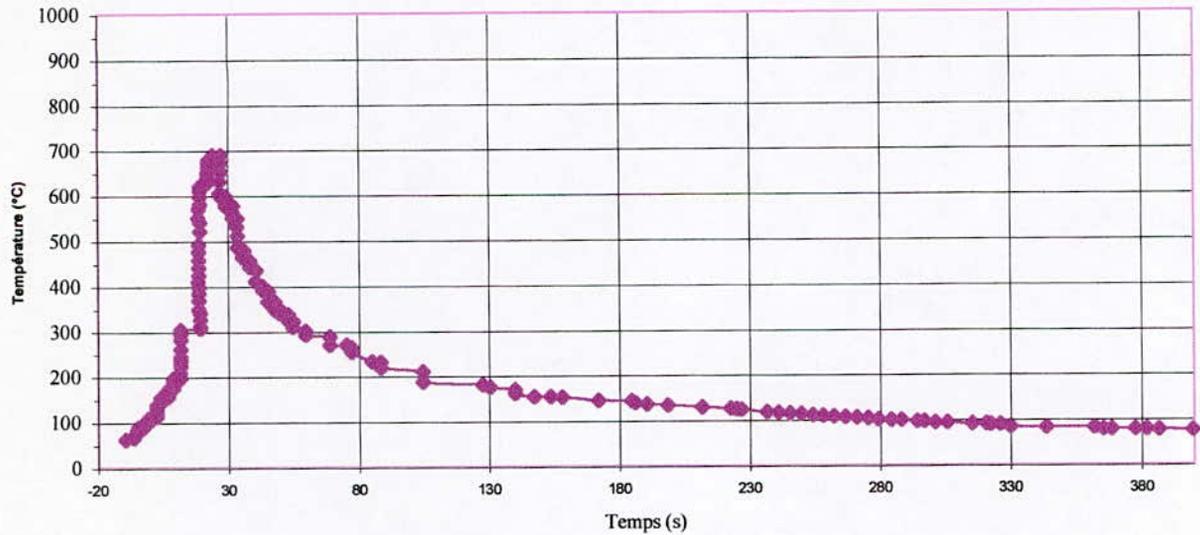


Figure 30 – Courbe Température-Temps au point B1

Cycle thermique du point A3 (Acier au Carbone)

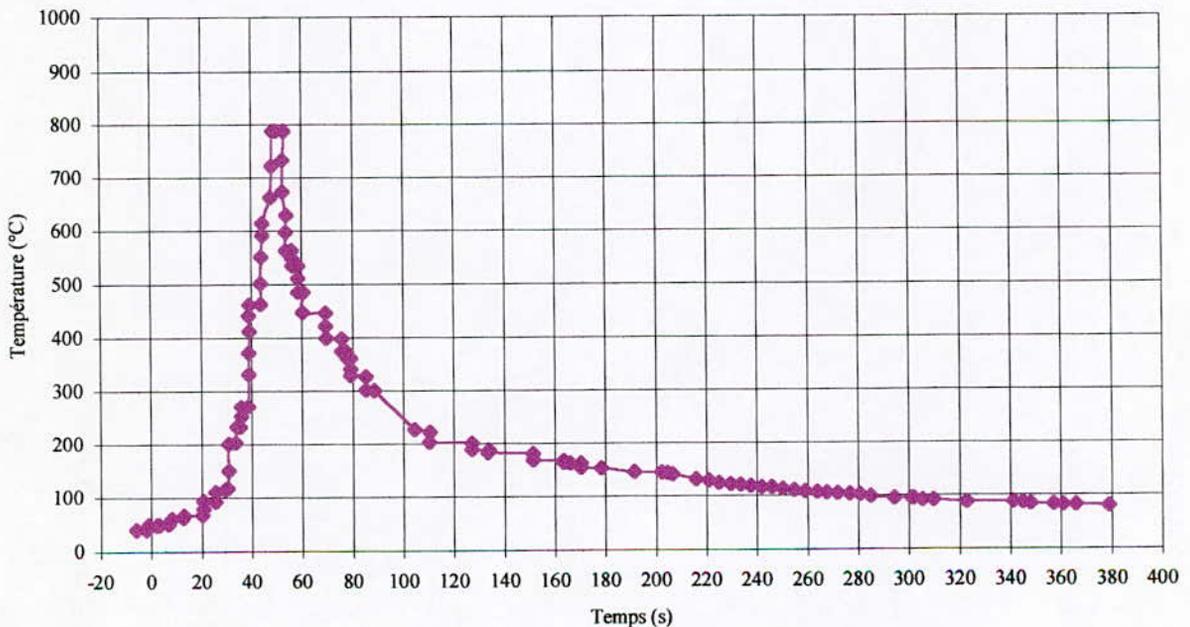


Figure 31 – Courbe Température-Temps au point A3

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Cycle thermique du point A4 (Acier au Carbone)

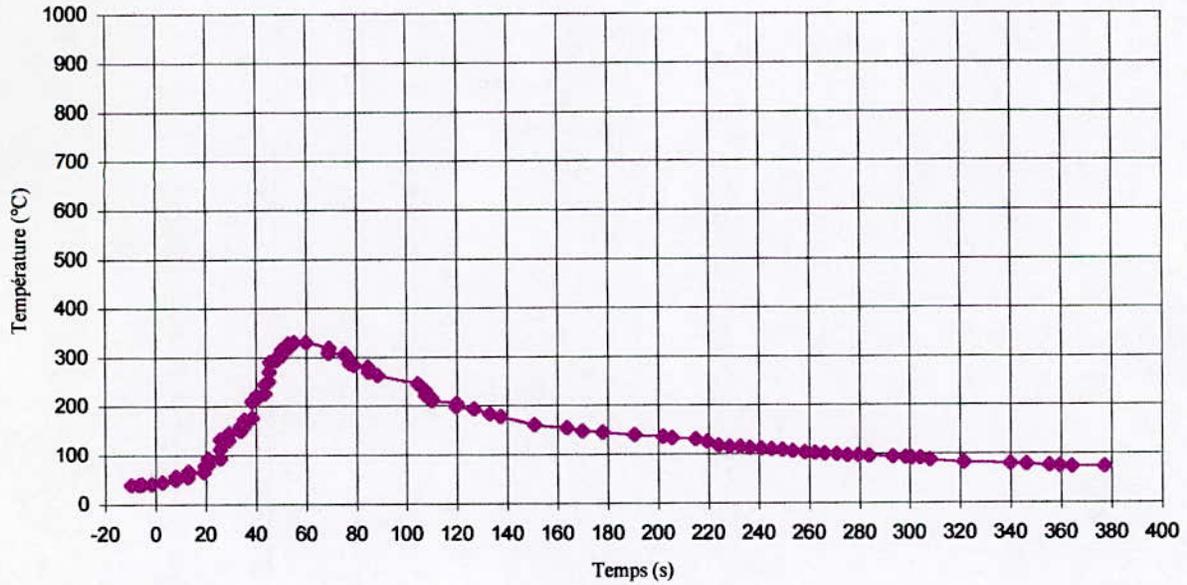


Figure 32 – Courbe Température-Temps au point A4

Cycle thermique du point A5 (Acier au Carbone)

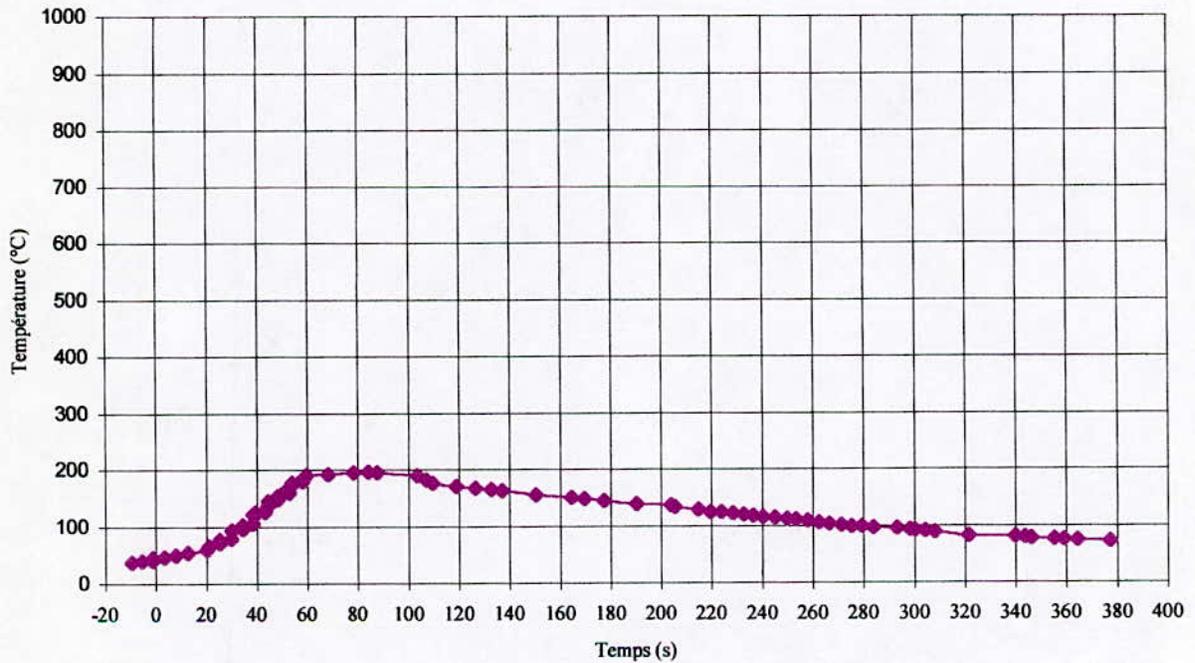


Figure 33 – Courbe Température-Temps au point A5

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Cycle thermique du point A6 (Acier au Carbone)

