

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Sc
Oientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



Thème

*Comportement mécanique des soudures par point de
tôle en acier à effet TRIP*

mémoire de fin de cycle

Présenté et soutenu publiquement le 13 Novembre 2014
En vue de l'obtention
du diplôme de **Master Académique en Génie Mécanique**
Option : **Comportement et mise en forme des matériaux**
Par
HOCEINI ELYAZID

Devant le jury composé de :

**FERHOUM
SEGHIR
OULD OUALI
FILALI
SALHI**

**RABAH
MUSTAPHA
MOHAND
SAID
AHMED**

**Président
Directeur de mémoire
Co-encadreur
Examineur
Examineur**

Promotion 2013/2014

Remerciements

Je remercie tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné la force, la volonté et la patience pour l'élaboration de mon travail.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Tout particulièrement OULD OUALI Mouhand mon promoteur pour sa disponibilité, ses conseils et son suivi.

Je remercie également Monsieur SEGHIR Mustapha de m'avoir donné le courage et le soutien moral durant la préparation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi en particulier aux personnels de Hall de technologie de Oued Aissi qui m'ont aussi aidé en me donnant des informations cruciales.

Je suis également reconnaissant aux personnels de la bibliothèque de Génie Mécanique pour leur aide.

Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner et de critiquer ce modeste travail.

Je remercie énormément tous mes enseignants, qui m'ont permis et nous permettent constamment d'apprendre et de mettre en pratique tous nos acquis théoriques et de m'ouvrir sur le monde professionnel.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*À ma chère mère et très cher père, à qui je souhaite une
longue vie, eux qui m'ont beaucoup aidé dans mes
études.*

*À mes chers frères et sœurs à qui je leur souhaite la
réussite dans leurs études et la vie.*

Liste des tableaux

Chapitre II : Techniques expérimentales

Tableau II.1 Caractéristique chimique de l'acier AISI304L.....	25
Tableau II.2 Caractéristiques mécaniques de l'inox AISI304L.....	26

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.1 Les caractéristiques mécaniques de matériau dans la direction de laminage.	38
Tableau III.2 les caractéristiques mécaniques de matériau à 45° direction de laminage....	39
Tableau III.3 les caractéristiques mécaniques de matériau à 90° direction de laminage....	39
Tableau III.4 caractéristiques mécaniques du point soudé en traction cisaillement.....	42
Tableau III.5 caractéristiques mécaniques du point soudé en pelage.....	43
Tableau III.6 caractéristiques mécaniques de point soudé en traction en U.....	44
Tableau III.7 caractéristiques mécaniques de point soudé en traction en croix.....	45
Tableau III.8 paramètres de soudage de l'éprouvette en U.....	45
Tableau III.9 .Résultats de l'essai de dureté sur le point soudé.....	49

Liste des tableaux

Chapitre II : Techniques expérimentales

Liste Des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II : Techniques expérimentales

Chapitre II : Méthodes expérimentales

Liste des figures

Chapitre I : synthèse bibliographique

Figure I.1.Structures Austénitique	2
Figure I.2. Représentation de l'emboutissabilité en fonction de la résistance des aciers a) laminés à chaud b) laminés à froid.....	5
Figure I.3: Les aciers TRIP dans le diagramme Résistance – Ductilité	6
Figure I.4: changement de forme associer a transformation martensitique.....	8
Figure. I.5: changement de structure cristalline de l'austénite γ en martensite α' dans le les aciers à effet TRIP	9
Figure I.6 : Orientation des plaquettes de martensite lors d'une transformation martensitique sous contrainte (effet Magee), ϵ_0^{pt} est la plasticité de transformation.....	10
Figure .I.7 : Accommodation anisotrope de l'écoulement plastique local-comparaison entre transformation avec et sans contrainte appliquée (effet Greenwood Johnson) [3].....	11
Figure I.8. Schémas de principe du soudage par points [8].....	13
Figure. I.9: Section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm : TH6.....	15
Figure.I.10 : Les différentes phases d'un cycle de soudage.....	17
Figure I.11 : Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues.....	18
Figure I.12: Différentes zones métallurgiques et la géométrie d'un point soudé en cas d'un assemblage de trois tôles	21
Figure I.13 : Position des points de soudure sur une caisse en blanc automobile.....	22

Chapitre II : Méthodes expérimentales

Figure II.1 Epreuve de traction métal de base.....	24
Figure II.2. Épreuve en croix.....	25
Figure II.3.Epreuve droit.....	25
Figure II.4 Epreuve en H.....	26
Figure II.5 Epreuve en double L.....	26
Figure II.6: dispositif pour l'essai de traction pour l'épreuve croix.....	27
Figure II.7 principe de l'essai de traction en U.....	28
Figure II. .8. polisseuse à deux disques.....	30
Figure II 9. Polisseuse mono plateau pour la finition.....	31
Figure II.10 Microscope optique.....	32
Figure II.1 principe de dureté Vickers.....	32

Chapitre III : Résultats et discussions

Fig. III.1. Courbe de traction à 0° direction de laminage.....	36
Fig. III.2. Courbe de traction à 45° direction de laminage.....	37
Fig. III.3. Courbe de traction à 90° direction de laminage.....	38
Fig. III.4. Superposition des courbes de traction à trois directions de laminage (0° ,45° ,90°).....	39
Fig. III.5: Micrographie optique de l'acier Inox 304L à l'état initiale.....	40
Fig. III.6: Micrographie optique de l'acier Inox X2CrNi18-9 après déformation.....	40
Fig. III.7. Courbe de traction-cisaillement.....	41
Fig. III .8. Courbe de comportement mécanique en pelage.....	42
Fig. III .9. Courbe de traction en U.....	43
Fig. III .10. Courbe de traction en croix.....	44
Fig. III .11. Courbe de traction de l'éprouvette 1.....	45
Fig. III .12. Courbe de traction de l'éprouvette 2.....	46
Fig. III .13. Microstructure de point soudé.....	47
Fig. III .13 .Faciès de rupture de métal de base.....	49
Fig. III.14. Observation microscopique à balayage de point soudé avec différents agrandissements.....	50

Liste des symboles

TRIP: transformation induced plasticity;

Mn: manganèse ;

Cr: chrome ;

Ni: le nickel ;

Mo: le molybdène ;

Fe₃C: cémentite ou carbure de fer ;

R_m: la résistance maximale ;

H_v: la dureté Vickers ;

F: Ferrite ;

A: Austénite;

B: Bainite;

M: Martensite;

A : allongement [%]

I : intensité [A]

CC : cubique centrée

CFC : cubique a face centrée

MB : métal de base ;

ZF : zone fondue

ZAT : zone affectée thermique

K : température en kelvin

T_f: température de fusion

σ: contrainte

ε : déformation

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Introduction	02
I.1 Généralités sur les aciers.....	02
I.1.1. Définition de l'acier	02
I.1.2. Structure des aciers	02
I.2. les aciers THR.....	04
I.2.1 Les aciers Dual phase.....	06
I.2.2 Les aciers Multiphase.....	06
I.2.3 Les aciers Ferrite- Bainite.....	06
I.2.4 Les aciers TRIP.....	06
I.3. Les aciers à effet TRIP.....	06
I.3.1 Présentation de l'acier TRIP	06
I.3.2 Etude microscopique de l'effet TRIP dans les aciers.....	07
I.3.3 Etude macroscopique de l'effet TRIP dans les aciers.....	09
I.4. Le soudage par point.....	11
I.4.1 Introduction au soudage par points.....	12
I.4.2 Principe de soudage par point.....	12
I.4.3 Paramètres du Procédé	13
I.4.4 Déroulement du cycle de soudage.....	16
I.4.5 Mécanisme de formation de la soudure.....	18
I.4.6 Microstructure d'un point soudé.....	20
I.4.6 Comportement mécanique des points soudés en aciers (THR).....	22
I.4.7 Conclusion.....	

Chapitre II : Synthèse bibliographique

Introduction	25
II.1 : Caractéristiques de l'acier 304L	25
II.1.1 : Composition chimique.....	25
II.1.2 : Les caractéristiques mécaniques.....	26
II.2 Caractérisation mécanique	26
II.2.1 Géométries des éprouvettes.....	26
II.2.2.Dispositifs expérimentaux.....	28
a)Dispositif 1(essai de traction en croix).....	29
b) Dispositif 2(essai de traction en U).....	30
II.3 . Machine de traction.....	30
II.4 Condition de déroulement des essais mécaniques.....	31
II.5.Analyse microstructural	31
II.5.1. Préparation des échantillons	31
a)1er polissage	31
b) 2eme polissage (polissage de finition)	31
c)Finissage.....	32
II.5.2. Procédure d'attaque	32
II.5.3 observation microscopique	33
II.5.3.1. Microscope optique.....	33
II.6. Essai de dureté	34
II.6.1. Principe de la dureté Vickers.....	34

Chapitre III : Résultats et discussions

Introduction.....	36
III.1 Résultats de caractérisation mécanique de métal de base.....	36
III.1.1 Comportement mécanique en traction.....	37
III.1.1.1.Comportement à 0° direction de laminage.....	37
III.1.1.2. Comportement à 45° direction de laminage.....	38
III.1.1.3. à 90° direction de laminage.....	39
III.1.1.4.Comparaison des résultats.....	40
III.2. Résultats de caractérisation microstructural de métal de base.....	40

III.2.1. Etat initial	41
III.2.1. Après rupture.....	41
III.4. Comportement mécanique des assemblages soudés.....	42
III.4.1. comportement mécanique en traction cisaillement.....	42
III.4.2. comportement mécanique en pelage	43
III.4.3. comportement mécanique de l'éprouvette en U.....	43
III.4.4. comportement mécanique en traction en croix.....	44
III.4.5. Influence des paramètres de soudage	45
III.5. Caractérisation micrographique de point soudé.....	48
III.6. Essai de dureté sur le point soudé	49
III.7 Etude des faciès de rupture (microscope électronique à balayage).....	50
III.7.1 Faciès de rupture (métal de base).....	50
III.6.2 Faciès de rupture (point soudé).....	50

Introduction générale

Le soudage par résistance par points est un procédé d'assemblage très couramment utilisé dans l'industrie automobile. Il présente l'avantage d'être à la fois rapide, économique et adapté au soudage des aciers, principaux matériaux utilisés dans les structures de caisse en blanc automobiles. Un véhicule contient typiquement entre 3000 et 5000 points soudés.

Le contexte actuel de sensibilisation à l'impact écologique d'un véhicule a orienté l'industrie automobile vers la conception de modèles plus économes en carburant et rejetant ainsi moins de gaz à effet de serre. La réalisation de cet objectif passe entre autres par la diminution de la masse des véhicules. Dans cette optique, il est envisageable de réduire l'épaisseur des tôles utilisées si elles possèdent des propriétés mécaniques plus élevées, afin de garantir le comportement mécanique de la structure. Le développement des aciers à Très Haute Résistance (THR) répond à cette problématique. Néanmoins, la tenue mécanique de l'assemblage final dépend non seulement des propriétés mécaniques intrinsèques des tôles, mais aussi de celles des liaisons soudées, par lesquelles transitent les efforts. Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant d'étudier le comportement mécanique des points soudés par résistance.

Dans notre travail on va s'intéresser à la caractérisation mécanique et microstructural de l'acier TRIP qui est l'AISI304L, et de point soudé, dans différents modes de sollicitation Traction cisaillement, Pelage, Traction en croix, Traction en U.

Afin de poser les bases du travail réalisé au cours de ce mémoire Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré à l'étude bibliographique sur les aciers en général et les aciers à effet TRIP en particulier. Des notions de base sur soudage par point tel que les paramètres le cycle de soudage et la microstructure de point soudé sont également abordé. Dans le deuxième chapitre concerne l'étude expérimentale qui à pour but la caractérisation mécanique et microstructurale de métal de base et de point soudé.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation ainsi qu'à la discussion des résultats.

On termine notre travail avec une conclusion générale où on présente les principaux résultats obtenu et les perspectives qu'on envisage.

Introduction

Dans ce chapitre on va s'intéresser à l'étude bibliographique de problème, nous allons consacrer une partie à l'étude des aciers en général et les aciers THR en particulier avant d'aborder l'effet TRIP, la deuxième partie sera consacrée au soudage par point.

I.1 Généralités sur les aciers**I.1.1. Définition de l'acier :**

On appelle acier, un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; certains aciers peuvent avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte.

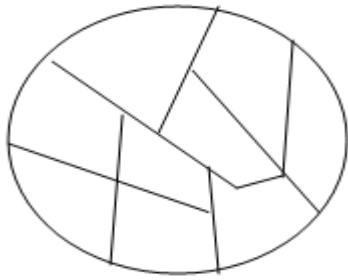
Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage; considéré alors comme un acier allié

On peut aussi ajouter à l'acier, pour qu'il résiste aux sollicitations mécaniques ou aux agressions chimiques, d'autres éléments appelés éléments d'additions, tels le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le molybdène (Mo). [5-6]

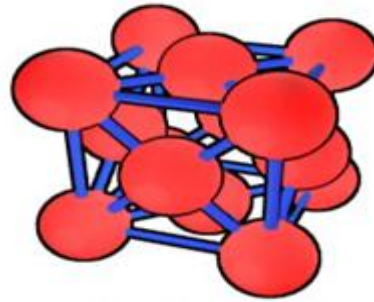
I.1.2. Structure des aciers :**Austénite :**

Ce constituant n'existe pas à la température ordinaire, il n'est stable qu'à haute température, il ne peut exister à la température ambiante que par un maintien hors équilibre grâce à l'ajout d'éléments d'alliage tel que le Ni et le Mn (aciers austénitiques). L'austénite est peu dure, entre 240-300 HB. [4]

Micrographie de l'austénite



Structure cristalline (CFC)

**Fig. I.1. Structures Austénitique****Ferrite :**

La ferrite est une solution solide de carbone dans l'allotropie α du fer. Le terme ferrite désigne en effet l'acier à très faible teneur en carbone. Toutefois, comme son champ d'existence dans le diagramme de phase fer-carbone s'élargit très peu vers le carbone, le terme ferrite est souvent utilisé même pour indiquer le fer α lui-même (correspond à la phase stable du fer pur lorsque la température est inférieure à 914°C) [4]

Bainite:

La bainite a une structure voisine de celle de la martensite, c'est un agrégat de ferrite et de carbures. Ce constituant présente les mêmes phases que la perlite (ferrite et cémentite), et de structure vraiment fine, souvent en aiguilles qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Elle est dure et plutôt facile à usiner. [4]

Cémentite ou Carbure de Fer (Fe_3C) :

La cémentite est un composé cristallin de fer et de carbone (Fe_3C). Sa dureté vickers est de $H_v = 800$ mais très fragile $A\% = 0\%$, $R_m = 700\text{N/mm}^2$, elle a donc une très bonne tenue à l'abrasion et à l'érosion. [4]

Martensite :

Après la décomposition de l'austénite la martensite est engendrée, sa structure se présente sous la forme d'aiguilles. Elle est très dure entre 500-650 HB selon la teneur en carbone, et difficilement usinable. [4]

I.2.les aciers THR

La sidérurgie propose aujourd'hui aux constructeurs automobile une large gamme d'aciers sous forme plats. Ils sont divisés en trois principales familles métallurgiques :

- Les aciers pour emboutissage calé aluminium au acier « INTERSTITIAL FREE »
- Les aciers à haute résistance (HR) aciers à haute limite d'élasticité (HLE) aciers rephosphorés, aciers isotropes au à (bake hardning) .
- Les aciers multiphasés à très haute résistance (THR), aciers dual phase (DP), Transformed Induced Plasticity (TRIP), Ferrite-Bénite ou multiphasé.

Les propriétés mécaniques de ces aciers résultent d'une combinaison de deux paramètres essentiels : la composition chimique et le processus thermomécanique. Les différentes gammes de produits sont présentées en fonction des critères de résistance mécanique et de l'emboutissabilité Fig. I-2.

La famille de ces aciers vise à obtenir des tenues mécaniques importantes tout en gardant une bonne ductilité (I.1).

