



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en

Ingénierie des matériaux et des surfaces

Thème :

**Influence de la contrainte sur la transformation
martensitique dans les aciers inoxydables**

Proposé et encadré par :

Mm: Zahra Sidhoum

Réalisé par :

Hachoud Dounia

Guessser Amina

Année universitaire 2019/2020

Remercîment :

Avant tout je tiens à remercier **ALLAH** tout puissant qui m'a accordé la santé et le courage pour mener ce travail jusqu'à son bout .

Je tiens à remercier **Mm ZAHRA SIDHOUM** ma promotrice qui ma fait l'honneur de m'encadrer et conseiller tout au long de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également pour toutes les aides qui m'ont été fournies par :

- Les enseignants et tout le personnel du département Mécanique de l'université Saad dahleb (Blida).
- Notre chef de département Mr Temmar .
- Tous ceux qui ont contribue de prés ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Mes vifs remerciements vont également mes chers parents pour leur soutien, compréhension et patience tout au long de mon cursus.

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers parents

A mes frères

A tous les enseignants

A tous mes proches

A tous mes amis

ملخص:

يتميز الفولاذ المقاوم للصدأ بتأثير TRIP بميزة تقديم حل وسط جيد جدًا بين المقاومة والليونة ، وقد جعل استخدامها من الممكن تقليل سماكة الألواح المكونة لجسم أبيض ، وبالتالي تقليل وزنها مع تحسين أدائها.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير الضغط على التحول المارتينسيستيك في الفولاذ الأوستنيتي المقاوم للصدأ بالكامل من نوع TRIP.

الصلب المعني هو فولاذ TRIP الأوستنيتي بالكامل من النوع L304. لإجراء هذه الدراسة ، قمنا بتقسيم عملنا إلى قسمين رئيسيين : الجزء النظري: مخصص لعرض الفولاذ المقاوم للصدأ مع تأثيرات TRIP وخصائصها والأنواع المختلفة الموجودة من ناحية وعملية المسحوق الموضعي من ناحية أخرى.

جزء تجريبي: هذا الجزء مخصص للتعريف التجريبي للسلوك الميكانيكي لصلب L304 ، لتوصيف التحول المارتينزي الناتج عن الإجهاد الميكانيكي.

RESUME :

Les aciers inoxydables à effets TRIP ont l'avantage de présenter un très bon compromis résistance ductilité, leur utilisation a permis la réduction des épaisseurs des tôles constituant une caisse en blanc, réduisant ainsi leur poids tous en améliorant leur rendement.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence d'une contrainte sur la transformation martensitique dans un acier inoxydable entièrement austénitique de type TRIP. L'acier en question est l'acier TRIP entièrement austénitique du type 304L. Pour mener à bien cette étude, nous avons divisé notre travail en deux grandes parties :

Une partie théorique : réservée à la présentation des aciers inoxydables à effets TRIP, de leurs caractéristiques, des différents types qui existent d'une part, et au procédé de soudage par points d'autre part.

Une partie expérimentale: cette partie est réservée à l'identification expérimentale du comportement mécanique de l'acier 304L, à la caractérisation de la transformation martensitique induite par la sollicitation mécanique.

Abstract :

TRIP effect stainless steels have the advantage of presenting a very good compromise between resistance and ductility, their use has made it possible to reduce the thicknesses of the sheets constituting a white body, thus reducing their weight while improving their performance.

The objective of this work is to study the influence of a stress on the martensitic transformation in a fully austenitic stainless steel of the TRIP type.

The steel in question is the fully austenitic TRIP steel type 304L. to carry out this study, we have divided our work into two main parts :

A theoretical part: reserved for the presentation of stainless steels with TRIP effects, their characteristics, the different types which exist on the one hand, and the spot welding process on the other hand.

An experimental part: this part is reserved for the experimental identification of the mechanical behavior of 304L steel, for the characterization of the martensitic transformation induced by mechanical stress.

Table de matieres

IntroductionErreur ! Signet non défini.

Chapitre I Généralités sur les aciers inoxydables à effets TRIP

I.1. Introduction.....Erreur ! Signet non défini.

I.2. Historique et définition des aciers inoxydables.....Erreur ! Signet non défini.

I.3. Classification des aciers inoxydablesErreur ! Signet non défini.

I.3.1. Aciers inoxydables ferritiques..... Erreur ! Signet non défini.

I.3.2. Aciers inoxydables martensitiques Erreur ! Signet non défini.

I.3.3. Aciers inoxydables austénitiques.....Erreur ! Signet non défini.

I.3.4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex) Erreur ! Signet non défini.

I.4. Rôles des éléments d'addition sur les propriétés des aciers inoxydables Erreur ! Signet non défini.

a) Eléments alphas : Erreur ! Signet non défini.

b) Eléments gammagènes : Erreur ! Signet non défini.

I.5. Effet TRIP : Plasticité de transformationErreur ! Signet non défini.

I.6. Mécanismes responsables du TRIPErreur ! Signet non défini.

I.7. Aciers à effet TRIPErreur ! Signet non défini.

Chapitre II Généralités et caractéristiques du soudage par points

II.1.1. Introduction :Erreur ! Signet non défini.

II.1.2. Définition du procédé de soudage :Erreur ! Signet non défini.

II.1.3. Types de soudures :Erreur ! Signet non défini.

II.1.4. Conditions de réalisation :Erreur ! Signet non défini.

II.1.5. Conditions de réalisation :Erreur ! Signet non défini.

II.1.6. Différentes parties d'une soudure :Erreur ! Signet non défini.

II.1.7. Différents types de soudage :Erreur ! Signet non défini.

II.2.1. Introduction :Erreur ! Signet non défini.

II.2.2. Définition du soudage par points :Erreur ! Signet non défini.

II.2.2. Principe du procédé :Erreur ! Signet non défini.

II.2.3. Paramètres du procédé :Erreur ! Signet non défini.

II.2.4. Fonctionnement de soudage par points :Erreur ! Signet non défini.

II.2.5. Matériaux appropriés pour le soudage par points :..... Erreur ! Signet non défini.

II.2.5. Les applications de soudage par points :..... Erreur ! Signet non défini.

chapitre III Etude Experimentale

A. Matière première et techniques expérimentales..... Erreur ! Signet non défini.

III.1. Introduction..... Erreur ! Signet non défini.

III.2. Présentation du métal de l'étude..... Erreur ! Signet non défini.

III.3. Techniques de caractérisation..... Erreur ! Signet non défini.

III.3.1. Caractérisation microstructurale..... Erreur ! Signet non défini.

III.3.2. caractérisation mécanique..... Erreur ! Signet non défini.

a. Essai de traction..... Erreur ! Signet non défini.

b. Essai de dureté Vickers..... Erreur ! Signet non défini.

B. Résultats de caractérisation..... Erreur ! Signet non défini.

III.3.1. Résultat du métal de base..... Erreur ! Signet non défini.

III.3.1.1. Micrographie..... Erreur ! Signet non défini.

III.3.1.2. Essai de dureté Vickers..... Erreur ! Signet non défini.

III.3.1.3. Analyse par les rayons X(DRX)..... Erreur ! Signet non défini.

III.3.2. Identification du comportement mécanique de l'acier 304L .. Erreur ! Signet non défini.

III.3.2.1. Résultats de l'essai de traction..... Erreur ! Signet non défini.

III.3.2.2 Résultats de la caractérisation microstructural..... Erreur ! Signet non défini.

conclusion..... Erreur ! Signet non défini.

conclusion Générale..... Erreur ! Signet non défini.

Introduction

Dans la course au développement qu'à engager l'homme en vue d'amélioration et d'allègement de certaines structures, on assiste de jours en jours à l'apparition de nouveau matériau. Parmi ces matériaux, les aciers à effets TRIP. Ces derniers, appartiennent à la famille des aciers inoxydables entièrement austénitiques et ont l'avantage de présenter un très bon compromis résistance ductilité. Leur utilisation a permis la réduction des épaisseurs des tôles, réduisant ainsi leur poids tout en améliorant leur rendement.

Au cours d'un chargement thermomécanique dans ces aciers, l'effet TRIP (Transformation Induced Plasticity) dû à la transformation de l'austénite résiduelle en martensite se traduit par une évolution de leur microstructure. La transformation peut améliorer le comportement mécanique (la formabilité, la résistance et la capacité d'absorption d'énergie,...).

Ces aciers sont particulièrement adaptés au soudage, ce qui justifie leurs places prépondérantes dans les constructions chaudronnées en acier inoxydable. En effet ces aciers étant austénitiques à toute température, ils manifestent pratiquement pas de transformation métallurgique lors du soudage, et les propriétés mécaniques des joints sont comparables à celles du métal de base.

Le principal mode d'assemblage d'une caisse en blanc est le soudage par point qui offre une bonne résistance à la rupture, en plus d'être assez facile à réaliser, ce mode d'assemblage est assimilé à un chargement thermomécanique vu qu'on fait subir aux pièces à assembler un chauffage jusqu'à la température de fusion mais aussi un effort de forgeage.

Ce présent manuscrit est structuré en deux parties : une synthèse bibliographique, englobant deux chapitres, et une partie expérimentale.

Le chapitre I fait figure de petite présentation des aciers inoxydables à effets TRIP, de leurs caractéristiques, des différents types qui existent. Le chapitre II est consacré à la définition du procédé de soudage par points. Nous avons essayé de définir ce procédé, les étapes successives pour sa réalisation, les différentes parties d'une soudure, leurs microstructures, les paramètres du soudage par point, les défauts qui en résultent. Les étapes qu'on a suivies pour la réalisation de notre travail, les paramètres utilisés, c'est-à-dire les

conditions de déroulement des essais et aussi une présentation des outils employés ont fait l'objet de la première partie du chapitre III. Quant à la deuxième partie de ce dernier, elle regroupe les résultats et discussions portant sur la caractérisation mécanique et microstructurale du notre métal d'étude à l'état initial et après avoir subi essai de traction.

Nous avons terminé notre travail par une conclusion générale sur nos principaux résultats et les perspectives envisagés pour approfondir notre étude.

Chapitre I

Généralités sur les aciers inoxydables à effets TRIP

I.1. Introduction

Ce premier chapitre va nous permettre d'avoir des notions générales sur les aciers inoxydables en premier lieu et sur les aciers à effet TRIP dans un deuxième temps. Un petit historique qui va revenir sur leur naissance et leur développement, leurs définitions, leurs classifications, leurs caractéristiques et certain domaine d'application.

I.2. Historique et définition des aciers inoxydables

Ce sont essentiellement des alliages Fer-Chrome ou Fer-Chrome-Nickel, dont la teneur en carbone varie entre 0.02% à 1% et le pourcentage de chrome doit être supérieur à 12%, avec dans certains cas l'ajout d'éléments d'alliages interstitiels carbone ou azote ou métalliques tel que le nickel, molybdène et le titane... pour améliorer la tenue à la corrosion et les propriétés mécaniques. [1]

Découverts, dans les années 1890, par l'allemand Hans Goldschmidt qui a pu développer les premiers aciers au chrome et à bas carbone. Entre 1904 et 1909, de nombreux chercheurs, en particulier le français Léon GUILLET, étudièrent et mirent au point différents alliages Fe-Cr-Ni. En 1911, l'allemand Philip MONNARTZ, mit en évidence l'influence de la teneur en chrome des alliages par rapport à leur résistance à la corrosion.

Aucun métal n'est inoxydable, mais dans le cas des aciers inox on parle d'aciers difficilement oxydables, autrement dit peu sensible à la corrosion. L'addition de chrome au fer, permet la formation en surface d'un film de passivation invisible et protecteur, qui provient de l'oxydation naturelle de la surface, et qui rend le métal passif. [2] . Cette pellicule protectrice a pour particularité d'être : très mince, chimiquement stable (passive) dans un milieu qui lui offre assez d'oxygène et aussi d'avoir une forte adhérence.

C'est la qualité du film de passivation qui détermine les qualités « d'inoxidabilité » de l'acier. Ceci implique que ce film ne soit pas endommagé par des actions extérieures telles que des rayures.

Les aciers inoxydables présentent une grande résistance à l'action de l'atmosphère aux divers degrés d'humidité et de salinité, aux attaques chimiques (acides, bases, agent de corrosion, eau de mer, environnement chimiques...). Vu que les mécanismes travaillent de

plus en plus dans des milieux difficiles en termes de corrosion, cela a contraint les ingénieurs à remplacer les aciers ordinaires par des aciers spéciaux. Ces aciers sont : les aciers réfractaires travaillant à de hautes températures (températures supérieures à 550°C), dans des milieux oxydants (présence d'oxygène ...), milieux réducteurs (hydrogène), les métaux...

I.3. Classification des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables constituent une grande famille d'alliages métalliques. Suivant leur teneur en chrome et les traitements thermiques qu'ils ont subis, ils présentent une large gamme de propriétés [3].

Il existe quatre classes d'aciers inoxydables (de structures cristallographiques différentes), dont l'emploi dépend des propriétés recherchées, ils sont obtenus à partir des différentes

zones de ces diagrammes :

- Les aciers ferritiques sont obtenus par refroidissement ;
- Les aciers austénitiques sont obtenus par trempe à partir d'une composition située dans la boucle γ , la phase austénitique résultante étant thermodynamiquement métastable ;
- Les aciers martensitiques sont obtenus de la même manière que les aciers austénitiques, à la différence que dans ce cas l'austénite obtenue est très instable à cause de la présence du carbone et se transforme en martensite ;
- Les aciers austéno-ferritiques sont obtenus à partir d'une composition située sur la limite de boucle γ .

