

[Tapez un texte]

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la construction
Département Génie mécanique



MEMOIRE

DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie mécanique

Option : Sciences des matériaux

Thème

***Evolution des caractéristiques
mécaniques et métallurgiques d'un
acier à effet trip lors des essais de
pliage et de dépliage***

Proposé par :

M. FERHOUM Rabah

Dirigé par : M^{elle} SIDHOUME Zahra

M. ALMANSBA Majid

Réalisé par : MESSAOUDENE KARIM

Promotion 2016/2017

Remerciements

Avant d'entamer mon travail, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné du courage et de la volonté.

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma grande reconnaissance et haute gratitude à mon promoteur M, ALMANSBA MADJID pour son aide et ses conseils qui 'il a généreusement donnés.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance la plus chaleureuse à Monsieur FARHOM RABAH, qui m'a proposé ce thème.

*Je suis très reconnaissant à la **Co-promotrice** : M^{elle} SIDHOUME ZOËRA, pour ses aides et ses encouragements durant toute la période de préparation de ce travail.*

Je remercie aussi le laboratoire de génie mécanique de l'université MOULOUD MAMMERRI et tout le personnel qui m'a aider à réaliser mon travail.

J'adresse mes remerciements les plus distingués à monsieur le professeur AZAM SAID.

Comme je remercie énormément et chaleureusement monsieur HANNOU AGHILES et monsieur ZEROUKI MARZAK.

[Tapez un texte]

Je remercie tous les membres de jury de ce projet.

Mes remerciements vont à tous mes amis qui m'ont donné la volonté et le courage.

Un grand remerciement pour ma femme qui m'a aidé et donné le courage pour reprendre les études.

Je remercie mes deux amis qui m'ont donné le soutien et le courage pour continuer mes études (HARGAS SAID et KRIS AGHILES).

Je termine avec un remerciement particulier pour mes chers parents, mes frères et mes sœurs et toute la famille, et les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction général 1

Chapitre I : synthèse bibliographique

I. Généralités sur les aciers à effet TRIP

I.1-Introduction	2
I.2- Définition de l'acier inoxydable	3
I.3. Historique des aciers inoxydables.....	4
I.4-Nuances des aciers austénitiques.....	5
I.4.1- Aciers martensitiques.....	6
I.4.2-Aciers ferritiques	7
I.4.3- Aciers austénitiques	8
I.4.4- Aciers duplex.....	9
I.4.5- Aciers austéno-ferritiques	10
I.4.6- Aciers inoxydables à Durcissement par précipitation	11
I.5-traitement thermique des aciers inoxydables	12
I.6-L'acier à effet trip.....	13
I-6-1-L'obtention de l'acier TRIP	14
I.6.2-Métallurgie des aciers à effet TRIP	15
1-Aciers à effet TRIP entièrement austénitiques (AISI304)	16
2-Acier TRIP multiphasés	10
I.6.3-Composition chimique 304L.....	12
I.6-4-La transformation martensitique	13
I.6.5-Etude de la microstructure d'acier à effet trip.....	14
I.7 -Le comportement mécanique des aciers à effet TRIP	15
I.7.1-Comportements sous sollicitation monotone	16

[Tapez un texte]

1.7.1.1.- Evolution de la teneur des phases martensitiques due à la déformation monotone	17
I.8. – soudage.....	18
I.8.1. Définition du procédé de soudage	
I.8.2. Types de soudures	
I.9.-Résumé de chapitre I.....	19

Chapitre. II. : méthodes et techniques expérimentales (matériel)

II.1. Introduction

II.2.Présentation du métal de l'étude :

II.2.1. Composition chimique

II.2.2. Caractéristiques de l'acier 304L

II.3.Pliage :

II.3.1.Principe de pliage

II.3.2. Découpage

II.3.3.Protocole de pliage

II.3.4. - L'enrobage

II.3.5. Polissage

II.3.6. Attaque chimique

II.3.7. Caractérisation de l'acier TRIP 304L

II.3.7.1. Caractérisation microstructurale

II.3.7.1.1. Microscope optique (MO) :

[Tapez un texte]

II.3.7.1.2. Microscope électronique à balayage (MEB)

II.3.8.-Essai de dureté

II.4. Dépliage :

II.4.1. Définition :

II. 4.2 .La matrice de dépliage

II.4.3. Essais de traction

II.4.3.1 Machine de traction

II.4.4 Essai de dureté

Chapitre III. : Discussions des résultats

III .1. Introduction

III.2.Résultat de la caractérisation du métal de base

III.2.1. Micrographie

III.2.2.Essai de dureté Vickers

III.3. Résultats obtenus de pliage

III.3.1. Résultats des d'observation microscope optique

III.3.1.1. Les différentes microstructures dans la zone comprimée.

III.3.1.2. . Les différentes microstructures dans la zone milieu.

III.3.1.3.Les Différentes microstructures dans la zone tendue

III.3.2. Résultats obtenue sur le MEB :

III.3.3. Interprétation des résultats

[Tapez un texte]

III.3.4. résultats de l'essai de dureté :

III.3.4.1. -Interprétation des résultats :

III.4. Résultats de dépliage

III.4.1. Les résultats de l'essai de traction

III.4.1.1. Les résultats des courbes de traction :

III.4.1.2. Superposition des courbes de traction :

III.4.1.3.-Interprétation des résultats

III.4.2.Conclusion

III.4.3.Essai de dureté

- **Les tableaux qui présentent la dureté des éprouvettes après dépliages**
- **Interprétation des résultats**

III.5. Résumé du chapitre

- ❖ **Conclusion générale**

Liste des figures

Figure I.1 : Nuance d'aciers austénitiques.

Figure I.2 : schéma typique du traitement thermique aux aciers multiphasés à effet TRIP.

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

Figure I.4: Micrographies optiques des aciers TRIP multiphasés

[Tapez un texte]

(TRIP600-700-800-1000).

Figure. I.5 : Diagramme d'équilibre fer –carbone

Figure I.6 : la variante de la martensite.

Figure I.7 : changement de structure cristalline de l'austénite en martensite.

Figure I.8: effet de Magee

Figure. I.9 : l'effet Greenwood-Johnson

Figure.10 courbe contrainte allongement en Obtenue par charge et décharge successive de l'acier X2CrNi18-9/1.4307 (AISI 304L).

Figure I.11 : Coefficient d'écroutissage fonction de la déformation pour

L'acier X5CrNi18-10/1.4301 (AISI 304L).

Figure I.12 : Taux de martensite transformé en fonction de la déformation plastique pendant un essai de traction.

Figure I.13. Différents procédés de soudage

Figure. II.1. Schéma de pliage avec matrice et poinçon

Figure II.2. L'enrobeuse

Figure. II.3. Les échantillons

Figure II.4. Polisseuse à deux disques

Figure II.5. Polisseuse mono disque de finition

Figure II.6 : Classement des différents microscopes sur l'échelle de grossissement et Résolution.

Figure II.7. Microscope optique.

[Tapez un texte]

Figure II. 8. : Différents sortes de signaux émis par les interactions entre les Electrons incidents et l'échantillon

Figure. II.9. machine de dureté

II.10.La matrice de dépliage avec la machine de traction.

Figure II.11. Machine de traction

Figure. II.12. machine de dureté

Figure III.1 : Micrographie optique de l'acier Inox X2CrNi18-9 entièrement austénitique à l'état initial

Figure III.2.Les échantillons

Figure III. A. B. C.D.E.F. microstructures des 'éprouvettes au zone comprimée grossissement 200

Figure III. G.H.I.J.K.L. Microstructures des 'éprouvettes au zone comprimée grossissement 400

Figure III. M.N.O.P.Q.R. Microstructures des 'éprouvettes au zone milieu. grossissement 200

Figure III. S.T.U.V.W.X. Microstructures des 'éprouvettes au zone milieu. grossissement 400.

Figure III.A1.A2.A3.A4.A5.A6. Microstructures des 'éprouvettes au zone tendu grossissement 200.

Figure III.A7.A8.A9.A10.A11.A12. Microstructures des 'éprouvettes au zone tendu grossissement 400.

Figure III .3. Microstructures de MEB

Figure III.4. : Les éprouvettes après dépliages.

[Tapez un texte]

Figure III.5. Courbes de traction

Figure III.6. Superposition des courbes de traction

Liste des Tableaux

- **Tableau I.1** : Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables.
- **Tableau I.2** : Composition chimique de la nuance entièrement austénitique AISI304.
- **Tableau. I.3**:composition chimique –taille des ilots d’austénite –dosage de teneur en

Carbone de l’austénite des aciers TRIP multiphasés

- **Tableau. I.4** : le pourcentage massique de l’acier à effet trip.
- **Tableau II.1.** Composition chimique de la nuance entièrement austénitique AI

Tableau II.2. Caractéristiques de l’acier 304L

Tableau III .3. Résultats des essais de dureté Vickers de métal de base

Tableau III.4. Résultats des essais de dureté Vickers au pliage

Tableau III .Les tableaux qui présentent la dureté des éprouvettes après dépliages

Liste des symboles

- C_r : chrome
- **X20Cr13, X46Cr13** : Acier martensitique
- **X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17** : Acier ferritique
- X2CrNiN23-4.Aciers austéno-ferritiques

[Tapez un texte]

- **TRIP**: transformation induced plasticity
- **F** : ferrite
- **A** : austénite
- **M** : martensite
- **B** : bainite)
- **C** : carbone
- **M_n** : Manganèse
- **Al** : Aluminium
- **Si** : silicium
- **HB** : la dureté Brinell
- **ε** : martensite de structure hexagonale compacte, ce type de martensite peut se présenter dans les alliages fortement alliés comme les Fe-Cr-C
- **α'** - La martensite ce type de martensite peut être obtenue par la trempe des alliages Fe-C et également Fe-N. Le réseau cristallin quadratique centré.
- **AISI** : entièrement austénitiques
- **MO** : microscope optique
- **MEB** : microscope électronique a balayage

[Tapez un texte]

Introduction générale

Dans la course au développement qu'à engagé 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 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,...).

Le principal mode de pliage qui offre une bonne résistance à la rupture, en plus d'être assez facile à réaliser.

Ce mode est assimilé à un chargement thermomécanique vu qu'on fait subir aux pièces à plier à froid soumis à des forces uni axial.

Dans notre travail, nous allons essayer d'étudier la caractérisation mécanique et métallurgique de la zone de traction et compression après pliage d'un acier inoxydable à effet TRIP, l'acier en question est l'acier AISI 304L.

Ce présent manuscrit est structuré en trois chapitres : une synthèse bibliographique, méthodes et techniques expérimentales (matériel), discussion des résultats.

Le chapitre I fait figure de petite présentation des aciers à effets TRIP, de leurs caractéristiques, des différents types qui existent .Le chapitre II est consacré à la définition du procédé de pliage et dépliage et les étapes qu'on a suivis 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 ; matrice de pliage, machine de traction, polisseuse, l'enrobeuse, microscope optique et à balayage...) . Le chapitre III regroupe les résultats et discussions portant sur la caractérisation mécanique et microstructurale du notre métal d'étude.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale sur nos principaux résultats et les perspectives envisagés pour approfondir nos recherches.