Famille	Laminage à		Métallurgie	Compromis résistance/ductilité (indicatif, tout grade compris)
	froid	chaud		
Dual Phase	X	X	Ferrite + martensite	Rm : ~450-1200 MPa A% : ~6-30%
Ferrite-Bainite		X	Ferrite + bainite	Rm : ~450-670 MPa A% : ~20-33%
Multiphase		X	Ferrite (ou ferrite durcie), bainite, martensite	Rm : ~750-1300 MPa A% : ~5-14%
TRIP	X	X	Ferrite, bainite, austénite résiduelle (transformation de l'austénite en martensite par déformation)	Rm : ~590-900 MPa A% : ~21-30%

Tableau I-1 classification des aciers THR par famille métallurgique.

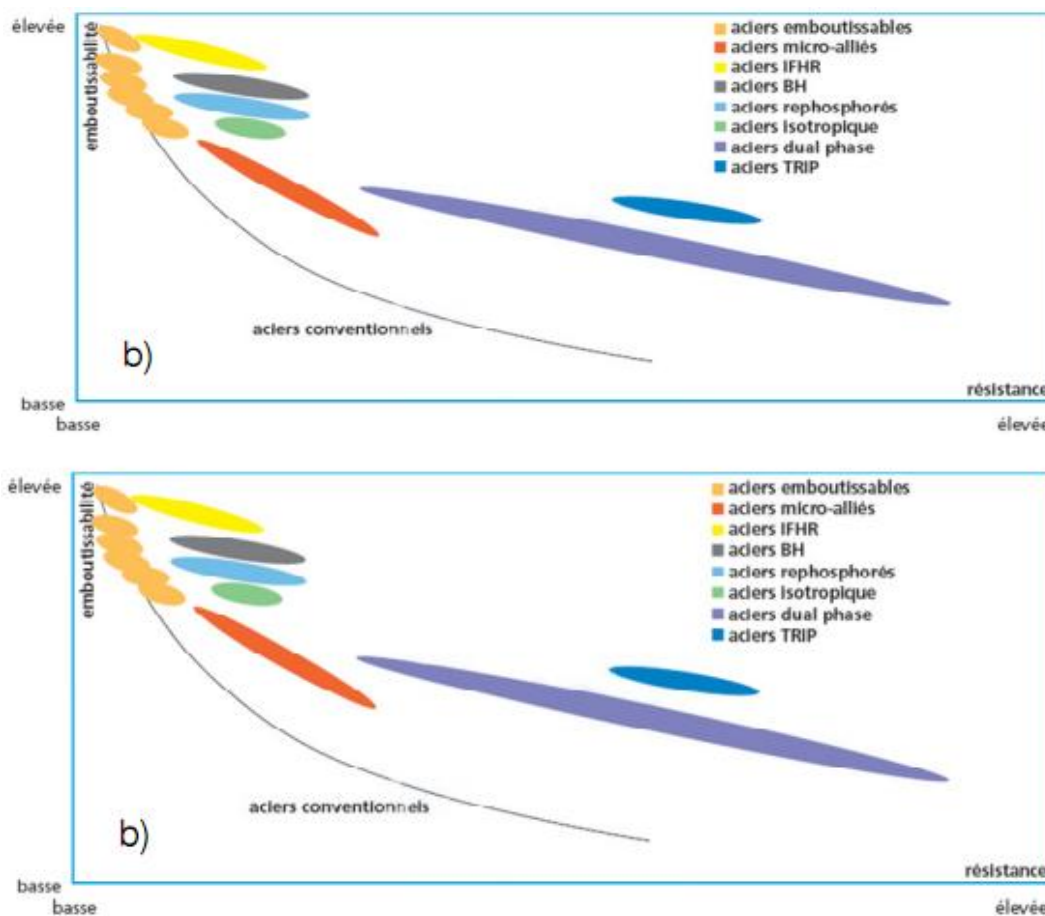


Fig. I.2. Représentation de l'emboutissabilité en fonction de la résistance des aciers a) laminés à chaud b) laminés à froid

a) Les aciers Dual phase

Les aciers Dual phase se distinguent par un bon compromis résistance / emboutissabilité. Ils ont une microstructure constituée d'une phase dure la, martensite, distribuée dans une matrice Ferritique. Ils ont une bonne aptitude de répartition de la déformation, donc une bonne emboutissabilité ainsi que des limites d'élasticité importantes. Leur haute résistance mécanique se traduit par une bonne résistance à la fatigue ainsi qu'une bonne capacité d'absorption d'énergie. Ces aciers donc sont utilisés pour des pièces de structure et de renfort.

b) Les aciers Multiphase

Les aciers Multiphase sont des aciers THR laminés à chaud, leur microstructure soit Ferrite-Bainitique très fine, soit Bainitique durcie par précipitation ou encore martensitique, ces aciers permettent la réalisation des structures mises en forme à froid.

c) Les aciers Ferrite- Bainite

Les aciers ont été développés pour répondre aux besoins d'allègement. Ils viennent compléter la gamme des aciers HSLA, tout en offrant une meilleure résistance mécanique. Ils conservent donc une excellente aptitude à la déformation. La microstructure est composée de Ferrite et de Bainite sous forme des lattes.

d) Les aciers TRIP

Les aciers TRIP sont conçus pour avoir la résistance mécanique la plus élevée possible tout en conservant une certaine formabilité. Ils sont composés d'une matrice Ferritique dans laquelle se trouvent des îlots de phase Bainitique dur et d'austénite résiduelle. L'effet Transformed Induced Plasticity- est la transformation de l'austénite en martensite sous l'effet de la déformation plastique. C'est ainsi que les aciers TRIP conservent une bonne formabilité. Ils sont utilisés eux aussi pour des pièces de structure et de renfort.

I.3. Les aciers à effet TRIP

I.3.1 Présentation de l'acier TRIP

Les aciers TRIP se différencient par un compromis résistance / ductilité particulièrement élevé qui résulte de leur microstructure. Ils sont ainsi très bien adaptés pour des pièces de structure et de renfort de formes complexes. Cette microstructure, composée d'une matrice ferritique ductile dans laquelle se trouvent des îlots de phase bainitique dure et d'austénite résiduelle, permet d'obtenir des allongements plus importants du fait de la transformation

de l'austénite en martensite sous l'effet de la déformation plastique (effet TRIP : "Transformation Induced Plasticity"). Cet effet TRIP confère à ces aciers un excellent compromis entre résistance et ductilité. [1]

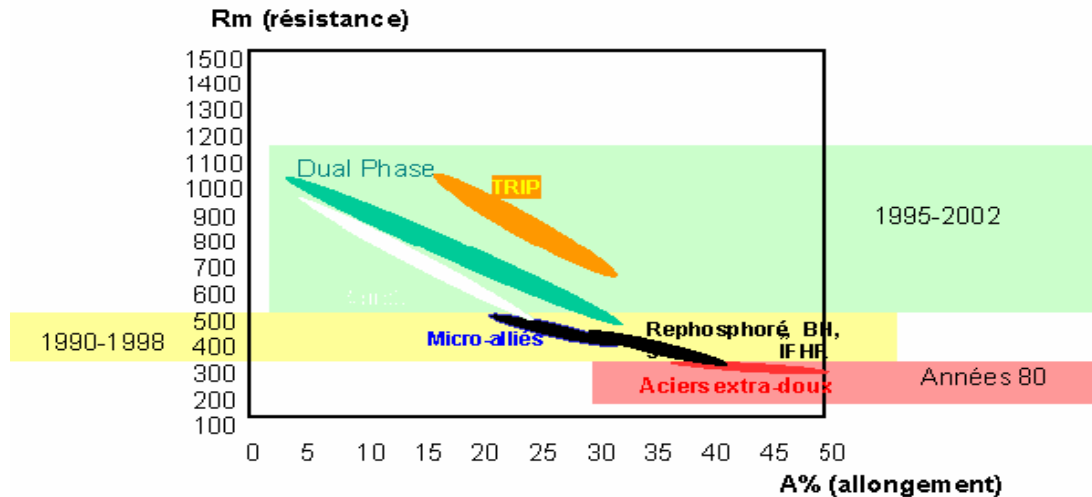


Fig. I.3: Les aciers TRIP dans le diagramme Résistance – Ductilité [2]

La capacité de consolidation de cet acier est considérable ; lui assurant une bonne aptitude à la répartition des déformations et par conséquent une bonne emboutissabilité. Cette consolidation conduit également à l'obtention de caractéristiques mécaniques sur pièces, notamment la limite d'élasticité, beaucoup plus élevées que sur le métal à plat.

Ce fort potentiel de consolidation et une haute résistance mécanique lui confèrent une excellente capacité d'absorption d'énergie. En outre les aciers TRIP présentent un effet BH (Bake Hardening) prononcé après déformation qui améliore d'autant leur comportement au crash.

I.3.2 Etude microscopique de l'effet TRIP dans les aciers

Transformation Induced Plasticity, cette expression en anglais indique que la plasticité est induite par la transformation. La martensite tient son nom de l'illustre métallurgiste allemand Adolph MARTENS. Les termes de martensite et de transformation martensitique sont aussi bien utilisés dans les alliages ferreux que les alliages non-ferreux. Dans les aciers à effet TRIP, cette transformation correspond à un changement de phase particulier qui se

produit à l'état solide et qui est à l'origine des propriétés remarquables des matériaux dans lesquels elle se produit.

La transformation martensitique se classe dans la catégorie des transformations cristallographiques. Elle se produit sans aucun phénomène de diffusion atomique, elle se présente comme un mouvement coopératif des atomes à des vitesses proche de vitesse de son dans le matériau. Le changement de phase ne résulte pas de composition chimique dans la phase martensitique, mais une interface sépare les deux phases initiales est formée [3].

La transformation se fait par le déplacement des atomes de leurs sites dans la phase mère vers les sites voisins qui définissent la configuration de la nouvelle phase. Pour que la transformation martensitique se produise, la vitesse de refroidissement doit être élevée ce que ne permet pas aux atomes de se déplacer par diffusion, il en résulte une déformation macroscopique sous la forme d'un cisaillement qui se compense par une déformation supplémentaire et la plastification de l'austénite, cette transformation est caractérisée par un changement de volume et par un changement de forme laissant un plan invariant, et par une énergie de déformation élastique[3].

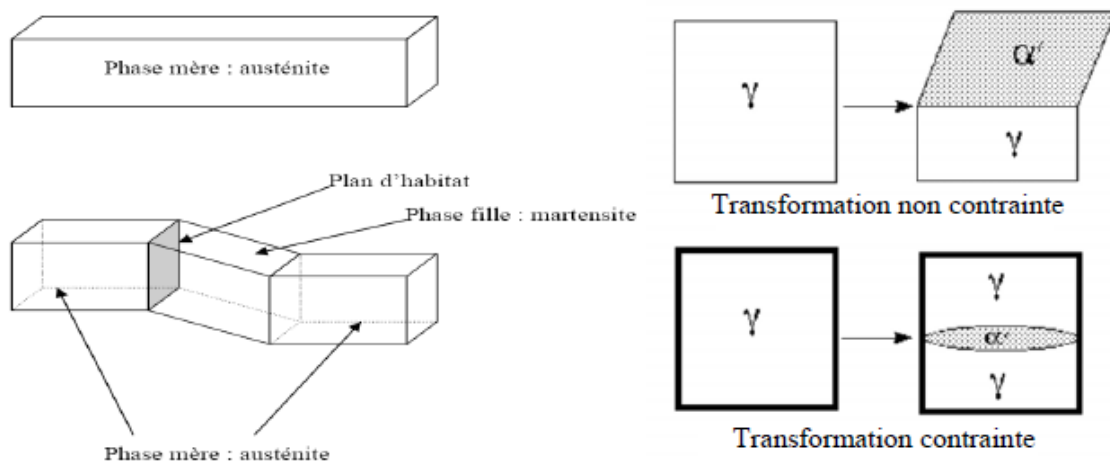


Fig. I.4: changement de forme associer a transformation martensitique [3]

La structure et la morphologie de la martensite varie en fonction de la composition chimique de matériau et de la température à laquelle se produit la transformation. Dans les aciers la martensite possède trois types de structure cristalline. [3]

-La martensite α' a une structure tétragonale (ou quadratique) centré TC. Elle est observée dans les aciers binaires Fe-C et se trouve dans les aciers TRIP industriels.

-La martensite ε a une structure hexagonale compacte HC.

-La martensite tétragonale à face centrée TFC est observée dans les alliages Fe-Pd et Fe-Pt.

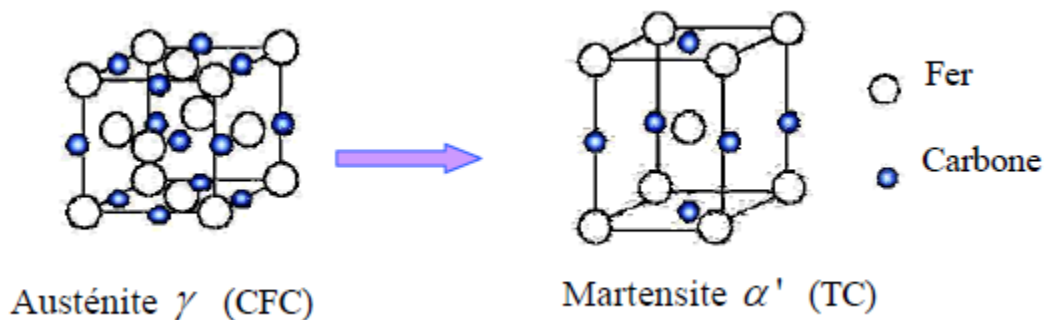


Fig. I.5: changement de structure cristalline de l'austénite γ en martensite α' dans les aciers à effet TRIP [3]

I.3.3 Etude macroscopique de l'effet TRIP dans les aciers

La transformation martensitique induit une déformation plastique macroscopique correspondant au phénomène de plasticité de transformation. La phase transformée en martensite accumule des contraintes qui peuvent être relaxée par une déformation plastique sous forme de glissement de dislocations ou de macles. Dans les aciers à effet TRIP, cette plasticité de transformation de l'austénite métastable se traduit par un changement soudain de la pente d'écroutissage [3].

La plasticité de transformation est généralement définie comme un accroissement significatif de la plasticité pendant une transformation de la phase. Une déformation plastique a lieu pour une contrainte externe appliquée, tel que la contrainte équivalente et inférieure à la limite d'élasticité de matériau [3].

Dans la littérature la plupart des modèles de la plasticité de transformation sont basés sur deux mécanismes appelés respectivement effet Magee et effet Greenwood Johnson.

- Effet Magee

L'effet Magee considère que la contrainte appliquée provoque une orientation préférentielle des plaquettes de martensite, qui est à l'origine des de la plasticité de transformation cette plasticité de transformation ε_0^{pt} se compose d'une expansion ε_0 et d'un cisaillement γ_0 . En effet lors d'un refroidissement à contrainte nulle aucune déformation de transformation, hormis la variation de volume, n'est formée. Si le déviateur des contraintes est non nul avec un refroidissement, seul les variantes les mieux orientées par rapport au chargement sans activité. En plus, en raison de la présence de la contrainte appliquée, un effet supplémentaire d'orientation de la déformation de transformation se produit en raison de cette sélection des variantes durant cette transformation de phases (figureI.5) [4]

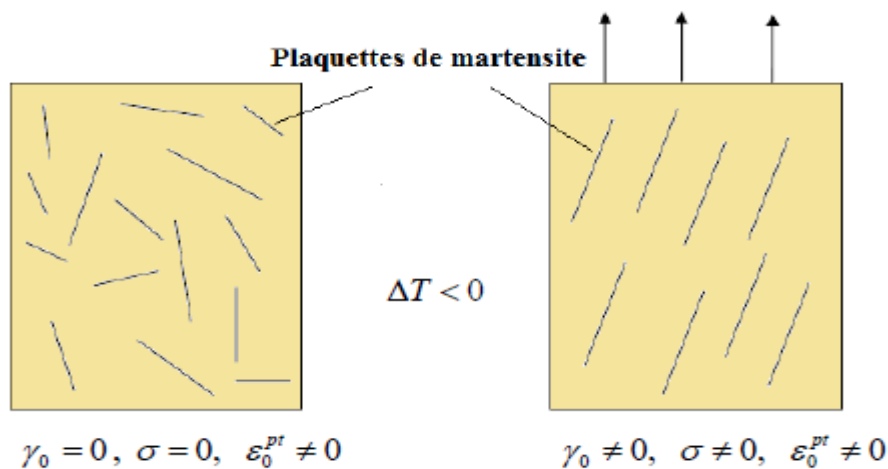


Figure I.6 : Orientation des plaquettes de martensite lors d'une transformation martensitique sous contrainte (effet Magee), ε_0^{pt} est la plasticité de transformation [3].