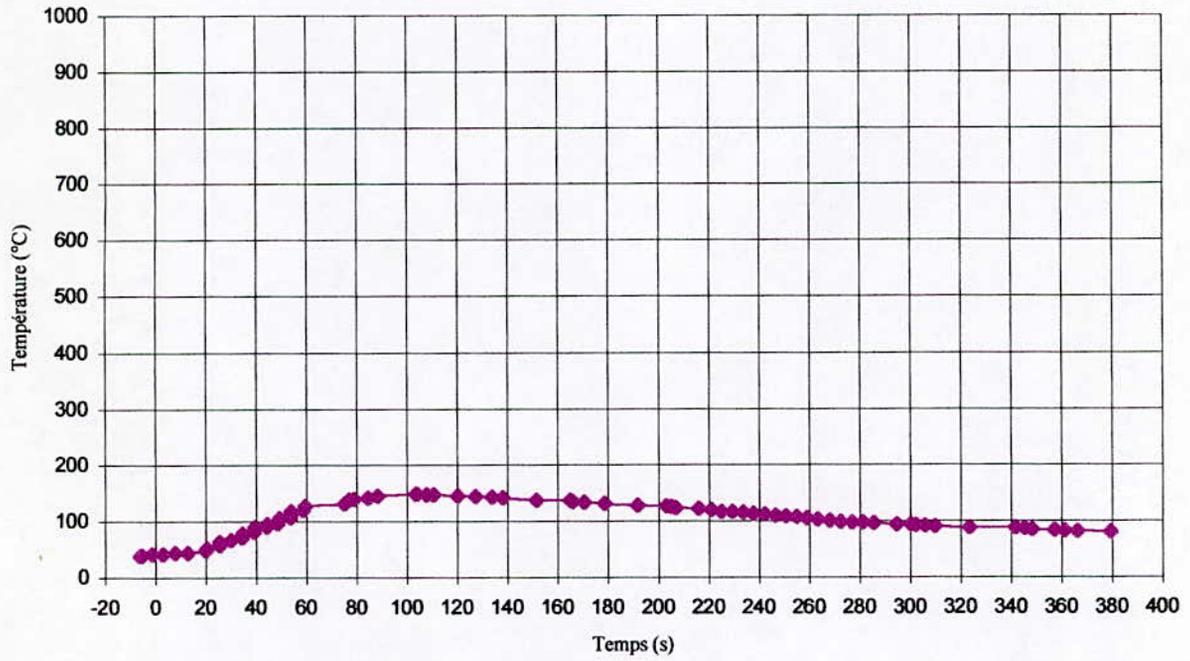


Figure 34 – Courbe Température-Temps au point A6

Cycle thermique du point A2 (Acier au carbone)

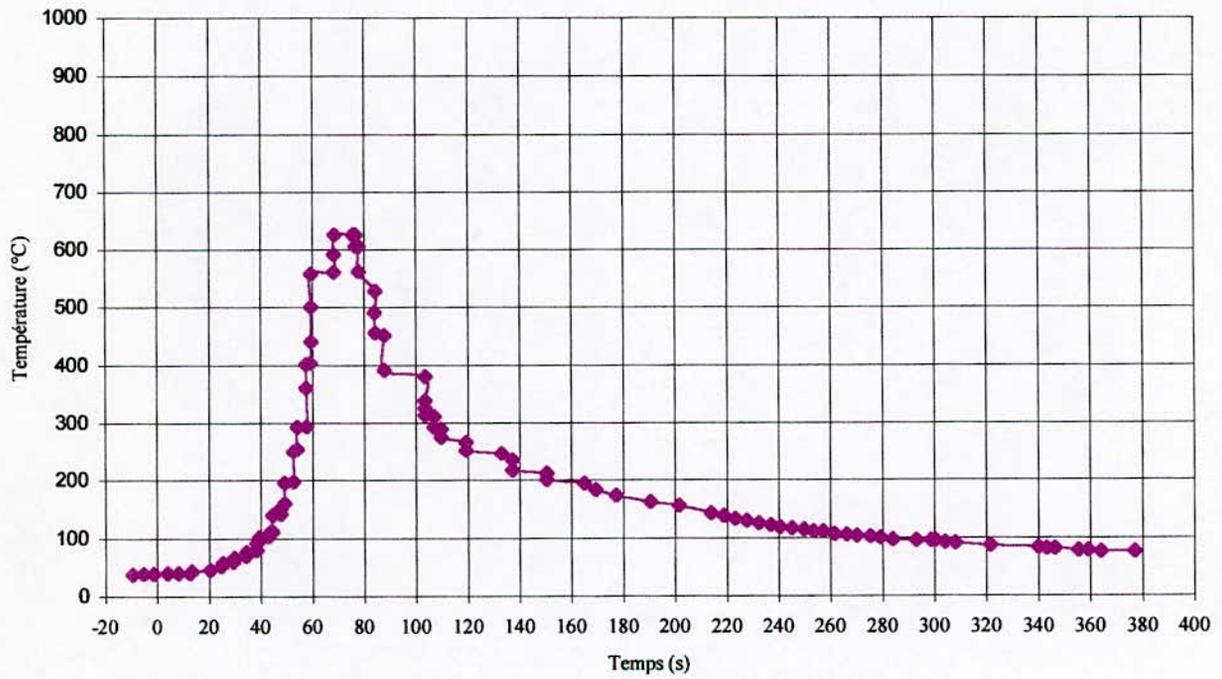


Figure 35 – Courbe Température-Temps au point A2

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Cycle thermique du point A1 (Acier au Carbone)

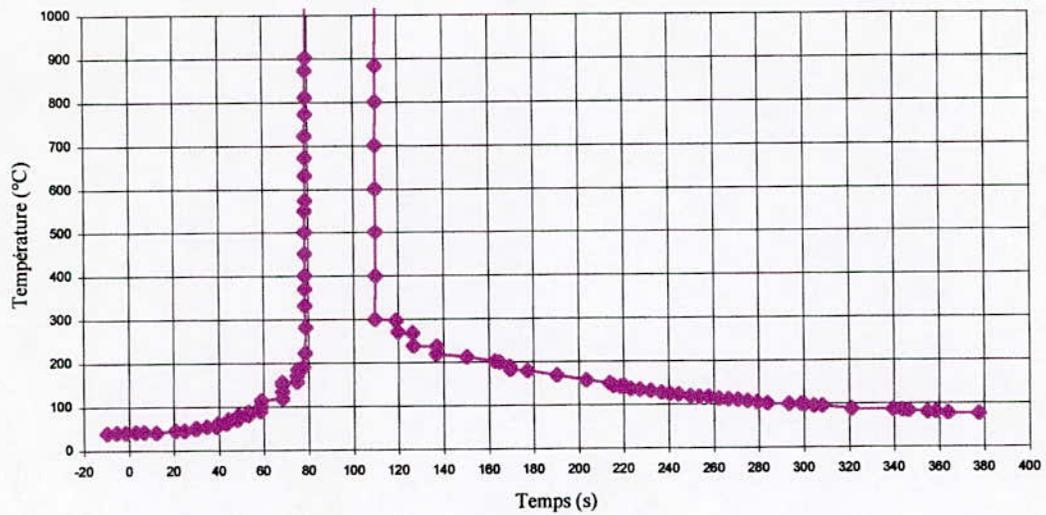


Figure 36 – Courbe Température-Temps au point A1

II Observation métallographique

L'observation métallographique donne pour chaque cas les résultats suivants:

- ✓ **Echantillon de faisabilité (304L)**

On remarque clairement les trois zones caractéristiques:

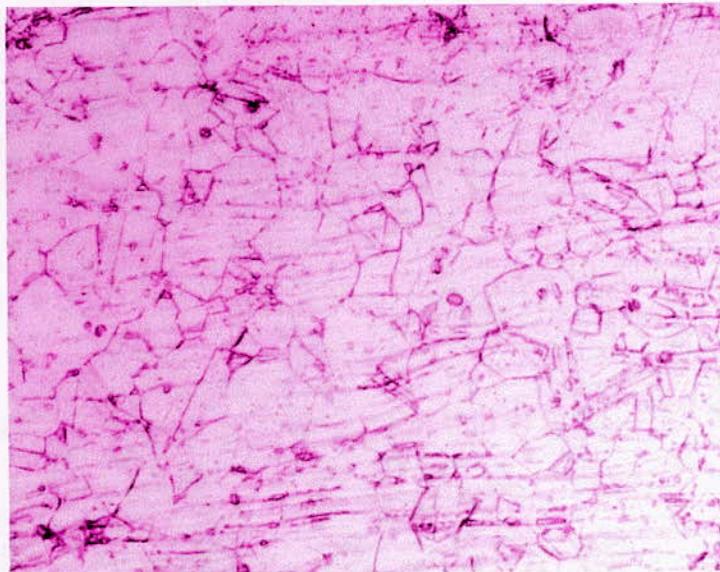


Figure 37 – Métal de base X500

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

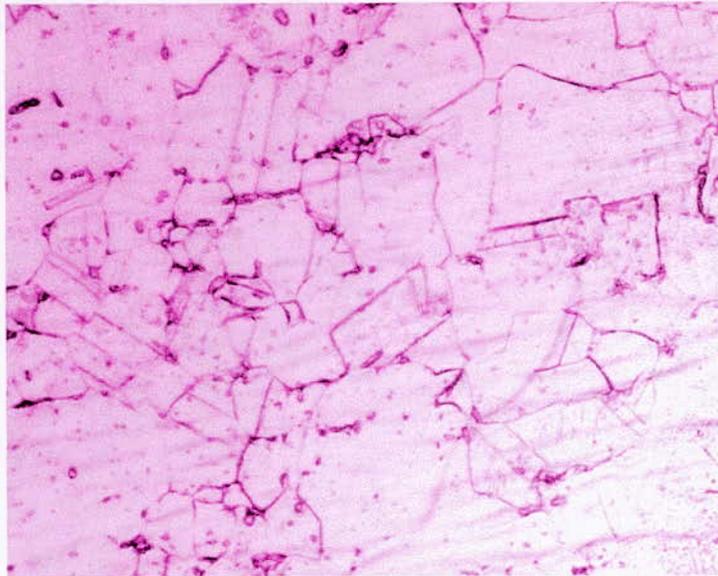


Figure 38 – ZAT X500

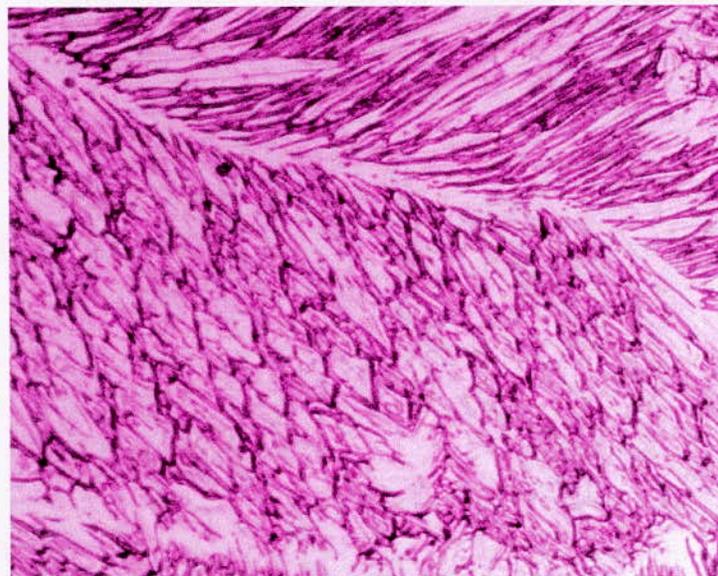


Figure 39 - Zone fondue X500

On voit avec clarté, sur cet échantillon la différence entre les trois zones. La zone fondue de structure dendritique, la ZAT avec une structure austénitique à gros grains où on a des précipités de carbures, et le métal de base avec sa structure austénitique avec une taille de grain inférieure à celle de la ZAT. Chaque zone est caractérisée par son propre cycle thermique.