Chapitre. I: synthèse bibliographique

I. Généralités sur les aciers à effet TRIP

I.1.-Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les aciers TRIP , il est scindé en deux parties ; on va définir l'acier inoxydable dans une première partie, puis dans une deuxième partie on va se consacrer à la présentation de l'acier à effet TRIP tout en abordant son mode d'obtention, leurs métallurgies , et leurs moyens de contrôle de la microstructure (fraction volumique d'austénite résiduelle stable à température ambiante) , une section se consacre à la description des phénomènes physiques associés à la transformation martensitique.

I.2-Définition de l'acier inoxydable

Aujourd'hui , nous vivons un extraordinaire développement des aciers inoxydables , cela due en grande partie à la disposition des éléments métalliques entrant dans leur composition c'est à dire le chrome , le nickel , le molybdène et de manganèse, un métal est dit inoxydable s'il résiste bien à l'action de l'atmosphère à divers degrés de l'humidité et de salinité , à des attaques chimiques (acides , bases , agent de corrosion) cet acier est destiné à travailler aux hautes températures , dans les milieux agressifs tel que les milieux oxydants.[1].

Le fer, un constituant majoritaire des aciers, s'oxyde facilement ; le produit de corrosion, la rouille, s'effrite ou se dissout dans l'eau, ce qui crée une dégradation de la pièce.

Une des manières d'éviter la corrosion consiste à mettre une quantité importante de chrome (Cr). L'addition de divers éléments d'alliage permet de s'adapter au milieu spécifique dans lequel doit être utilisé l'acier, et de modifier ses propriétés mécaniques.

-l'ajout de **nickel** améliore les propriétés de la couche passive [1].

-**le carbone** en haute teneur permet de tremper l'acier et d'obtenir un acier martensitique, très dur, mais le carbone nuit à la soudabilité, et par ailleurs, il peut piéger le chrome et gêner la formation de la couche passive.

[Tapez un texte]

D'autres éléments d'alliage, pour des métaux « nobles » Comme le **molybdène**, **titane**, **cuivre** améliorent encore la résistance chimique[2], en particulier dans les milieux non oxydants .Il existe de très nombreuses nuances d'aciers inoxydables et le choix est parfois difficile, car ils n'ont pas tous le même comportement dans un milieu donné, en les désigne souvent par les pourcentages de masse en nickel et en chrome.

I.2.1- Aciers martensitiques

Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13 % de chrome avec au moins 0,08 % de carbone.

D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel. Exemples : X20Cr13, X46Cr13. [5]

I.2.2-Aciers ferritiques

Ils ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 27 %), particulièrement intéressants en présence de soufre. Les aciers ferritiques sont parfois utilisés comme barrière de résistance à la corrosion (tôles plaquées, tôle revêtues, protégées des parois d'équipements sous pression en acier utilisés dans les industries pétrochimique et chimique. Exemples : X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17.

I.2.3- Aciers austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques sont des alliages de fer et de carbone qui contient, en général, de 0,02% à 0,1% de carbone, 17 à 20% de chrome, 7 à 25% de nickel, 2 à 5% de molybdène et d'autres éléments d'addition comme le cuivre, le silicium, le titane, ... Les éléments d'addition permettent d'améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques du matériau. [4]

I.2.4- Aciers duplex

Aciers duplex sont des aciers inoxydables ayant une structure biphasée composée de ferrite et de 40 à 60 % d'austénite. Ils combinent favorablement les propriétés mécaniques. Ceci se traduit par une limite d'élasticité élevée (entre 200 et 600 MPa) et une ductilité satisfaisante (25 à 45%). La résistance à la rupture peut atteindre 850 MPa.

En effet ces aciers n'ont pas de transition brutale ductile-fragile, ils peuvent donc être utilisés sans précautions particulières jusqu'à 50°C. Les aciers duplex ont une grande résistance à la corrosion, c'est pourquoi ils constituent la majorité de la production de pièces moulées en acier inoxydable. La production de tôles fortes ou minces, de produits longs ou de tubes est moins développée en raison des précautions particulières à mettre en œuvre. [6]

[Tapez un texte]

I.2.5- Aciers austéno-ferritiques

Ils ont des propriétés de résistance à la corrosion inter-granulaire ainsi qu'à la corrosion en eau de mer remarquables et présentent, pendant l'essai de traction, un palier élastoplastique. Ils ont un comportement mécanique semblable aux aciers de construction. La transformation liquide / solide se traduit par une solidification en phase ferritique (ferrite delta) puis d'une seconde transformation, à l'état solide, en austénite. Ils devraient donc, en conséquence, être dénommés aciers ferrito-austénitiques. Le simple fait de désigner correctement ces aciers permet de tout de suite comprendre qu'un refroidissement lent. Exemple : X2CrNiN23-4. [5]

I.2.6- Aciers inoxydables à durcissement par précipitation

Il s'agit d'une famille d'aciers inoxydables dont les caractéristiques mécaniques sont obtenues à l'issue d'un traitement de durcissement secondaire suivant un traitement thermique de trempe ou d'hypertrempe.[5]

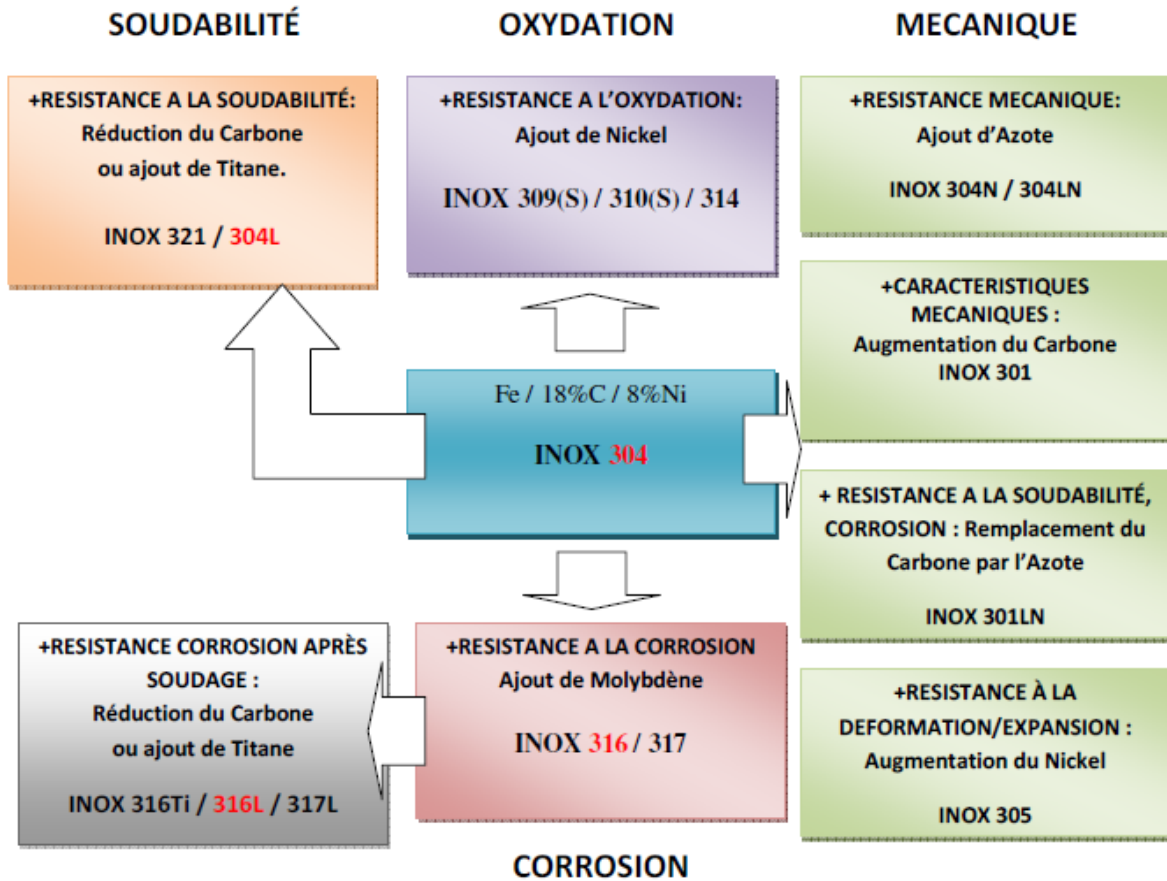
Il existe trois groupes d'aciers inoxydables à durcissement par précipitation.

- a) Aciers martensitiques à transformation directe.
- b) Aciers semi-austénitiques ou à transformation martensitique Indirecte.
- c) Aciers austénitiques à durcissement par durcissement secondaire.

I.2.7.-Nuances d'aciers austénitiques

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.

[Tapez un texte]



Figure(I.1):Nuance d'aciers austénitiques [4]

I.5-Traitement thermique des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables assurant une bonne résistance à la corrosion ont pour but de rendre la répartition en chrome du métal la plus homogène possible en évitant toute précipitation de phases riches en chrome [7].

Traitement thermique	Objectifs	Processus métallurgiques mis en œuvre
Homogenisation	--Diminuer l'ampleur de la ségrégation --Obtenir une phase homogène	Maintien à haute température (diffusion des éléments ségrévés, dissolution de précipités ou des phases intermétalliques).
Durcissement	--Augmente les caractéristiques Mécaniques	Austenisation puis transformation martensitique. — Durcissement secondaire par précipitation.

[Tapez un texte]

Adoucissement	--Augmenter la ductilité --Diminuer la fragilité	Élimination des dislocations par restauration ou recristallisation. —coalescence et globularisation des précipités. — Grossissement de grain. — Transformations de phase.
Détente	--Éliminer une partie résiduelle	Par abaissement de la limite d'élasticité avec la température. — Par relaxation des contraintes (fluage).
Traitement superficiels	--augmenter la dureté en surface	Rapports d'interstitiels.

[Tapez un texte]

Désensibilisation	--supprimer la sensibilité à la corrosion intergranulaire due en carbure de chrome	Homogénéisation de la teneur en chrome autour des carbures (diffusion).
-------------------	--	---

Tableau(I.1) : Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables.

I.6-L'acier à effet trip

Les aciers à effet TRIP (transformation Induced placticity) dû à la transformation de l'austénite résiduel en martensite se traduisent par une évolution de leur microstructure. Cette structure composée d'une matrice ferritique ductile dans laquelle se trouve des particules de phase bainitique et l'austénite résiduelle. La transformation peut améliorer le comportement mécanique, la formabilité, la résistance et l'absorption d'énergie. [8]

I.6.1-L'obtention de l'acier trip

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 [11,12, 13] 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 remarquable.