I.3.1. Aciers inoxydables ferritiques

En principe, les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par le fait que leur structure reste ferritique dans tout l'intervalle de température c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de transformation $\alpha \leftrightarrow \gamma$

Les propriétés mécaniques de ces aciers :

- Limite d'élasticité $R_{p0.2} = 300$ MPa ;
- Résistance à la rupture par traction assez faible $R_m = 500$ MPa.

Pour améliorer la résistance mécanique, l'addition de nickel dans l'alliage est privilégiée à l'addition de carbone quand les précipités de carbone sont à éviter. Le nickel, de structure CFC, favorise la formation d'une solution solide austénitique CFC

(γ) aux dépens de la structure CC (α). Le nickel est dit élément γ -gène. Ainsi, les alliages base nickel et les aciers austénitiques ont été développés. Les nuances industrielles les plus utilisées peuvent, selon leur teneur en chrome, être divisées en trois groupes (tableau I.1).[3]

Groupe	Teneur en chrome (% en masse)	Teneur en carbone (% en masse)	Autres éléments Dont stabilisant
1	10,5 a 13	$\leq 0,080$	Stabilisant : Ti
2	16 a 18	$\leq 0,080$	Stabilisants : Ti Nb Zr V Resistance a la corrosion : Mo
3	> 20	$\leq 0,020$	Stabilisants : Ti Nb Resistance a la corrosion : Mo

Tableau I.1 : classification des aciers inoxydables ferritiques. [3]

I.3.2. Aciers inoxydables martensitiques

L'obtention d'une structure entièrement martensitique, après trempe, confère à ces nuances une limite d'élasticité, une résistance à la rupture et une dureté très élevées. Comme pour tous les aciers non ou faiblement alliés, le carbone joue un rôle essentiel. Pour les aciers inoxydables, suivant la norme EN 10020, la teneur maximale en carbone est limitée à 1,2 %. Leur teneur en chrome est comprise entre 11,5 et 18 %, ils peuvent contenir jusqu'à 6 % de nickel et jusqu'à 1,5 % de molybdène. Ces aciers sont toujours utilisés à l'état trempé et revenu. Ils présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques telles que :

- Limite d'élasticité $R_{p0,2}$ qui dépasse 1000 MPa ;
- Résistance à la rupture R_m supérieure à 1200 MPa ;
- Allongement à rupture dépasse rarement 10%.

Suivant leur composition chimique, ils sont divisés en quatre groupes (tableau I.2).

groupe	Composition chimique (% en masse)			
	Carbone	Chrome	nickel	molybdène
1	≤0,15	11,5 a 13,5	≤ 1,0	≤0,60
2	0,15 a 0,50	12,0 a 14,5	≤1,0	≤0,80
3	0,60 a 1,20	14,0 a 18,0	≤1,0	≤0,80
4	≤0,22	12,0 a 18,0	1,5 a 6,0	≤1,50

Tableau I.2 : classification des aciers inoxydables martensitiques [3].

I.3.3. Aciers inoxydables austénitiques

Malgré les progrès incontestables réalisés, en matière de ductilité et de ténacité, par les aciers inoxydables ferritiques, les aciers inoxydables austénitiques du type Fe-Cr-Ni représentent encore 80 % du marché mondial. Ceci est dû au fait que leur structure cristallographique de type cubique à faces centrées leur confère une ductilité et une ténacité exceptionnelles depuis les températures cryogéniques jusqu'à plusieurs centaines de degrés Celsius. A ces propriétés intrinsèques, il faut ajouter une excellente soudabilité opératoire et métallurgique, ce qui facilite la mise en œuvre [3].

A température ambiante, ces aciers présentent un bon compromis entre résistance mécanique et allongement.

Les caractéristiques mécaniques de ces aciers sont :

- Limite d'élasticité est comprise entre 350 et 400 MPa;
- Résistance à la rupture dépasse 800 MPa ;
- Allongement à rupture (A%) peut atteindre 50%.

Groupe	Teneur en chrome (% en masse)	Teneur en carbone (% en masse)	Autres éléments Dont stabilisant
1	10,5 a 13	≤ 0,080	Stabilisant : Ti
2	16 a 18	≤ 0,080	Stabilisants : Ti Nb Zr V Resistance a la corrosion : Mo
3	> 20	≤ 0,020	Stabilisants : Ti Nb Resistance a la corrosion : Mo

Tableau I.3 : désignation des aciers inoxydables austénitiques Fe-Cr-Ni(Mo) suivant la norme EN 10088-1 (la teneur en chrome étant comprise entre 16 et 26%) [3].

I.3.4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex)

Les propriétés des aciers austéno-ferritiques sont dues à la structure biphasée austénite ferrite .Ils sont obtenus par trempe depuis une structure mixte austénite-ferrite, ils combinent favorablement les propriétés mécaniques et de corrosion des aciers austénitiques et ferritiques.

Les principales nuances contiennent 22 à 25% de chrome et 4 à 7% de nickel.

Ces aciers sont utilisés dans les conditions relativement agressives : industries chimiques, pétrolière et maritime [4].

I.4.Rôles des éléments d'addition sur les propriétés des aciers inoxydables

Les éléments d'addition ajoutés à l'acier ou alliage métallique à base de fer (Fe + C), jouent un rôle particulier sur les caractéristiques générales, ou un rôle commun lorsque plusieurs éléments d'additions sont présents dans la composition chimique finale. Les éléments

d'alliages se répartissent en deux catégories : ceux qui favorisent le maintien du fer (α) et ceux qui stabilisent le fer (γ).

Les informations suivantes montrent brièvement le type d'influence que peuvent avoir quelques éléments d'alliage et leur rôle quand ils sont additionnés à un acier [5].

a) Eléments alphagènes :

Le chrome

Élément de base de tous les aciers inoxydables qui offre la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud.

Le silicium

C'est un élément alphagène, il augmente la résistance à la corrosion et améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage.

Le molybdène

C'est un élément alphagène, améliore la qualité du film passif, en particulier en milieux chlorurés et acides, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Le molybdène augmente la résistance au fluage des aciers au chrome. Il diminue la fragilité au revenu. Il améliore sensiblement la résistance à la corrosion intergranulaire et par piqûre [6].

Le vanadium

Élément formateur de fer (α). Avec la présence de Nickel, il améliore la résistance mécanique [7].

Le titane

Élément formateur de ferrite (α). Il se combine dans les aciers ferritiques et austénitiques avec le carbone pour former le carbure de titane, et avec l'azote pour former un nitrure de titane, dont l'existence rend l'acier insensible à la corrosion intergranulaire.

Le niobium

C'est un élément alphagène, il se combine également avec le carbone dans les aciers pour s'opposer à la corrosion intergranulaire.

b) Eléments gammagènes :

Le nickel

Grâce à son rôle gammagène, stabilise l'austénite aussi bien à température ambiante qu'aux températures très basses. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique, il améliore la résistance à la corrosion, il affine le grain et améliore la ductilité [7].

Le manganèse

Bien que classé comme élément gammagène, devient alphagène aux teneurs supérieures à 7 %, rend ainsi difficile la transformation de l'austénite en martensite dans les aciers CR- NI et lors des sollicitations mécaniques aux basses températures, renforçant résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage).

Le carbone

Élément fortement gammagène, contribue à stabiliser l'austénite pour accroître les propriétés mécaniques de l'acier (dureté, charge à la rupture, fluage...) lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome $Cr_{23}C_6$ intergranulaires qui diminuent la résistance à la corrosion intergranulaire [7].

L'azote

Puissant élément gammagène, contribue également à stabiliser l'austénite. Associé à une basse teneur en carbone, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion intergranulaire [8].

Le soufre

À des teneurs de l'ordre 0,2%, il améliore considérablement l'usinabilité (tournage, fraisage, perçage, etc.) mais cela se fait au détriment de la résistance à la corrosion par piqûres [9].

Le cuivre

Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion et pour accroître l'aptitude à la frappe à froid

I.5. Effet TRIP : Plasticité de transformation

Transformation Induced Plasticity (TRIP), cette expression en anglais indique que la plasticité est induite par la transformation.[10] consacra tout un livre à ce phénomène et il le décrit comme un "...accroissement significatif de la plasticité au cours d'un changement de phase. Pour une contrainte extérieure appliquée, dont la contrainte équivalente est petite comparée à la norme de la limite d'élasticité du matériau, une déformation plastique macroscopique se produit...". Cette définition exprime que la plasticité est induite par la transformation « plasticité de transformation ». 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. Celle-ci sera traitée en détail dans la suite de ce chapitre.

I.6. Mécanismes responsables du TRIP

De point de vue microscopique, deux mécanismes permettent d'expliquer l'apparition du TRIP : le mécanisme de Greenwood-Johnson et le mécanisme de Magee.

- **Mécanisme Greenwood-Johnson**

La première approche, proposée par De Jong et al. [I-32], est basée sur le fait que la transformation martensitique $\gamma \rightarrow \alpha'$ s'accompagne d'une variation de volume. La différence de volume entre la phase mère et la phase produite crée des contraintes internes dans le matériau. La plasticité de transformation serait due alors à l'accommodation de ces contraintes

internes. La contrainte externe va orienter l'écoulement suivant son sens d'application. La déformation du métal résulte alors de la superposition des champs de contrainte, interne et appliqué. Un schéma de ce mécanisme est donné en (figure I.1). [11]

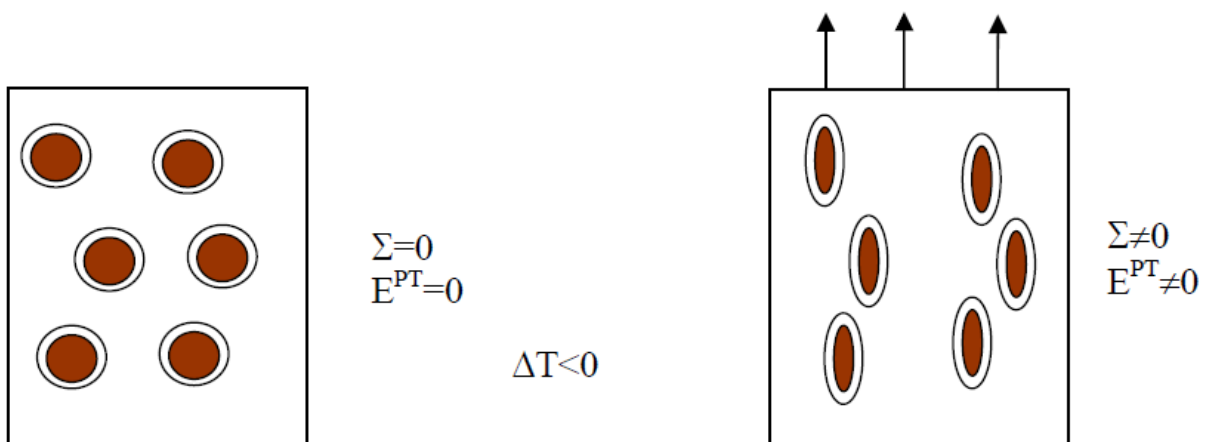


Figure I.1: Mécanisme Greenwood Johnson. [12]

- **Mécanisme de Magee**

Il correspond à l'orientation des variantes de martensite sous un chargement (**figure I.2**). Lors d'un refroidissement à contrainte (globale et locale) nulle, il n'existe pas de déformation de transformation macroscopique (hormis la variation de volume) car les déformations de transformation propres à chaque variante se compensent mutuellement. La formation des variantes est équiprobable. Au contraire lorsque le déviateur des contraintes est non nul lors du refroidissement, seules les variantes les mieux orientées par rapport au chargement vont s'activer. Il y a sélection des variantes par la contrainte. Ainsi, la déformation de transformation globale sera non nulle et orientée par les contraintes.. [13]

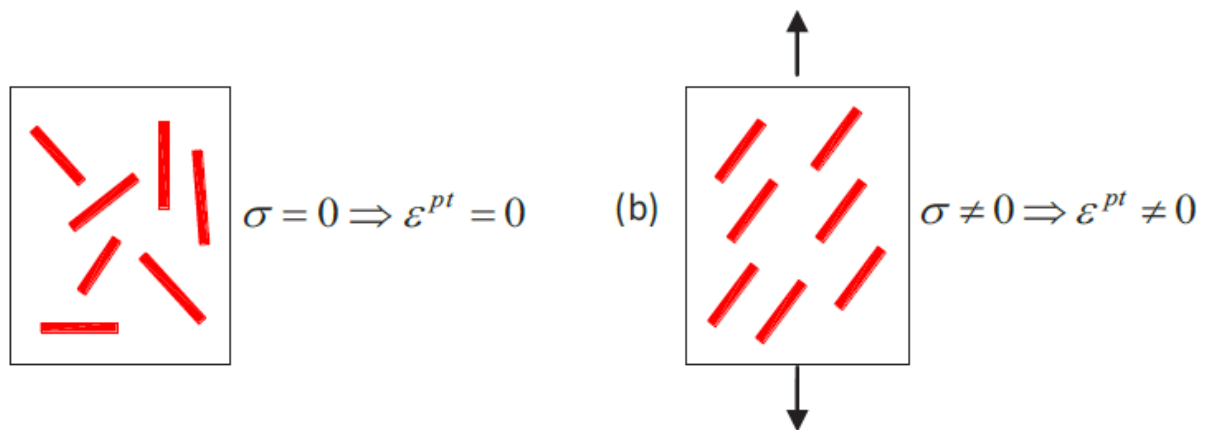


Figure I.2: Mécanisme de Magee[13]

I.7. Aciers à effet TRIP

Les aciers désignés par le terme TRIP sont des aciers présentant un comportement mécanique particulier. Ils ont à la fois une résistance élevée et une haute ductilité. Ce qui les rend particulièrement intéressants pour la mise en forme par déformation plastique.