- Effet Greenwood Johnson

Greenwood et Johnson ont étudié la plasticité de la transformation à 910°C lors de changement de phase de fer α ou fer γ pour un fer Fe 0.39%C. Selon ces auteurs, la

transformation martensitique s'accompagne d'une variation de volume qui produit un écoulement plastique de l'austénite autour des variantes. L'amplitude de la plasticité de transformation, ε_0^{pt} , dépend de trois facteurs qui sont :

- L'amplitude de variation volumique de transformation.
- Le niveau de la contrainte appliquée.
- La propriété mécanique des phases en présence au cours de la transformation.

Lorsque le refroidissement se fait sous contrainte, l'écoulement plastique est orienté dans la direction de la contrainte externe (figure I.6), la déformation plastique macroscopique est la résultante de la superposition de la contrainte interne liée à la déformation de transformation et du champ de contrainte externe appliqué [3].

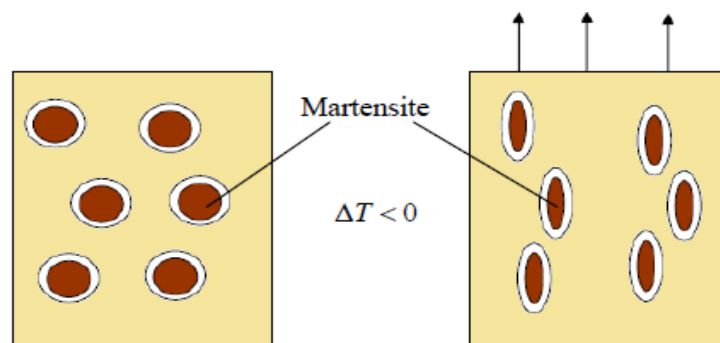


Figure .I.7 : Accommodation anisotrope de l'écoulement plastique local-comparaison entre transformation avec et sans contrainte appliquée (effet Greenwood Johnson) [3]

I.4. Le soudage par point

Le soudage par points fait partie de la famille des procédés de "soudage par résistance", au même titre que le soudage à la molette, par bossages, ou en bout. Il est utilisé pour assembler deux tôles (ou plus) dont l'épaisseur est typiquement comprise entre 0,5 et 10 mm. Signalons que ces deux tôles peuvent avoir - même si ce n'est généralement pas le cas au CRDM - des caractéristiques différentes (composition, revêtement), et qu'elles n'ont pas forcément la même épaisseur. Historiquement, ce fut l'Américain Thomson qui eut, en

1877, l'idée d'assembler deux tôles d'acier en utilisant, comme agent de chauffage, l'effet de la traversée de l'assemblage par un courant électrique de forte intensité.

76 Chapitre 6. Introduction au soudage par points

Il s'agit depuis longtemps du procédé d'assemblage numéro un des carrosseries automobiles, une voiture nécessitant en moyenne 4000 points soudés.

I.4 .1 Introduction au soudage par points

Le soudage par points sert à assembler localement deux tôles, en utilisant l'effet Joule. A cet effet, on comprime ces tôles à l'aide d'une paire d'électrodes, généralement en alliage de cuivre, et l'on fait passer par ces mêmes électrodes un courant électrique de forte intensité. La chaleur engendrée par ce courant à l'interface tôle-tôle fait fondre localement le métal, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.

Une soudure est réalisée en une à deux secondes, avec un temps effectif de passage du courant de quelques dixièmes de secondes. Les phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une soudure sont à la fois d'origine électrique, thermique, mécanique et métallurgique. La rapidité et la complexité de ces phénomènes en font un procédé extrêmement difficile à modéliser.

Conformément à la géométrie des électrodes, une soudure par point possède - dans le plan des deux tôles - une forme approximativement circulaire. Si la fonction principale d'une soudure est la tenue mécanique, on choisit généralement de caractériser sa qualité par son diamètre de bouton, c'est-à-dire par le diamètre moyen (en millimètres) du rivet restant sur l'une des deux tôles après un essai destructif appelé déboutonnage.

Parmi les différents paramètres de soudage, l'intensité du courant de soudage joue un rôle prépondérant, car elle conditionne directement la taille de la soudure. Le domaine de soudabilité d'un produit est défini comme la plage d'intensité permettant d'obtenir une soudure de qualité satisfaisante, tous les autres paramètres (effort mécanique, durées, etc.) étant fixés préalablement. [7]

I.4.2 Principe de soudage par point

La figure I.7 représente schématiquement le principe du soudage par points : les deux tôles sont prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'ensemble en contact. Cet assemblage est ensuite traversé par un courant de forte intensité qui crée un noyau fondu au niveau de l'interface tôle-tôle. En refroidissant, ce noyau fondu fixe localement les deux tôles entre elles.

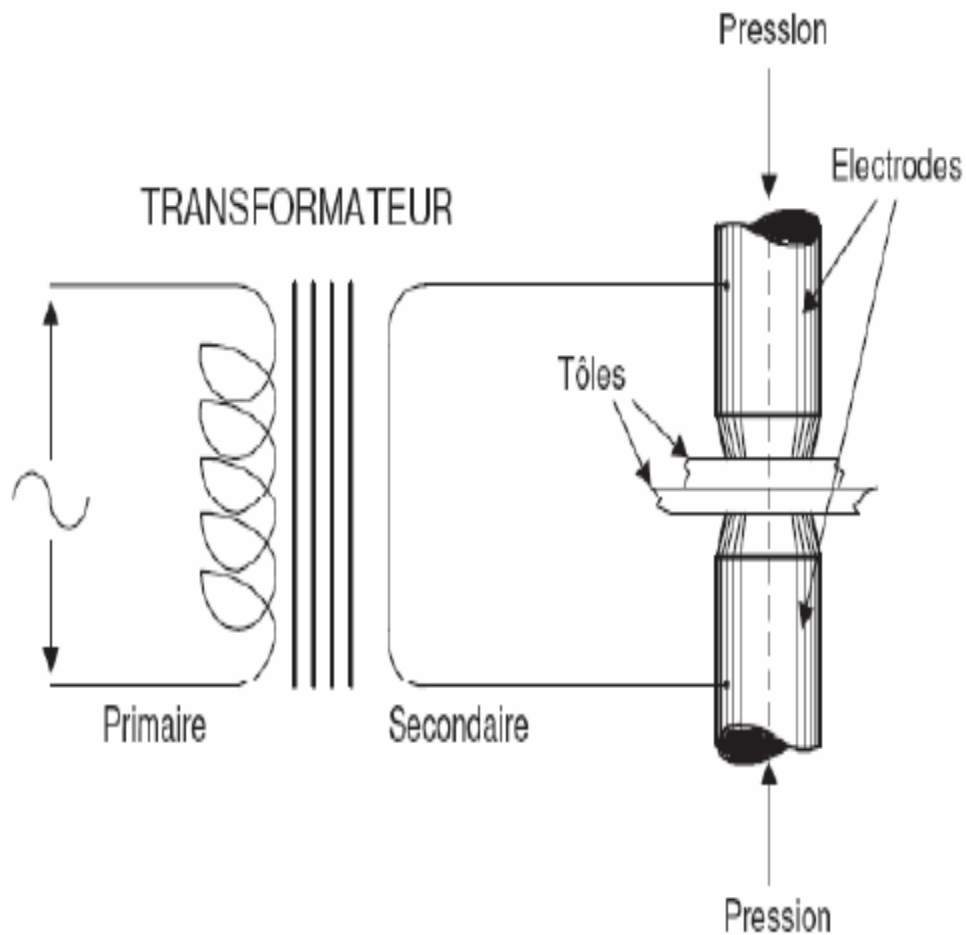


Figure I.8. Schémas de principe du soudage par points [8]

I.4.3 Paramètres du Procédé

Dans ce paragraphe, nous présenterons l'influence qualitative de toutes les variables du procédé de soudage. Les paramètres sont adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder. Les paramètres principaux décrits dans l'ordre de chronologie du procédé sont l'effort de soudage, l'intensité, le temps de soudage, et le temps de maintien.

Effort de soudage : l'effort d'applique dès la phase d'accostage et la valeur appliquer dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, l'incrément de l'effort pendant la phase d'accostage n'est pas linéaire, mais dépend des systèmes de mise en charge de la soudeuse. [9]

Intensité de soudage : l'intensité de soudage est considérée comme un paramètre important pour engendrer l'énergie dissipée. Car elle gouverne la génération de chaleur par effet Joule. L'intensité utilisée soit en courant alternatif monophasé, (AC-50Hz), ou soit courant continu moyenne fréquence, (MFDC-1000Hz). [9]

Temps de soudage : intervient pendant la phase de chauffage. L'ordre de grandeur typique est de quelques dixièmes de secondes. Selon la norme, le temps de soudage dépend de la nuance d'acier et son épaisseur. Dans certains cas de soudage de tôle épaisse, et haute résistance mécanique, le courant pulsé est souvent à appliquer afin de stabiliser le développement du noyau. Cette pulsation comporte le temps de chaud, séparé par le temps de maintien ou le temps de froid. Le nombre de cycles supplémentaires pour le post traitement thermique est souvent adapté à l'assemblage de tôles hautes résistances. [9]

Temps de maintien : le temps de maintien est nécessaire à la solidification par l'évacuation de la chaleur de l'assemblage vers le circuit d'eau de refroidissement. [9]

En général, les ordres de grandeur des paramètres de soudage sont les suivants :

- Intensité de soudage en kA, sous quelques V, (environ 7 à 14 kA)
- Effort de serrage en daN, (comprise entre 230-600 daN et dépend du comportement mécanique de l'acier)

- Durée d'un cycle, environ 1 seconde. (Sans modification particulière des conditions de soudage, ni pré-, ni post-chauffage). [9]

Électrode : Les électrodes sont des éléments essentiels pour ce procédé. Un type d'électrode en profil tronconique à face active hémisphérique est présenté sur la Fig. I.8 C'est un paramètre externe, qui influe directement sur le domaine de soudabilité car il gouverne la taille du contact aux interfaces par son profil de face active. L'électrode joue trois rôles principaux :

- Mécanique : c'est d'abord pendant la phase de serrage pour assurer le contact électrique entre les tôles avec la mise en charge jusqu'à sa valeur définie pour le soudage. Pendant le soudage et le maintien, l'électrode sert comme une stabilisatrice pour maintenir la zone fondue pendant le chauffage et le refroidissement. Par conséquent, le matériau de l'électrode doit avoir une bonne tenue mécanique à chaud.

- Électrique : la forte intensité de soudage s'applique via les deux électrodes sans chauffer intérieurement. L'électrode donc doit avoir une bonne conductivité électrique.

- Thermique : l'électrode est un passage pour la chaleur évacuée de la zone chaude dans l'assemblage à l'eau de refroidissement. Pendant le soudage, la chaleur générée à l'interface électrode/tôle doit être évacuée rapidement afin d'éviter que la zone fondue n'atteigne cette interface. Le matériau de l'électrode donc avoir une bonne capacité calorifique ainsi qu'une bonne conductivité thermique.[9]

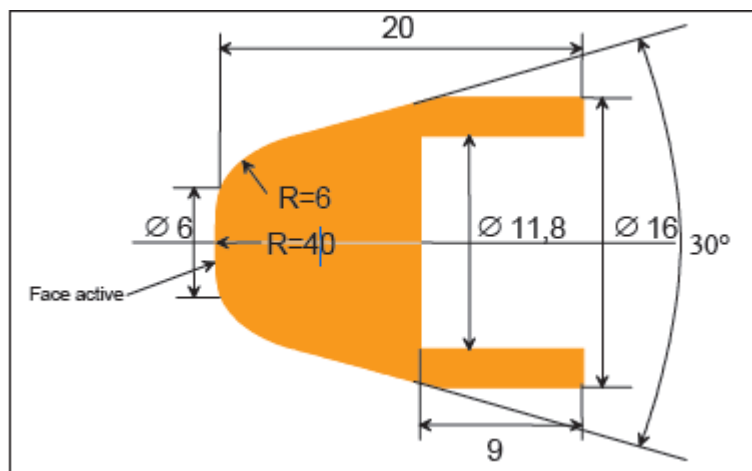


Fig. I.9: Section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm : TH6 [9]

I.4.4 Déroutement du cycle de soudage

Un cycle de soudage se décompose en quatre phases :

- ❖ **l'accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent comprimer les pièces à souder, à l'endroit prévu et sous un effort donné. Dans le cas des machines du CRDM, seule l'électrode supérieure se rapproche, l'autre étant fixe. Cette phase se termine quand la valeur d'effort nominale est atteinte,

- ❖ **le soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle-tôle pour qu'une zone fondue apparaisse,

- ❖ **le forgeage** : effectué avec maintien de l'effort mais sans passage de courant, il permet au noyau fondu de se refroidir et de se solidifier en restant confiné,

- ❖ **la remontée de l'électrode** : l'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point.

Ces quatre phases, ainsi que les évolutions de l'effort mécanique et du courant de soudage tout au long d'un cycle, sont représentées sur la figure I.9. [7]

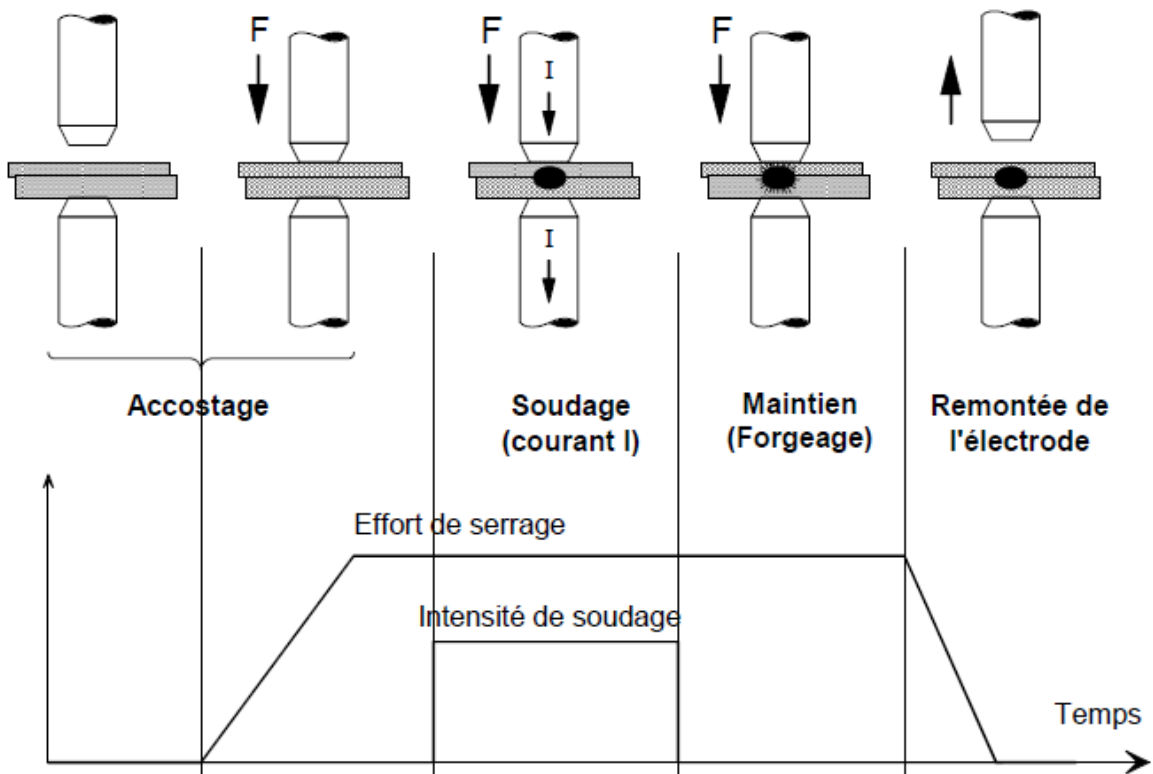


Fig.I10 : Les différentes phases d'un cycle de soudage [7]

L'allure des courbes d'effort et d'intensité représentées ici est purement qualitative. Dans la pratique, leurs évolutions ne sont jamais linéaires car les valeurs sont fortement perturbées par les évolutions des résistances mécaniques et électriques rencontrées.