✓ Echantillon de la tôle n°2 (304L)

On remarque que la différence entre la taille des grains de la ZAT et celle du métal de base sont assez proches, en ce qui concerne la zone fondue, c'est toujours la structure dendritique qui est mise en évidence.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

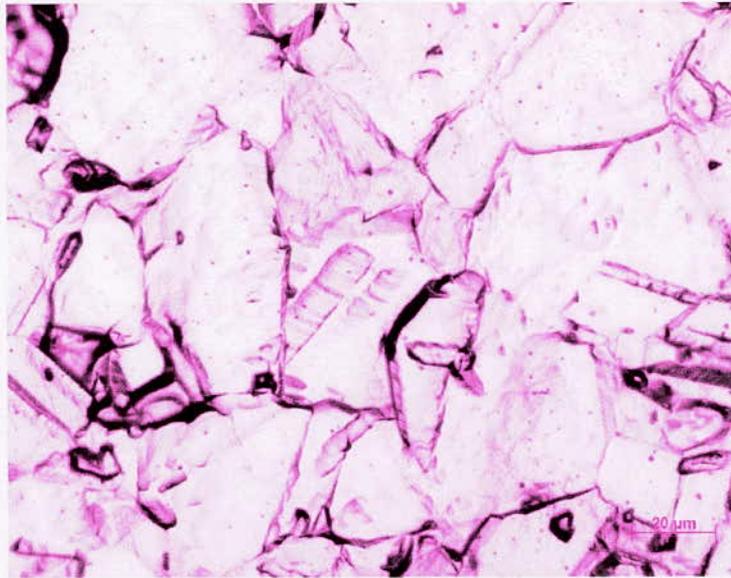


Figure 40 – Métal de base

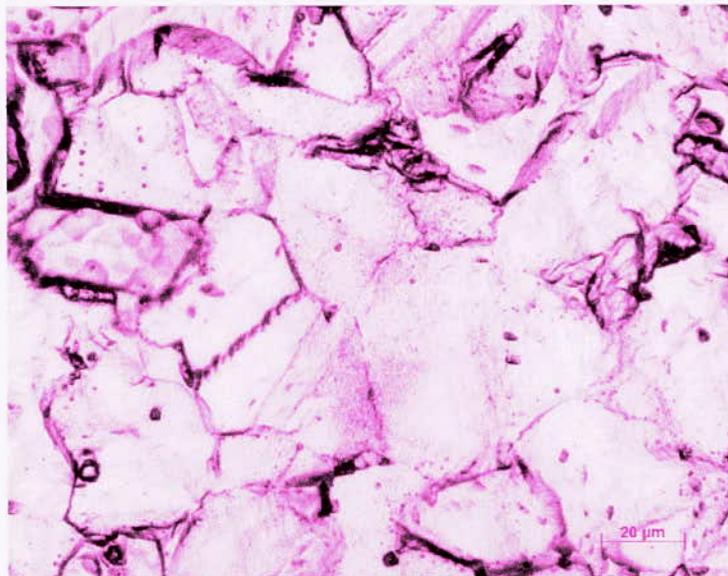


Figure 41 – ZAT

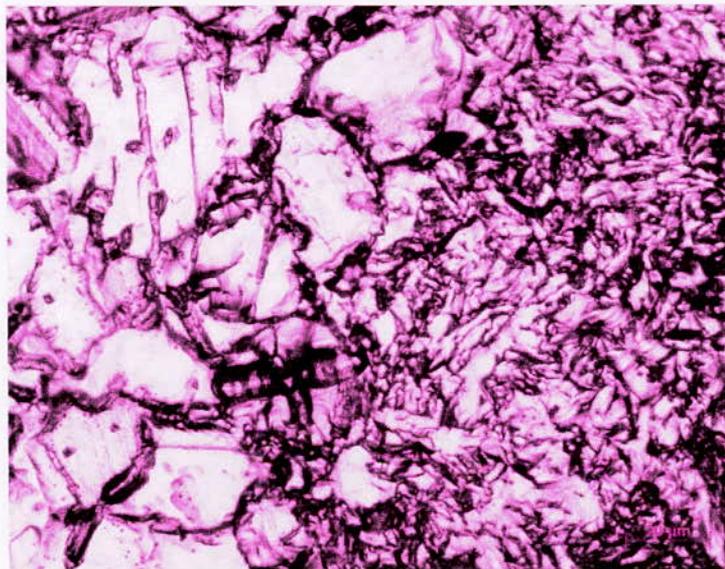


Figure 42 – Zone intermédiaire ZAT-Zone fondue

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans ce cas la structure austénitique de cet échantillon possède une taille de grain importante, ceci explique la difficulté qu'on a eu pour séparer entre la ZAT et le métal de base. Donc étant donnée que la taille initiale du grain est importante, le phénomène de recristallisation se produit à une échelle moindre.

✓ **Echantillon de la tôle n°3**

La structure initiale de notre produit est une structure ferritique, l'examen métallographique après soudure nous donne le résultat suivant:

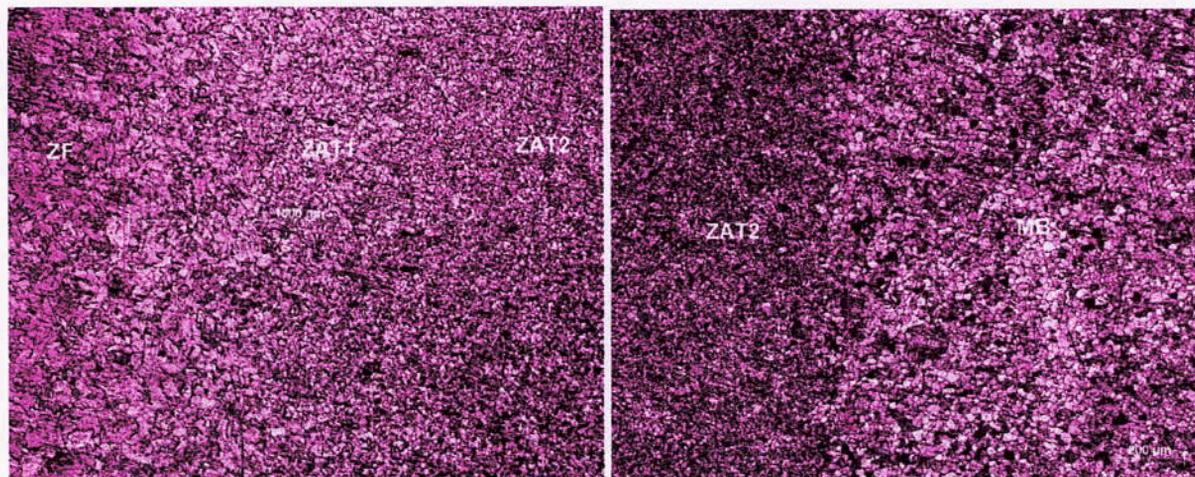


Figure 43 – Identification des différentes zones qui caractérise la soudure X50

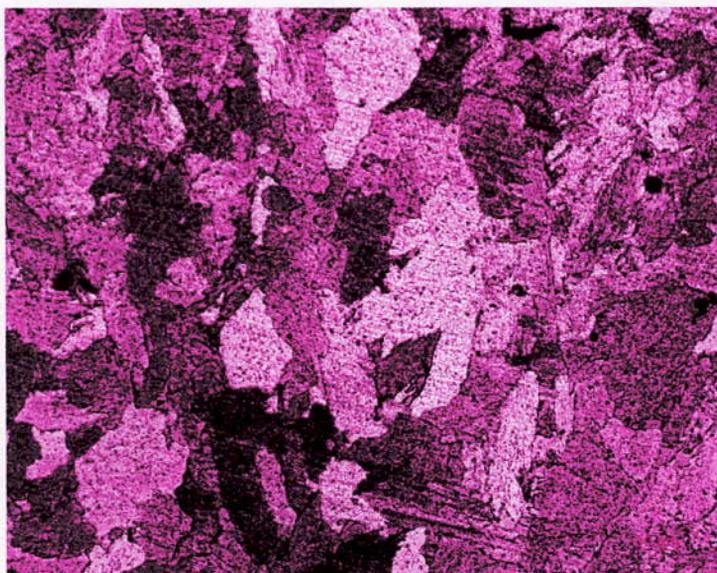


Figure 44 – Zone fondue X100

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

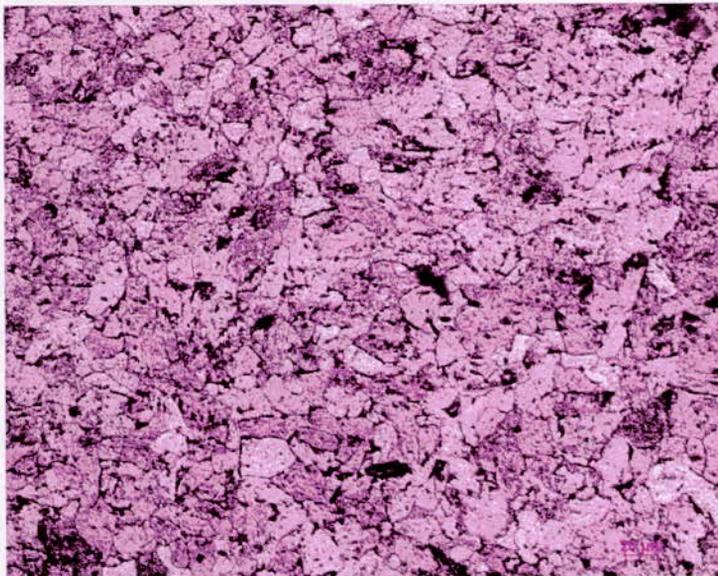


Figure 45 – première ZAT à gros grains X200

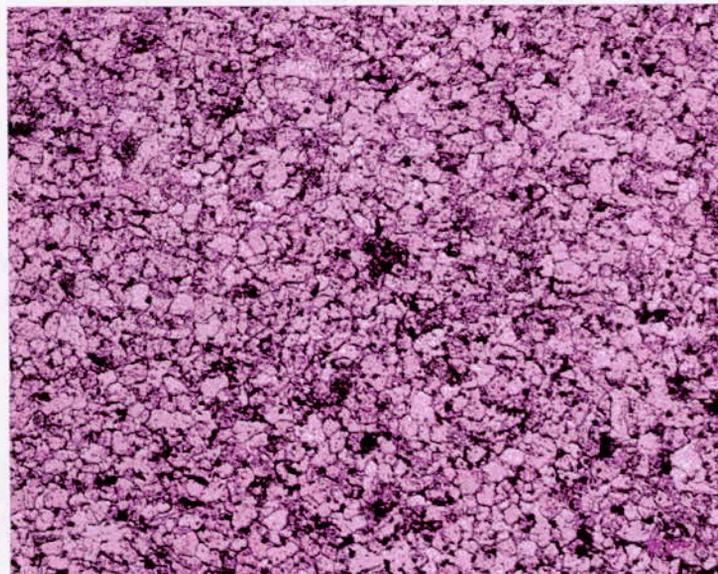


Figure 46 – Deuxième ZAT à grains fins X200

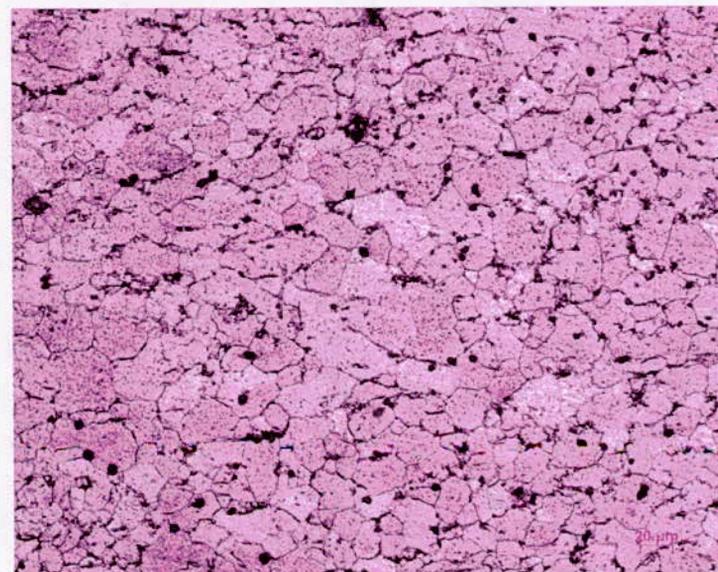


Figure 47 – Métal de base X200

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

D'après les micrographies observées, on peut tirer les conclusions suivantes:

- La zone fondue ayant une structure en éventail, et ceci est expliqué par le fait que la solidification se fait suivant le gradient de température, on peut aussi supposer que cette structure est le fer δ , car d'après les cycles thermiques, le refroidissement est très rapide.
- La structure de la première ZAT à gros grains obtenue par le phénomène de recristallisation secondaire, car le métal a atteint une température de transformation du palier eutectoïde du diagramme Fer-Carbone.
- La structure de la deuxième ZAT à grains fins est obtenue par le phénomène de recristallisation primaire où le matériau n'a pas atteint une température de changement de structure.
- Le métal de base a une structure ferritique avec des grains de grande taille.

III Propriétés mécaniques

III.1 Microdureté

On a effectué les microduretés Vickers avec une charge de 300gf sur les trois échantillons (celui pour la faisabilité, plaque2, et plaque3).

✓ Echantillon de faisabilité

Pour l'échantillon en acier inoxydable (304L) dessiné à l'étude de faisabilité, on obtient les résultats sur le tableau suivant:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
201.8	215.5	196.1	202.6	203.3	202.9	199.1	188.3	204.5	202.6	207.3	215.9
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
192.9	209.7	199.1	194.3	201.4	182.9	191.8	194.7	185.2	236.9	225.2	205.7
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
242.9	222.9	208.5	213.0	214.7	212.3	205.7	201.8	201.8	206.5	211.8	201.0
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
233.1	208.9	209.7	213.8	205.7	205.3	186.9	196.9	219.4	228.8	202.2	223.4
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
216.4	199.6	221.6	229.3	207.3	214.3	203.3	206.1	219.8	183.9	196.9	179.9
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
195.8	183.2	189.0	199.1	163.9	180.6	194.7	190.7	195.4	178.3	190.7	182.2
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
203.3	207.3	192.5	213.8	197.3	209.3	214.3	206.9	196.9	213.8	184.9	215.1
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
206.5	208.1	200.3	194.3	196.5	194.0	194.3	151.2	185.2	195.0	192.5	187.6
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
190.4	188.3	197.3	210.1	195.0	201.4	202.6	201.4	204.1	213.0	198.4	192.2

Tableau 9 - Résultats des essais de microduretés sur échantillon en acier inoxydable 304L selon les positions avec un pas de 100 μ m jusqu'à la position 89, et 200 μ m à partir de la position 90.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

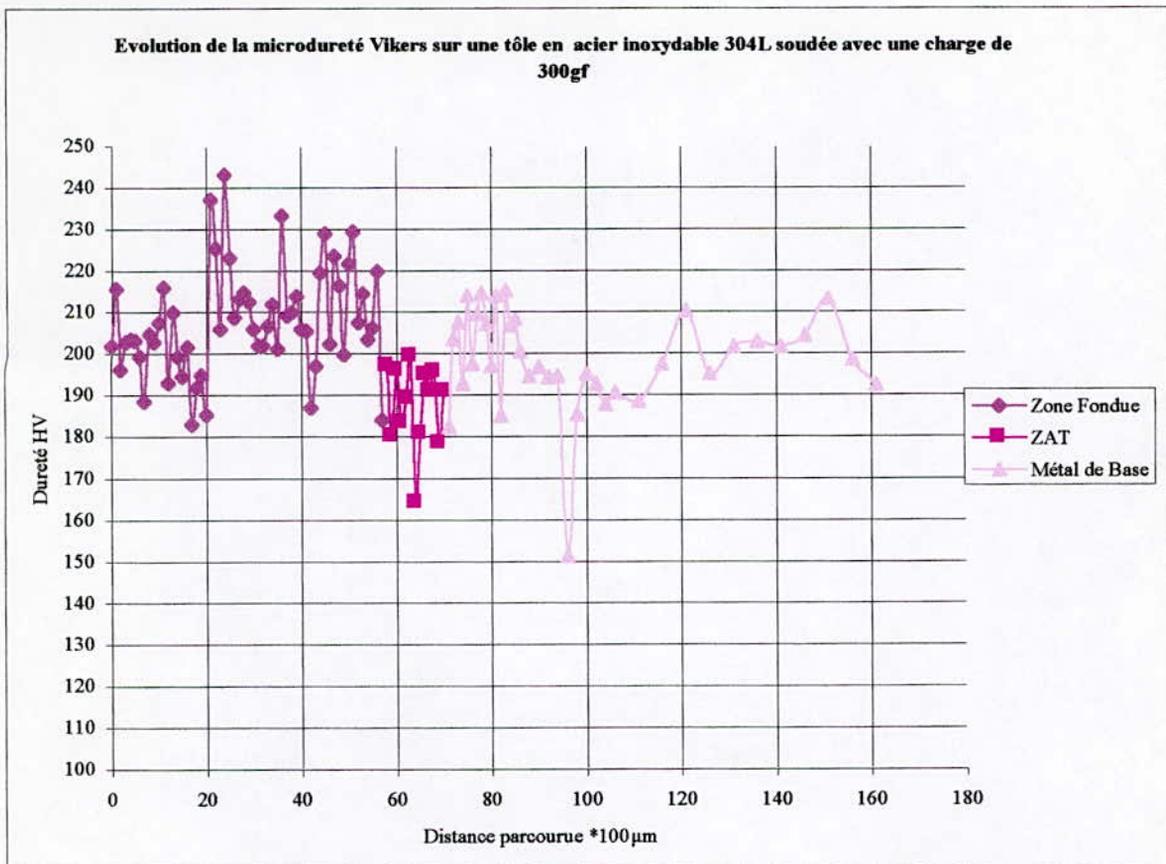


Figure 47 – Evolution de la microdureté selon les trois zones du soudage

Ce graphe montre que dans l'ensemble l'évolution de la dureté suit les moyennes des microduretés calculées pour chaque zone:

Métal fondu (entre 1 et 60): 206.92

ZAT (entre 61 et 73): 188.22

Métal de base (entre 74 et 108): 198.22

Donc on voit clairement que la zone la plus dure est la zone fondue, chose qui était prévisible car la structure dendritique, car elle a subi une trempe d'une température supérieure à la température de fusion jusqu'à la température ambiante. La ZAT est la moins dure, ça structure est grossière elle est

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

due à la recristallisation primaire, et donc la résistance à la pénétration est moindre. Le métal de base ayant une structure avec des tailles de grains moins importantes donne lieu à une dureté plus importante que celle de la ZAT.