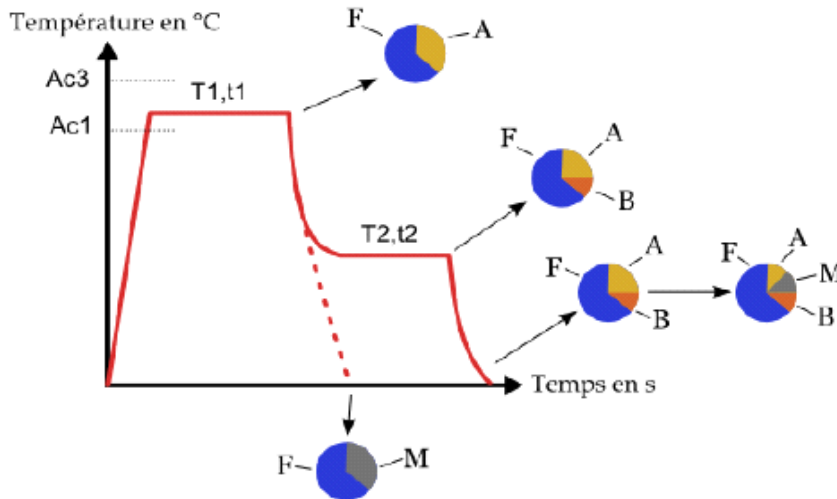
L'obtention d'un acier à effet TRIP commence par la réalisation d'une trempe ; cette trempe se déroule en 4 étapes distinctes :

- la première étape est un maintien de l'acier entre les températures inter critiqués ; L'acier a une structure austénitique et ferritique.
- la seconde étape consiste en un refroidissement rapide jusqu'a la zone d'existence de la bainite.
- on réalise alors un second maintien dans la zone bainitique. Ceci permet d'éviter l'obtention de martensite pure en grande proportion dans la structure.

[Tapez un texte]

– la dernière étape est un second refroidissement de l'acier, celui-ci jusqu'à la température ambiante, on obtient un acier contenant de l'austénite retenue. [9]

Sur la figure(I.2) vous pouvez observer les différentes étapes de la trempe ainsi que la composition de l'acier à chaque étape.



**Figure(I.2) : schéma typique du traitement thermique aux aciers multi phases
À effet TRIP**

(F : ferrite, A : austénite, M : martensite : B, bainite)[10]

La différence entre les aciers ces le taux de martensite.

1-Aciers à effet TRIP entièrement austénitiques (AISI304)

La connaissance de l'état microstructural constitue une étape importante.

La *figure (I.3)*:représente une micrographie de l'acier AISI304 après déformation ; polissage mécanique et électrolytique [14]. (La taille de grain moyenne est de 25µm).

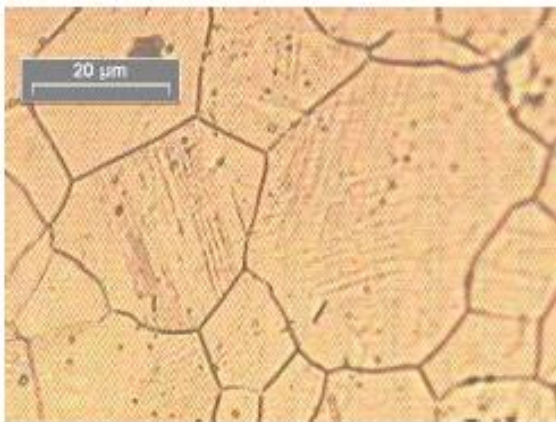


Figure (I.3): Micrographie optique de l'acier AISI304. Apparition de martensite dans un grain d'austénite [14]

[Tapez un texte]

AISI304	C	Cr	Ni	Si	Mn
%pds	0.0420	18.1	8.65	0.45	1.15

Tableau (I.2) : Composition chimique de la nuance entièrement austénitique AISI304.

2-Aciers TRIP multiphasés

TRIP	Taille de grain austénite (μm)	Composition (%pds)			Fraction de phase(%)				%C dans γ
		C	Mn	Si	γ	A	b	M	
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.3): composition chimique –taille des ilots d’austénite –dosage de Teneur en carbone de l’austénite des aciers TRIP multiphasés [15].

Les nuances d’aciers TRIP multiphasés diffèrent par leur composition chimique et leur proportion de phase. Le *tableau (I.3)* 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 micrographiques sont présentées sur la *figure (I.4)*.

.En peut identifier les différentes caractéristiques de la microstructure.

[Tapez un texte]

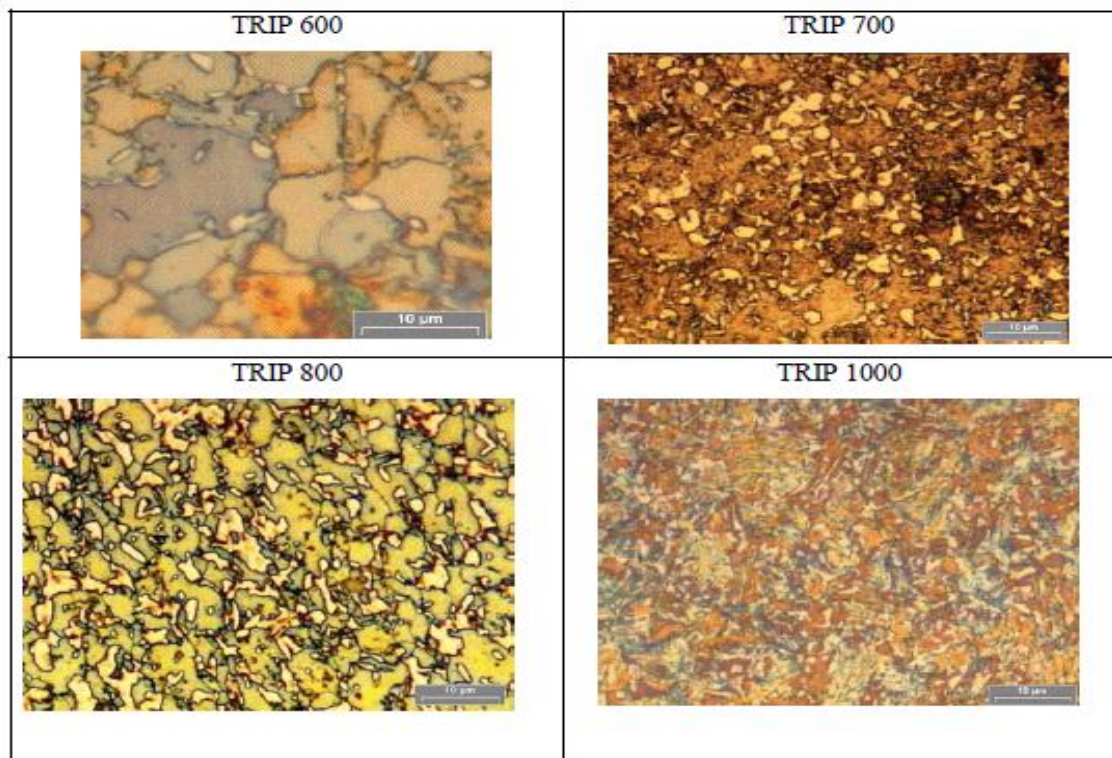


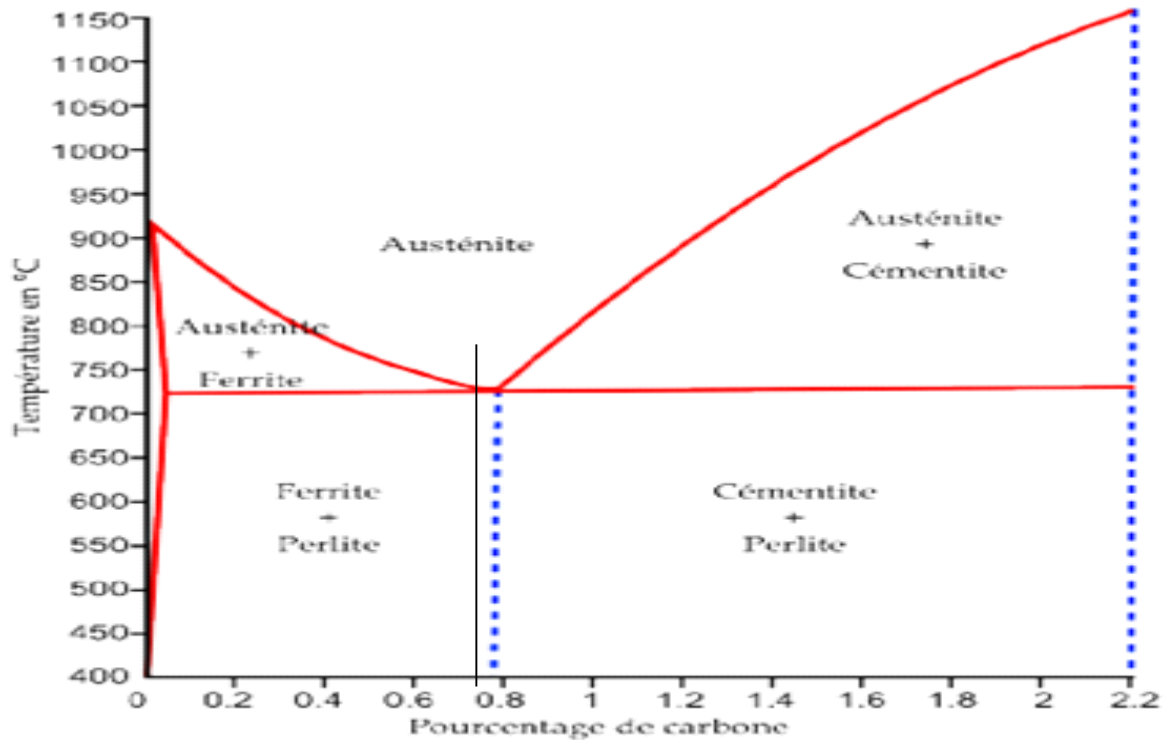
Figure (I.4): Micrographies optiques des aciers TRIP multiphasés (TRIP600-700-800-1000). [14]

On conclue que la taille des grains est différentes d'un acier à l'autre

I.6.3-Compositions chimique 304L

Les aciers a effet TRIP, font partie de la classe des aciers hypoeutectoides ou faiblement allie, leur pourcentage de carbone étant inferieur 0,77%. Le diagramme fer-carbone simplifie ci-dessous montre le domaine d'existence des Aciers à effet TRIP. [16]

[Tapez un texte]



Figure(I.5) : Diagramme d'équilibre fer –carbone .[14]

Afin d'obtenir l'effet TRIP, il est nécessaire d'incorporer dans l'alliage du Silicium et ou de l'Aluminium ces composants servant à stabiliser la structure austénitique de l'acier lors du refroidissement. Ainsi à température ambiante, l'acier obtenu conserve l'austénite dans la structure cristalline, appeler austénite retenu à base de l'effet trip.

Il est donc possible de dégager les proportions habituelles des constituants d'un acier à effet TRIP (en% massique).

Fer(%)	C	Mn	Al ou Si
	0,1-0,4%	1,5-2,5%	0,5-2%

Tableur(I.4) : le pourcentage massique de l'acier à effet TRIP.