Suivant la composition chimique, on distingue deux catégories d'aciers à effet TRIP :

- les aciers à effet TRIP fortement alliés (Fe-Ni, AISI304, AISI301, ...) qui sont entièrement austénitiques,
- les aciers TRIP faiblement alliés qui sont partiellement austénitiques (multiphasés).

La rhéologie et les microstructures des aciers entièrement austénitiques ont été largement étudiées et sont bien définis ([14] [15] [16]). Au courant de la dernière décennie, les industriels s'intéressent en particulier à l'effet TRIP des aciers faiblement alliés multiphasés pour leurs caractéristiques mécaniques remarquables.

- ***Aciers à effet TRIP entièrement austénitiques***

Parmi les aciers austénitiques certains sont dits inoxydables en raison de leur excellente résistance à la corrosion, en particulier celle qui est due à l'oxydation par l'air et par les

acides. De nombreuses nuances d'aciers inoxydables sont développées pour des applications spéciales dans l'industrie du pétrole, de l'agro-alimentaire de l'industrie chimique et dans l'aéronautique. Le chrome, dont la proportion atteint au moins 10%, est l'élément d'addition essentiel de l'acier inoxydable. C'est qui donne à l'acier inoxydable sa résistance à la corrosion et à l'oxydation. Le deuxième élément d'alliage est le nickel, c'est un élément gammagène qui stabilise l'austénite à température ambiante.

Le (tableau I.4) donne la composition chimique des principaux aciers inoxydables austénitiques.

TENEURS EN % (MINI-MAXI)

DESIGNATION (NF EN / AISI)	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Ni	Ti	W	Nb
Austénitiques													
X4CrNi 18.10 - 1.4301 / 304	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	17,00 19,50			8,00 10,50			
X2CrNi 18.9 - 1.4307 / 304 L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	17,50 19,50			8,00 10,00			
X2CrNi 19.11 - 1.4306 / 304 L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	18,00 20,00			10,00 12,00			
X4CrNi 18.12 - 1.4303 / 305	≤ 0,06	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	17,00 19,00			11,00 13,00			
X4CrNiMo 17.12.2 - 1.4401 / 316	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	16,50 18,50			10,00 13,00			
X2CrNiMo 17.12.2 - 1.4404 / 316 L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	16,50 18,50	2,00 2,50	10,00 13,00				
X2CrNiMo 17.12.3 - 1.4432 / 316 L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	16,50 18,50	2,50 3,00	10,50 13,00				
X6CrNiMoTi 17.12.2 - 1.4571 / 316 Ti	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015		16,50 18,50	2,00 2,50	10,50 13,50	5 × C 0,70			
X2CrNiMo 18.15.4 - 1.4438 / 317 L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	17,50 19,50	3,00 4,00	13,00 16,00				
X6CrNiTi 18.10 - 1.4541 / 321	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015		17,00 19,00			9,00 12,00	5 × C 0,70		
X1CrNiSi 18.15.4 - 1.4361 / 18.15	≤ 0,015	3,70 4,50	≤ 2,00	0,025	≤ 0,010	≤ 0,11	16,50 18,50		≤ 0,20	14,00 16,00			
X1NiCrMoCu 25.20.5 - 1.4539 / 904 L	≤ 0,020	≤ 0,70	≤ 2,00	0,03	≤ 0,010	≤ 0,15	19,00 21,00	1,20 2,00	4,00 5,00	24,00 26,00			
Z2NCDU 25.25.05 Az - 1.4537 / URSB8	≤ 0,020	≤ 0,70	≤ 2,00	0,03	≤ 0,010	0,17 0,25	24,00 26,00	1,20 2,00	4,70 5,70	24,00 27,00			

http://www.almet-metal.com/en/iso_album/catalogue_normes_inox_1.pdf

Tableau I.4 : Composition chimique des principaux aciers inoxydables austénitiques

La figure I.3 représente une micrographie de l'acier AISI304 après déformation, polissage mécanique et électrolytique ..[17] La taille de grain moyenne est de 25µm.

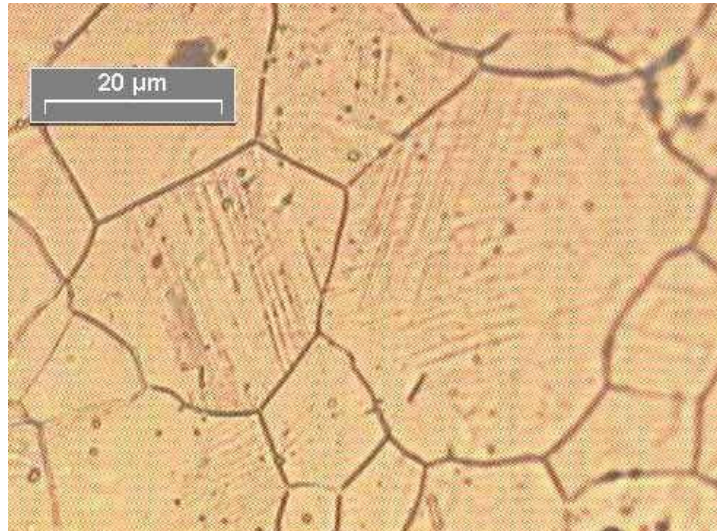


Figure I.3 : Micrographie optique de l'acier AISI304. Apparition de martensite dans un grain d'austénite.[18]

- *Aciers TRIP multiphasés*

Ces types d'aciers sont conçus suivant le même principe que les matériaux composites. À l'aide de la composition chimique **figure I.4** et de traitements thermiques **figure I.5** et mécaniques, le matériau s'enrichit localement en certains éléments d'alliages. Le matériau obtenu est alors un mélange de phases dures et de phases ductiles. Sous sollicitation mécanique, l'une de ces phases se transforme en martensite. La combinaison entre les propriétés de ces phases offre de meilleures caractéristiques mécaniques à ces aciers.

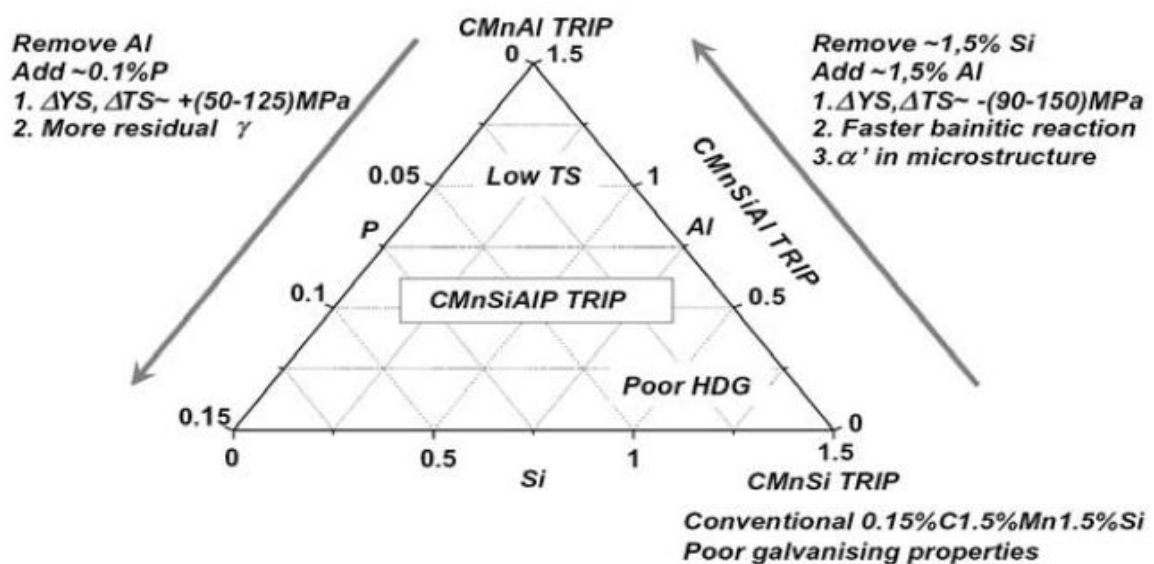


Figure I.4 : schéma de composition chimique pour l'acier faiblement allié, TRIP, présentant les principales raisons qui ont conduit à l'élaboration de nouvelles compositions [11]

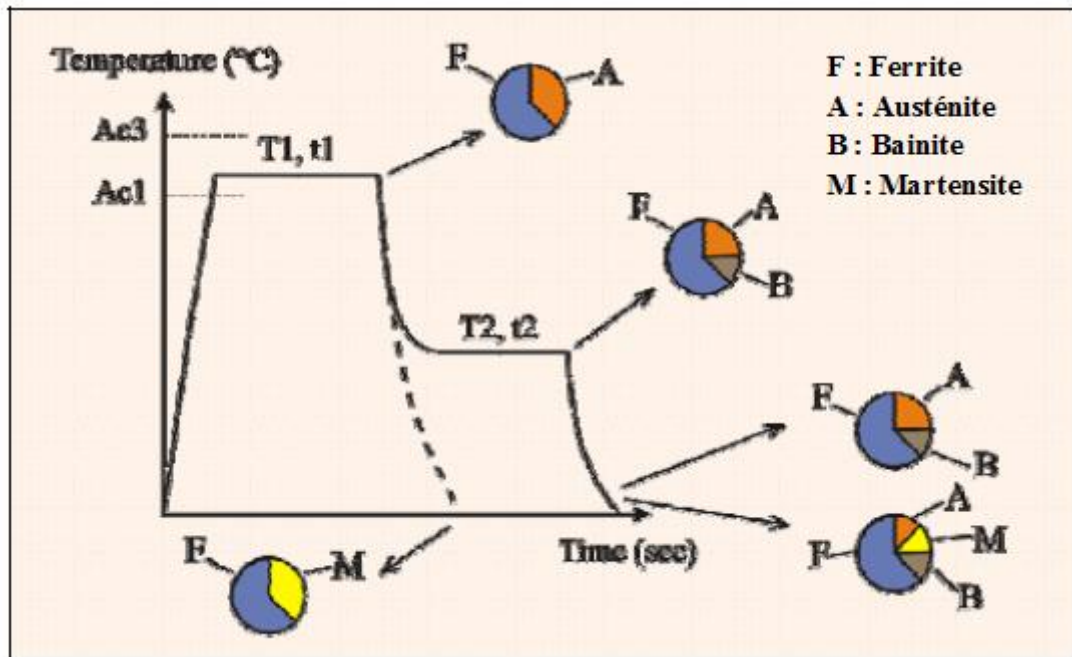
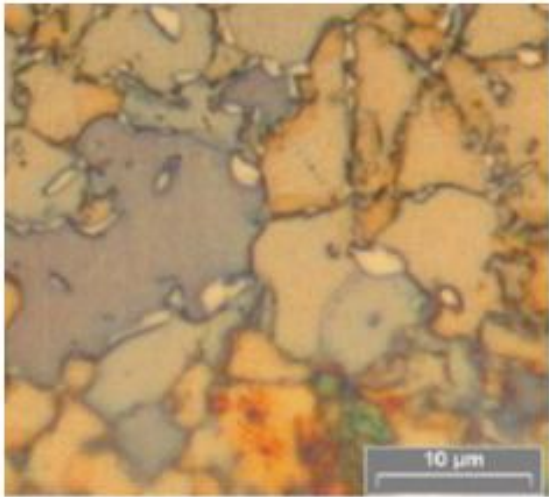


Figure I.5: Schéma typiques du traitement thermique appliqué aux aciers multiphasés à effet TRIP[19]

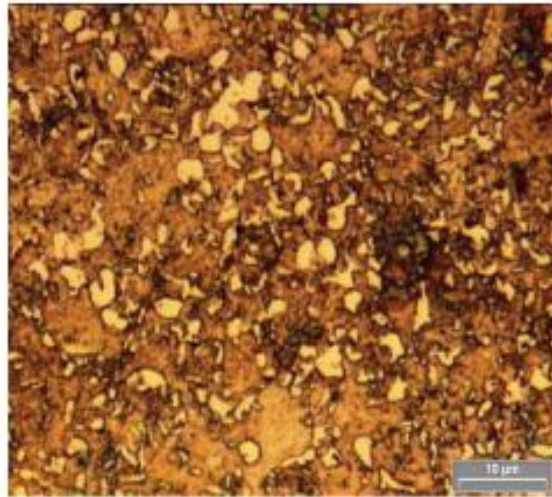
Les nuances d'aciers TRIP multiphasés diffèrent par leur composition chimique et leur proportion de phase. Le **tableau 5** donne des exemples de compositions d'aciers TRIP ayant les résistances maximales de 600MPa, 700MPa, 800MPa et 1000MPa. Lors de l'élaboration, le matériau subit une succession de transformations qui lui confère différentes fractions volumiques de phases, une répartition spatiale (connexité), des dimensions caractéristiques (taille de grain, taille des lattes de bainite, etc.), une texture morphologique, une texture cristallographique. Les micrographies sont présentées sur la **figure I.6**.