I.4.5 Mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle est créé par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée t en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation suivante:

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_0+t} R i^2 d\tau \quad (\text{I.1}) [7]$$

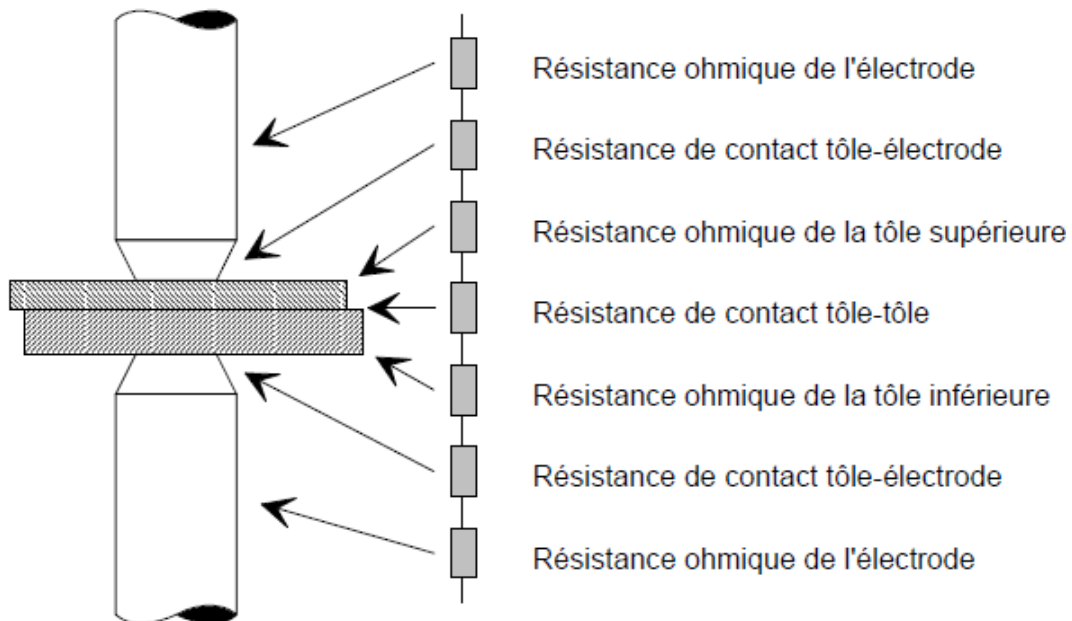


Figure I.11 : Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues [7]

Si l'on néglige les phénomènes capacitifs, l'équivalent électrique de l'assemblage de soudage par points est constitué de résistances en série (Figure I.10). Le dégagement de chaleur est donc maximal à l'endroit où la résistance est la plus élevée.

Dans la pratique, les résistances de contact sont, au début d'un cycle de soudage, plus grandes que les résistances ohmiques des tôles et des électrodes. Dans le cas de produits revêtus, il est possible d'utiliser le même modèle que celui de la figure 6.3 (les résistances des revêtements

étant alors incluses dans les résistances de contact), ou de compléter le modèle en ajoutant quatre résistances ohmiques du revêtement. [7]

Ces diverses résistances, qui ont une influence directe sur les dégagements de chaleur, donc sur la constitution du noyau fondu, ne sont pas constantes au cours d'un cycle de soudage.

Elles dépendent en effet fortement de la température :

- Les résistances ohmiques augmentent en fonction de la température,
- Les résistances de contact diminuent lorsque la température augmente. En effet, les contacts étant initialement "ponctuels" plutôt que surfaciques, ces résistances dépendent directement, à pression donnée, des caractéristiques mécaniques des matériaux en contact et de leur état de surface : la dureté des matériaux diminuant avec l'échauffement, les surfaces de contact augmentent. Il y a donc une diminution des résistances de contact avec la température. [7]

En début de soudage, les dégagements de chaleur les plus importants sont situés au niveau des différentes discontinuités de l'assemblage :

- à l'interface tôle-tôle, cette chaleur sert à faire fondre le revêtement et l'acier afin de former le noyau fondu,
- aux interfaces électrode - tôle, cette chaleur - qui ne contribue pas à la formation de la soudure - est en partie évacuée par les électrodes, qui, outre une bonne conductivité électrique, doivent par conséquent avoir une conductivité thermique élevée. [7]

I.4.6 Microstructure d'un point soudé

La géométrie d'un point est définie en trois zones métallurgiquement distinctes :

- ❖ le noyau fondu
- ❖ La zone affectée thermiquement (ZAT).
- ❖ le métal de base.

La géométrie d'un point soudé sur la Figure I.11 . Présente trois particularités quel que soit type d'assemblage. Il s'agit de la discontinuité de l'assemblage, une entaille concentrant les contraintes en cas de sollicitation mécanique, et l'indentation d'électrode des surfaces externes de l'assemblage.

Généralement, la taille du noyau est symétrique par rapport à son plan de section s'il s'agit d'un celui d'un assemblage homogène. Le noyau dissymétrique est également envisagé dans le cas de l'assemblage hétérogène ou d'un mauvais alignement entre l'axe vertical d'électrodes. Qualitativement, la tenue mécanique d'un point dépend du diamètre du noyau. Plus la taille est importante, plus la tenue en mécanique est élevée. Le critère de soudabilité est donc défini en basant sur la recherche de l'intensité de soudage nécessaire afin d'engendrer le diamètre du noyau minimal et maximal. [9]

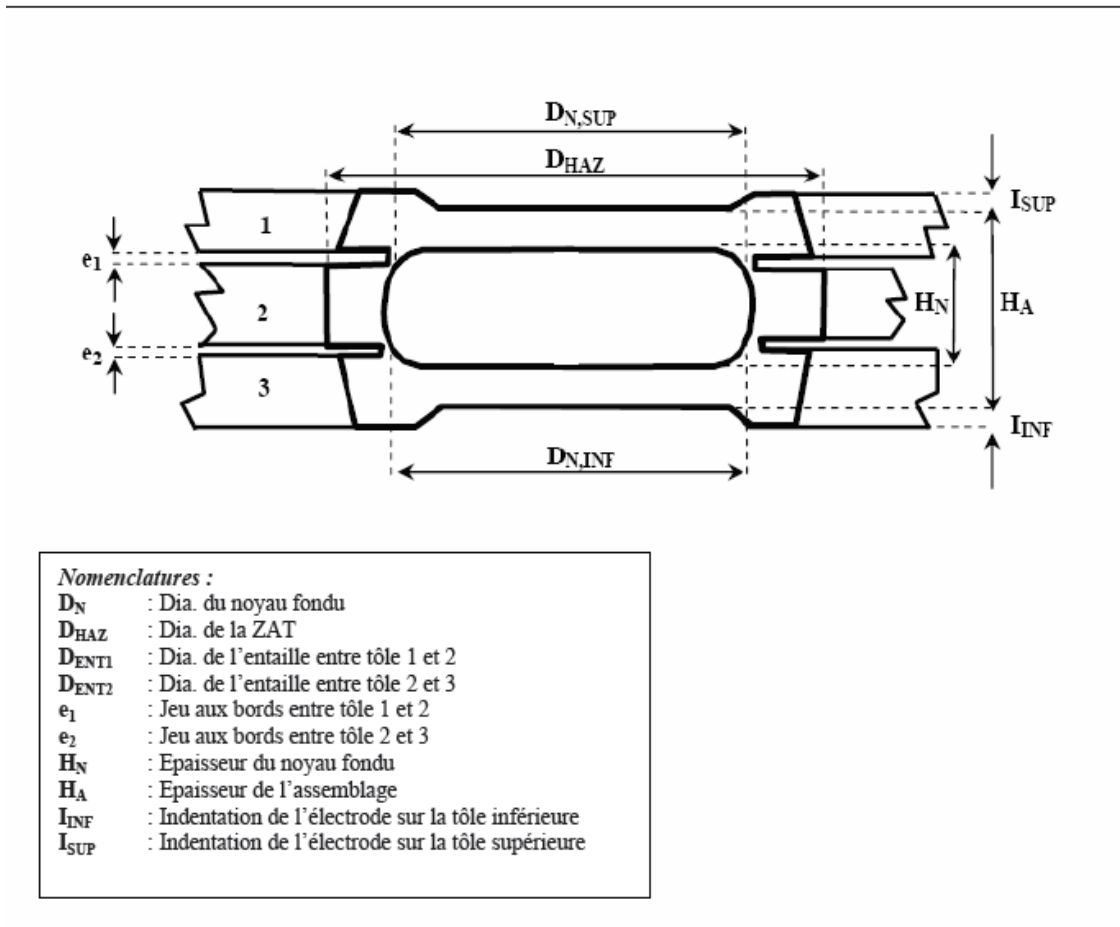


Fig L12: Différentes zones métallurgiques et la géométrie d'un point soudé en cas d'un assemblage de trois tôles [9]

Transformation des Microstructures dans la ZAT :

Dans le soudage par point, la soudure comporte donc la zone fondue et la zone de métal de base affectée par la chaleur. Les températures maximales et les gradients thermiques diminuent en fonction de la distance du centre de soudure.

Par conséquent, plusieurs zones dans la ZAT avec différentes microstructures se trouvent entre ligne de fusion et le métal de base. Ces zones sont caractérisées par T_{max} locale qui est entre T_{Fusion} et A_{C1} . [9]

Les différentes zones dans la soudure, peut être distinguées comme :

- ❖ la zone fondue à structure basaltique, (grains allongés perpendiculairement à la ligne de fusion)
- ❖ la zone pâteuse dans laquelle la transition liquide/solide (ou ligne de fusion)

- ❖ La zone affectée thermiquement (ZAT) : Dans cette zone, les modifications se produisent à l'état solide et dépendent de la distance à la zone fondue et le refroidissement caractéristique du procédé de soudage,

La ZAT est généralement subdivisée en quatre régions métalliquement équivalentes montrées sur la Figure I.10 et déterminées par des isothermes caractéristiques :

- ❖ la zone de à gros grains (Coarse Grained Heat Affected Zone-CGHZ) : La température maximale atteinte est élevée ce qui entraîne un grossissement du grain austénitique.
- ❖ la zone à grains fins (Fine Grained Heat Affected Zone-FGHAZ) : Cette zone subit un passage très bref dans le domaine austénitique ($T_P > A_{C3}$, où T_P est la température locale)
- ❖ la zone inter critique (Inter-Critical Heat Affected Zone-ICHAZ) : La température maximale atteinte est comprise entre les points de transformation A_{C1} et A_{C3} , ($A_{C1} < T_P < A_{C3}$), ce qui entraîne une austénitisation partielle.
- ❖ la zone subcritique (Sub-Critical Heat Affected Zone-SCHAZ) : La température maximale atteinte est inférieure à A_{C1} , ($T_P < A_{C1}$). Le métal ne subit qu'un revenu (restauration, précipitation...).

I.4.6 Comportement mécanique des points soudés en aciers à (Très) Haute Résistance

La soudabilité des aciers THR présente un certain nombre de particularités, liées à la résistance mécanique plus élevée des tôles, à leur résistivité accrue par la quantité d'éléments d'alliage, ainsi qu'à la trempabilité plus élevée et la fragilité potentielle des phases formées. Une conséquence importante est la sensibilité accrue des points soudés en acier THR aux modes de rupture partiellement ou totalement à l'interface. Ces particularités conduisent à une adaptation des pratiques de soudage par rapport à celles utilisées classiquement pour les aciers ferritiques, ce qui se traduit, de façon générale, par une augmentation de l'effort de soudage, un ajustement des temps de soudage et de maintien de façon à contrôler la vitesse des cycles thermiques appliqués et éventuellement l'utilisation de pré/post chauffage. Ces modifications peuvent permettre à la fois d'influer sur les niveaux relatifs de propriétés mécaniques dans les différentes zones du point soudé (ténacité en fond d'entaille en particulier) et de favoriser des formes de fond d'entaille émoussées limitant les concentrations de contraintes.

Les sollicitations à composante normale dominante (traction en croix, pelage) induisant une triaxialité élevée en fond d'entaille sont les plus sensibles à une rupture prématurée à l'interface. Gould & Workman résumant les conditions favorisant la rupture interfaciale (partielle ou totale) de la façon suivante :

- triaxialité importante, qui concerne en particulier les soudures de petite taille.
- fragilité des microstructures en fond d'entaille et dans le noyau (liée à la trempabilité de l'acier et à la teneur en carbone, principalement).
- présence de porosités, en particulier en bordure de noyau, constituant un chemin préférentiel de fissuration.

La première condition est principalement gouvernée par des considérations mécaniques liées à la géométrie de l'assemblage et au mode de sollicitation. Les deux autres sont, quant à elles, étroitement liées à la nature des tôles soudées et au type de cycle thermique imposé.

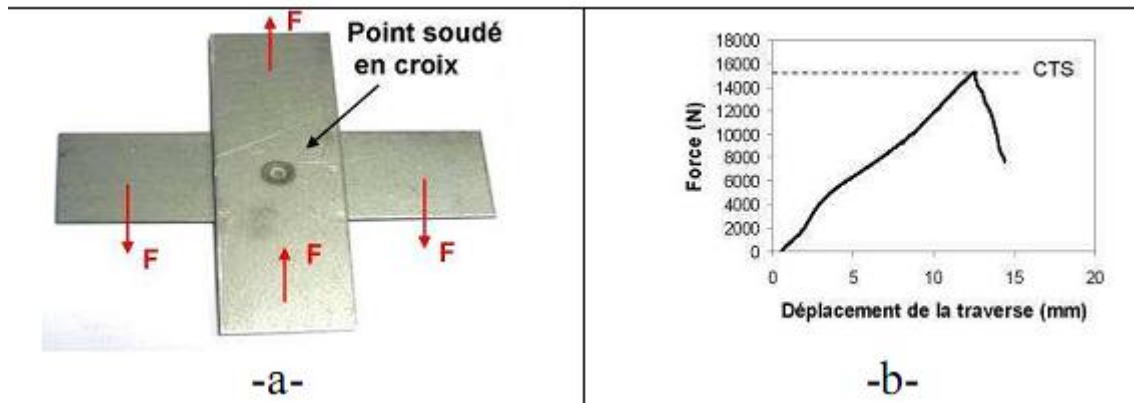


Fig. I.13. Essais de traction en croix (-a-principe de l'essai -b-courbe force- déplacement) [14]

I.4.7 Conclusion

Les avantages de ce procédé sont nombreux : il est facile à mettre en œuvre et à automatiser, et permet de réaliser rapidement des assemblages d'une qualité contrôlée pour un coût minimum. Aujourd'hui, une structure de caisse en blanc compte entre 3000 et 5000 points de soudure figure I.12.

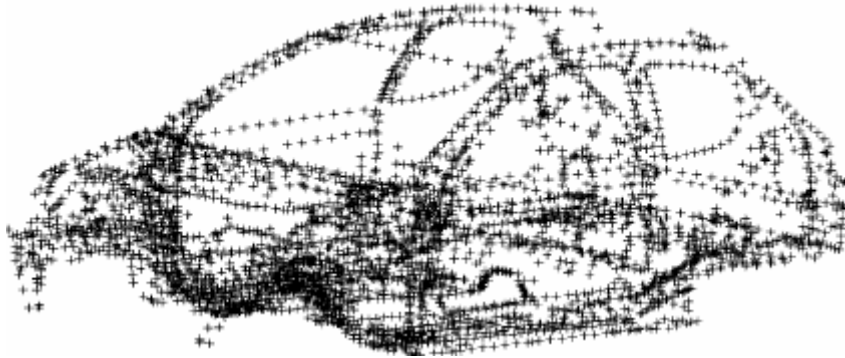


Figure I.14 : Position des points de soudure sur une caisse en blanc automobile [10]

Introduction :

L'objet de ce chapitre est de présenter les différents essais expérimentaux effectués dans le but de faire une caractérisation mécanique et microstructurale de l'acier à effet TRIP 304L et de point soudé.

En commence par la présentation des instruments utilisés durant les essais mécaniques, suivie d'une description des éprouvettes, leurs formes géométriques les dispositifs utilisés, ainsi que, le déroulement des essais mécanique.

- Essais de traction.
- Essais de traction cisaillement
- Essais de traction en croix.
- Essais de traction en U.
- Essais de pelage.