I.6.4-La transformation martensitique

La transformation martensitique induit une déformation plastique macroscopique correspondant au phénomène de plasticité de transformation .la phase transforme en martensite accumule des contraintes qui peuvent être relaxées par déformation sous forme de glissement de dislocation ou de

[Tapez un texte]

macle .Dans les aciers a effet TRIP, cette plasticité de transformation de phase de l'austénite métastable ou de macle se traduit par un changement soudain de la pente de l'érouissage [17]

La plasticité sa transformation est généralement définie comme un accroissement significatif de la plasticité pendant une transformation de phase. Une déformation plastique a lieu pour une contrainte externe appliqué telle que la contrainte équivalente inférieure est inférieur à la limite d'élasticité.

I.6.5-Etude de la microstructure d'acier a l'effet trip

Transformation Induced placticity (trip) : cette expression en anglais indique que la transformation de phase est induite par la déformation plastique, la phase transformé en martensite accumule des contraintes qui peuvent être relaxé par une déformation sous forme de glissent de dislocation ou de maclage. Dans l'acier à effet TRIP, cette plasticité de transformation de l'austénite métastable se traduit par un changement soudain du seuil d'érouissage.

La transformation correspond à un changement de phase qui se produit à l'état solide et qui est à l'origine des propriétés remarquables des matériaux dans laquelle se produise, la vitesse de refroidissement doit être élève ce qui ne permet pas aux atomes de se déplacer par diffusion, il en résulte une déformation macroscopique sous la forme d'un cisaillement qui se compose par une déformation supplémentaire et la plastification de l'austénite.

L'absence de diffusion implique non seulement que les phases austénitique et martensitique ont même composition chimique, mais que; de plus la martensite hérite de l'ordre et des défauts de la phase mère.

La structure de la martensite se présente sous forme d'aiguille, elle est très dure entre 500-650HB selon la teneur en carbone, et difficilement usinable.

[Tapez un texte]

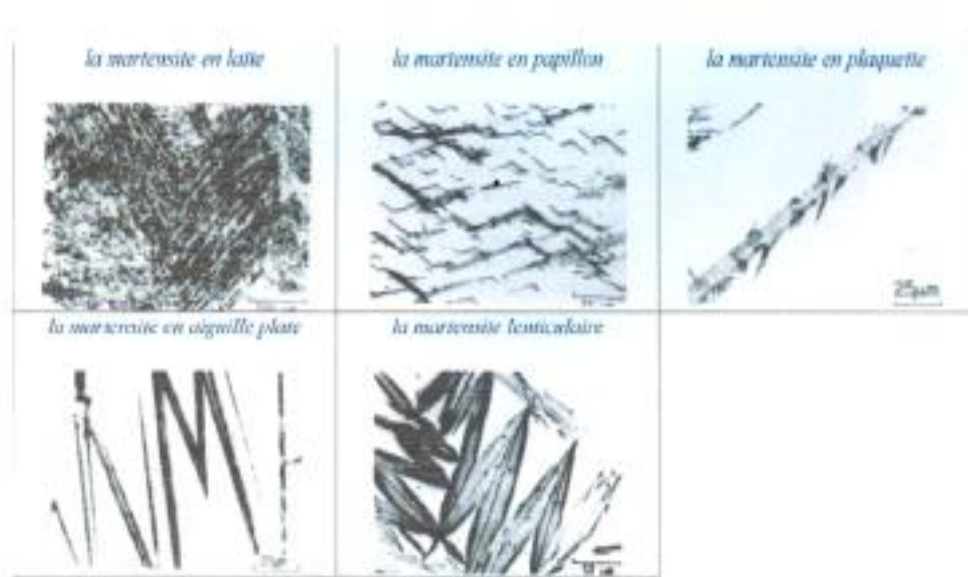
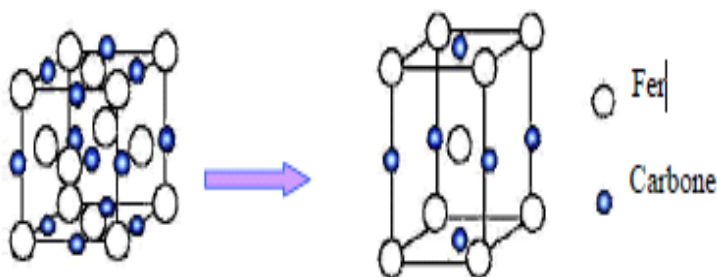


Figure (I.6) : La variante de la martensite. [18]

Dans les aciers la martensite possède trois types de structures cristallines:

- La martensite (α') à une structure tétragonale. Elle est observée dans l'alliage binaire Fe-c et se trouve dans les aciers trip industriels. Elle possède une forte énergie de fonte d'empilement.
- La martensite a une structure hexagonale compacte Hc.
- La martensite (ϵ) tétragonale à face centrée TFC les caractéristiques de la transformation martensitique une énergie de déformation élastique importantes, un changement de forme laissant un plan invariant ; une déformation homogène macroscopique du réseau cristallographique constituée par un glissement et une dilatation.



Martensite M

Austénite γ

Figure(I.7) : changement de structure cristalline de l'austénite en martensite [19].

[Tapez un texte]

Il existe deux mécanismes relatifs à la plasticité de transformation :

• **L'effet Magee** : Il correspond à la l'orientation des variantes de martensite sous un chargement. Voir *figure(I.8)*.

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 , 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. [20]

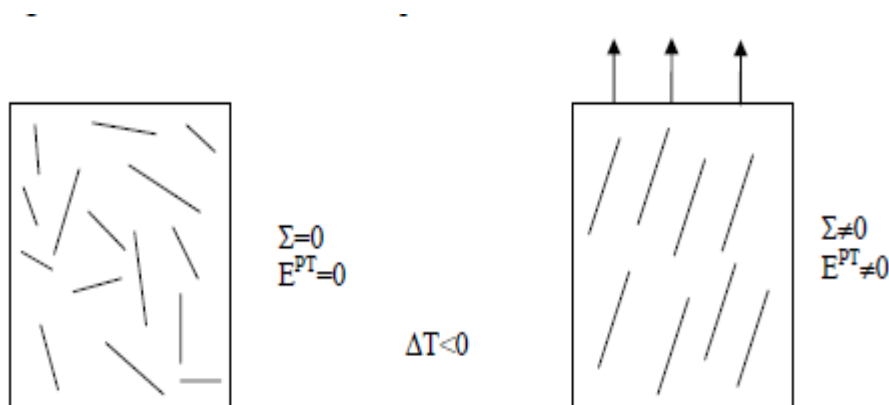


Figure (I.8) : effet de Magee

• **l'effet Green Wood-Johnson** : Il prend en compte l'accommodation inélastique de déformation de Bain dans les deux phases (*figure I.9*) Explique par la génération de contraintes internes microscopiques dues à la différence de volume entre les deux phases, qui sont suffisantes pour induire un écoulement plastique dans la phase ayant la limite d'élasticité la plus faible. Ainsi, la contrainte oriente ces déformations plastiques microscopiques et il en résulte une déformation macroscopique dans la direction de la contrainte appliquée. [21]

[Tapez un texte]

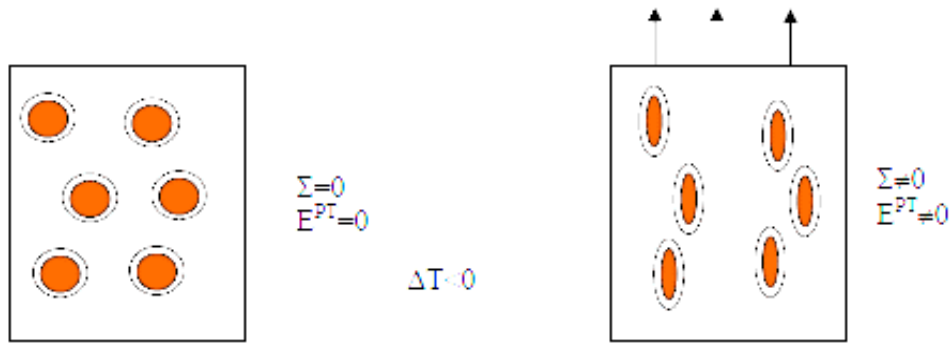


Figure (I.9): l'effet Greenwood-Johnson

Σ : Contrainte externe

E^{pt} : Déformation plastique

I.7-Le comportement mécanique des aciers a effet TRIP

Le phénomène de plasticité de transformation a été mis à profit pour développer une nouvelle gamme d'aciers dans les années 1990 à 2000, les aciers TRIP (Transformation Induced Plasticity). La plupart de ces aciers sont multi phases et présentent une fraction d'austénite résiduelle qui se transforme en martensite sous sollicitation thermomécanique.

L'étude du comportement mécanique traction uni axiale (homogènes), traction, compression, cisaillement, en fin des essais d'emboutissage.

I.7.1-Comportements sous sollicitation monotone

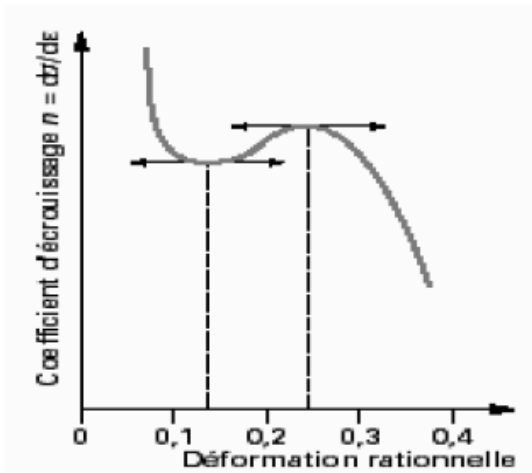
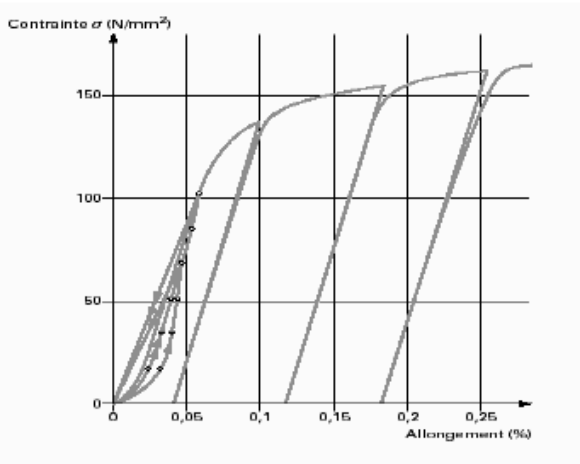
La proportion des différentes phases (l'austénite γ , la martensite ϵ , et la martensite α' dans l'acier inoxydable est fonction de l'histoire thermomécanique antérieure et de la déformation plastique. Lorsque la déformation est faible, la quantité de martensite transformée est faible. La formation rapide de la martensite α' durant la déformation plastique joue un rôle essentiel dans le phénomène de consolidation qui apparaît en particulier pendant l'essai de traction. Cela se traduit par une évolution significative du coefficient d'écroutissement instantané

$$n = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \epsilon} [22] \text{ voir figure(I.10).}$$

Dans ce fait, pour les aciers inoxydables austénitiques instables, n passe par un minimum puis par un maximum figure(I.11).