TRIP	Taille de grain austénite (μm)	Composition			Fraction de phase (%)				% C dans γ
		C	Mn	Si	γ	A	b	α'	
600	4	0,08	1,70	1,55	8	91	1	-	-
700	3	0,16	1,60	1,60	13	-	-	-	-
800	2-3	0,2	1,65	1,65	17	70-73	10-13	-	1,14
1000	1-2	0,4	1,65	1,65	30	-	70	-	1,35

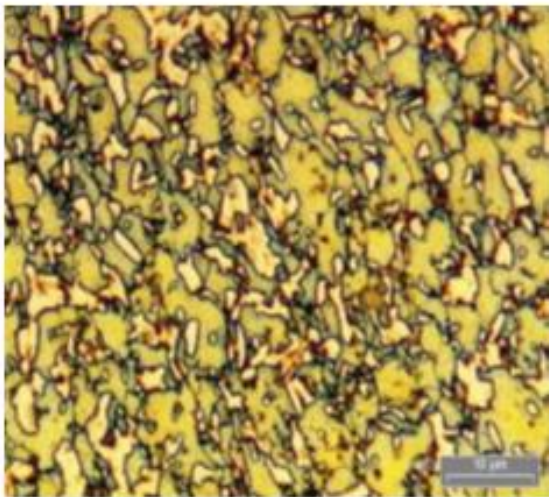
Tableau I. 5 : Composition chimique – Taille des filots d'austénite – dosage de phase – teneur en carbone de l'austénite des aciers TRIP multiphasés.



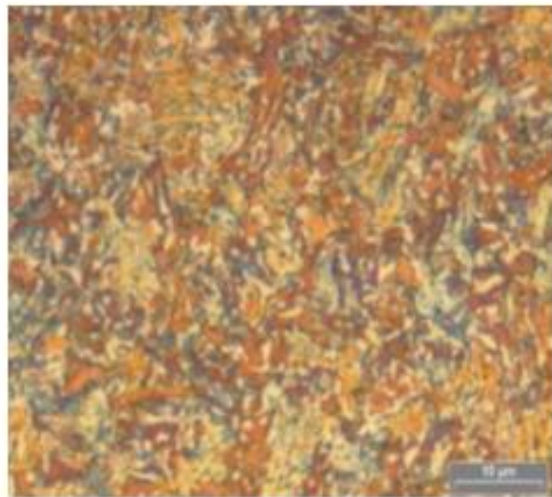
TRIP 600



TRIP 700



TRIP 800



TRIP 1000

Figure I.6 : Micrographies optiques des aciers TRIP multiphasés après attaque électrochimique (TRIP600-700-800-1000).[18]

Chapitre II

Généralités et caractéristiques du soudage par points

II.1.1.Introduction:

Pour réaliser des assemblages mécaniques destinés à différents mécanismes nous avons plusieurs modèles de liaisons, le soudage en fait partie. Nous allons parler de ce procédé d'une manière générale dans un premier temps sans s'attarder sur les différents types de soudage ou leur mise en œuvre mais en parlant d'une manière plus approfondie sur le soudage par résistance par points qui fait l'objet de notre étude, nous allons définir le procédé, les paramètres influant sur ce procédé, la microstructure du point soudé et le mode de rupture de ces points.

II.1.2.Définition du procédé de soudage :

Le soudage est un procédé de formation d'un joint permanent par la mise en action des forces d'attraction inter atomiques des matériaux à réunir. Ce type de liaison complète indémontable est obtenue par interpénétration de la matière de deux (ou plus) éléments métalliques amenés à l'état liquide dans leurs zones de contact avec ou sans métal d'apport

L'utilisation du métal d'apport a une importance particulière. Premièrement, il est nécessaire, d'apporter de la matière afin de combler une préparation de joint (chanfreins) qui assure une zone de contact efficace entre les deux parties à assembler. Aussi, afin de conférer les caractéristiques mécaniques désirées au joint (zone fondue), il est nécessaire de changer la composition métallographique de ce dernier. Sans métal d'apport il n'y a pas d'apparition de métal liquide à l'échelle macroscopique, la liaison se fait par diffusion à l'état solide.

Ce procédé se traduit par un échauffement local et rapide du métal apparition de métal liquide dont une partie au moins provient de la fusion partielle des pièces à assembler formation d'un bain liquide unique refroidissement rapide de l'ensemble.[20]

II.1.3.Types de soudures :

On distingue deux types :

- Soudure autogène, avec métal d'apport de même composition que celle des métaux à souder ou sans métal d'apport.

- Soudure hétérogène que l'on peut diviser en deux types.

Soudure hétérogène de type A les métaux à assembler sont de même nature, alors que le métal d'apport est différent ($T_{\text{°}}$ de fusion du métal d'apport $<$ à celle des métaux à assembler).

Soudure hétérogène de type B où tous les éléments de l'assemblage sont de différentes nature.

II.1.4. Conditions de réalisation :

La soudure de deux pièces est rendue plus facile si :

- La composition de leurs métaux est identique ou très voisine: la fusion se produit pour chacun d'eux à la même température dans ce cas, la pièce est réalisée sans discontinuité de matière.
- Les métaux présentent le phénomène de fusion pâteuse avec un temps de maintien relativement étendue (caractère de soudabilité).
- Les pièces sont de faibles épaisseurs : l'uniformité des températures est facilement obtenue.

Tous les matériaux métalliques sont pratiquement soudables et peuvent se scinder en deux grandes familles :

- ✓ **Les facilement soudables :** Acier A 33 et A 48 (très utilisés).
- ✓ **Soudage avec technique spéciale :** tous les aciers et aciers spéciaux, fontes, cuivre, laitons, aluminium, alliages légers et alliages ultra légers. [21]

II.1.5. Soudabilité des matériaux:

Dans la définition de l'ISO qui s'énonce en ces termes :

« On considère qu'un matériau métallique est soudable, à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondantes à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joint soudé, qui par leurs caractéristiques locales et les conséquences de leurs présences, satisfont aux propriétés requises, est choisies comme base de jugement ».

La soudabilité est d'autant meilleure que la teneur en carbone est plus faible.

Le phosphore et le soufre sont nuisibles vu qu'ils fragilisent et provoquent la fissuration du métal.

Pour les aciers, on utilise un critère dit de soudabilité, donné par le pourcentage carbone équivalent métallurgique fixé par l'institut international de soudure :

$$C_{eq}\% = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

C_{eq} : Carbone équivalent métallurgique

- Si $C_{eq} \leq 0.40$, on soude sans précaution,
- Si $0.41 < C_{eq} \leq 0.60$, on effectue un préchauffage avec une température comprise entre 100 à 250 C°,
- Si $C_{eq} \geq 0.6$, l'acier est difficile soudable,
- Si $C_{eq} > 0.7$, l'acier est non soudable. [22]

II.1.6. Différentes parties d'une soudure :

L'étude des joints de soudure a révélé l'existence de plusieurs zones différentes selon la variation des constituants et l'état de la structure causé par la réalisation du soudage, on trouve donc :

a. Zone fondue (ZF)

C'est la zone où la température est plus importante elle atteint même la température de fusion du métal. C'est dans cet endroit que la composition chimique de la soudure est élaborée. Le cycle de refroidissement joue un rôle important dans la structure métallurgique obtenue. On remarque l'existence de gradients, de la partie la plus chaude vers celle qui l'est moins. Il est donc facile d'examiner la composition et les variations de dureté d'une soudure.

b. Zone affectée thermiquement (ZAT)

C'est la zone limitrophe de la zone fondue sur une largeur plus ou moins importante. Elle est soumise à l'élévation de température sans atteindre la température de fusion.

Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

c. Zone de liaison

C'est la bande qui se situe entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, c'est l'interface sur laquelle la solidification du métal fondu commence.

Elle délimite ainsi la zone fondue et elle est mise en évidence par la différence de structure que l'on constate de part et d'autre.

d. Métal de base

C'est la zone non affectée, il n'y a pas d'élévation importante de la température donc aucun changement de la structure n'est engendré.

Le métal de base sert de référence pour apprécier les transformations qui se produisent lors du soudage. [23]

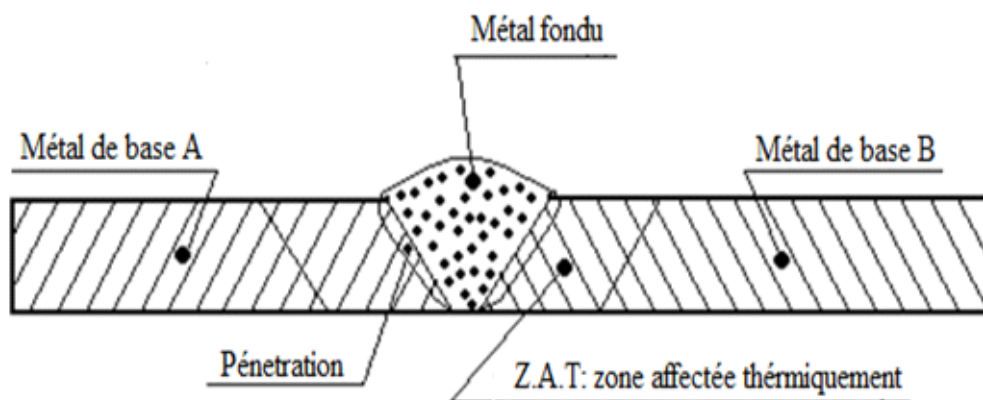


Figure II.1. Différentes parties d'une soudure [Bill Taylor, Anne Guesnier: Métallographie des soudures].

II.1.7. Différentes types de soudage :

Pour réaliser le montage de deux pièces en métal, on doit prendre en considération leurs propriétés physiques, la fonction de l'assemblage et les moyens dont on dispose pour sa réalisation. C'est dans cette optique là que plusieurs techniques de soudage ont vues le jour, que ce soit des méthodes de soudage par fusion ou par pression, chacune d'elle est adaptée à un cas de figure particulier. Le diagramme ci-dessous montre les procédés de soudage les plus souvent utilisés.

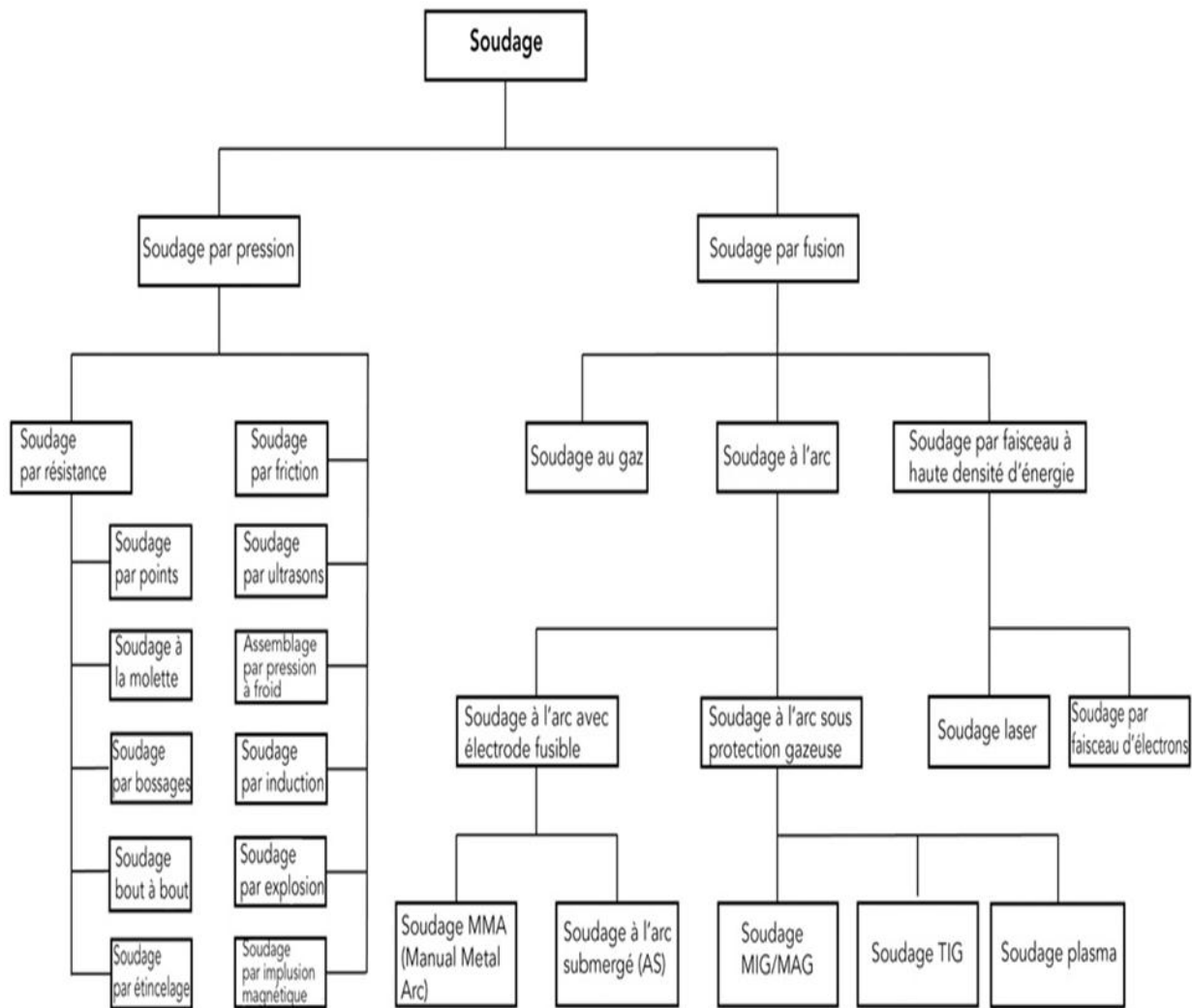


Figure II.2. Différents procédés de soudage.