Par la suite, on explique les méthodes utilisées pour la caractérisation micrographique du métal de base et du point soudé.

Pou finir, on décret les méthodes utilisées pour déterminé la dureté de métal de base et de point de soudure.

II.1 : Caractéristiques du matériau

Le matériau utilisé est un acier austénitique de type 304L (selon la norme AISI et X2CrNi18-9 selon AFNOR) est commercialisé sous forme des tôles minces d'épaisseur 3mm. Le (L) signifie que l'acier à une faible teneur en carbone.

II.1.1 : Composition chimique

Le tableau(II.1) affiche la composition chimique de l'acier selon la fiche technique.

Désignation	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	N	S
Elément%	≤ 0.03	8 -20	8-12	0.45	1.31	0.025	0.056	0.005

Le tableau(II.1) : caractéristique chimique de l'acier AISI304L

II.1.2 : Les caractéristiques mécaniques

Le tableau (II.2) représente les caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable AISI304L selon la norme DIN.

Etat	R0.2 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	[HV]
Recuit	190	-600	45	150-180
Ecrouissage maximal	965	1275	4	390

Tableau (II.2) : Caractéristiques mécaniques de l'inox AISI304L

II.2 Caractérisation mécanique

II.2.1 Géométries des éprouvettes

Pour caractériser le matériau en général et étudier un comportement d'un point soudé en particulier, mon choix est porté sur la réalisation de quelques essais sur des éprouvettes de traction et des structures soudées par point.

Les éprouvettes de traction ont été prélevées en pleine tôle dans le sens de laminage, 45° et 90°. Ces opérations ont été réalisées sur la fraiseuse à commande numérique au niveau de l'entreprise nationale de l'industrie et électroménager (ENIEM) d'Oued Aissi.

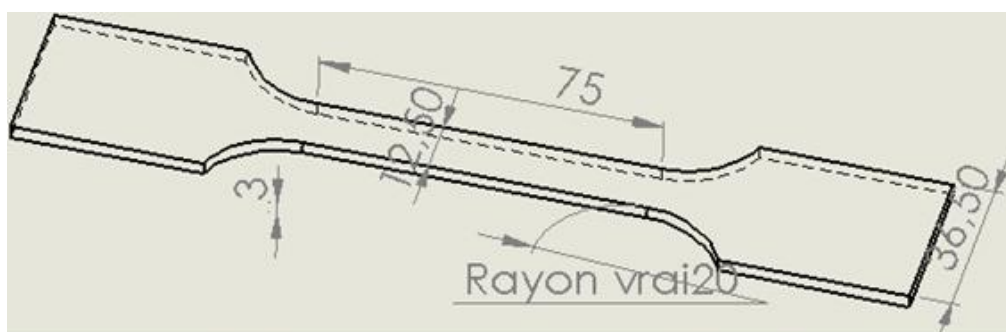


Fig II-1 : éprouvette de traction matériau de base

La tenue mécanique d'un assemblage constitué de deux plaques assemblées par le soudage par point, peut être caractérisée par différents mode de sollicitation. A cet effet, on a réalisé quatre assemblages différents qui sont représentés ci-dessous, voir les figures (II 2, II3, II4, II5).

Eprouvette de traction-croix: la géométrie est définie par la norme ISO [03] voir (fig. II.2)

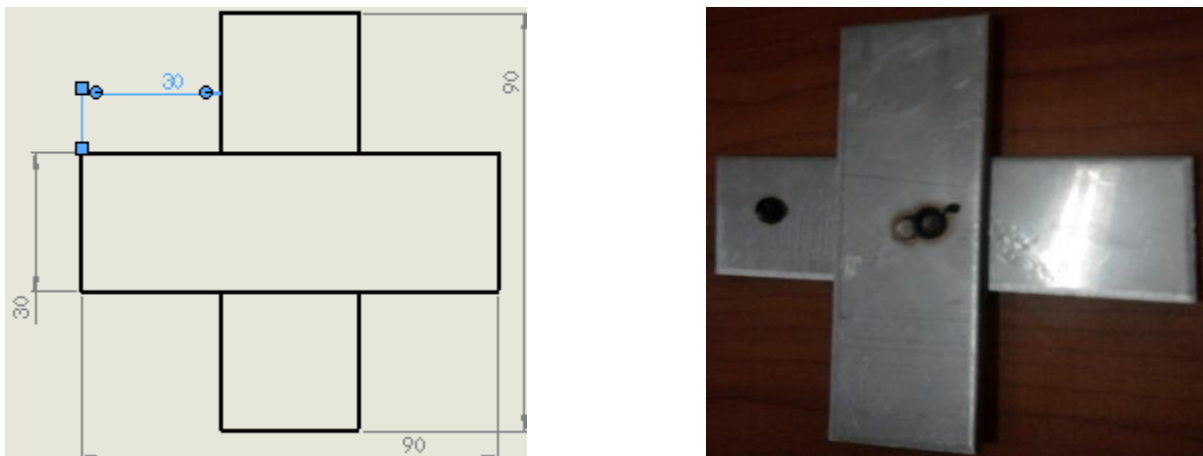


Fig. II.2. Éprouvette en croix

Eprouvette de traction-cisaillement : la géométrie de l'éprouvette est définie par la norme ISO 14234 figure II.3.

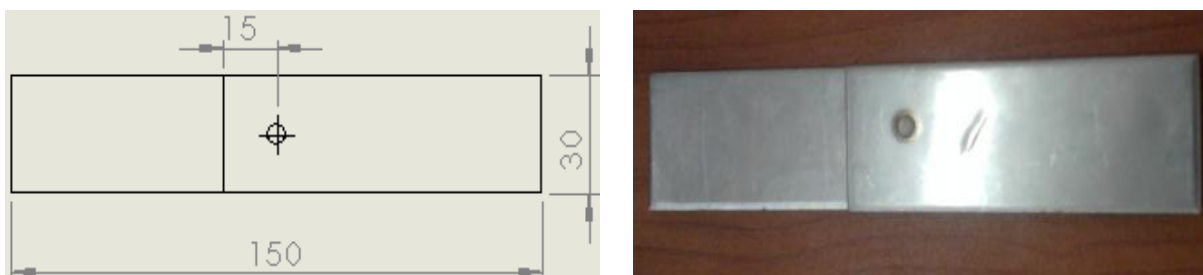


Fig. II.3. Eprouvette droit

Essai de traction en U : la géométrie de l'éprouvette est définie par la norme ISO 14234 figure II.4.

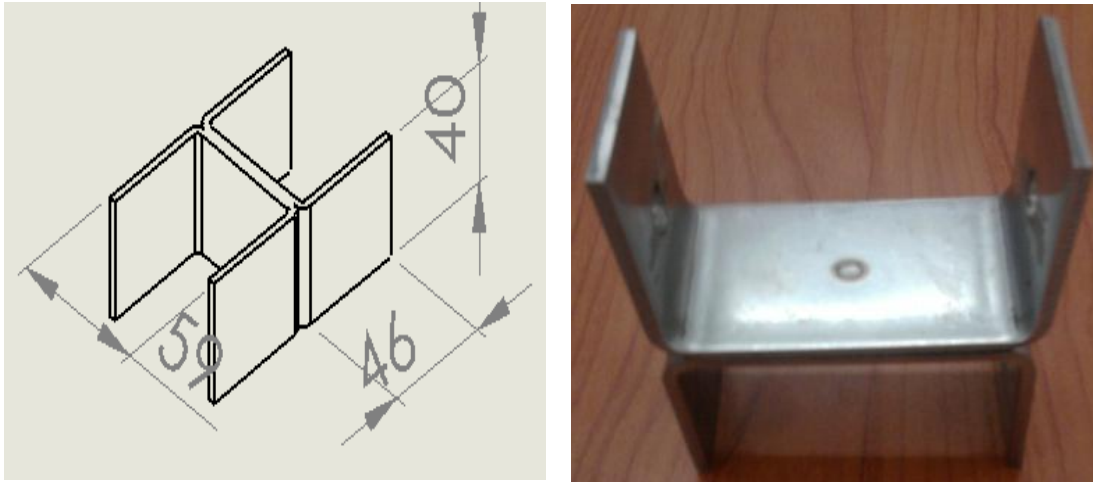


Fig. II.4 Eprouvette en H

Essai de pelage : la géométrie est définie par la norme [LON07] figure II.5

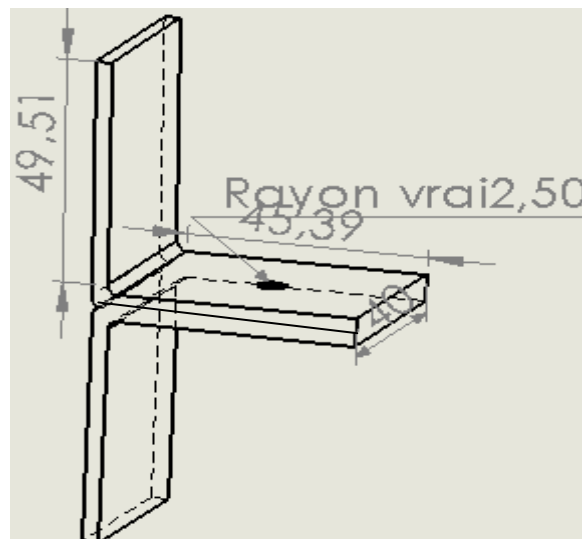


Fig. II.5 Eprouvette en double L

I .2.2. Dispositifs expérimentaux

Selon les formes des éprouvettes, des dispositifs adéquats sont utilisés pour la réalisation des essais mécanique sur la machine de traction. Ces dispositifs ont été fabriqués avec deux nuances d'acier le Z-200 et le Xc-48 sur des machines de fraisage et de tournage au niveau de Hall de technologie.

Dispositif 1(essai de traction en croix)

Un dispositif a été réalisé de toute pièces voir (fig. : II.6), constitué de deux montant cylindrique servant comme appuis à la barre où la charge est appliquée à son milieu. Comme aussi à l'aide de ces deux montant que l'effort de l'essai est appliqué à l'éprouvette comme le montre la figure ci-dessous. Pour supporter l'éprouvette deux cylindres sont utilisé.

L'éprouvette utilisée est un ensemble de deux plaques soudées en croix (fig. II.2), et la figure ci-dessous montre le principe de l'essai.

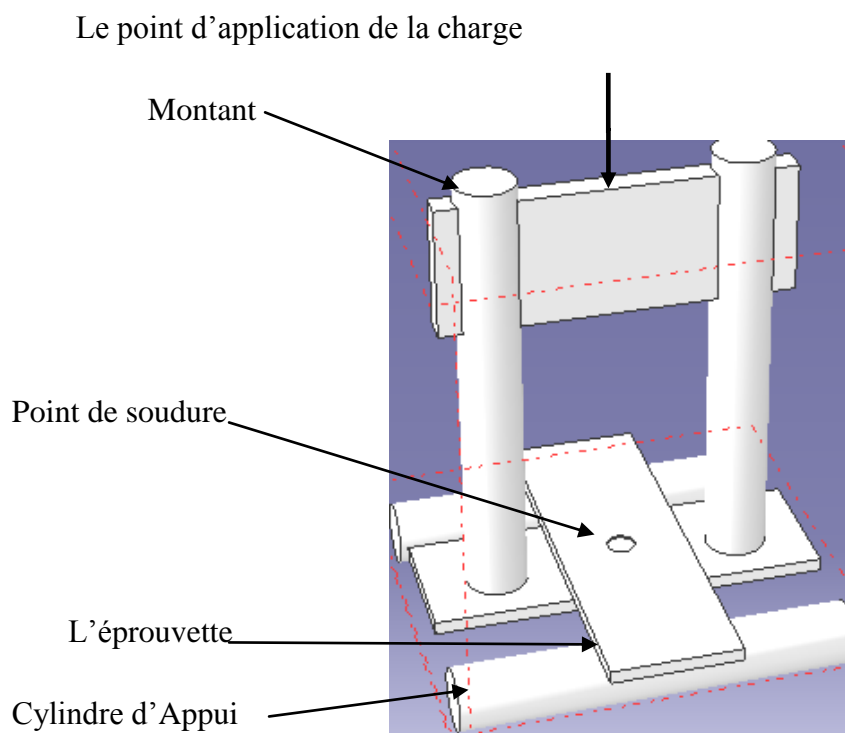


Fig. II.6: dispositif pour l'essai de traction pour l'éprouvette croix

b) Dispositif 2(essai de traction en U)

L'éprouvette utilisée c'est deux plaques pliées sous forme U soudées entre elles, avec un système d'axe solide de tirant à partir de quel on exerce un effort de traction comme le montre la figure (fig. :II.7).

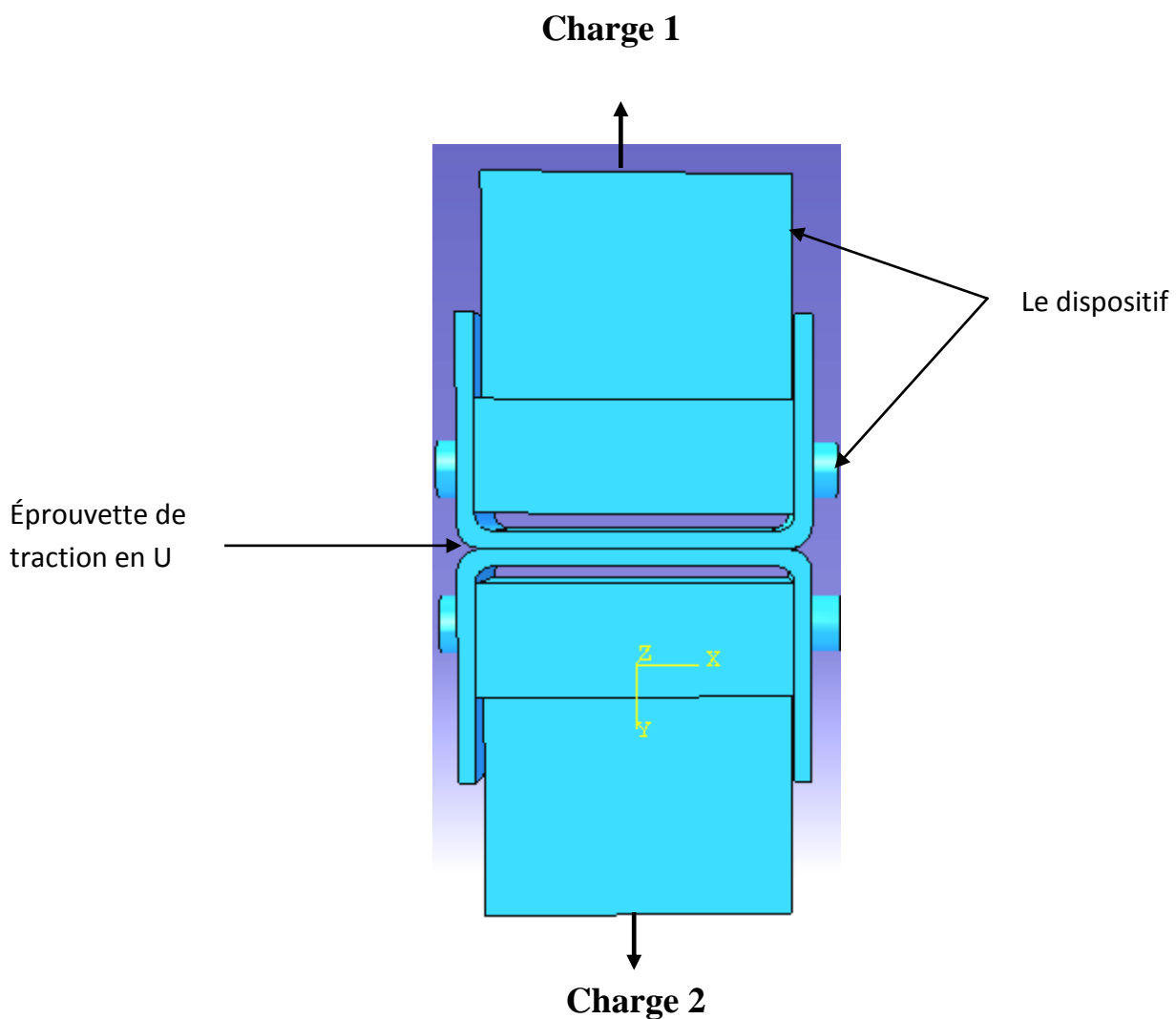


Fig. II.7 principe de l'essai de traction en U

II .3 . Machine de traction

La machine de traction utilisée est de type IBETTEST. Cette machine est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe sur laquelle repose un dynamomètre servant à

mesurer la force appliquée à l'éprouvette, et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fil mise en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur de la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette. On commande la machine automatiquement par un micro-ordinateur. Ses caractéristiques sont :

- Charge d'essais : 250KN.
- Vitesse d'essais : 10 à 500mm/mn.
- Alimentation électrique T= 220V,F=50Hz.