[Tapez un texte]

L'existence de ces deux extremums avec les austénites instables résulte de la formation de martensite durant l'écroutissage. La valeur minimale se place légèrement en dessous du seuil de formation de la martensite, alors que la valeur maximale correspond à la déformation pour laquelle la formation de martensite est maximale *figure (I.11)*. Quand la déformation atteint une valeur maximale de l'ordre de 0.25, le coefficient d'écroutissage diminue rapidement. Cet effet est lié à la saturation des phases présentes et au fait que l'écroutissage de la phase martensitique est nettement plus faible que celui de l'austénite [23].



Figure(I.10) ; courbe contrainte allongement **Figure(I.11)** : Coefficient d'écroutissage en Obtenue par charge/décharge successive fonction de la déformation pour De l'acier X2CrNi18-9/1.4307 (AISI 304L). l'acier X5CrNi18-10/1.4301 (AISI 304)

1.7.1.1- Evolution de la teneur des phases martensitiques due à la déformation monotone

Mango non [24] et Botshekan [25] ont étudié l'évolution des phases martensitiques (α') et (ϵ) se produisant durant un essai de traction monotone sur l'acier 304. Mangonon [24] a trouvé, à l'aide de la technique de la diffraction des rayons X et l'observation par le microscope électronique à transmission, que la phase martensitique (ϵ) apparaît dès le début de déformation et atteint un maximum à 5% de déformation [24]. En revanche, la formation de phase (α'), détectée par méthodes magnétiques comme la technique de bruit de Barkhausen, ne commence qu'à partir de 20% de déformation plastique et elle perdure jusqu'à la rupture [10], *figure (I.12)*

[Tapez un texte]

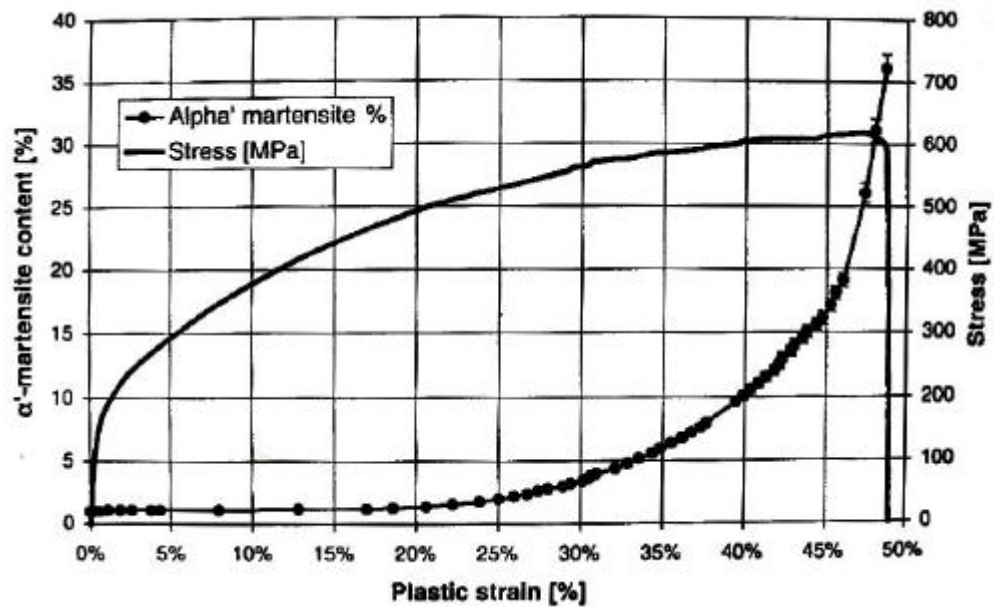


Figure (I.12) : Taux de martensite transformé en fonction de la déformation plastique pendant un essai de traction, [22].

[Tapez un texte]

I.9-Résumé de chapitre :

Ce chapitre est consacré à la présentation de la transformation martensitique et plus particulièrement de l'effet TRIP dans les aciers. Cet effet se manifeste dans les aciers à structure entièrement ou partiellement austénitique instable lors d'un chargement thermomécanique.

La transformation martensitique comme toute transformation de phase, elle respecte les principes de la thermodynamique et dépend de la composition chimique du matériau et des différentes phases qu'il contient ainsi que de la température, la cinétique de la transformation martensitique dépend de l'état de contrainte dans le matériau et plus particulièrement de la contrainte hydrostatique. Plus localement la transformation dépend de la densité de dislocation et d'autres défauts dans le matériau.

[Tapez un texte]

Chapitre. II : méthodes et techniques expérimentales (matériel)

II.1. Introduction :

Cette partie représente une introduction au travail expérimental, il est réservé à la présentation de l'acier qui fait objet de notre étude, sa composition chimique et ses caractéristiques théoriques et les différentes étapes suivies pour la réalisation de pliage et de dépliage ; Puis de l'observation de la microstructure faite sur microscope optique et microscope électronique à balayage (MEB) après polissage et attaque chimique de nos échantillons.

-la traction et la dureté.

II.2. Présentation du métal de l'étude :

C'est un acier inoxydable à effet TRIP, entièrement austénitique. Sa dénomination est AISI 304L. Le (L) signifie que l'acier à une faible teneur en carbone. Suivant l'AFNOR sa désignation est X2CrNi18-9.

II.2.1. Composition chimique

Le tableau ci-dessous résume la composition chimique et le pourcentage de chaque élément de cet acier 100% austénitique.

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

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

II.2.2. Caractéristiques de l'acier 304L

[Tapez un texte]

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 II.2. Caractéristiques de l'acier 304L

[Tapez un texte]

II.3.Pliage :

II.3.1.Principe de pliage :

Le pliage est une déformation obtenue grâce à une force appliquée sur la longueur de la pièce, Celle – ci sera en appui sur 2 lignes et s'apparente à la flexion ; il faudra dépasser la limite élastique pour obtenir **l'angle voulu**.

II.3.2. Découpage : on a passé au découpage de nos échantillons. Ce dernier a été fait à l'aide d'une guillotine, on a découpée 03 échantillons d'épaisseur 1.8mm et 03 échantillons.

II.3.3.Protocole de pliage : les assai de pliage on été réalisé au laboratoire par madame sidhoum durant son stage au France, elle a passé à l'usinage du poinçon a utilisé, comme un contre Vé, pour le pliage de nos échantillons. Le poinçon réalisé a un angle de 90° avec une pointe vive. Le poinçon usiné a ensuite subi une opération de polissage dans le but d'éliminer l'angle vif et d'avoir un angle émoussé. Une fois que l'outillage est fait, on a passé aux essais de pliage. Ces derniers sont effectués sur une machine de traction de type LLOYD INSTRUMENT. La matrice portant l'éprouvette est placée sur le mors fixe de la machine et le poinçon sur son mors mobile. La machine est reliée à un ordinateur qui nous permettra le réglage des paramètres de l'essai tels que type de l'essai, la charge maximale, l'avance maximale, la vitesse de l'essai...etc. dans notre cas, on a choisi l'essai de compression et on a joué sur l'avance du poinçon pour aboutir à plusieurs angle de pliage. Les essais sont effectués à une vitesse de 10mm/mn. A la fin de chaque essai, on prenait des photos avant et après décharge, et cela dans le but de mesurer le retour élastique. Les photos obtenues sont traitées à l'aide du logiciel de traitement d'image Visilog.

Et concernant mon travail il consiste à étudier l'évolution des caractérisation mécanique et métallurgique après pliage et réalisé les essais de dépliage.

[Tapez un texte]

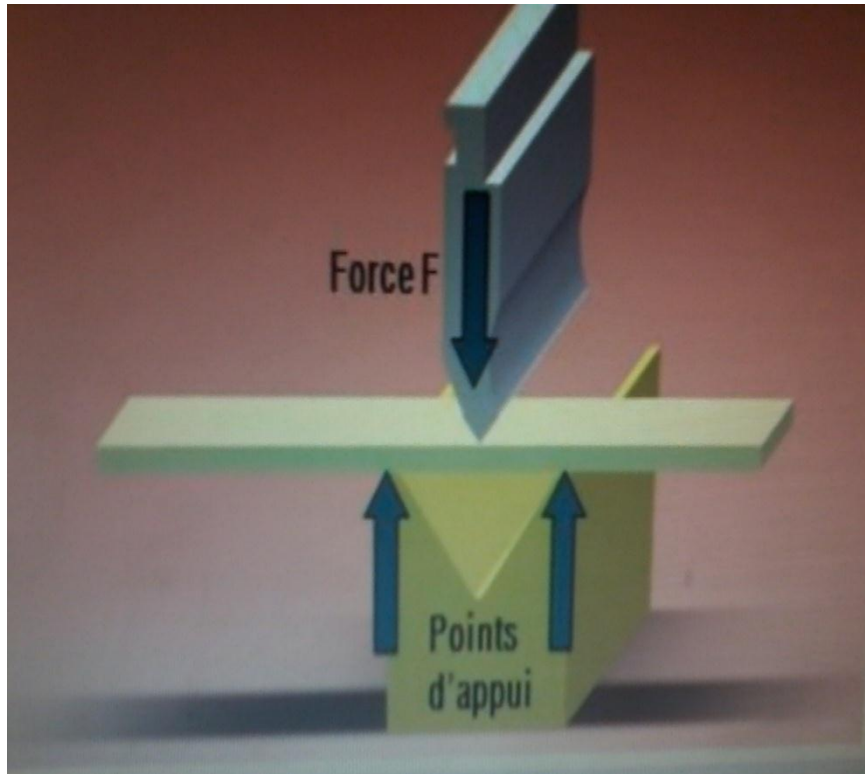


Figure. II.1. : Schéma de pliage avec matrice et poinçon

[Tapez un texte]

II.3.4. - L'enrobage : après l'opération de pliage on a découpé des petits échantillons, puis on a enrobé dans l'enrobeuse avec des poudres des baqilites soumises à une force de compression :



Figure II.2. L'enrobeuse

[Tapez un texte]



Figure. II.3. Les échantillons après pliage pour micrographie.

[Tapez un texte]

II.3.5. Polissage

Suite à la découpe d'échantillons, nous avons réalisé un polissage dans le but d'obtenir une surface plane, brillante, et dépourvue de rayures qu'on appelle communément surface à « effet miroir ». Cette opération est réalisée sur une polisseuse à deux disques, la vitesse de rotation des disques est de 300tr/mn, avec un arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement et de contamination.

La réalisation du polissage se fait de façon graduelle c'est-à-dire que nous commençons avec un papier abrasif assez rugueux de granulométrie égale à (P240, P400, P800) et petit à petit on utilise un papier de plus en plus fin (P1000, P1200, P2000, P4000).

Les rayures que provoque un papier sont éliminées par le suivant, c'est pour cela que le polissage se fait dans un sens puis dans le sens perpendiculaire.