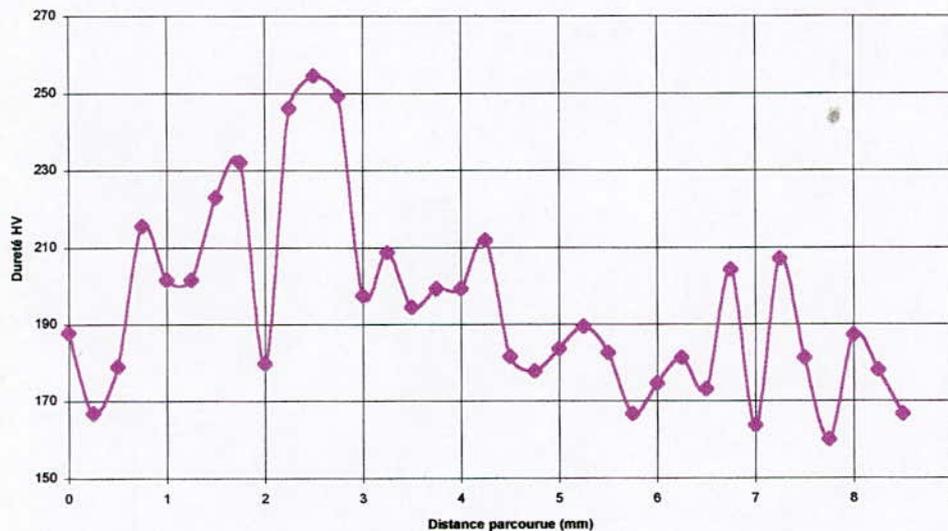
✓ Echantillon de la plaque n°2

Les résultats des essais de microdureté sur l'échantillon n°2 en acier inoxydable 304L sont sur le tableau suivant:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
187,6	166,8	178,9	215,5	201,4	201,4	222,9	232,1	179,6	246,0	254,5	249,1
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
197,3	208,5	194,3	199,1	199,1	211,8	181,5	177,7	183,5	189,3	182,5	166,5
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
174,5	181,2	173,0	204,1	163,6	206,9	181,2	160,0	187,2	178,0	166,5	

Tableau 10 - Résultats des essais de microduretés sur échantillon en acier inoxydable 304L de la tôle n°2 avec un pas de 250µm

Evolution de la microdureté sur échantillon de la tôle2 (304L)



Evolution de la microdureté sur échantillon de la tôle2 (304L)



Figure 48 – Evolution de la micro dureté sur la tôle n°2 (304L)

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Le graphe ci dessus peut nous fixer sur les différentes zones, si on essaye de situer les trois zones caractéristiques du soudage on peut dire que: la ZAT est située entre les points à 4,5 et 6mm, chose qui peut être vérifiée par les cycles thermiques équivalents où on a obtenu des températures de l'ordre de 700 à 800°C. Les valeurs de la microdureté sont très proches entre la ZAT et le métal de base, et ceci est dû au rapprochement des grandeurs des tailles des grains, comme nous avons vu par examen métallographique.

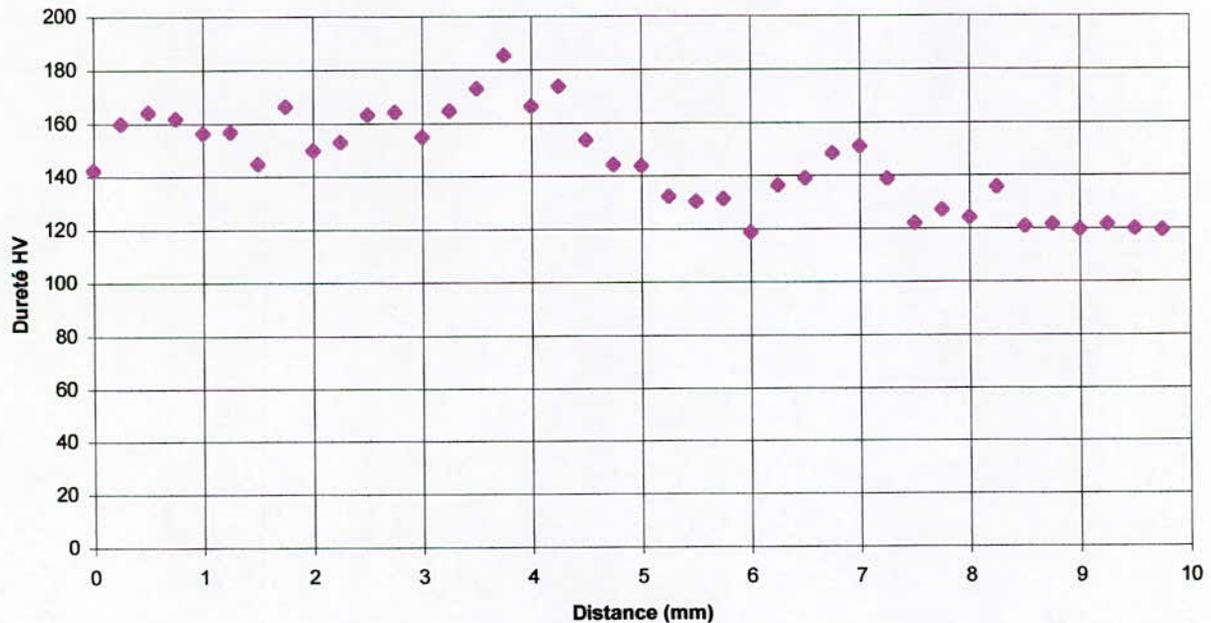
✓ Echantillon de la plaque n°3 (Acier au carbone)

Les résultats des microduretés sur la plaque n°3 en acier au carbone donne les résultats qui sont sur le tableau suivant:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
142.1	159.8	164.2	161.7	156.3	156.6	144.7	166.2	149.9	152.9
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
163.1	164.2	154.7	164.5	173	185.2	166.2	173.6	153.7	144
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
143.7	132.2	130.4	131.2	118.7	136.2	138.8	148.5	150.9	138.6
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
121.9	127.1	124.1	135.6	120.8	121.5	119.6	121.5	119.9	119.4

Tableau 11 - Résultats des essais de microduretés sur échantillon en acier au carbone de la tôle n°3 avec un pas de 250µm

Evolution de la microdureté sur échantillon de la tole n°3 (Acier au carbone)



RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Moyenne de la microdureté sur échantillon de la tôle n°3 (Acier au carbone)

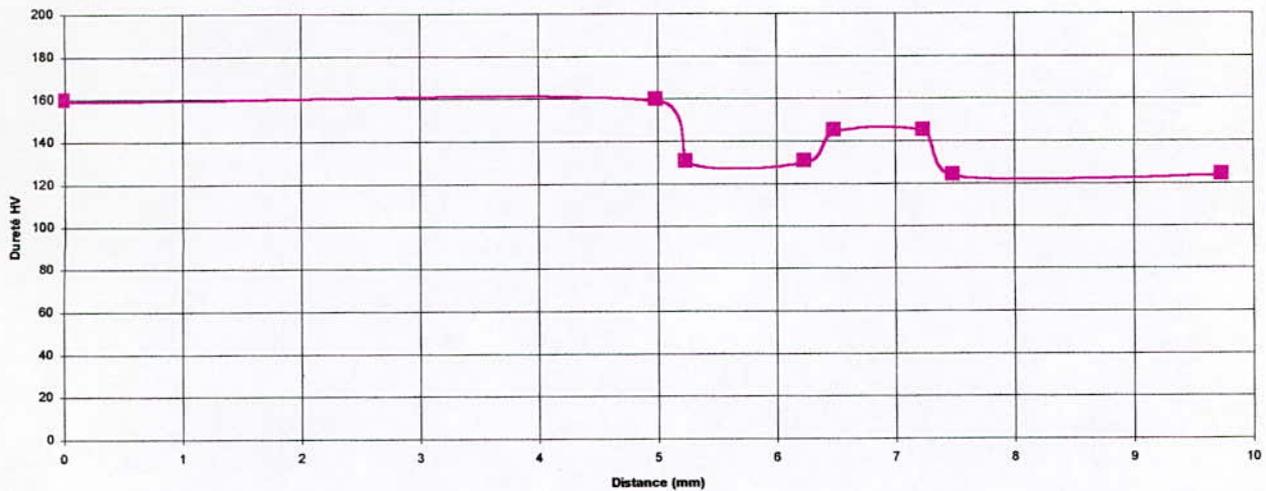


Figure 49 – Evolution de la micro dureté sur la tôle n° (Acier au carbone)

En partant des résultats de microdureté, on voit clairement que la dureté diminue puis augmente puis diminue, et d'après l'examen métallographique, on pouvait s'attendre à ce résultat. Sur ce graphe on voit que la dureté diminue aux alentours de 5mm il y'a une diminution de la dureté, ceci est expliqué par la structura à gros grains de la première ZAT qui a une épaisseur de l'ordre de 1mm, à partir de 6,25 jusqu'à 7.25 on remarque que la structure est plus dure, car la taille des grains est petite.

III.2 Dureté

Les essais de duretés on tous été faits avec une charge de 5kgf, et un pas entre deux prises de dureté de 500µm.

✓ Echantillon de faisabilité

Les résultats des essais de dureté Vickers pour le l'acier inoxydable (304L), avec une charge de 5Kgf ont donné les résultats qui sont sur le tableau suivant:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
182	184	180	188	203	184	182	188	186	171
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
176	188	173	175	188	189	187	191	183	187
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
183	185	186	175	185	182	183	181	175	175
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
178	179	182	184	176	186	179	183	189	185

Tableau 12 - Résultats des essais de duretés avec un pas de 0,5mm sur échantillon en acier inoxydable 304L