II .4 Condition de déroulement des essais mécaniques

Les essais sont réalisés au sein de laboratoire de génie civil dans les conditions suivantes :

-Vitesse = 10mm/mn.

-Température = 20°C

II.5.Analyse microstructural

II.5.1. Préparation des échantillons :

Les échantillons pour l'étude microstructurale ont été découpés sur la tôle sous forme de rectangle. Les échantillons une fois découpés, puis enrobés. Un polissage mécanique est alors réalisé,

a) 1^{er} polissage :

Il a pour but de créer la surface plane d'examen pour les échantillons. Il a été fait sur papier émeri de granulométrie P180, P600, P800, P1000 P1200 sur une polisseuse à deux disques ; avec un arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement et de contamination.

b) 2^{eme} polissage (polissage de finition) :

Le polissage consiste à rendre la surface à analyser plane, brillante et dénués de toute rayure. Pour cela, on frotte l'échantillon sur des papiers abrasifs de plus en plus fins (P1000, P1200, P2000 et P4000). Les raies provoquées par un papier doivent être éliminées par le suivant. Pour réaliser cette condition, il faut rayer l'échantillon avec un papier dans un sens et dans le sens perpendiculaire.

c) Finissage :

Le but principal de cette opération est d'obtenir une surface comparable à celle d'un miroir permettant ainsi de réfléchir la lumière. Les échantillons sont frottés sur des disques de feutre ou de drap imbibé d'une suspension d'abrasifs qui est le plus souvent de l'alumine (Al_2O_3)

Polisseuse à deux disques : de type «MECAPOL CONTROLAB» alimentée sous une tension de 220v et munie d'un dispositif d'arrosage.



Fig. II. .8. Polisseuse à deux disques.

Polisseuse mono plateau : Elle comporte un filtre placé sur un disque tournant à une vitesse de 300tr/min, avec la pâte diamantée.



Fig. II.9 Polisseuse mono plateau

II.5.2. Procédure d'attaque :

Après polissage, les échantillons sont attaqués chimiquement pour révéler la morphologie des différentes phases présentes. Cette attaque est une attaque électrolytique. Elle est réalisée avec une solution d'acide oxalique, sa composition chimique est de 10g de $C_2H_4O_4$ et 100ml H_2O . Les paramètres de l'attaque sont les suivants : 10 Volts et 40 secondes temps d'attaque. Généralement à la température ambiante, puis on lave l'échantillon sous un jet d'eau et on sèche à l'aide d'un séchoir.



Fig. II. .9. Séchoir d'échantillon

II.5.3 observation microscopique :

Après le polissage, la surface à analyser est soumise à une attaque chimique permettant de révéler la forme, la distribution et la quantité des phases qui constituent le matériau. Nous avons effectués ces dernières à l'aide d'un microscope optique équipé d'une caméra relié à un ordinateur

II.5.3.1. Microscope optique

Le microscope optique utilisé est de type HUND équipé d'une caméra vidéo de type EyesCora permettant l'acquisition des micrographies sur ordinateur. Sur ce dernier, un logiciel d'acquisition et de traitement de résultats PicedCora est installé. Ce microscope a quatre objectifs de grossissement 40, 100, 200 et 400 fois. Il est constitué d'une lampe qui fournit de la lumière transmise horizontalement sur un prisme qui la réfléchit verticalement. Le faisceau lumineux est localisé sur l'échantillon. La lumière réfléchi par la surface à analyser est transmise à travers la même lentille, on arrondissant l'image de 4, 10, 40 et 100 vers un miroir semi transparent qui la renvoie sur la lentille de grossissement 10, ou elle sera observée

par l'œil de l'utilisateur. Une acquisition de photos y est ainsi possible sur ordinateur au moyen de la camera vidéo.



Fig. II.10 Microscope optique

II.6. Essai de dureté

Dans l'intérêt de connaître l'influence de soudage sur la dureté de matériau utilisé, on a réalisés des essais de dureté Vickers sur le métal de base, la zone fondu et la zone affectée thermiquement (ZAT).

II.6.1. Principe de la dureté Vickers

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré, on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

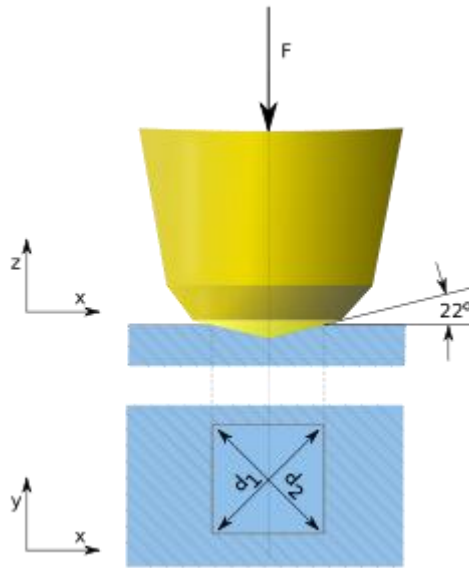


Fig. II.1 principe de dureté Vickers

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2} \quad (II.1)$$

HV = Dureté Vickers.

F = Force appliquée [N]

d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

g = Accélération terrestre [m s⁻²] (9.80665)

Le degré de dureté, noté Hv, est ensuite lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui.

ε Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation, ainsi qu'à la discussion des résultats obtenus lors des différents essais réalisés au cours de la partie expérimentale.

III.1 Résultats de caractérisation mécanique de métal de base

L'ensemble des résultats sont directement obtenus par une chaîne d'acquisition et enregistrés sur un micro-ordinateur.

A partir de l'enregistrement, on établit un diagramme rationnel de la forme : $\sigma = f(\epsilon)$ qui est la contrainte en fonction de la déformation en utilisant les formules (III.1, III.2).

$$\sigma_{\text{conv}} = \frac{F}{S_0} \quad \text{et} \quad \epsilon_{\text{conv}} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{III.1})$$

$$\sigma_{\text{rat}} = \sigma_{\text{conv}} (1 + \epsilon_{\text{conv}}) \quad \text{et} \quad \epsilon_{\text{rat}} = \ln (1 + \epsilon_{\text{conv}}) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

L₀ : longueur utile initial de l'éprouvette (mm).

S₀ : section initial de l'éprouvette (mm²).

L : longueur utile de l'éprouvette (mm).

S : force appliquée à l'extrémité de l'éprouvette (mm²).

On déduit par la suite l'allongement relatif $e(\%)$:

$$e(\%) = \frac{L - L_0}{L_0} * 100$$

III.1.1 Comportement mécanique en traction

III.1.1.1. à 0° direction de laminage

La figure (III.1) représente le comportement mécanique de l'éprouvette dans la direction de laminage à la température $T=20^{\circ}$ et pour une vitesse de déformation $V=10\text{mm/mn}$.

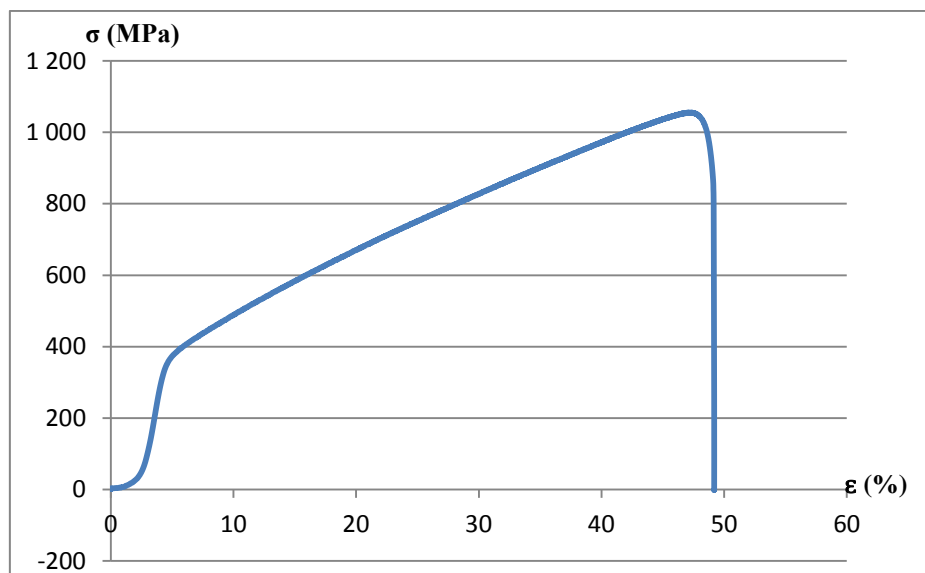


Fig. III.1. Courbe de traction à 0° direction de laminage

L'allure de la courbe peut être décomposée en trois phases :

- Une partie non-linéaire dû au glissement de l'éprouvette sur les mors de la machine (défaut de la machine).
- Une droite qui correspond à la partie élastique, où la déformation est réversible, c'est-à-dire que l'éprouvette reprend sa longueur initiale une fois que la contrainte soit supprimée. Cette partie est caractérisée par une contrainte limite qui est la limite d'élasticité.
- Une deuxième partie non-linéaire qui correspond à la partie plastique au dessus de limite élastique, où la déformation est irréversible, c'est-à-dire que la l'éprouvette ne reprend pas sa longueur initiale une fois que la contrainte soit supprimée. Cette partie de déformation engendre l'écroutissement de métal ou durcissement par déformation.

Les paramètres sont directement relevés de la courbe de traction, d'autre sont déduits à partir de ces paramètres.

F_m : charge maximal (KN).

R_m: contrainte maximal à la rupture en traction (MPa).

Allgt : allongement à la charge maximal.

Re_L : contrainte à limite élastique conventionnelle à 0.2% (MPa).

E : module de Young (MPa).

Selon la loi de HOOK, le module d'élasticité longitudinal est donné par la formule suivante :

$$E = \frac{F}{S} * \frac{1}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{Fe}{S_0} * \frac{1}{\frac{\Delta L}{L_0}} \quad (\text{III.3})$$

Température (°C)	Caractéristique			
	Re _L (MPa)	R _m (MPa)	E(MPa)	A(%)
20	325	1075	185500	47

Tableau III.1. Les caractéristiques mécaniques de matériau dans la direction de laminage

III.1.1.2. à 45° direction de laminage

-La figure (III.2) représente le comportement mécanique pour l'éprouvette à 45° direction de laminage.

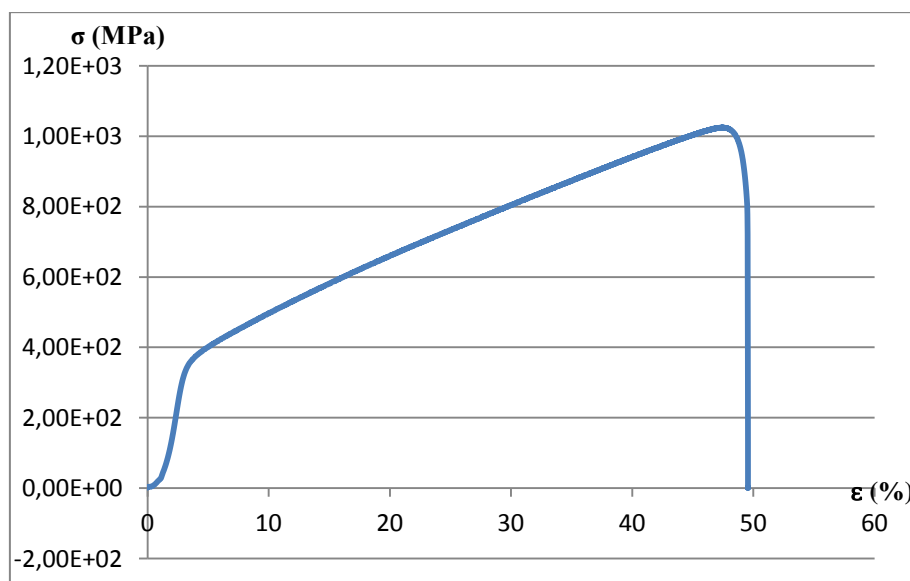


Fig. III.2. Courbe de traction à 45° direction de laminage

Température (°C)	Caractéristique			
	Re _L (MPa)	Rm(MPa)	E(MPa)	A(%)
20	328	1020	195500	47

Tableau III.2 les caractéristiques mécaniques de matériau à 45° direction de laminage

III.1.1.3. Comportement à 90° direction de laminage

-La figure (III.3) représente le comportement mécanique pour l'éprouvette à 90° direction de laminage

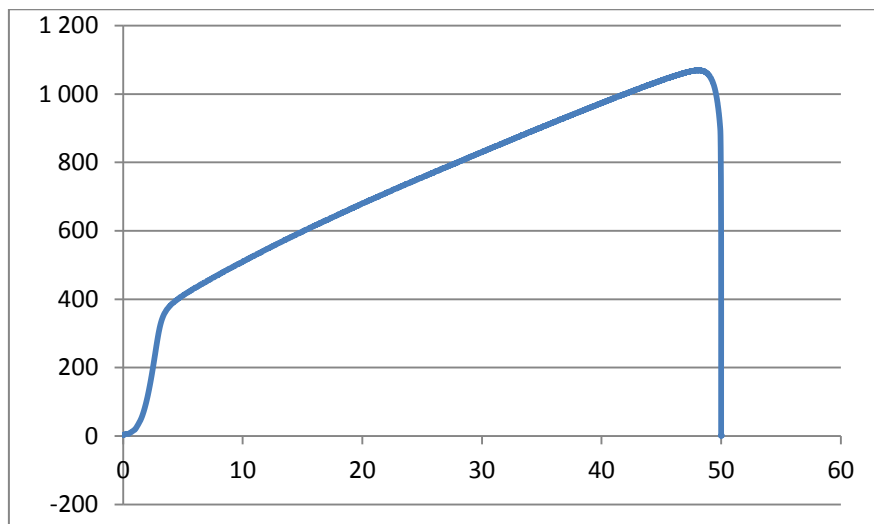


Fig. III.3. Courbe de traction à 90° direction de laminage

Température (°C)	Caractéristique			
	Re _L (MPa)	Rm(MPa)	E(MPa)	A(%)
20	331	1085	203300	48

Tableau III.3 les caractéristiques mécaniques de matériau à 90° direction de laminage

III.1.1.4. Comparaison des résultats

La figure III.4. Représente la superposition des trois courbe de traction à trois direction de laminage (0° , 45° , 90°)

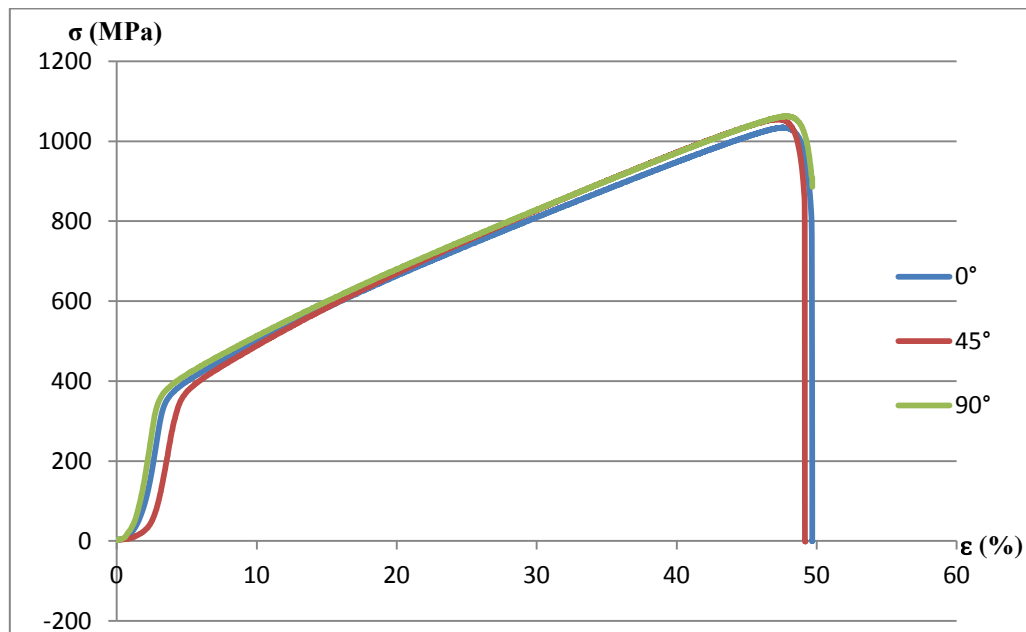


Fig. III.4. Superposition des courbes de traction à trois directions de laminage (0° , 45° , 90°)

A partir des trois courbes, on déduit que les caractéristiques intrinsèques de matériau sont différentes sur les trois directions, donc le matériau est anisotrope.