II.2.1. Introduction :

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.

II.2.2. Définition du soudage par points :

Le soudage par point est un procédé de soudage sans métal D'apport dit autogène. La fusion du métal localisé entre les tôles à assembler est obtenue par effet joule (courant électrique de Quelques kilo ampère) .Les pièces à souder sont superposée et sont serrée localement entre deux électrodes en alliage de cuivre, l'ensemble pièce/électrode est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet de joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes.[24]

Loi de joule :

Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps.

$$w = I^2 \times R \times t \quad [25]$$

Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur , la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carrée de l'intensité du courant et au temps.

W: (joule) , R: (Ohm), I: (ampère), t: (seconde).

II.2.2. Principe du procédé :

Le principe du soudage par points schématisé sur la Fig. 1.2 illustre les deux tôles d'acier prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'assemblage en contact. Cet assemblage est en suite traversé par un courant de forte intensité qui va créer un noyau fondu à l'interface tôle/tôle. En refroidissant, le noyau maintient localement les deux tôles entre elles. Un cycle de soudage schématisé sur la Fig.1.2 se décompose en trois phases principales :

TM

a) 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 de la soudeuse du CRDM, seule l'électrode supérieure descend. L'électrode inférieure est fixée au bâti de la soudeuse. Cette phase se termine dès que l'effort est stabilisé.

TM

b) 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. En terme de variation de la résistance électrique, il y a deux étapes consécutives pour l'apparition de la soudure.

Au début du soudage, la résistance de contact entre deux tôles est plus importante que celle de la tôle à basse température. Par conséquent, l'interface chauffe plus rapidement que les pièces. Lorsque la température augmente, la résistance de contact diminue considérablement avec la température. Le développement du noyau et de la ZAT progresse alors dans l'assemblage par l'augmentation de la résistivité de la tôle avec la température.

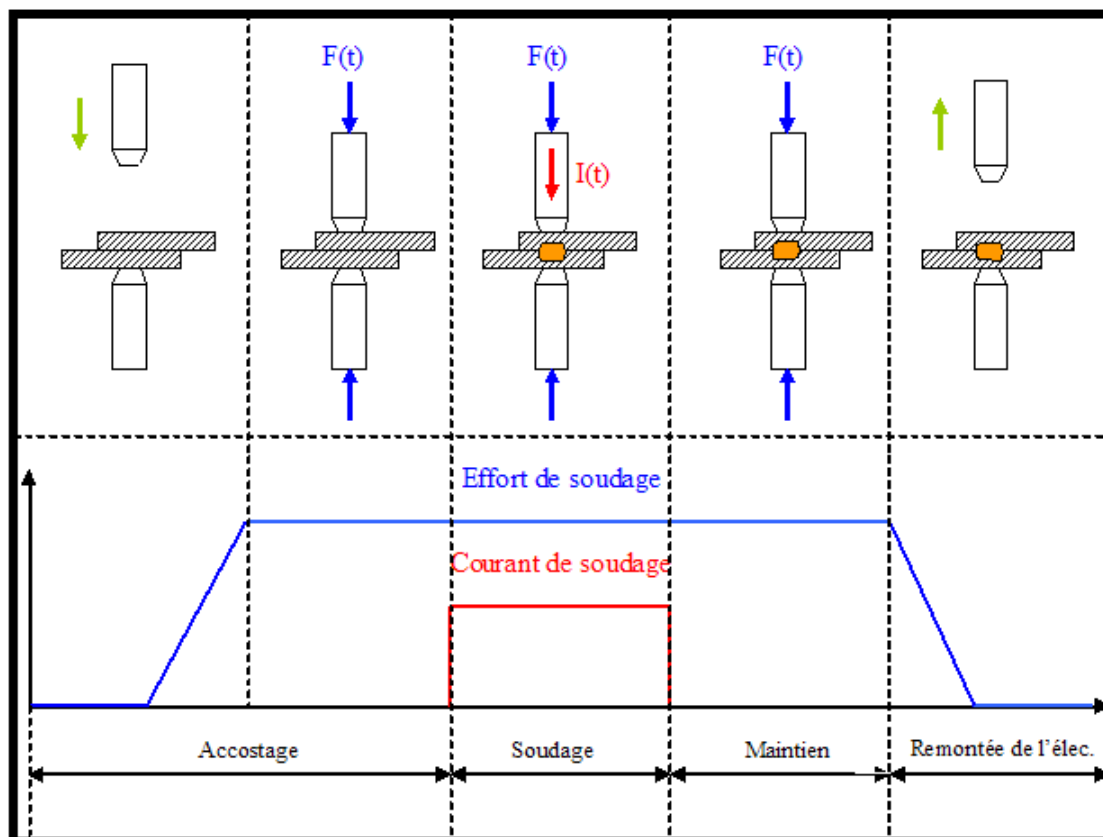


Figure II.3.Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point

c) le maintien :

Cette phase a pour but de solidifier le noyau et la ZAT. La qualité des phases métallurgiques résiduelles et le comportement mécanique du point dépendent directement de la durée de cette phase. Les pièces sont maintenues par un effort, qui a généralement la même magnitude que celui de soudage. La chaleur s'évacue vers le circuit de refroidissement par l'eau dans deux électrodes. La durée du temps de maintien est normalement la même que celle du soudage. En fin d'un cycle, c'est la remontée de l'électrode supérieure. L'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à un nouveau soudage par point.[26]

II.2.3. 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.

a. Effort de soudage :

l'effort s'applique dès la phase d'accostage et la valeur à 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, (Fig.1.2), mais dépend des systèmes de mise en charge de la soudeuse.

TM

b. 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).

c. TMTemps 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.

d. 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.

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

§

1-Intensité de soudage en kA, sous quelques V, (environ 7 à 10 kA)

§

2-Effort de serrage en daN, (comprise entre 230-600 daN et dépend du comportement mécanique de l'acier)

§

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

4-La détermination de ces paramètres se base préalablement sur la norme française ; [NFA 87-001]/ISO No. 18278/2. TM

e. 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. 1.3. 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 :

§

e.1.mécanique : c'est d'abord pendant le 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.

Š

e..2.électrique : la forte intensité de soudage s'applique via les deux électrodes sans chauffer intérieurement. L'électrode donc doit avoir une bonne conductivité électrique.

Š

e..3.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.[24]

II.2.4. Fonctionnement de soudage par points :

Le processus consiste à appliquer une pression et de la chaleur sur la zone de soudure à l'aide d'électrodes en cuivre en alliage moulé qui transportent un courant électrique à travers les pièces de soudure. Le matériau fond, fusionnant les pièces ensemble à quel point le courant est coupé, la pression des électrodes est maintenue et la «pépite» fondue se solidifie pour former le joint.

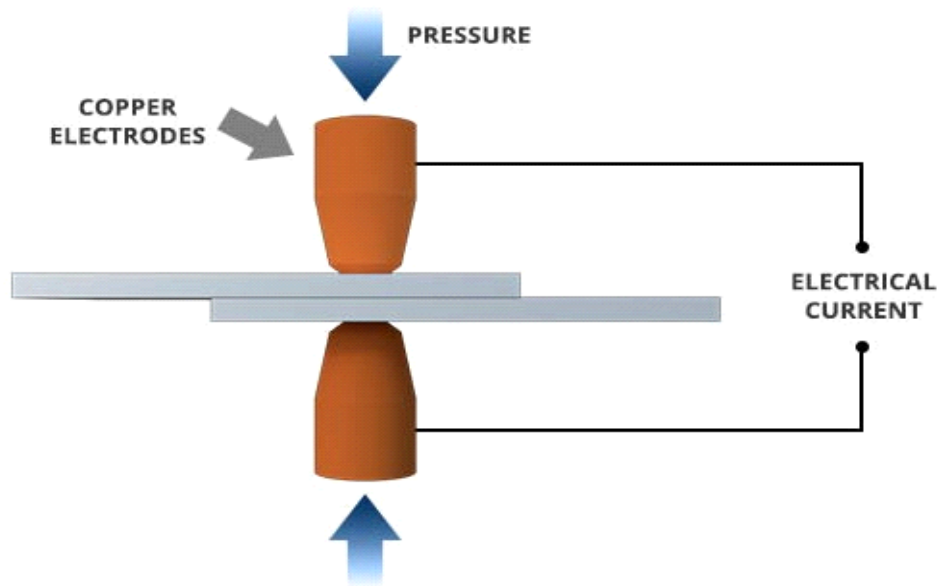


Figure II .4.Schéma de principe du soudage par points par résistance.

La chaleur de soudage est générée par le courant électrique, qui est transféré à la pièce par des électrodes en alliage de cuivre. Le cuivre est utilisé pour les électrodes car il a une conductivité thermique élevée et une faible résistance électrique par rapport à la plupart des autres métaux, garantissant que la chaleur est générée préférentiellement dans les pièces plutôt que dans les électrodes.

La quantité de chaleur dépend de la conductivité thermique et de la résistance électrique du métal ainsi que de la durée pendant laquelle le courant est appliqué. Cette chaleur peut être exprimée par l'équation:

$$Q = I^2 R t$$

Dans cette équation, «Q» est l'énergie thermique, «I» est le courant, «R» est la résistance électrique et «t» est le temps pendant lequel le courant est appliqué.[27]

II.2.5.Matériaux appropriés pour le soudage par points :

En raison de sa conductivité thermique inférieure et de sa résistance électrique plus élevée, l'acier est relativement facile à souder par points, l'acier à faible teneur en carbone étant le plus adapté au soudage par points. Cependant, les aciers à haute teneur en carbone (équivalence carbone > 0,4% en poids) sont sujets à une mauvaise résistance à la rupture ou à

des fissures dans les soudures car ils ont tendance à former des microstructures dures et cassantes.

L'acier galvanisé (zingué) nécessite des courants de soudage légèrement plus élevés pour souder que les aciers non revêtus. De plus, avec les alliages de zinc, les électrodes en cuivre dégradent rapidement la surface et conduisent à une perte de qualité de la soudure. Lors du soudage par points d'aciers zingués, les électrodes doivent être fréquemment échangées ou la surface de la pointe de l'électrode doit être "habillée", où un couteau enlève le matériau contaminé pour exposer une surface de cuivre propre et remodeler l'électrode.

Les autres matériaux couramment soudés par points comprennent les aciers inoxydables (en particulier les nuances austénitiques et ferritiques), les alliages de nickel et le titane.

Bien que l'aluminium ait une conductivité thermique et une résistance électrique proches de celles du cuivre, le point de fusion de l'aluminium est plus bas, ce qui signifie que le soudage est possible. Cependant, en raison de sa faible résistance, des niveaux de courant très élevés doivent être utilisés lors du soudage de l'aluminium (de l'ordre de deux à trois fois plus élevé que pour un acier d'épaisseur équivalente).

De plus, l'aluminium dégrade la surface des électrodes en cuivre dans un très petit nombre de soudures, ce qui signifie qu'un soudage stable de haute qualité est très difficile à réaliser. Pour cette raison, seules les applications spécialisées du soudage par points de l'aluminium se trouvent actuellement dans l'industrie. Divers nouveaux développements technologiques émergent pour permettre un soudage par points stable de haute qualité dans l'aluminium.

Le cuivre et ses alliages peuvent également être assemblés par soudage par points par résistance, bien que le soudage par points du cuivre ne puisse pas être facilement réalisé avec des électrodes de soudage par points en alliage de cuivre conventionnelles, car la génération de chaleur dans les électrodes et la pièce à usiner est très similaire.

La solution pour souder le cuivre est d'utiliser une électrode en alliage à haute résistance électrique et à température de fusion largement supérieure au point de fusion du cuivre (bien supérieur à 1080 ° C). Les matériaux d'électrode généralement utilisés pour le soudage par points du cuivre comprennent le molybdène et le tungstène.[27]

II.2.5. Les applications de soudage par points :

Le soudage par points a des applications dans un certain nombre d'industries, notamment l'automobile , l'aérospatiale , le rail , les électroménagers, les meubles métalliques, l'électronique , le bâtiment médical et la construction



Figure II.5.Soudeuse par points.

Compte tenu de la facilité avec laquelle le soudage par points peut être automatisé lorsqu'il est combiné avec des robots et des systèmes de manipulation, il s'agit du processus d'assemblage le plus courant dans les lignes de fabrication à grand volume et en particulier le principal processus d'assemblage dans la construction de voitures en acier depuis plus de 100 ans.[27]

Chapitre III

Etude expérimentale

A. Matière première et techniques expérimentales

III.1. Introduction

Le troisième chapitre de cette étude se divise en deux parties. La première est réservée à la présentation de l'acier qui fait objet de notre étude, sa composition chimique ses caractéristiques théoriques, les travaux effectués à son sujet ainsi que les différentes techniques expérimentales, mises en œuvre au cours de notre investigation. La seconde partie exposera les résultats de caractérisation de notre matériau d'étude.

III.2. Présentation du métal de l'étude

Le matériau utilisé dans notre étude est un acier inoxydable à effet TRIP, entièrement austénitique. Sa dénomination est AISI 304L. Le (L) signifie que l'acier a une faible teneur en carbone. Suivant l'AFNOR sa désignation est X2CrNi18-9. Cet acier nous a été livré sous forme d'une tôle de 3 mm d'épaisseur.

Désignation	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	N
Eléments %	≤ 0.03	18 - 20	8 - 12	1.00	2.00	0.045	0.015	0.1

Tableau III.1. Composition chimique de la nuance entièrement austénitique AISI 304L

Nous donnons ici le rôle de quelques éléments d'alliages de notre acier :

Chrome : élément de base de tous les aciers inoxydables, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud.