Figure II.4. Polisseuse à deux disques

Pour la finition, 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). Les granulométries sont caractérisées par le temps nécessaire au dépôt de l'alumine en suspension, après agitation. Plus l'alumine est fine et plus la durée est longue La vitesse de rotation du disque est de 300tr/min.

[Tapez un texte]



Figure II.5. Polisseuse mono disque de finition

A l'issue de cette opération finale, l'échantillon est lavé puis séché.

Une petite remarque, vu que nos échantillons sont de faible épaisseur ($e=3$ mm) nous avons réalisés un enrobage, de ces derniers, à base bakélite dans le but de bien les manipulés et assurer une bonne préparation des bords.

II.3.6. Attaque chimique

On réalise une attaque électrolytique après le polissage dans le but de mettre en évidence les différentes phases et leur morphologie, tout comme les joints de grains austénitiques.

(Définition de l'attaque électrolytique + photo du dispositif)

La mise en œuvre de cette attaque est effectuée avec une solution d'acide oxalique, la composition chimique est de 10g de $C_2H_4O_4$ et 100 ml H_2O .

II.3.7. Caractérisation de l'acier TRIP 304L

La caractérisation de l'acier TRIP 304L peut être divisé en deux partie. Une première qui est la caractérisation microstructurale et la seconde c'est la caractérisation mécanique.

II.3.7.1. Caractérisation microstructurale

Après le polissage et l'attaque chimique nécessaire pour la réalisation de cette caractérisation microstructurale nous avons besoins d'utilisé le microscope optique ainsi que le microscope

[Tapez un texte]

électronique à balayage chacun d'eux dans des buts bien précis bien évidemment. La figure ci-dessous montre le classement du MO et du MEB sur une échelle de grossissement et de résolution.

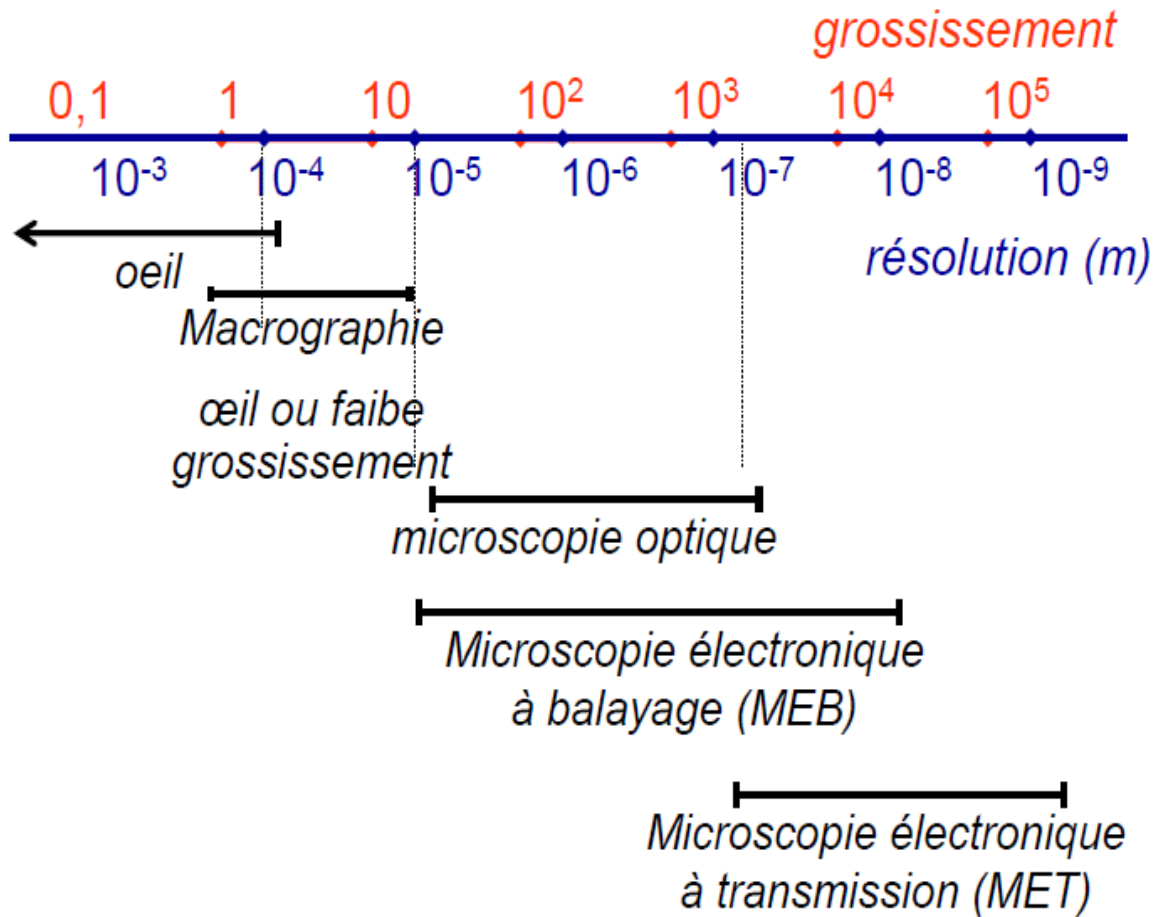


Figure II.6 : Classement des différents microscopes sur l'échelle de grossissement et Résolution.

[Tapez un texte]

Après toutes les opérations faites sur les éprouvettes, on passe à l'observation microscopique :

II.3.7.1.1. Microscope optique (MO) :

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.

Le but de cette analyse au microscope optique est de mettre en évidence les différents constituants, les grains et joints de grains, leurs discontinuités, et les figures cristalline.

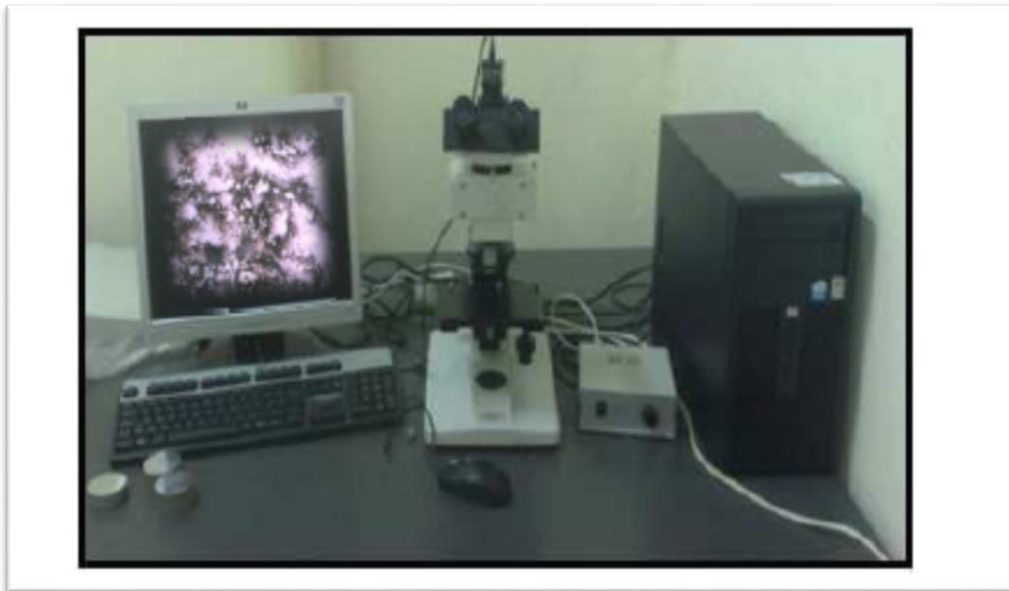


Figure II.7. Microscope optique.

II.3.7.1.2. Microscope à balayage électronique (MEB)

[Tapez un texte]

L'image MEB est une image reconstituée : une sonde, le faisceau d'électrons, balaye la surface de l'échantillon, un détecteur récupère de manière synchrone un signal induit par cette sonde pour en former une image, cartographie de l'intensité de ce signal. Le MEB est constitué d'une source d'électrons qu'un jeu de lentilles "condenseur" focalise sur un diaphragme.

Une deuxième lentille "objectif" refocalise ce faisceau sur l'échantillon en un spot très fin (<15 à 200 Å). Un jeu de bobines de déflexion permet de déplacer le faisceau et donc de balayer

l'échantillon. Ceci forme la sonde. Sous l'impact du faisceau d'électrons, il y a essentiellement :

- rétrodiffusion d'électrons du faisceau incident avec plus ou moins de perte d'énergie.
- émission d'électrons secondaires de faible énergie, provenant des couches externes des atomes de l'échantillon.
- émission de rayons X, concurrentiellement avec les électrons Auger.
- émission de photons UV-visible.
- écoulement d'un courant vers la masse.

Dans notre cas, l'imagerie des faciès de rupture qu'on a obtenu se fait avec l'émission d'électrons secondaires.

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.

Les informations principales que nous fournit le MEB sont la morphologie, l'effet de relief, la rugosité, la profondeur de champ, des grossissements de 10x à 500.000x, une imagerie de la répartition d'inhomogénéités de composition (sans identification des éléments)

Par contre, il n'offre pas d'information structurale autre que les formes cristallines « macroscopiques » en standard, mais possible en EBSP, pas d'info non plus sur le relief (Z) relative.

[Tapez un texte]

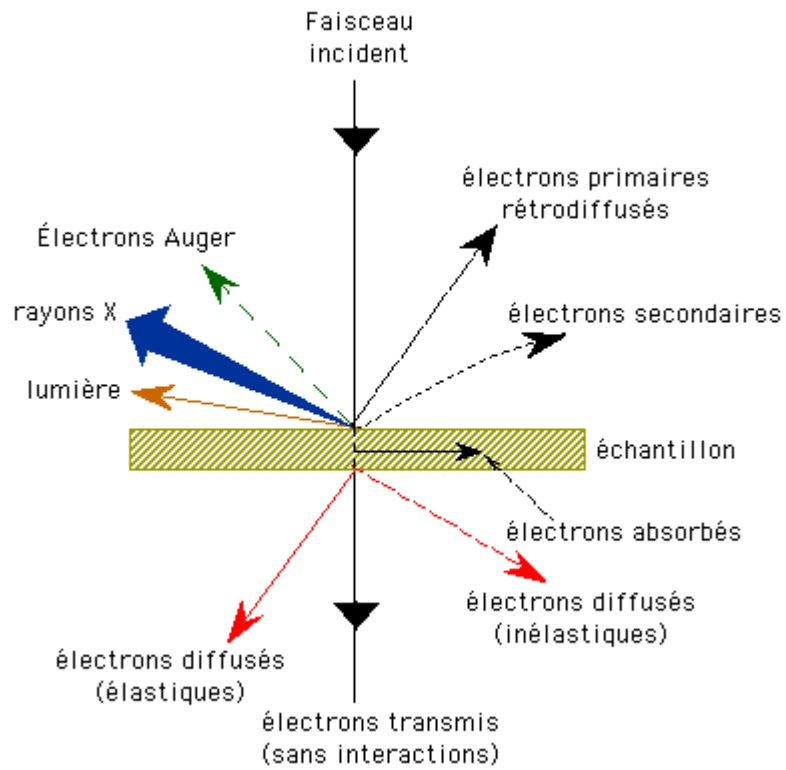


Figure II. 8. : Différents sortes de signaux émis par les interactions entre les électrons incidents et l'échantillon

[Tapez un texte]

II.3.8.-Essai de dureté :

Cet essai est destiné à vérifier la dureté superficielle d'une pièce. Il consiste à indenter la surface de la pièce tester à l'aide d'un pénétrateur pyramidale a base carrée (dureté Vickers) sur lequel on a appliqué une charge connue, la mesure de l'aire de l'empreinte rapportée à la charge appliquée permet de déduire la dureté .