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

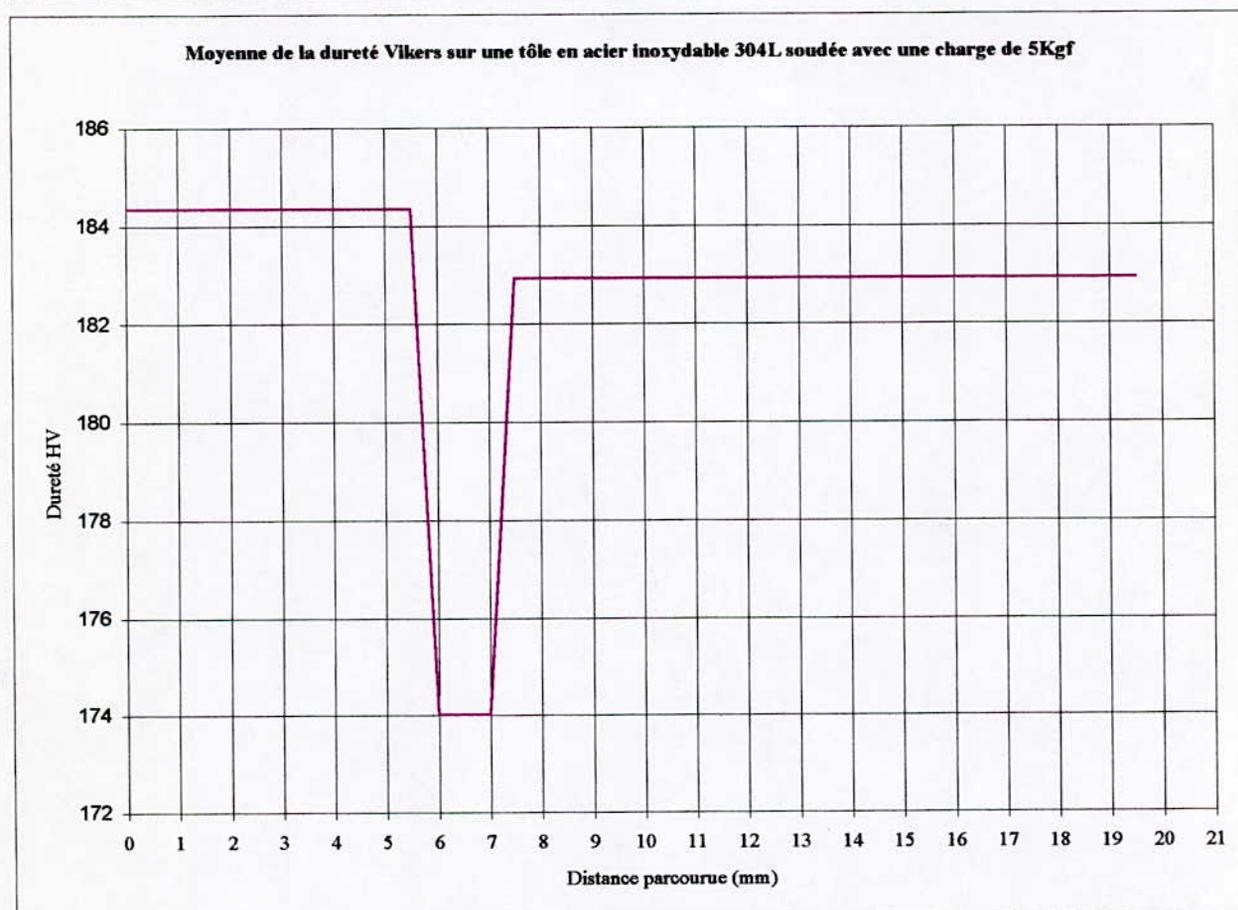
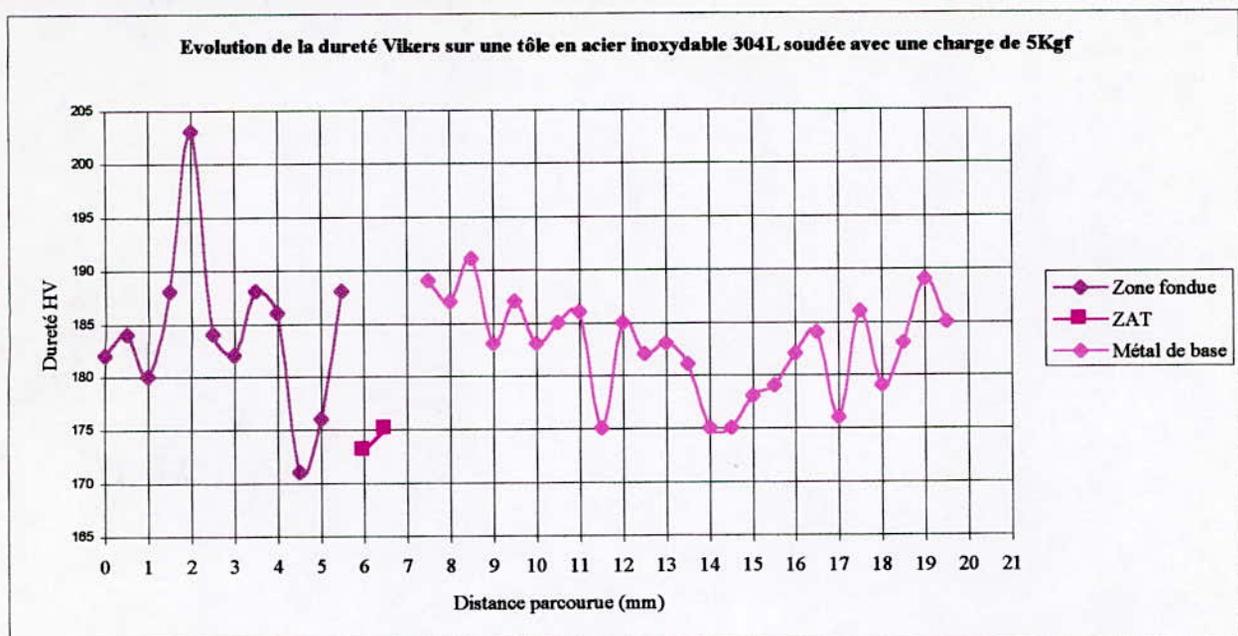


Figure 50 - Evolution de la dureté selon les trois zones du soudage

Moyenne des duretés:

Métal fondu (entre 1 et 12): 184.33

ZAT (entre 13 et 14): 174

Métal de base (entre 15 et 40): 182.92

Ces résultats sont logique et suivent ceux de la microdureté.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

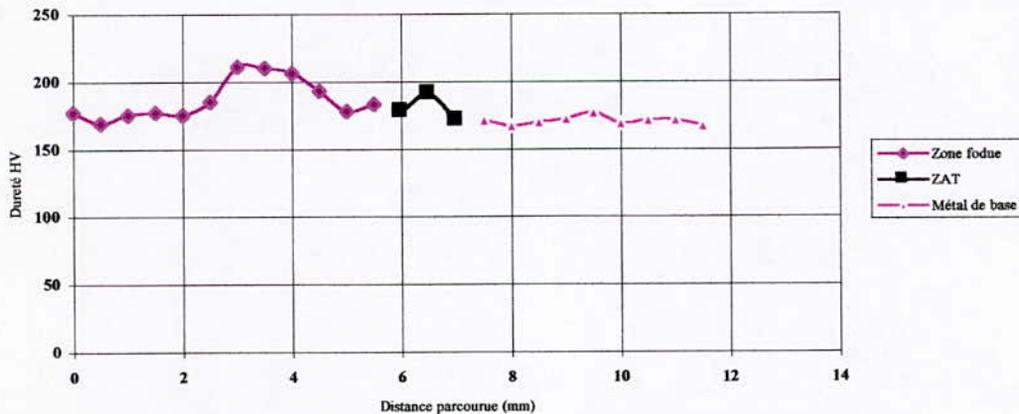
✓ Echantillon de la plaque n°2

Les résultats sont sur le tableau suivant:

1	2	3	4	5	6	7	8
177	169	175	177	175	185	211	210
9	10	11	12	13	14	15	16
206	193	178	183	178	191	171	171
17	18	19	20	21	22	23	24
167	170	172	177	169	171	171	167

Tableau 13: Résultats des essais de duretés sur avec un pas de 0,5mm sur échantillon en acier inoxydable 304L de la tôle n°2

Evolution de la dureté Vikers sur une tôle en acier inoxydable 304L soudée avec une charge de 5Kgf



Moyenne de la dureté Vikers sur une tôle en acier inoxydable 304L soudée avec une charge de 5Kgf

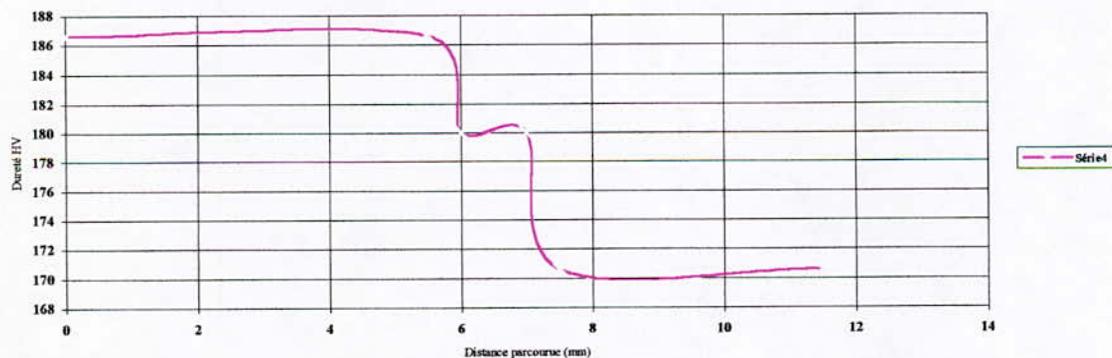


Figure 51 – Evolution de la dureté selon les trois zones du soudage pour la tôle n°2

On peut remarquer que les duretés moyennes sont comme suit:

Zone fondue: 186.58

ZAT: 180

Métal de base: 170.55

Pour la zone fondue, c'est la même chose que l'échantillon précédent. Pour le cas des deux autres zones (ZAT, métal de base) les duretés sont assez proches, chose qui était prévisible vu leurs structures proches à l'examen métallographique, et les résultats de la microdureté.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

✓ Echantillon de la plaque n°3

Les résultats des essais de dureté sont comme suit:

1	2	3	4	5	6	7	8
135	158	142	133	141	156	161	179
9	10	11	12	13	14	15	16
164	140	126	123	116	134	138	118
17	18	19	20	21	22	23	24
125	109	111	113	113	110	109	108

Tableau 14 - Résultats des essais de duretés avec un pas de 0,5mm sur l'échantillon n°3 en acier au carbone

Les moyennes des duretés dans chaque zone sont:

Zone fondue: 150.9

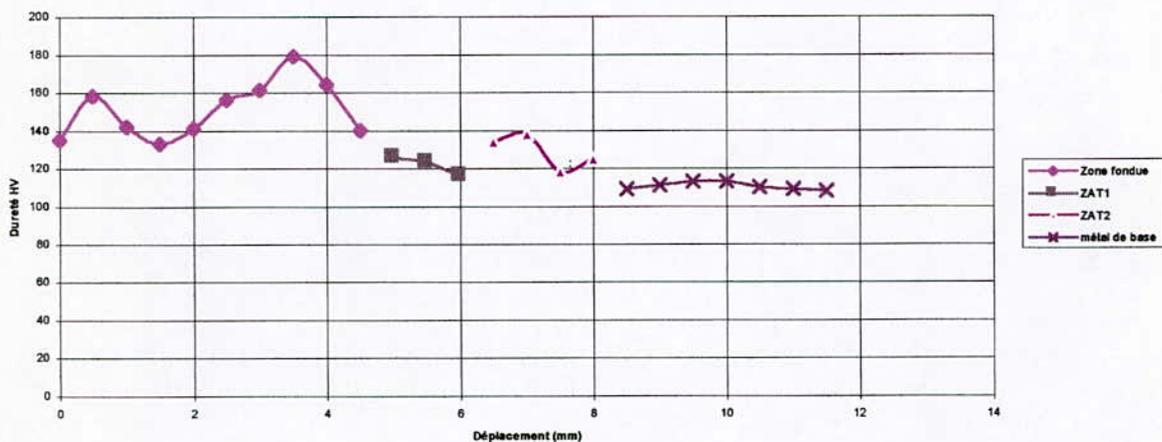
ZAT 1: 121.77

ZAT 2: 128.75

Métal de base: 110.43

Ces données sont logiques, si on voit bien les structures de chaque zone, puisque la granulométrie la plus importante donne la dureté la plus basse.