Nickel : grâce à son rôle gammagène, stabilise l'austénite aussi bien à température ambiante qu'aux températures très basses.

Manganèse : bien que classé comme élément gammagène, devient alphagène aux teneurs supérieures à 7 %, renforçant ainsi la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage).

Carbone : élément fortement gammagène, contribue à stabiliser l'austénite lors des déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome Cr₂₃C₆ intergranulaires qui diminuent la résistance à la corrosion intergranulaire.

Azote : puissant élément gammagène, contribue également à stabiliser l'austénite. Associé à une basse teneur en carbone, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion intergranulaire.

Silicium : autre élément alphasgène, améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage.

Le tableau ci-dessous contient quelques caractéristiques mécaniques, physiques, thermiques et électriques.

mécaniques	physiques	Thermiques	électriques
Dureté-brinell 160-190	Densité (g.cm ⁻³) 7.93	Coefficient d'expansion thermique à 20-100°C (x10 ⁻⁶ K ⁻¹) 18.0	Résistivité électrique (μOhm.cm) 70-72
Elongation à la rupture (%) 60	Point de fusion 1400-1455 (°C)	Conductivité thermique à 23 °C (W m ⁻¹ K ⁻¹) 16.3	
Module d'élasticité (GPa) 190-210			
Résistance à la traction (MPa) 460-1100			
Résistance aux chocs-IZOD (J m ⁻¹) 20-136			

Tableau III.2. Caractéristiques de l'acier 304L

III.3. Techniques de caractérisation

III.3.1. Caractérisation microstructurale

Pour mettre en évidence la structure et la morphologie de la matière première de notre matériau et de déterminer et quantifier les différentes phases formées après l'essai de traction et de pliage, nos échantillons ont subi les opérations suivantes :

a. Préparation des surfaces à analyser

- **Polissage**

Le polissage est une opération qui consiste à rendre la surface à analyser plane, brillante et dénuée de toute rayure. L'opération de polissage de nos échantillons est menée selon la procédure suivante :

- polissage au papier SiC avec les grades successifs 400, 800, 1200, 2500, 4000. L'opération est effectuée sur une polisseuse électrique de type « Struers », à deux disques, munie d'un dispositif d'arrosage permanent d'eau afin d'éviter tout échauffement local suite au frottement. Le passage d'un papier à l'autre nécessite une rotation de 90° de l'échantillon, afin d'éliminer les rayures laissées par le papier abrasif précédent. La vitesse de rotation des disques est de 300tr/mn.

- pour la finition, les échantillons sont frottés sur un disque à feutre imbibé d'une suspension d'abrasifs qui est l'alumine (Al_2O_3). La vitesse de rotation du disque est de 300tr/min. À l'issue de cette opération finale, l'échantillon est lavé puis séché.

- **Attaque chimique**

Après l'opération du polissage et dans le but de mettre en évidence les différentes phases et leur morphologie, tout comme les joints de grains austénitiques, une attaque chimique électrolytique a été réalisée. La mise en œuvre de cette attaque est effectuée avec une solution d'acide oxalique dont la composition chimique est de 10g de $C_2H_4O_4$ et 100 ml H_2O .

b. Analyse par microscopie optique (MO)

Les analyses métallographiques ont été réalisées afin de mettre en évidence la structure de nos échantillons. Pour ce faire, nous avons utilisé un microscope optique de type HUND WETZLART 100 équipé d'une caméra vidéo de type Eyes Cora permettant l'acquisition des micrographies sur ordinateur. Ce microscope est équipé de trois objectifs de grossissement 10, 20 et 40 fois et de deux oculaires avec un grossissement de 10 fois.

c. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour Scanning ElectronMicroscopy en anglais) est une technique de microscopie utilisant les diverses interactions électrons-matière. Un faisceau d'électrons, produit par un filament en tungstène, balaie la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet des électrons et des rayons X (figure II.3). De différents détecteurs permettent d'analyser les électrons et de reconstruire une image de la surface (figure II.4).

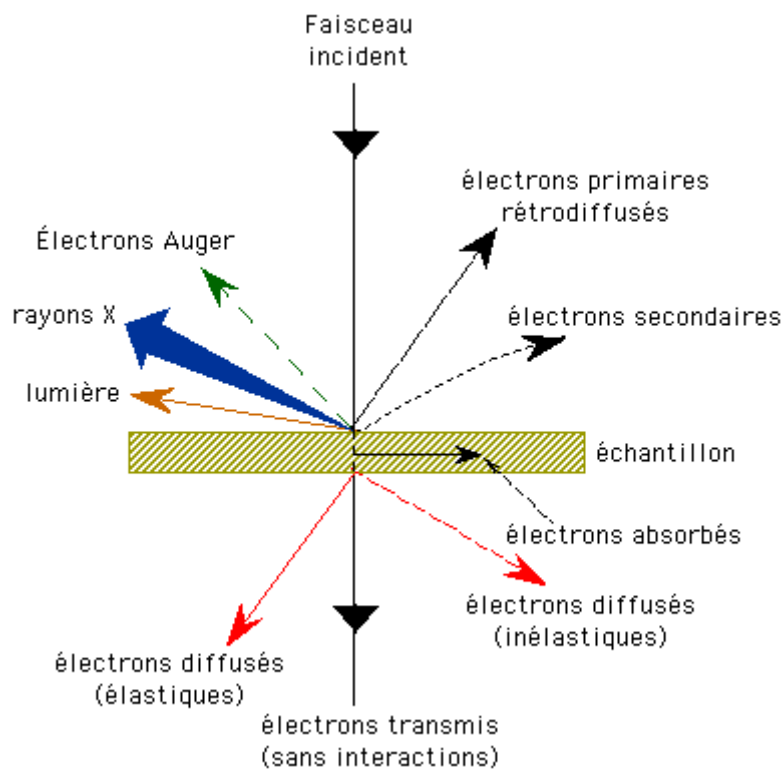


Figure III .1: Différents sortes de signaux émis par les interactions entre les électrons incidents et l'échantillon

- Électrons secondaires (SE)

On appelle électron secondaire, l'électron éjecté lors d'un choc entre les électrons primaires du faisceau incident et les atomes de l'échantillon. Ces électrons sont de faible énergie (environ 50 eV). De part cette faible énergie, les électrons secondaires produits dans les couches profondes ne pourront pas sortir de l'échantillon. De ce fait, seuls les électrons provenant des couches superficielles peuvent être recueillis par les détecteurs. Etant donné qu'ils proviennent des couches superficielles, ils sont donc utilisés pour l'examen de la morphologie et de la topographie de l'échantillon.

- Électrons rétrodiffusés (BSE)

Les électrons rétrodiffusés sont des électrons issus du faisceau primaire qui sont entrés en collision avec des atomes de l'échantillon et qui ont réagi de façon quasi élastique avec eux. Ces électrons ont une énergie relativement élevée, pouvant aller jusqu'à l'énergie initiale des électrons du faisceau incident. Ils sont sensibles aux numéros atomiques des atomes de l'échantillon. Les atomes les plus lourds (ceux ayant un nombre important d'électrons) réémettront plus d'électrons que les atomes plus légers. Cette particularité sera utilisée pour l'analyse en électrons rétrodiffusés. Les zones formées d'atomes avec des nombres atomiques élevés apparaîtront plus brillantes que d'autres, c'est le contraste de phase.

- Rayons X

Provenant de l'excitation des atomes aux niveaux électroniques profonds. Le retour à l'équilibre par transition des électrons des niveaux supérieurs vers les niveaux excités provoque l'émission des rayons X. L'analyse des ces rayons permet d'obtenir des informations sur la nature chimique de l'atome. Car le rayonnement X produit possède une énergie caractéristique qui correspond à une désexcitation spécifique de l'atome.

- Électrons Auger

Les électrons Auger sont émis lors de l'émission des rayons X. Les rayons X peuvent parfois, à condition d'être suffisamment énergétique, ioniser l'atome qui émet un électron appelé électron Auger. Ces électrons sont utilisés pour faire des analyses élémentaires de surface (couches minces).

Nos échantillons ont été analysés à l'aide d'un microscope électronique à balayage du type Philips XL30. Celui-ci est équipé de détecteurs d'électrons secondaires et rétrodiffusés ainsi que d'un analyseur EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) permettant de réaliser des cartographies des éléments et d'évaluer la teneur en éléments de l'échantillon par des méthodes semi-quantitatives en utilisant les rayons X caractéristiques des atomes contenus dans l'échantillon.

L'appareil est relié à deux microordinateurs sur lesquels sont installés les logiciels de commande du microscope, d'acquisition et de traitement des résultats.

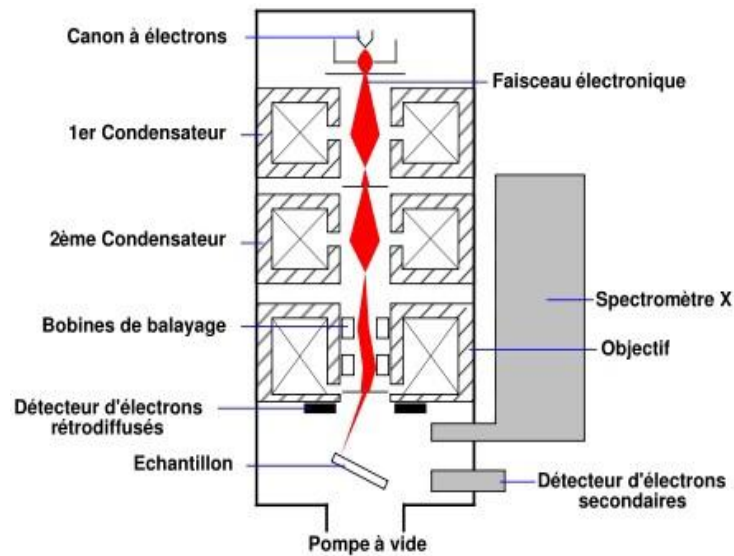


Figure III.2 : Schéma d'un MEB équipé d'un détecteur de rayons X

d. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Les techniques de diffraction des rayons X sont des outils de prédiction pour l'analyse des problèmes de cristallographie. Celles-ci donnent deux types d'informations:

- Structurales : paramètres de maille, distribution des atomes,...
- Microstructurales : taille de grains, contraintes, texture,...

La technique d'analyse par la diffraction des rayons X repose sur l'interaction élastique d'un faisceau monochromatique de photons X avec la matière cristallisée.

Lorsqu'un matériau polycristallin est soumis à un rayonnement monochromatique X, celui-ci est diffracté par les plans réticulaires du matériau. Chaque famille de plans donne lieu à un pic de diffraction pour un angle 2θ , entre les rayons X incidents et les rayons diffractés, relié à la distance inter réticulaire par la formule de Bragg.

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \sin\theta$$

Avec :

d : distance entre deux plans réticulaires consécutifs,

θ : angle des rayons X incidents ou diffractés avec le plan réticulaire,

n : nombre entier appelé ordre de la réflexion,

λ : longueur d'onde.

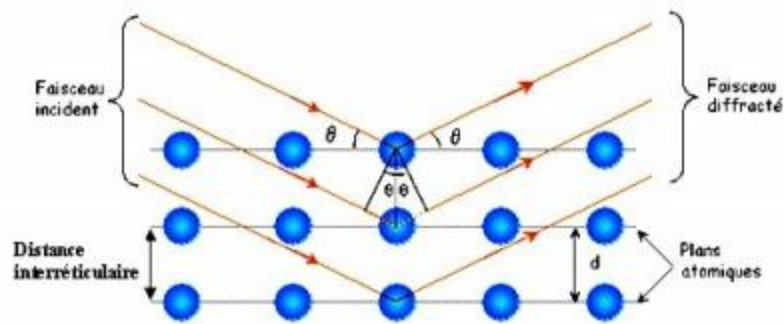


Figure III.3 :Illustration de la condition de Bragg.

Dans notre travail cette technique est utilisée pour l'identification des matières premières utilisées ainsi que celle des différents composés formés dans les échantillons synthétisés. Pour cela, nos échantillons ont été analysés avec un diffractomètre de type Philips Panalytical. Cet appareil est muni d'un tube à anticathode de cuivre produisant un rayonnement X de longueur d'onde de 1.540598Å. Il est piloté par ordinateur où sont injectés les paramètres d'analyse dans le logiciel X'pert High Score. Les paramètres utilisés au cours de nos expériences sont les suivants :

- L'intervalle de balayage est de 0 à 120 degrés,
- Le pas de balayage est de 0,02°,
- Le temps d'exposition par pas est de 1 seconde.

Le dépouillement du spectre et l'analyse des résultats sont effectués à l'aide du logiciel EVA.

❖ **Dépouillement du spectre**

À la fin de l'expérience, nous avons récupéré le fichier de données contenant les valeurs des intensités en fonction de l'angle de diffraction 2 theta (2θ). À partir de ces valeurs, on trace un diagramme de diffraction des rayons X à l'aide du logiciel EVA.

La première étape de dépouillement est de rechercher sur le diagramme la présence des différentes phases. Le logiciel EVA permet de comparer les pics des composés portés dans la base de données, JCPDS réalisée par ASTM (American Society of Testing and Materials) et ceux du diffractogramme obtenu. Une recherche par élément chimique permet d'établir une liste de composés potentiels. Pour affirmer la présence de l'un d'entre eux il faut qu'au moins trois de ses raies intenses coïncident avec trois raies expérimentales. Après avoir identifié tout les pics, le diffractogramme est tracé en transférant les données sur ORIGIN.