Figure. II.9. machine de dureté

Cette étape est nécessaire afin de déterminer la cinétique de durcissement de la tôle étudié. On a appliqué une charge de 15 KN sur l'éprouvette en deux épaisseurs de 1.8mm et 03 mm. Sur chaque éprouvette on a effectué l'essai de dureté suivant la position des points relevé sur chaque zone de l'éprouvette (zone comprime, tendu, milieu).

Pour calculer HV on a utilisé la formule suivante :

avec : **F= 15 KN : charge**

$$HV = \frac{(1.8544 * F)}{D^2}$$

D² : diamètre d'empreint

[Tapez un texte]

II.4. Dépliage :

Après l'opération de pliage on passe à l'étape de dépliage.

II.4.1 Définition :

Le dépliage : c'est l'étape de remettre l'éprouvette à l'état initial après sa sera pliée.

II 4.2. La matrice de dépliage :

Pour cet étape on a choisi d'usinée un dispositif qui a fixé les éprouvettes aux mores de la machine de traction.

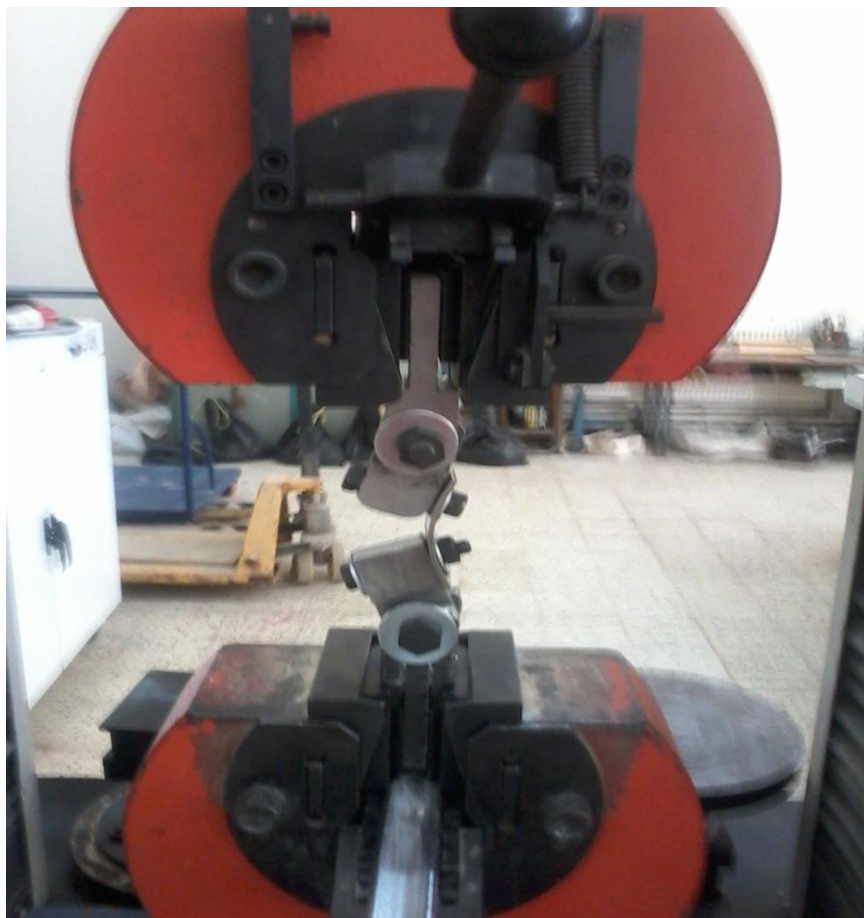


Figure. II.10.La matrice de dépliage avec la machine de traction.

[Tapez un texte]

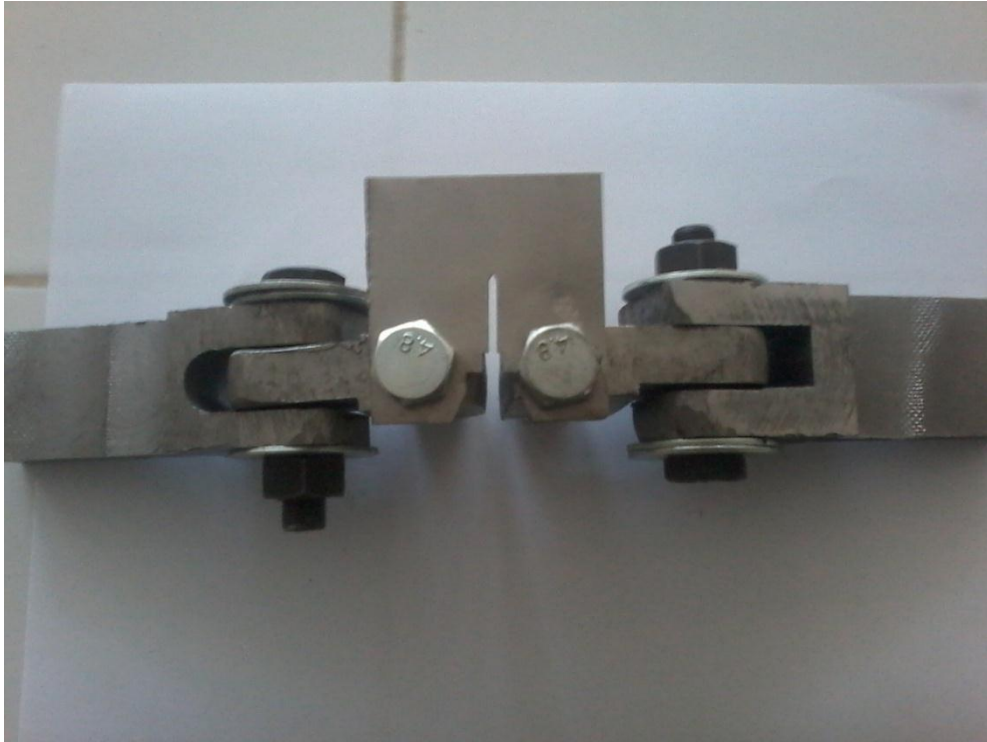


Figure. II.11. dispositif de dépliage

[Tapez un texte]

II.4.3 .Essais de dépliage

Pour l'essai de dépliage on à travaillé sur la machine de traction

II.4.3.1. Machine de traction

La machine de traction utilisée est de type IBERTEST. 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. Ses caractéristiques sont:

Charge d'essais : 200KN ;

Vitesse d'essai: 10 à 500 mm/min ;

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



Figure II.11. : Machine de traction

II.4.4. essai de dureté

Cet essai est destiné à vérifier la dureté superficielle d'une pièce. Il consiste à indenter la surface de la pièce tester à l'aide d'un pénétrateur pyramidale a base carrée (dureté Vickers) sur lequel on a appliqué une charge connue, la mesure de l'aire de l'empreinte rapportée à la charge appliquée permet de déduire la dureté .

[Tapez un texte]



Figure. II.12. machine de dureté

Cette étape est nécessaire afin de déterminer la cinétique de durcissement de la tôle étudié.
On a appliqué une charge de 15 KN sur l'éprouvette en deux épaisseurs de 1.8mm et 03 mm.
Sur chaque éprouvette on a effectué l'essai de dureté suivant la position des points relevé sur chaque zone de dépliage.

Pour calculer HV on a utilisé la formule suivante :

avec : **F= 15 KN : charge**

$$HV = \frac{(1.8544 * F)}{D^2}$$

D² : diamètre d'empreint

Chapitre III. : Discussions des résultats

III .1. Introduction

Le sujet de notre projet est la caractérisation mécanique et métallurgique de la zone de pliée et dépliée d'un acier inoxydable à effet TRIP, l'acier en question est l'acier AISI 304L. Dans l'optique de cette étude nous avons réalisés des essais mécaniques, sur le métal de base, que nous avons présentés dans le chapitre précédent, ainsi y'a eu des essais de traction et de dureté. Puis on s'est intéressé à l'évolution de la microstructure, pour cela nous avons utilisés le microscope électronique à balayage pour étudier la morphologie de la zone pliée, (zone comprimée et zone tendue) et le microscope optique pour suivre l'évolution de la microstructure de nos échantillons.

Ce présent chapitre 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 une opération de pliage , Le but ici étant de déduire les caractéristiques de notre métal de base, l'influence du taux de déformation sur la transformation martensitique, les transformations induites par le pliage, l'évolution des caractéristiques mécaniques après pliage et après dépliage .

III.2.Résultat de la caractérisation du métal de base

III.2.1. 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 III.1** .ci-dessous représente la micrographie optique de la nuance d'acier inoxydable entièrement austénitique AISI 304L (X2CrNi18-9) à l'état initial, obtenue après polissage et attaque électrolytique. On y distingue des grains entièrement austénitiques.