III.2. Résultats de caractérisation microstructural de métal de base

L'observation microscopique effectuée sur les échantillons à différents états, nous à révélée des changements microstructural de métal de base après déformation.

III.2.1. Etat initial

La figure III.5 représente la microstructure de métal de base

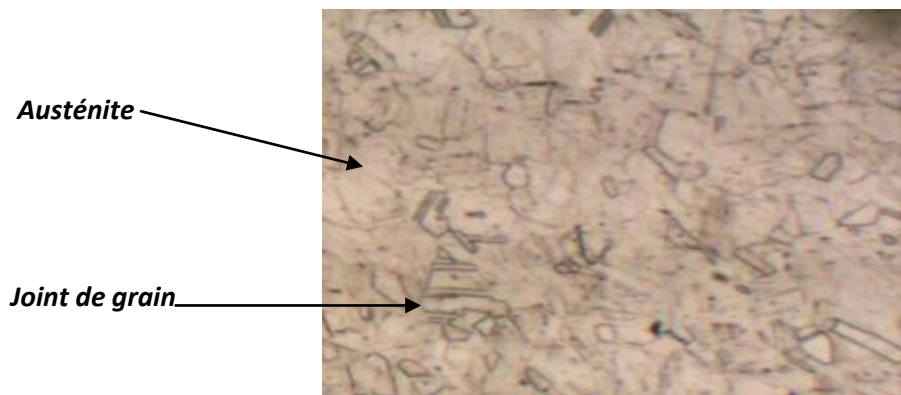


Fig. III.5: Micrographie optique de l'acier Inox 304L à l'état initiale.

A l'état initial, le matériau est un poly cristal monophasé constitué de grains austénitiques obtenus après polissage et attaque électrolytique.

III.2.1. Après rupture

La figure III.6 représente la microstructure de métal de base après déformation.

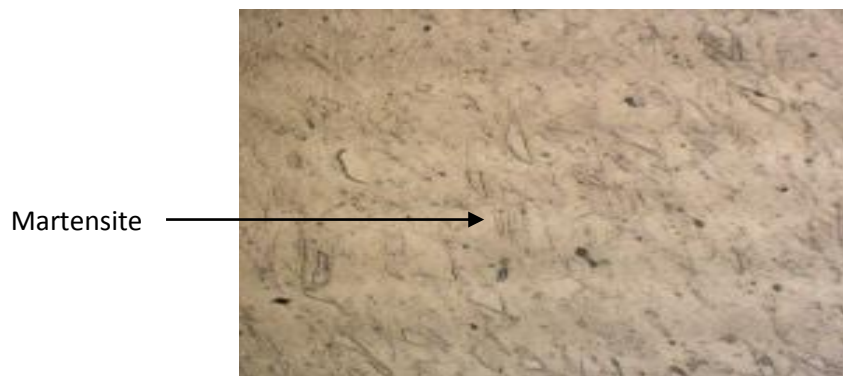


Fig. III.6: Micrographie optique de l'acier Inox 304L après déformation

La morphologie de la martensite (ϵ) est différente de celle de la martensite lenticulaire (figure III.6), elle adopte la forme de bandes parallèles. Et sa formation est en relation directe avec la formation de défauts d'empilement au sein du réseau cubique à faces centrées de l'austénite.

III.4. Comportement mécanique des points soudés

Dans cette partie on va présenter les courbes de comportement pour les différents modes de sollicitation des points soudés.

III.4.1. comportement mécanique en traction cisaillement

La figure (III.7) représente le comportement mécanique pour l'éprouvette en traction cisaillement.

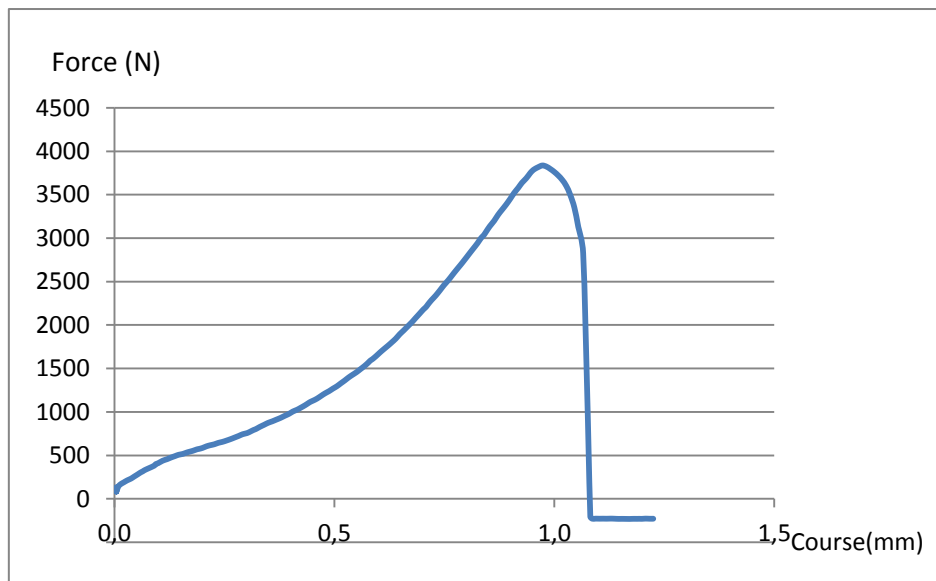


Fig. III.7. Courbe de comportement en traction-cisaillement

Température (°C)	Caractéristique		
	Rm(MPa)	A(%)	E(GPa)
20	23	17	8.20

Le tableau III.4 caractéristiques mécaniques du point soudé en traction cisaillement

III.4.2. comportement mécanique en pelage

La figure (III.8) représente le comportement mécanique de l'éprouvette en pelage :

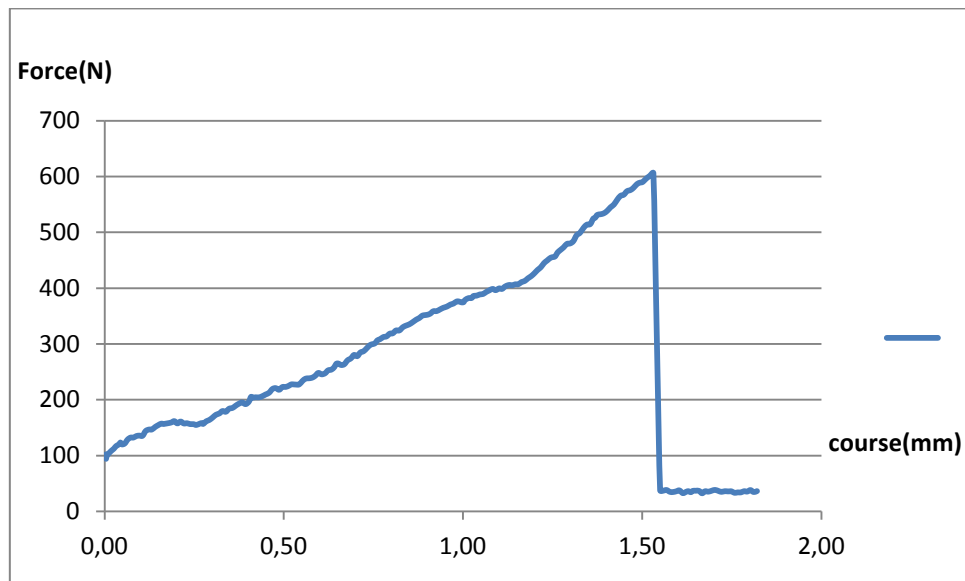


Fig. III .8. Courbe de comportement en pelage

Température (°C)	Caractéristique		
	Rm(MPa)	A(%)	E(GPa)
20	5.2	3.1	5.235

Le tableau III.5 caractéristiques mécaniques du point soudé en pelage

III.4.3. comportement mécanique de l'éprouvette de traction en U

La figure (III.9) représente le comportement mécanique l'éprouvette en U :

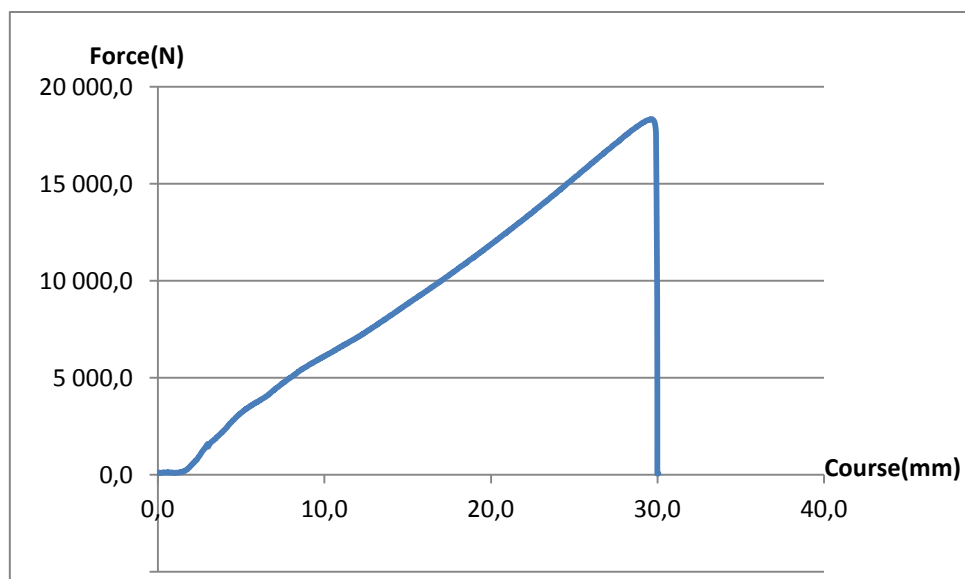


Fig. III .9. Courbe de traction en U

Température (°C)	Caractéristique		
	Rm(MPa)	A(%)	E(GPa)
20	27	3.2	14.35

Le tableau III.6 caractéristiques mécaniques de point soudé en traction en U

III.4.4. comportement mécanique en traction en croix

La figure (III.10) représente le comportement mécanique de point soudé pour l'éprouvette de traction en croix.

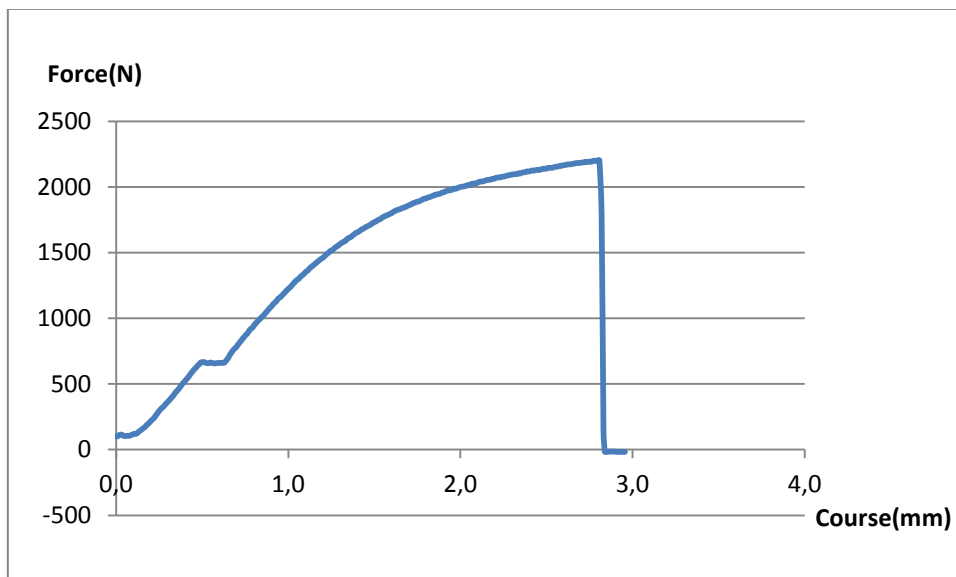


Fig. III .10. Courbe de comportement traction en croix

Température (°C)	Caractéristique	
	Fm(N)	mm
20	22250	2.8

Tableau III.7 caractéristiques mécaniques de point soudé en traction croix

On remarque sur l'ensemble des courbes une partie quasi-linéaire jusque à la rupture, donc le comportement de point soudé est un comportement quasi-fragile.

La rupture est brutale et totale sur l'interface de point soudé, elle se produit à un niveau de contrainte différent selon le type d'assemblage. On explique ça par la trempabilité de matériau et la fragilité des phases formées après soudage, donc le cop

III.4.5. Influence des paramètres de soudage

A fin de montrer l'influence des paramètres de soudage sur la tûne mécanique de point soudé, on à varié l'intensité de courant pour deux éprouvettes de même type d'assemblage (assemblage en U), et les valeurs sont mentionnées dans tableau suivant :

Eprouvette	Intensité de courant (KA)
1	10
2	7

Tableau III.8 paramètres de soudage de l'éprouvette en U

En premier lieu on remarque une influence sur le diamètre de point soudé, en effet, le diamètre 1=5mm et le diamètre 2 = 7mm.

On à réalisés des essais de traction sur chaque assemblage et les résultats sont représenté sur les figures (III .11) et (III .12).

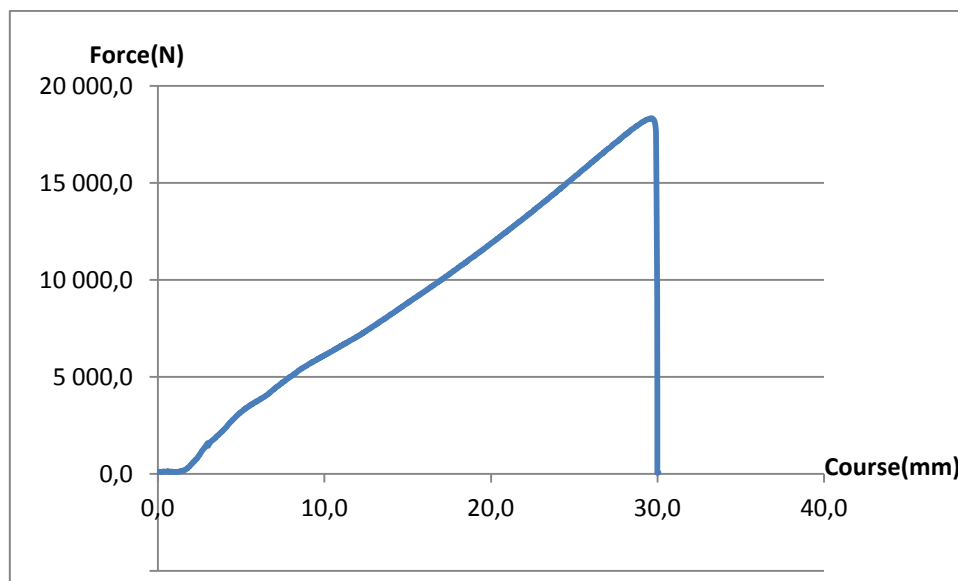


Fig. III .11. Courbe de traction de l'éprouvette 1

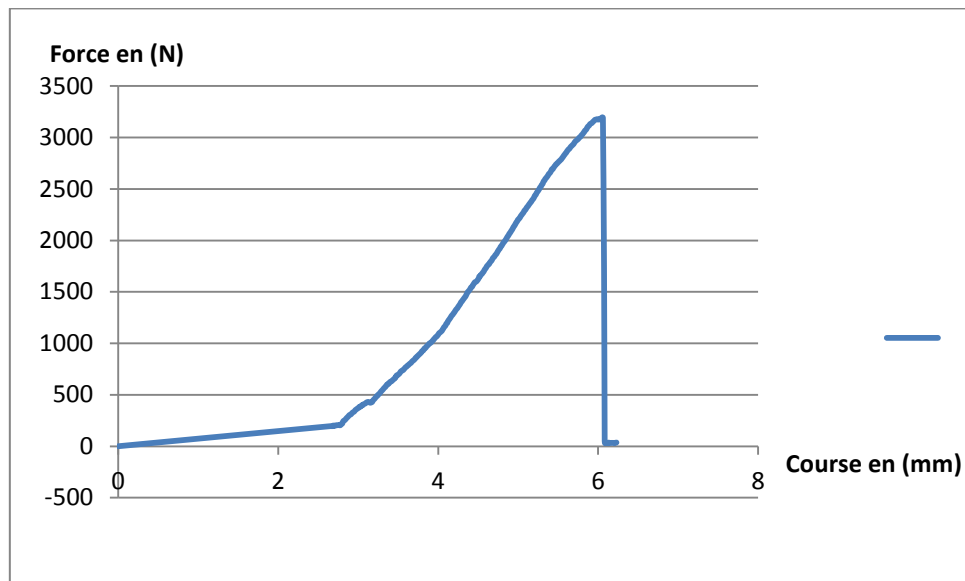


Fig. III .12. Courbe de traction de l'éprouvette 2

Les deux courbes montrent un comportement mécanique pareil avec une différence dans les caractéristiques mécaniques, en effet, la résistance maximale la rupture est supérieure pour L'ÉPROUVETTE 1. Cela peut être expliqué par le fait que l'intensité de courant augmente le diamètre de point soudé.