III.3.2. caractérisation mécanique

a. Essai de traction

Afin de déterminer le comportement mécanique de notre matériau, étudier l'influence de taux de déformation sur la transformation martensitique et la mise en évidence de l'effet TRIP dans notre matériau, un essai de traction, sur des éprouvettes normalisées, à été effectué. Dans les deux premiers cas l'essai est réalisé à une température ambiante (25°C), et pour le troisième cas, trois (03) température ont été utilisées à savoir : 25, 75 et 130°C. Pour cela, une machine de traction de type IBERTEST a été utilisée. 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 fin mise en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur de la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette. On commande la machine automatiquement par un micro-ordinateur. Les caractéristiques de la machine sont:

Charge d'essais : 200KN ;

Vitesse d'essai: 10 à 500 mm/min ;

Alimentation électrique T=220V, F=50Hz.

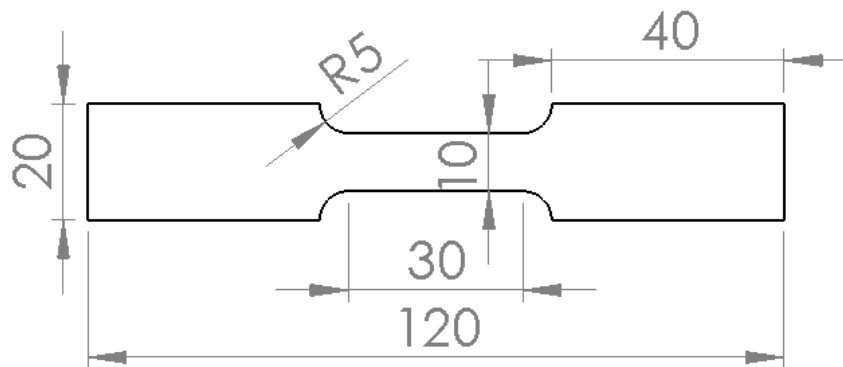


Figure III.4 : Éprouvette de traction

b. Essai de dureté Vickers

L'essai de dureté Vickers fait appel à un pénétrateur en diamant de forme pyramidale. La pyramide est droite à base carrée d'angle au sommet 136°, appliquée avec une force F de 49 à 980N (10 à 120 Kg). On mesure la longueur (d) moyenne des deux diagonales de l'empreinte, à l'aide d'un système optique. La dureté Vickers HV est donnée par la relation suivante:

$$HV=1.8544 \frac{F}{d^2}$$

Où $d = (d_1 + d_2) / 2$

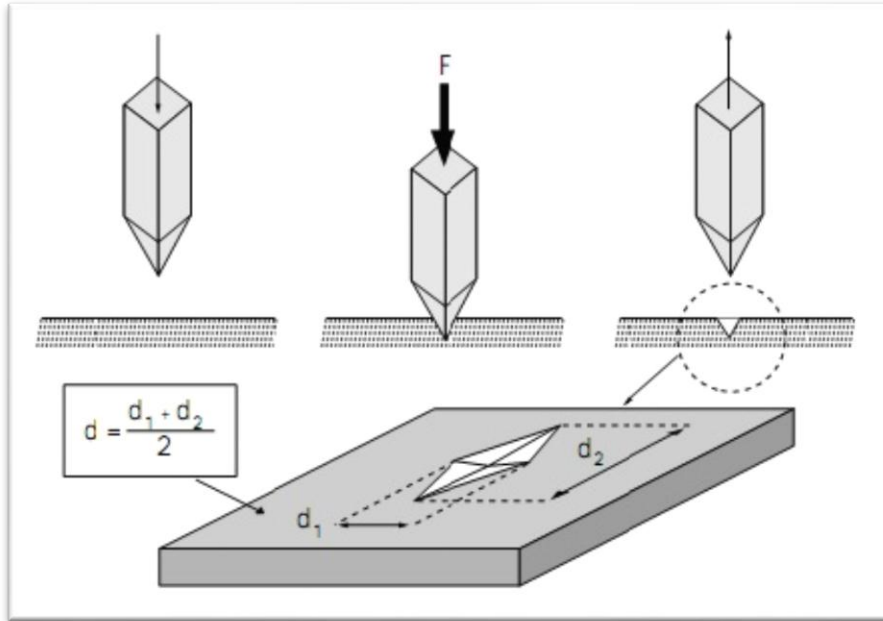


Figure III.5 : Essai de dureté Vickers

Pour la réalisation de ces essais, certaines conditions doivent être respectées :

- Essai réalisé à température ambiante.
- On applique la charge progressivement, sans vibrations ni chocs et on maintient la valeur finale pendant 10 à 15s

B. Résultats de caractérisation

III.3.1. Résultat du métal de base

III.3.1.1. Micrographie

Pour pouvoir aboutir à des résultats satisfaisant et pour observer les changements de microstructure qui peuvent découler des essais que nous allons effectuer nous devons avant toute chose avoir la microstructure de notre matériau à l'état vierge. La figure VI.1 ci-dessous représente la micrographie MEB de la nuance d'acier inoxydable entièrement austénitique du type 304L à l'état initial, obtenue après polissage et attaque électrolytique. On y distingue des grains austénitiques d'environ 20µm.

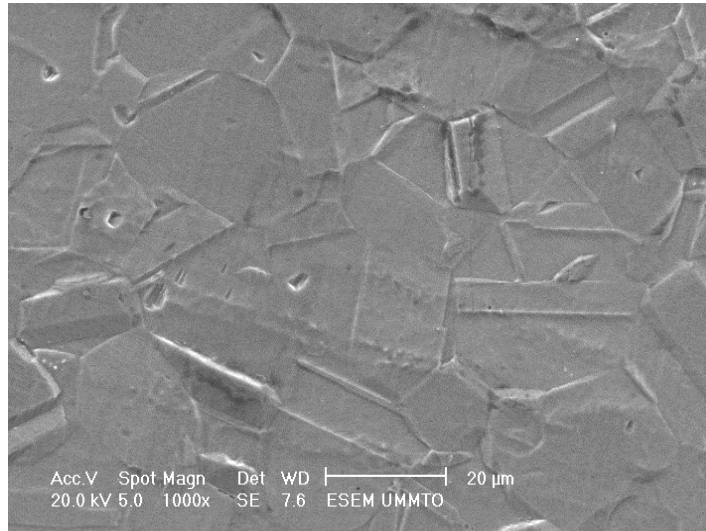


Figure III.6 : Micrographie MEB de l'acier 304L à l'état initial

III.3.1.2. Essai de dureté Vickers

Afin de déterminer la dureté de notre acier à l'état initial, nous avons réalisé des essais de dureté Vickers (Hv). Le test a été effectué en cinq (5) points différents sur un échantillon de longueur de trois centimètres (3cm). Les résultats obtenus sont répertoriés dans le tableau ci-dessous (tableau II.3).

Métal de base	1	2	3	4	5
Hv	173.85	173.85	182.87	165.47	173.85
La moyenne de la dureté Vickers (Hv) du métal de base					173.98

Tableau III.3. Résultats des essais de dureté Vickers

Nous remarquons que les résultats obtenus sont assez cohérents et homogènes, il n'y a pas une grande différence entre les valeurs calculées. La dureté Vickers (Hv), moyenne, de notre acier est de 173.98, ce qui nous situe dans la fourchette de la dureté théorique de notre matériau qui varie entre 160-190.

III.3.1.3. Analyse par les rayons X(DRX)

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de notre matériau a révélé que des pics correspondant à l'austenite figure II.2.

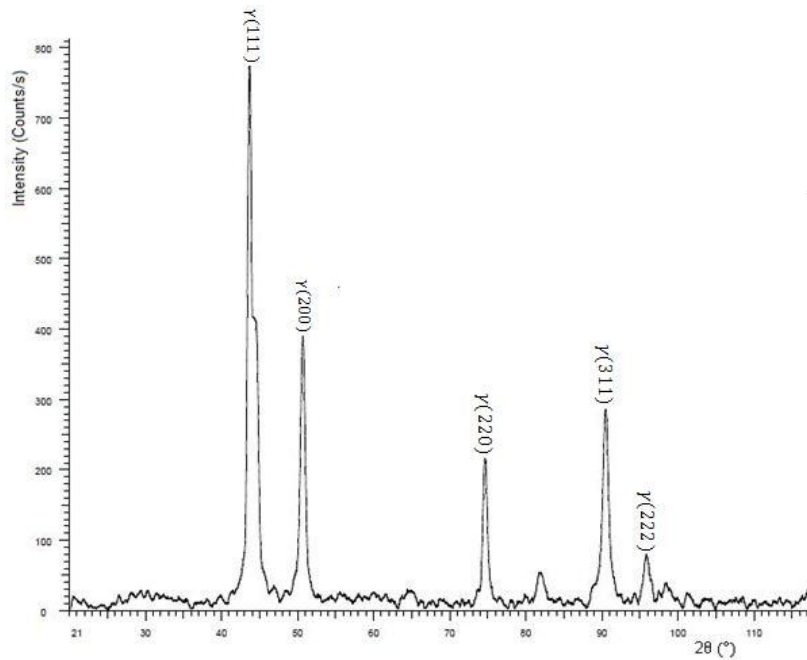


Figure III.7 : Spectre de diffraction de l'acier 304L

III.3.2. Identification du comportement mécanique de l'acier 304L

III.3.2.1. Résultats de l'essai de traction

Dans le but d'identifier le type du comportement de notre matériau, nous avons réalisé un essai de traction sur éprouvettes normalisées à une température de 25°C. L'essai est effectué à une vitesse de 20mm/mn sur machine de traction de type IBERTEST.

Pendant l'essai nous avons remarqué que la déformation se produit en trois étapes : Tout d'abord y'a un allongement limité de l'éprouvette, puis petit à petit on peut observer une diminution de la section sur la partie calibrée de l'éprouvette jusqu'à l'apparition de la striction puis rupture de l'éprouvette. Le résultat est obtenu par une chaîne d'acquisition reliée à un ordinateur qui enregistre ses données. La courbe obtenue lors de ces essais est montrée sur les figures ci-dessus :

Sur la courbes, on remarque l'existence de plusieurs parties distinctes : tout d'abord nous avons une partie quasi-linéaire correspondant à la partie élastique ensuite vient le domaine plastique avec écoulement, après la partie plastique nous avons une striction puis la rupture. D'après l'allure de la courbe, nous voyons bien que cet acier a un comportement élasto-plastique. La courbe nous montre également un excellent compromis entre les caractéristiques de résistance et de déformation plastique.

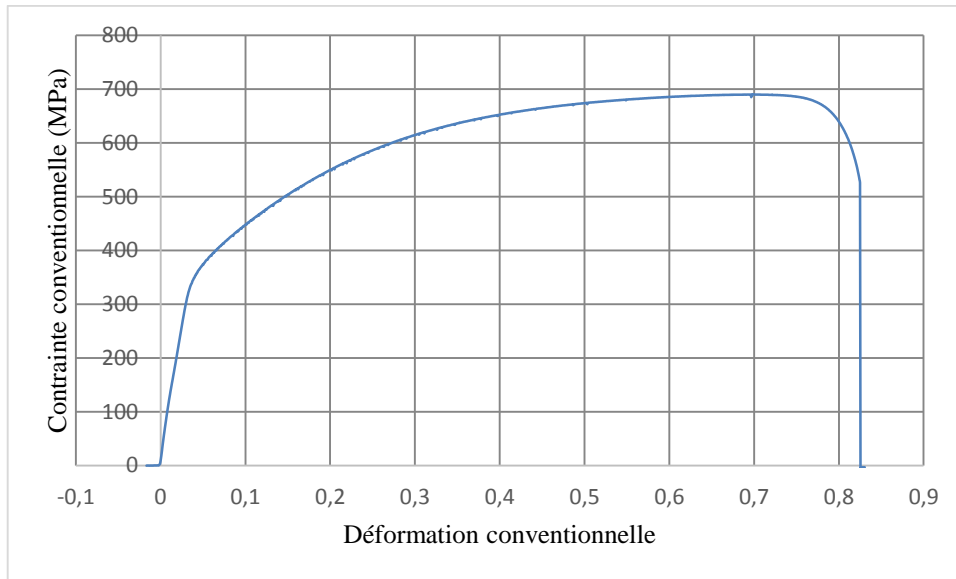


Figure III.8 : Courbe de traction de l'éprouvette à 25°C

La variation des caractéristiques mécaniques (Module d'Young, limite d'élasticité, limite d'élasticité conventionnelle, limite à la rupture et la déformation à la rupture) après l'essai de traction, est donné sous forme de tableaux.

Température C°	Module d'Young (MPa)	Limite élasticité supérieur (MPa)	Rm (MPa)	Limite à la rupture (Mpa)	Allongement Total
25	209603	358.688	689.64	525.89	0.826

Tableau III.4.caracteristiques du materiau

II.3.2.2 Résultats de la caractérisation microstructural

A. Observations micrographiques

❖ Microscopie optique

Dans le but de voir les changements qui se sont produit au niveau de la microstructure de nos éprouvettes avant et après l'essai de traction, nous avons découpé, à l'aide d'une scie métallique, des petits échantillons dans chacune de ces dernières. Les échantillons découpés ont subi ensuite une opération de polissage et une attaque chimique avant d'être observés par le microscope optique et électronique.

Les figures ci-dessous montrent les microstructures obtenues à différents températures avec un grossissement de 200.