Résultats des essais de duretés avec un pas de 0,5mm sur l'échantillon n°3 en acier



Moyennes des essais de duretés sur l'échantillon n°3 en acier

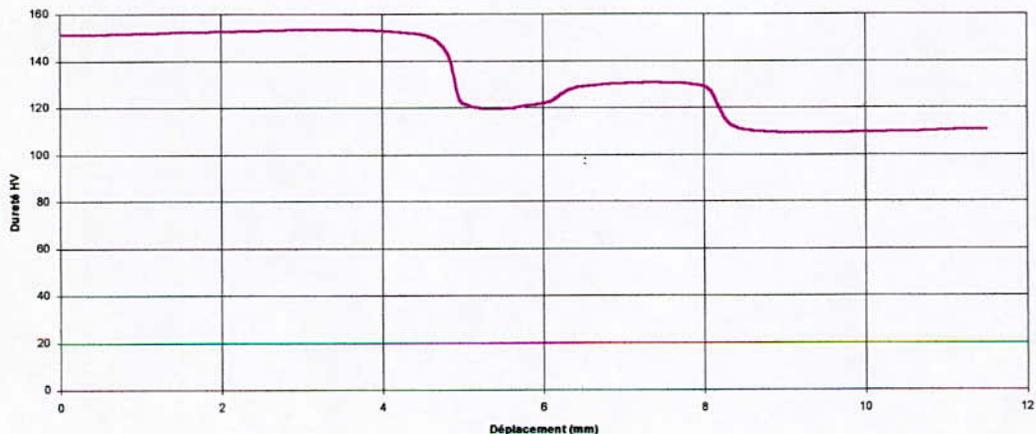


Figure 52 – Evolution de la dureté selon les zones du soudage pour la tôle n°3

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.3 Essais de traction:

Les essais de traction ont donné les résultats suivants:

Acier inoxydable 304L

Le tableau ci-dessous, nous donne les différentes données obtenues à partir des essais de traction:

N°	Type de l'éprouvette	Charge maximale (kN)	Extension à la rupture (mm)	Module de Young (MPa)	Contrainte maximale (MPa)	Déformation à la rupture (%)
20	Sans soudure	37.74	95.47	19872	638.54	86.01
01	Soudée pour faisabilité	24.03	46.35	7684.21	406.16	41.38
02	Soudée pour faisabilité	22.96	40.78	14845.61	379.46	36.09
21	Soudée avec cycles thermiques	22.18	12.69	19099	389.58	10.15
22	Soudée avec cycles thermiques	24.14	14.99	22403	409.94	11.94

Tableau 15 – Caractéristiques mécaniques obtenues à partir de l'essai de traction

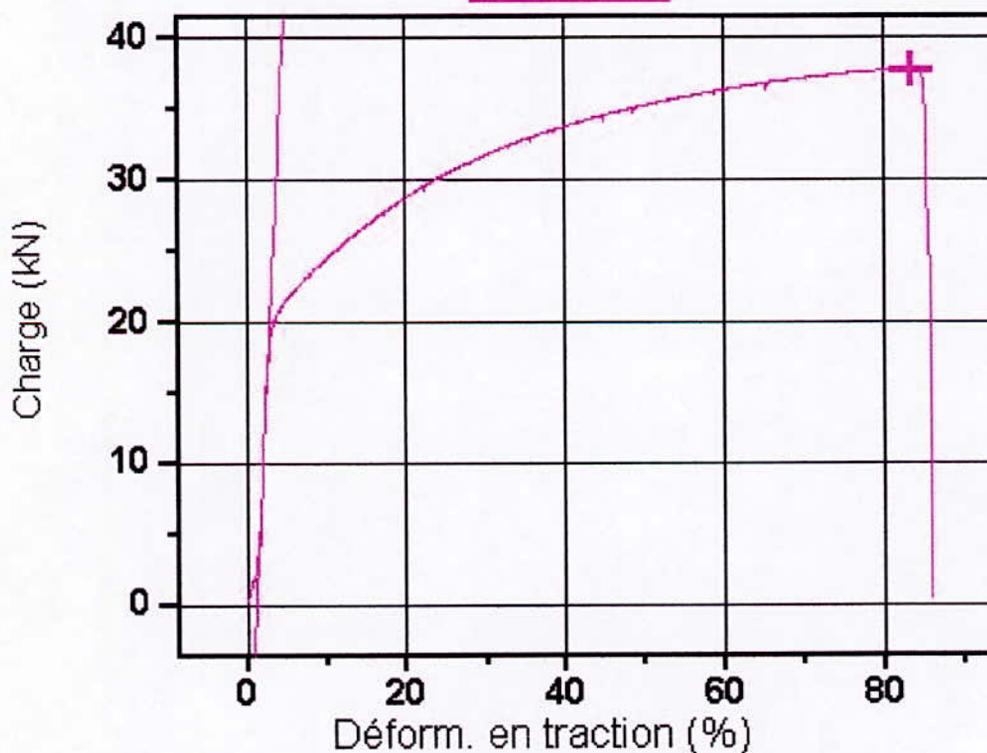


Figure 53 – Courbe de traction de l'éprouvette n°20

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

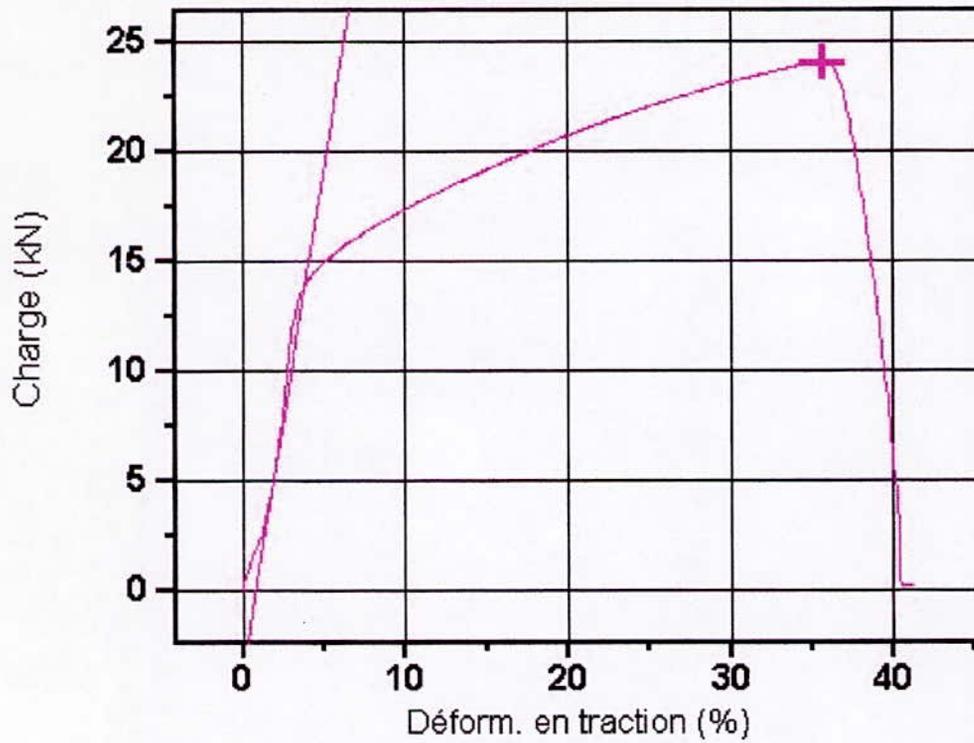


Figure 54 – Courbe de traction de l'éprouvette n°01

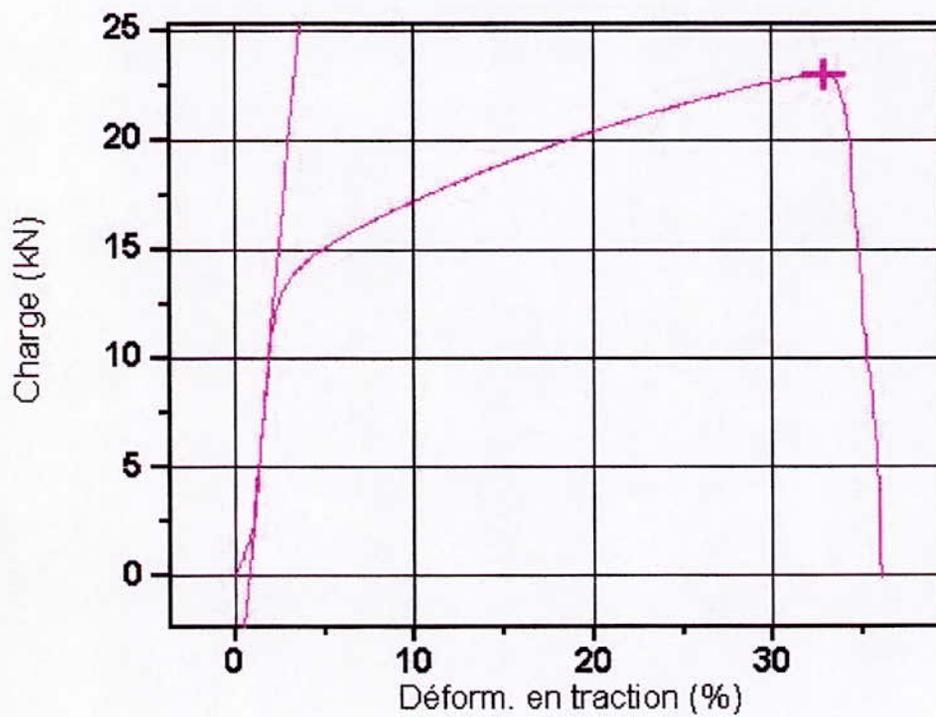


Figure 55 – Courbe de traction de l'éprouvette n°02

RESULTATS ET INTERPRETATIONS



Figure 56 – Courbe de traction de l'éprouvette n°21



Figure 57 – Courbe de traction de l'éprouvette n°22

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Acier au carbone

Le tableau ci-dessous, nous donne les différentes données obtenues à partir des essais de traction:

N°	Type de l'éprouvette	Charge maximale (kN)	Extension à la rupture (mm)	Module de Young (MPa)	Contrainte maximale (MPa)	Déformation à la rupture (%)
10	Sans soudure	18.61	45.79	20295	333	32.59
11	Soudée, tôle n°3	16.86	20.61	23110	314.36	14.72
14	Soudée, tôle n°3	18.34	48.30	23911	328.34	33.20

Tableau 16 – Caractéristiques mécaniques obtenues à partir de l'essai de traction

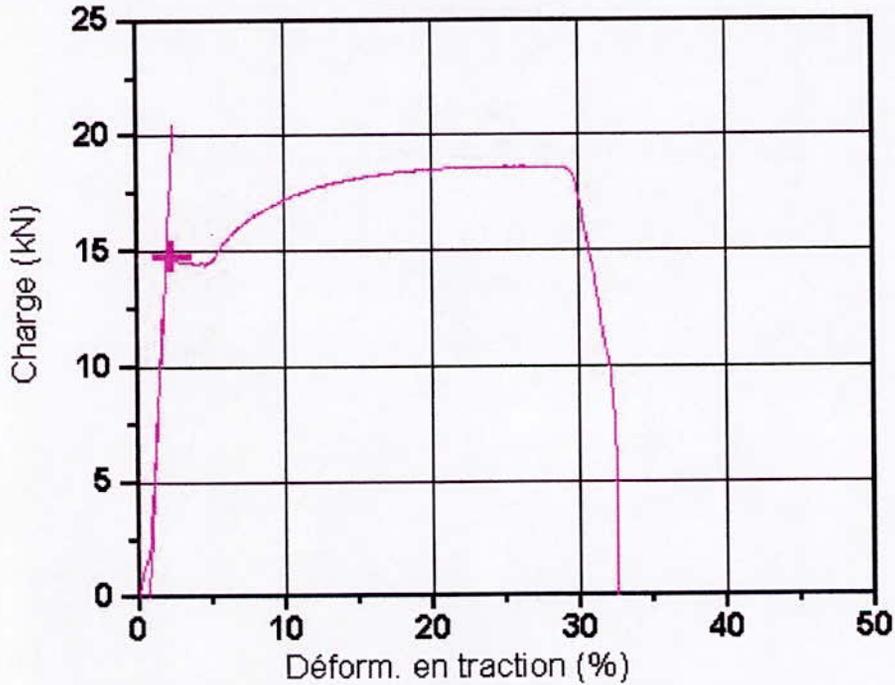


Figure 58 – Courbe de traction de l'éprouvette n°10

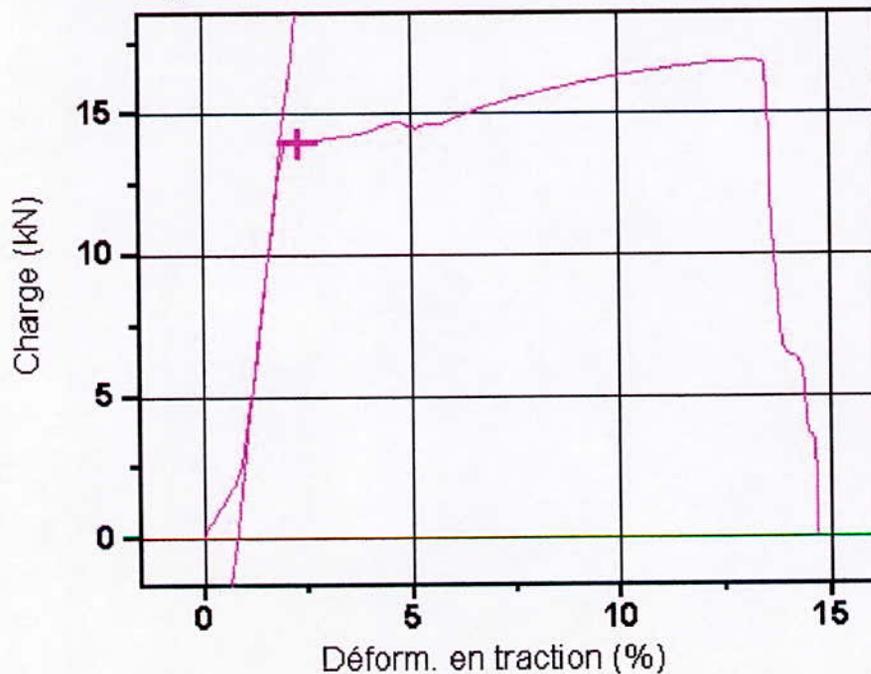


Figure 59 – Courbe de traction de l'éprouvette n°11

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

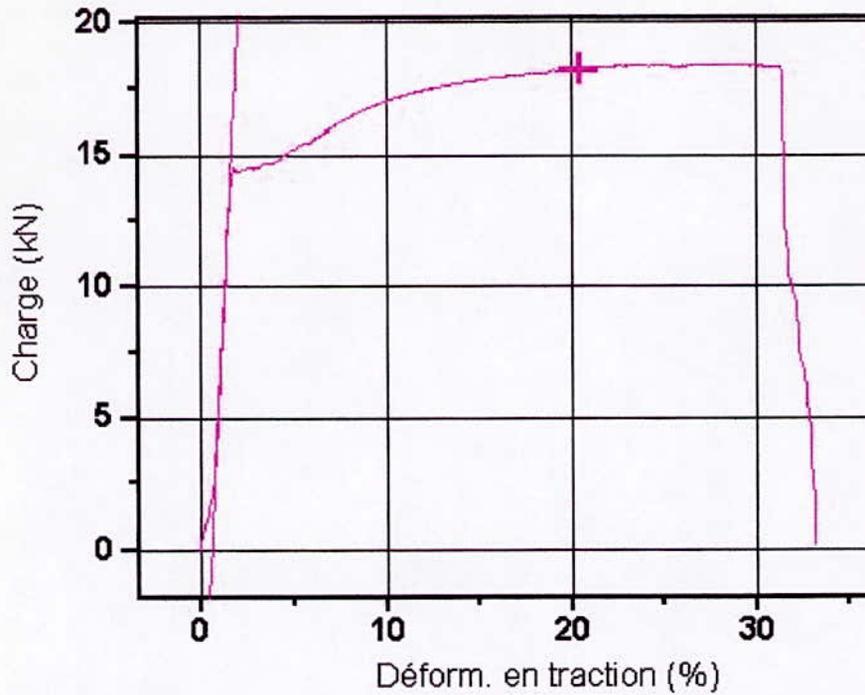


Figure 60 – Courbe de traction de l'éprouvette n°14

D'après ces données on remarque que la soudure diminue l'extension du métal et le rend moins résistant à la traction, il est aussi important de noter que la qualité de la soudure est très importante pour avoir des pertes moindres au niveau des propriétés mécaniques, car dans notre études on a remarqué que les soudures des éprouvettes 23, et 24 étaient moins bonnes que celles des éprouvettes 21 et 22. Quelques fois, comme c'est le cas pour l'éprouvette 14 on a des caractéristiques mécaniques qui égale celles du métal non soudé, et c'est là l'importance de la qualité de la soudure. En général la zone la plus fragile est la zone affectée thermiquement et c'est autour de cette zone que la rupture se passe.

CONCLUSION GENERALE

D'après les résultats obtenus au cours de cette étude, on a pu identifier les différentes structures engendrées par un soudage TIG dans le cas des tôles en acier inoxydable austénitique (304L), et les caractéristiques mécaniques qui sont liées à la morphologie de ces zones.

La zone affectée thermiquement (ZAT) est la zone la plus fragile d'un assemblage soudée, sa structure est généralement grossière, la dureté est faible, et c'est là que les ruptures peuvent se faire lorsque la soudure est soumise à une traction.

On peut aussi dire que la structure de chaque zone dépend de son cycle thermique.

La qualité du soudage a un effet important sur les dimensions des ZAT et des propriétés engendrés par l'apport de température.

L'étude des cycles thermique nous a permis de vérifier l'état quasi-stationnaire.

Le dispositif de capture des cycles thermiques étant limité, on pourrait améliorer ce dispositif en essayant d'arriver à capter l'évolution de la température dans chaque point avec plus de précision.

•

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Michel COLOMBIE ET COLL – Matériaux industriels: Matériaux métalliques - Dunod - 2000.
- [2] Bertrand LE BOURGEOIS – Soudage à l'arc Tome3 : Procédés avec fil fusible Procédés avec électrode réfractaire – Eyrolles – 1989.
- [3] <http://www.couteaux.free.fr>
- [4] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR - M 4 540 - Aciers inoxydables. Critères de choix et structure.
- [5] V. RYBAKOV – Le soudage et le coupage des métaux – Mir – 1980.
- [6] R. VARAISSELLAZ – Soudage Eléments de conception et de réalisation – Dunod – 1987.
- [7] <http://www.chez.com/soudage2000>
- [8] <http://plg.chez.tiscali.fr/procede%20tig.htm>
- [9] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR – M 7 730 - Roland CAZES – Soudage à l'arc.
- [10] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR – R 2 831 - Pierre THUREAU - Introduction aux transferts thermiques.
- [11] Guy DAVID – Les aciers inoxydables – Lavoisier TEC & DOC – 1990
- [12] H. GRANJON - Bases métallurgiques du soudage – 5^e édition – Eyrolles - 1989
- [13] J. BENARD A.MICHEL – Métallurgie générale – 2^e édition – Masson – 1990
- [14] Métallographie et techniques d'analyse – Pyc livres - 1998