Le comportement mécanique de point soudé peut être influencé par un certain nombre de facteurs :

- La géométrie de point soudé.
- le mode de sollicitation de point soudé.
- Espacement entre les mors de la machine de traction.

III.5. Caractérisation micrographique de point soudé

Pour connaître l'influence de l'opération de soudage sur la microstructure de métal de base, on a réalisé des observations micrographiques qui incluent trois zones qui sont le métal de base la zone affectée thermiquement (ZAT) et le noyau fondu, et les résultats des observations sont montrés dans la figure (III .13).

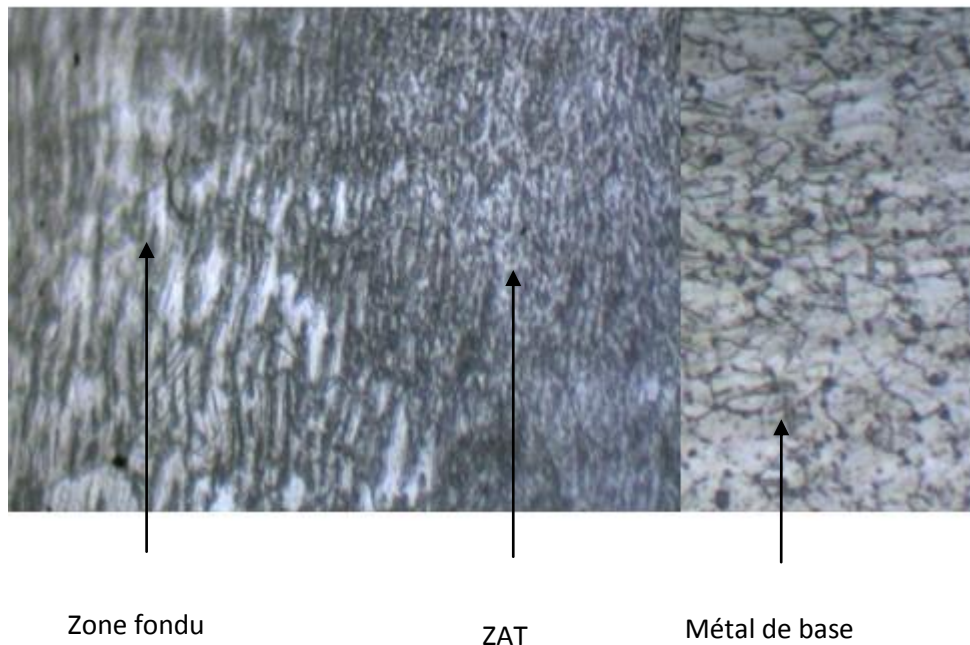


Fig. III .13. Microstructure de point soudé

La zone associée au métal de base **MB** : la température atteinte dans cette zone est restée en dessous de celle de l'austénitisation si bien qu'on ne détecte pas de modification structurale visible.

La zone affectée thermiquement **ZAT** : on remarque que la microstructure obtenue après refroidissement rapide est martensitique sous forme des lamelles, elles deviennent moins fines à la périphérie de la zone fondue, cette différence de morphologie peut être expliquée par la différence de la température au cours de soudage.

La zone fondu **ZF** : on observe une microstructure martensitique grossière au centre du point plus fine en bordure de noyau.

III.6. Essai de dureté sur le point soudé

Pour confirmer les résultats de l'observation micrographique on a réalisé des essais de dureté sur l'ensemble des zones du point soudé qui sont : la zone fondue, la zone affectée thermiquement et le métal de base, et les résultats sont mentionnés dans le tableau ci-dessous :

Zones	Zone fondue (ZF)			Zone affectée thermiquement (ZAT)			Métal de base (MB)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Essai									
Dureté	315.6	320.12	308.55	348.09	362.70	350.40	170.22	162.47	165.47
Moyenne	314.75			353.73			166.38		

Tableau III.9 .Résultats de l'essai de dureté sur le point soudé

Les résultats obtenus après essais, montre que la dureté de la ZAT est supérieure à celle de la zone fondue et largement supérieure à celle du métal de base, et ça confirme les résultats micrographique, en effet, la martensite plus fine est plus dure que la martensite grossière, et nettement plus dure que l'austénite.

III.7 Etude des facies de rupture (microscope électronique à balayage)

III.7.1 Facies de rupture (métal de base)

La figure III.14 montre le facies de rupture de métal de base après essai de traction

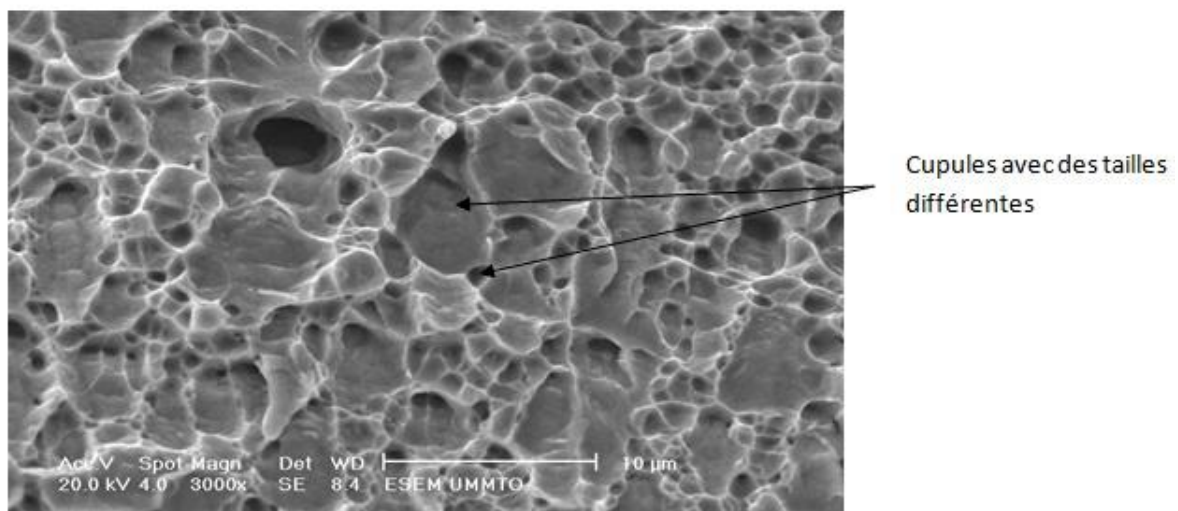


Fig. III.14. Facies de rupture de métal de base

L'observation montre un faciès constitué des cupules de tailles différentes orienté suivant la direction de traction.

III.6.2 Faciès de rupture (point soudé)

La figure III.15 représente des observations microscopiques à balayage des faciès de rupture de point soudé avec différents agrandissements.

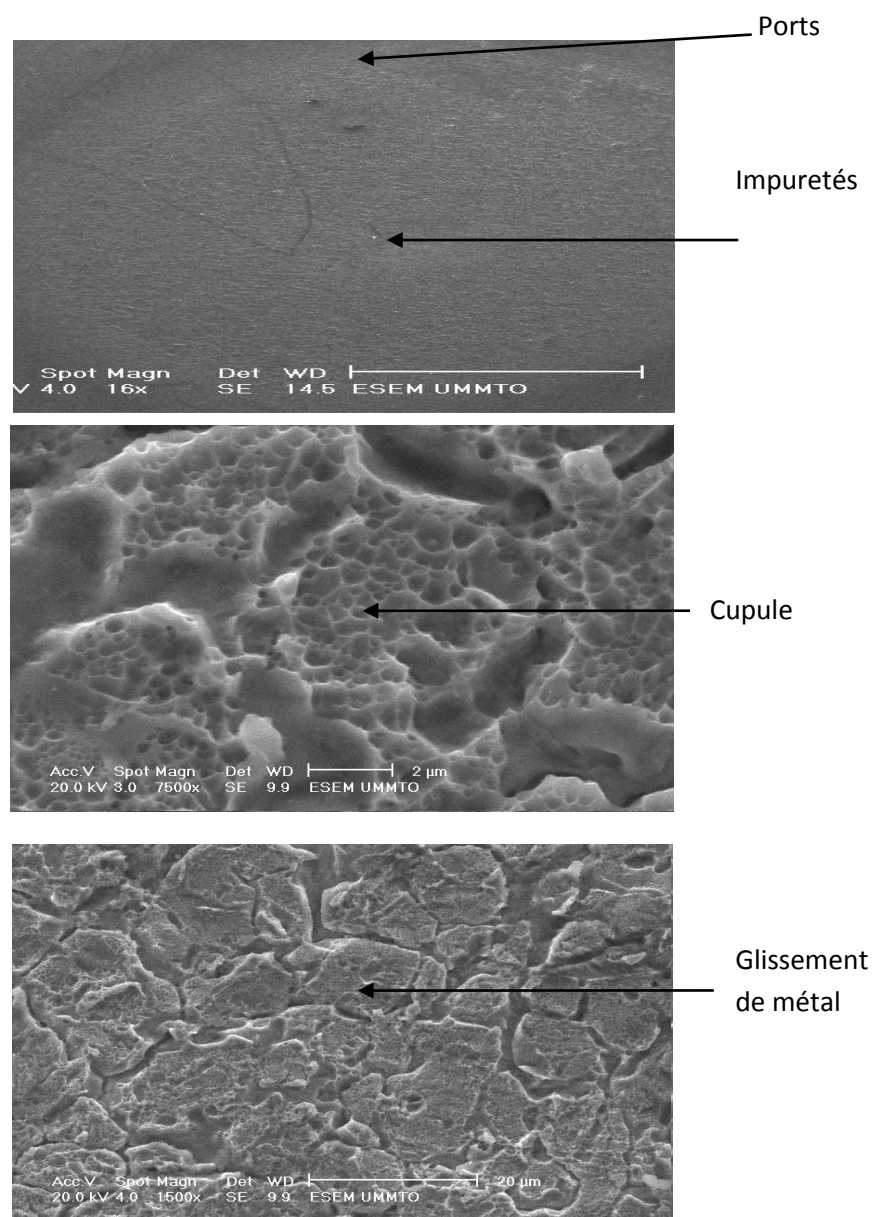


Fig. III.15. Observation microscopique à balayage de point soudé avec différents agrandissements

L'observation par microscopie électronique à balayage a révélé que le faciès de rupture présente une rupture fragile. La structure comporte aussi des défauts tels les cavités, les impuretés, les pores ainsi on constate un glissement du métal dans le sens de la sollicitation.

Conclusion général

Ce travail porte sur l'étude de comportement mécanique d'un point soudé en différents modes de sollicitation, avant d'entamer cette étude, il est primordial de faire une caractérisation mécanique et microstructurale de matériau de base (AISI 304L).

Dans le but de mettre en évidence le comportement élastoplastique de matériau ainsi que sont anisotropie, on a réalisé des essais de traction sur des éprouvettes prélevées selon trois directions par rapport au sens de laminage, on a conclu sur les courbes de traction que comportement de matériau est élastoplastique. Les caractéristiques intrinsèques sont différentes selon le sens de découpage de la tôle, donc le matériau est anisotrope.

L'observation microscopique à révélé que le métal de base est un polycristal monophasé constitué des grains austénitiques. À 100% de déformation la structure est devenu martensitique avec de l'austénite résiduelle conséquence de l'effet TRIP.

Après une première phase de caractérisation de métal de base, des essais de caractérisation mécanique et microstructural ont été réalisé sur le point soudé. Dans un premier temps le point soudé a été sollicité avec différents modes de sollicitation, qui sont la traction cisaillement, la traction en U, la traction en croix et l'essai de pelage.

L'ensemble des courbes ont présenté un comportement quasi fragile des points soudés, avec une rupture qui se produit à un niveau de contrainte différent selon le mode de sollicitation.

L'influence des paramètres de soudage sur les caractéristiques mécanique de point soudé, ont été également testées par la variation de courant de soudage sur un même type d'assemblage, on a conclu que l'augmentation de courant de soudage augmente le diamètre de point soudé ainsi que sa résistance mécanique.

L'observation microscopique de point soudé après polissage et attaque électrolytique à révélée trois structure distincte :

- Une structure austénitique associée au métal de base.
- Une structure martensitique lamellaire associée à la ZAT.
- Une structure martensitique grossière au centre de point et plus fine en bordure de noyau fondu.

Les essais de la dureté ont vérifié les résultats de l'observation microscopique, en effet, la dureté est plus élevée dans la ZAT par rapport à la ZF ce qu'est relatif à la morphologie de la martensite formée, et beaucoup plus dure par rapport au métal de structure austénitique.

Comme perspective j'envisage l'étude de l'influence de tous les paramètres de soudage sur le comportement mécanique de point soudé et la réalisation des modèles basés sur une approche par éléments finis.

References bibliographiques :

- [1] Arcelor Mittal, Aciers TRIP (TRansformation Induced Plasticity), 2012
- [2] Mohamed Reda berrahmoun , transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austénitique instable 301In2006
- [3] : thèse Bagher Mohammad sadeghi (analyse et identification du comportement mécanique d'aciers à effet TRIP à partir de mesures de champs cinématiques.
- [4] J. Paul bailon, J. Marie dorlot. " Des matériaux", 3eme édition 2000-2001
- [5] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. " Livre de l'acier", Ed. SOLLAC, 1996.
- [6] A. Roos, B. Milet. "Précis de métallurgie Appliquée", Edition Technique et Documentation- Lavoisier
(1982).
- [7]: Gaétan MONARI : Sélection de modèles non linéaires par leave-one-out
Etude théorique et application des réseaux de neurones au procédé de soudage par points
- [8] DROUART C, Soudage par résistance, Publications du soudage et de ses applications, 1993
- [9]: thèse Chainarong SRIKUNWONG: MODELISATION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR POINTS
- [10] thèse Frédérique Rossillon Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point
AISSANI 103
24THESE
- [11] M. MARYA, X. Q. GAYDEN. Development of requirements for resistance spot welding Dual-Phase (DP600) steels Part 2 – Statistical analyses and process maps. Welding Journal, Vol. 84-s, N° 12, pp. 197-204, 2005
- [12] M. MARYA, K. WANG, L. G. HECTOR, X. GAYDEN. Tensile-shear forces and fracture modes in single and multiple weld specimens in Dual-Phase steels. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, pp. 287-298, Feb. 2006
- [13] thèse Comportement mécanique des soudures par point ; mécanisme et stratégie de prédiction dans le cas des tôles en acier pour automobile (Sylvan DANCETTE).
- [14] 19^{ème} congrès français de mécanique Caractérisation mécanique locale d'un point soudé des aciers à très haute résistance