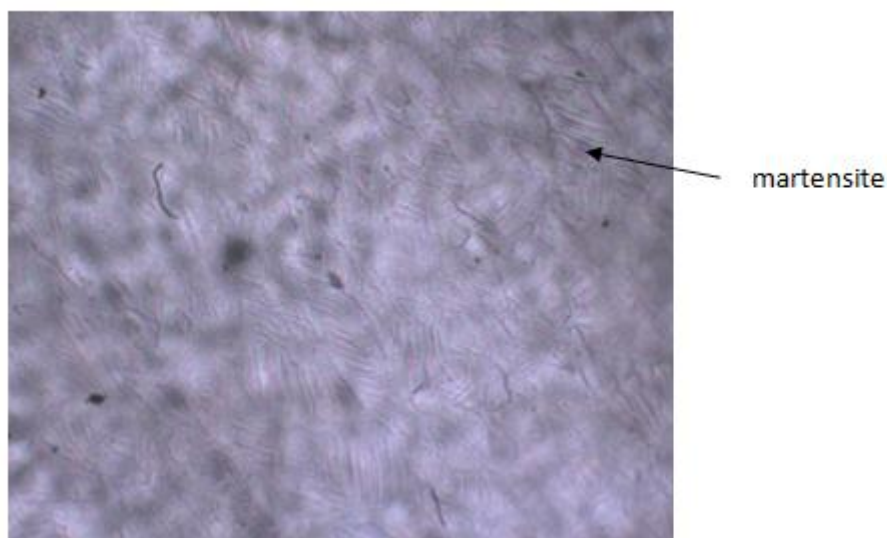


Figure III.9 :Micrographie optique de l'échantillon à 25°C

En observant les microstructures des micrographies obtenues, on voit clairement l'existence de deux phase, une sous forme lamellaire qui correspond probablement à la martensite et l'autre sous forme de grains qui est l'austenite.

❖ **Microscopie électronique à balayage (MEB)**

Les figures ci-dessous correspondent respectivement aux micrographies MEB de de notre échantillon après rupture. L'analyse été faite à l'aide des électrons retro diffusés. Cette micrographie montre clairement la formation des lamelles de martensite dans les grains austénitiques.

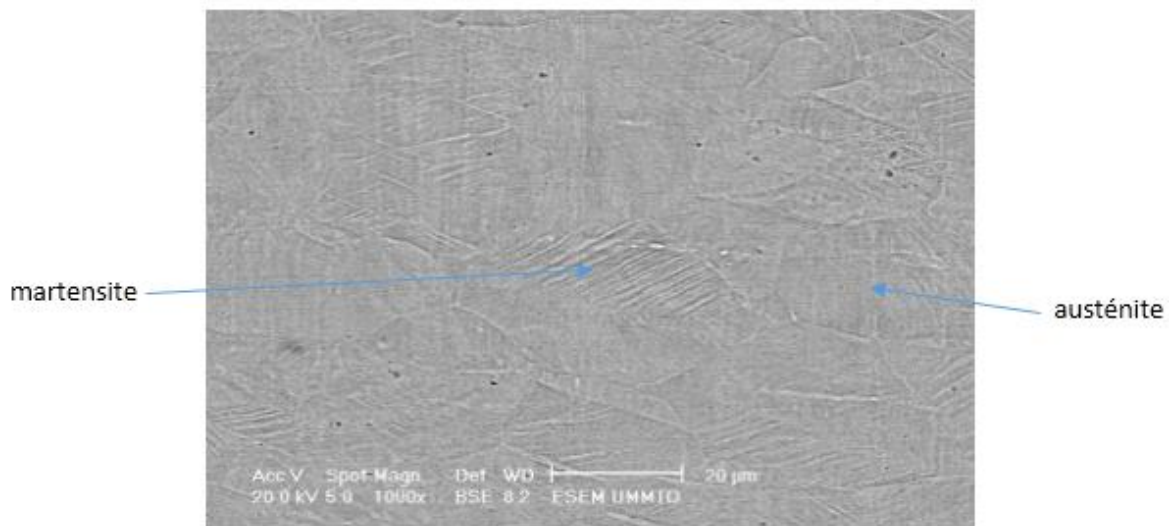


Figure III.10 :Micrographie MEB de l'échantillon après rupture

B. résultat de l'essai de dureté après rupture

À la rupture, les valeurs des duretés obtenues sont logiquement supérieures à celles vu aux différents autres taux de déformation. Ces valeurs sont proches entre elles.

Essais	1	2	3	4	5
Hv	319.63	330.74	342.45	342.45	330.74
La moyenne de la dureté (Hv) (rupture)					333.20

Tableau III.5.: Valeurs de la dureté Vickers (Hv).

conclusion

En comparant les résultats de l'état brut et après rupture par traction, nous pouvons constater que la dureté Vickers passe d'une moyenne de 173.98 à l'état initial à 333.20 quand y'a rupture. On en déduit donc qu'il y'a une transformation de phase, l'austénite s'est transformée en martensite.

Conclusion générale

Au cours de ce présent travail le but était d'étudier l'influence d'une contrainte sur la transformation martensitique dans un acier inoxydable entièrement austénitique de type TRIP. L'acier en question est l'acier 304L.

Pour cela et afin de bien mener notre étude, on a fait appel à une série d'opérations de caractérisation à savoir la caractérisation mécanique (essai de dureté et de traction) pour l'étude du comportement mécanique et la caractérisation microstructural (microscopie optique et électronique afin de mettre en évidence l'évolution de la microstructure de notre matériau avant et après sollicitation mécanique et la diffraction des rayons X dans le but de déterminer la nature des phases

Les résultats de la caractérisation ont montré que :

- L'acier 304L a un comportement élasto-plastique avec écrouissage non linéaire.
- L'observation au microscope optique, avant chargement, a révélé que l'acier 304L a une structure entièrement austénitique. Quant à la structure après rupture, elle est constituée d'un mélange de deux phases ; à savoir l'austénite et la martensite. Ce résultat témoigne de la transformation de l'austénite en martensite sous chargement mécanique.

Pour approfondir cette étude, on suggère :

- des essais de soudage afin d'étudier l'influence de la contrainte sur la transformation martensitique dans l'acier 304L.

- d'effectuer des analyses permettant la quantification de la martensite formée, lors des essais de traction et de l'essai de pliage, soit par la méthode de dosages de phase ou bien par des mesures magnétiques.

- d'effectuer des analyses par EBSD pour l'identification et détermination de l'orientation des variantes de martensite (martensite ϵ et α') à l'intérieur du grain austénitique.

Références bibliographique

- [1] : (J.BARALIS G. MAEDER : précis métallurgie, édition Nathan, Paris 1997, p.102).
- [2] : (Castro, R. Historique des aciers inoxydables, les aciers inoxydables. 1990. Les éditions de physique).
- [3] : Pierre-Jean CUNAT, « Aciers inoxydables : Critères de choix et structure», Technique de l'ingénieur ; M4540
- [4] : Dudognon Julien : Etude des modifications structurelles induites par implantation ionique dans les aciers austénitiques, thèse de doctorat de l'université d'Orléans, décembre 2006.
- [5] : VARIOT et GERBEAUX. Les aciers inoxydables mise en oeuvre et soudage publication de la soudure autogène, Paris 82.
- [6] : M :K.AHN, Know & H.M.Lee : quantitative comparison of the influences of tungsten and molybdenum on the passivity of Fe-29Cr ferritic stainless steels, Elsevier (1998).
- [7] : Jean VARIOT : chaudronnerie en acier inoxydable, Technique de l'Ingénieur A869.
- [8] : LI Hua-bing, JIANG Zhou-hua, ZHANG Zu-mi, Xu Bao-Yu, Liu Fu-Bin: Mechanical properties of nickel free high nitrogen austenitic stainless steels, materials symposium (2007).
- [9] : WUDI & LI Zhuang: A new ph- free machinable austenitic stainless steel, journal of iron and steel research, International (2010).
- [10] Mitter. W., Umwandlungsplastizität Und Ihre Berücksichtigung Bei Der Berechnung Von Eigenspannungen. Materialkundlich-Technische, Stuttgart, Allemagne, (1987).
- [11] David G, Les Aciers Inoxydables: Propriétés, Mise En Oeuvre, Emploi, Normes, Technique Et Documentation, Lavoisier.
- [12] Kubler R(2004). Comportement Thermomécanique à l'effet des aciers à effet TRIP : approche micromécanique et phénoménologique .Application à la mise en forme
- [13] Magee Cl. Transformation Kinetics, Microplasticity And Ageing In Fe-31-Ni. Phd Thesis, Carnegie Institute Of Technology, Pi[12] IRVINE, K.J., High-strength austenitic stainless steels. J. of the Iron and Steel Inst. (1961), pp153-175.
- [14] ANGEL, T., Formation of martensite in austenitic stainless steels. J. of the Iron and Steel

Inst. (1954), 177, pp154-174.

[15] IRVINE, K.J., High-strength austenitic stainless steels. J. of the Iron and Steel Inst. (1961), pp153-175.

[16] HECKER, S.S., STOUT, M.G., STAUDHAMMER, K.P., SMITH, J.L., Effects of strain state and strain rate on deformation induced transformation in 304 stainless steel: Part I et Part II. Met. Trans. A (1982), 13A, pp619-635.

[17]

[18]: BUZIT, S., BERGUGNAT, J.B., Evolution of texture of the austenite during martensitic Transformation in TRIP steels. Rapport de fin d'études, ENSAM Metz (2001).

[19] Sassoulas Hervé, «Traitements thermiques des aciers inoxydables», In : Techniques De l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, 1997, vol.MD1, dossier M1155.

[20] Klas Weman, « Aide mémoire, procédés de soudage », Edition Dunod 2000, France.

[21] [37-B. Polizzi, « Etude de construction », Edition Fernand Nathan 1977, France.(Chapitre IV : Les procédés Mécano-Soudés)]

[22] (Abdulkader ZALT Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des structures soudées de type caisson).

[23] [Bill Taylor, Anne Guesnier : Métallographie des soudures].

[24] Ferederique Rossillon. "Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point". Thèse de Doctorat, Université balaise pascal. 2007.

[25] Benddeb Mostapha. "Etude les défauts de soudage des pipelines". Mémoire de Master, Université de Biskra.2012

[26] Chainarong Srikunwong. "Modélisation du procédé de soudage par point". Thèse de Doctorat, Ecole Nationaldes Mines de Paris, 2005.

[27] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-spot-welding> .

Liste des figures :

Chapitre I :

- **Figure I.1:** Mécanisme Greenwood Johnson
- **Figure I.2:** Mécanisme de Magee
- **Figure I.3 :** Micrographie optique de l'acier AISI304. Apparition de martensite dans un grain d'austénite.
- **Figure I.4 :** schéma de composition chimique pour l'acier faiblement allié, TRIP, présentant les principales raisons qui ont conduit à l'élaboration de nouvelles compositions
- **Figure I.5:** Schéma typiques du traitement thermique appliqué aux aciers multiphasés à effet TRIP
- **Figure I.6 :** Micrographies optiques des aciers TRIP multiphasés après attaque électrochimique (TRIP600-700-800-1000).

Chapitre II :

- **Figure II.1.** Différentes parties d'une soudure
- **Figure II.2.** Différents procédés de soudage.
- **Figure II.3.** Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point
- **Figure II .4.** Schéma de principe du soudage par points par résistance
- **Figure II.5.** Soudeuse par points.

Chapitre III :

- **Figure III .1:** Différents sortes de signaux émis par les interactions entre les électrons incidents et l'échantillon
- **Figure III.2 :** Schéma d'un MEB équipé d'un détecteur de rayons X
- **Figure III.3 :** Illustration de la condition de Bragg
- **Figure III.4 :** Éprouvette de traction
- **Figure III.5 :** Essai de dureté Vickers

- **Figure III.6** : Micrographie MEB de l'acier 304L à l'état initial
- **Figure III.7** : Spectre de diffraction de l'acier 304L
- **Figure III.8** : Courbe de traction de l'éprouvette à 25°C
- **Figure III.9** : Micrographie optique de l'échantillon à 25°C
- **Figure III.10** : Micrographie MEB de l'échantillon après rupture

Liste des tableaux

Chapitre I :

- **Tableau I.1** : classification des aciers inoxydables ferritiques.5
- **Tableau I.2** : classification des aciers inoxydables martensitiques.....6
- **Tableau I.3** : désignation des aciers inoxydables austénitiques Fe-Cr-Ni(Mo) suivant la norme EN 10088-1 (la teneur en chrome étant comprise entre 16 et 26%)7
- **Tableau I.4** : Composition chimique des principaux aciers inoxydables austénitiques.....12
- **Tableau I. 5** : Composition chimique – Taille des îlots d’austénite – dosage de phase – teneur en carbone de l’austénite des aciers TRIP multiphasés..... 14

Chapitre III :

- **Tableau III.1.** Composition chimique de la nuance entièrement austénitique AISI 304L.....29
- **Tableau III.2.** Caractéristiques de l’acier 304L.....30
- **Tableau III.3.** Résultats des essais de dureté Vickers.....38
- **Tableau III.4.**caracteristiques du materiau.....40
- **Tableau III.5.:** Valeurs de la dureté Vickers (Hv).....42

Liste des symboles

- d : distance entre deux plans réticulaires consécutifs,
- θ : angle des rayons X incidents ou diffractés avec le plan réticulaire,
- n : nombre entier appelé ordre de la réflexion,
- λ : longueur d'onde.

- W : puissance
- R : conductivité électrique
- I : intensité de courant
- t : temps
- Q : l'énergie thermique