[Tapez un texte]

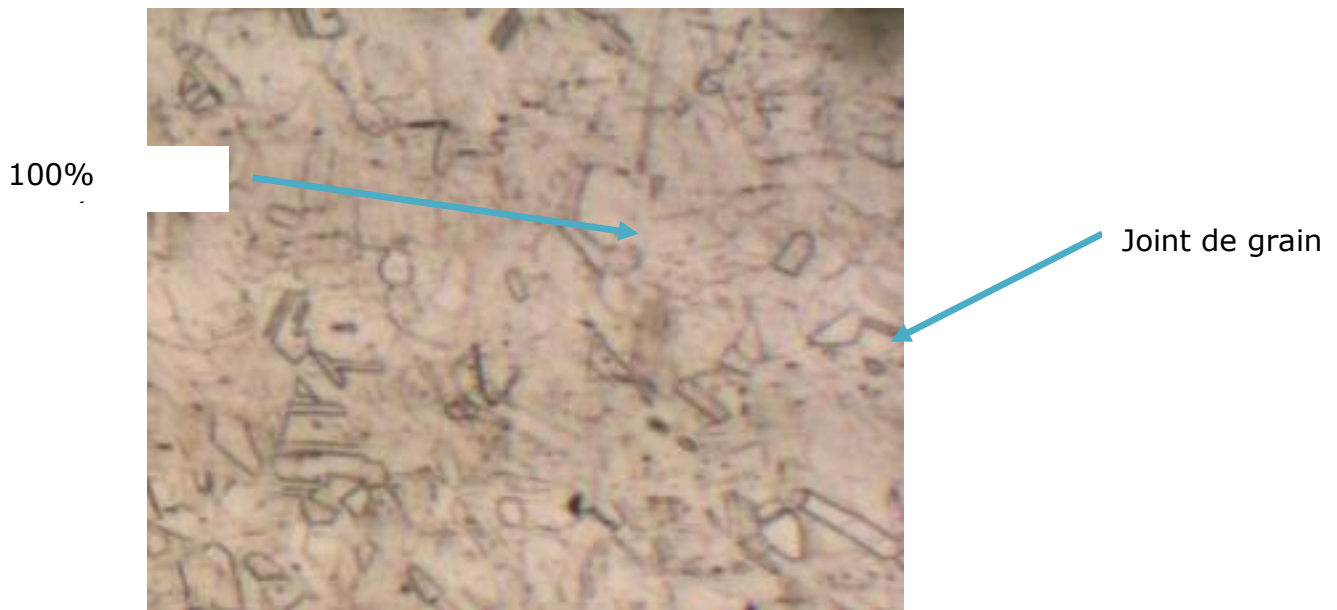


Figure III.1 : Micrographie optique de l'acier Inox X2CrNi18-9 entièrement austénitique à l'état initial

III.2.2.Essai de dureté Vickers

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

Tableau III .3. Résultats des essais de dureté Vickers de métal de base

Métal de base	1	2	3
HV	143.12	141.85	145.87

[Tapez un texte]

III.3. Résultats obtenus de pliage : le but de stage était de réaliser des essais de pliage sur des éprouvettes en acier 304L. Les outillages qu'on a utilisés pour cela sont : une matrice à 90° ayant un vé de 29mm et deux poinçons à rayons différents à savoir ; 3mm et 5mm. Les résultats obtenus sont comme suit :

- Lors du pliage, nos éprouvettes sont soumises à deux types de contraintes : une contrainte de compression s'exerçant sur la zone intérieur du pli, et une contrainte de traction qui elle s'exerce sur sa zone extérieur. Dans la zone de compression, la matière est comme refoulée alors qu'au contraire elle est comme attirée dans la zone de traction.

- Après extraction du poinçon, les éprouvettes ne gardent pas leur forme initiale: c'est le phénomène de retour élastique. Ceci se manifeste par l'ouverture de l'angle de pliage après extraction du poinçon. Il est estimé à 2° pour les éprouvettes à 3mm d'épaisseur et il est de 4° pour les éprouvettes à 1.8mm d'épaisseur.

- L'observation, à l'aide d'une loupe binoculaire, des éprouvettes après pliage n'a révélé l'existence d'aucune fissure dans la zone pliée. Ce résultat est le même pour tout les rayons de pliage utilisés.

[Tapez un texte]



Figure III.2. Les échantillons après pliage pour la micrographie

[Tapez un texte]

III.3.1. Résultats des d'observation microscope optique :

D'après toutes nos observations sur le microscope optique on a obtenu ces différentes microstructures des trois zones (zone comprimée, zone milieu, zone tendue) :

[Tapez un texte]

III.31.1.

Les différentes microstructures dans la zone comprimée

→ Grossissement 200

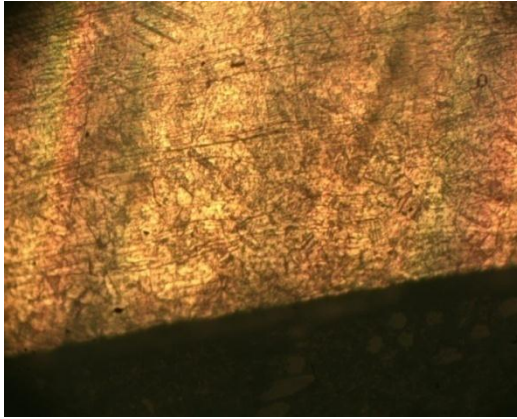


Image A



Image B

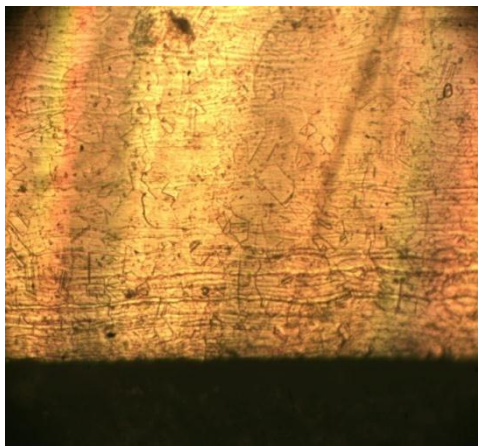


Image C

	Image A	Image B	Image C
Angle	90°	120°	150°
Epaisseur (mm)	1.8	1.8	1.8

[Tapez un texte]

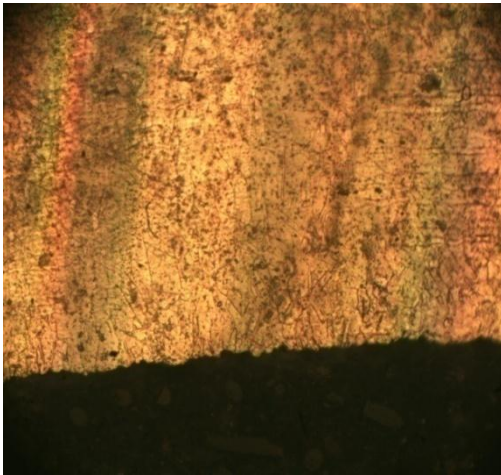


Image D

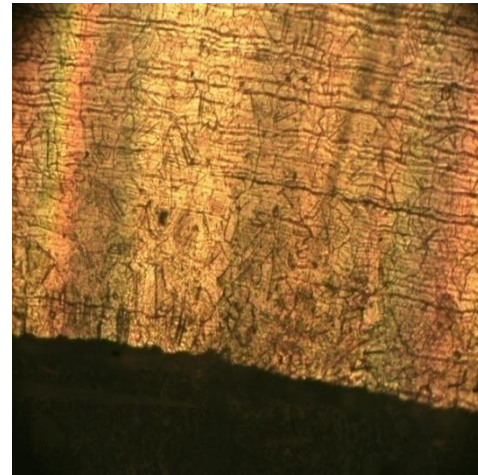


Image E

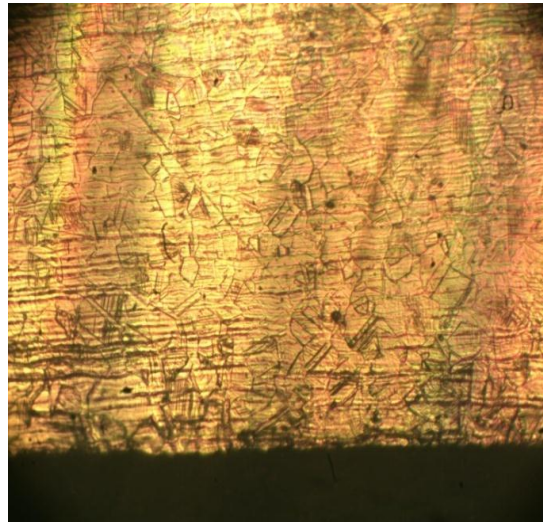


Image F

	Image D	Image E	Image D
Angle(°)	90°	120°	150°
Epaisseur (mm)	3mm	3mm	3mm

[Tapez un texte]

Grossissement 400 :

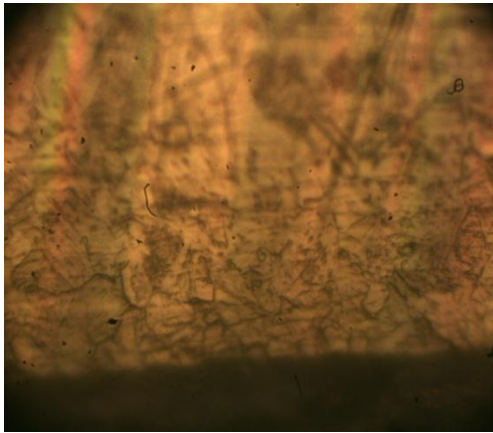


Image G

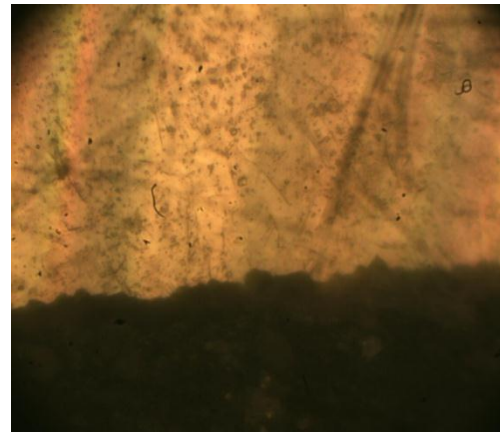


Image H

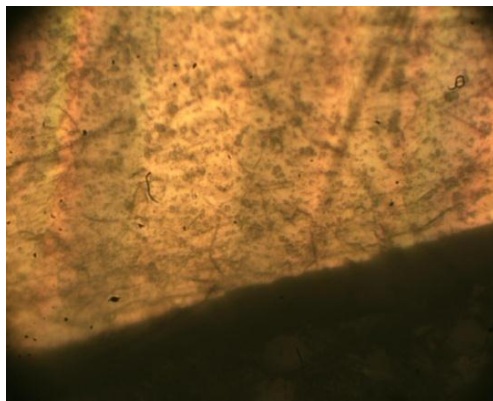


Image I

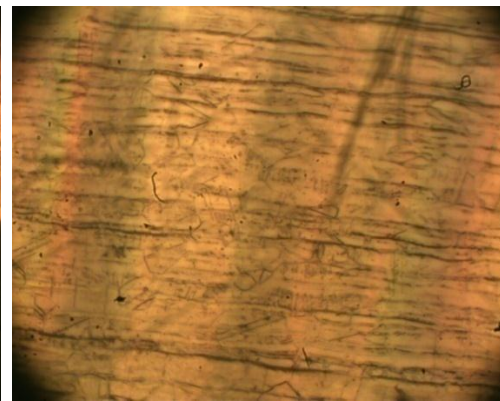


Image J

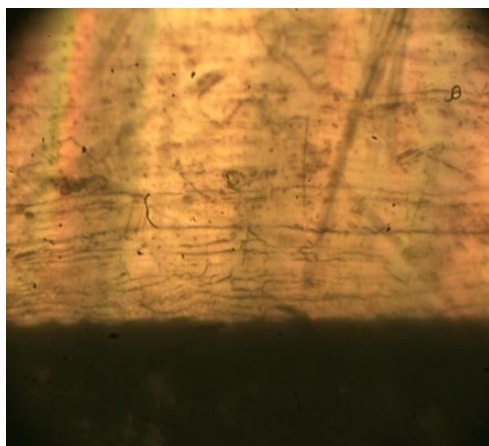


Image K

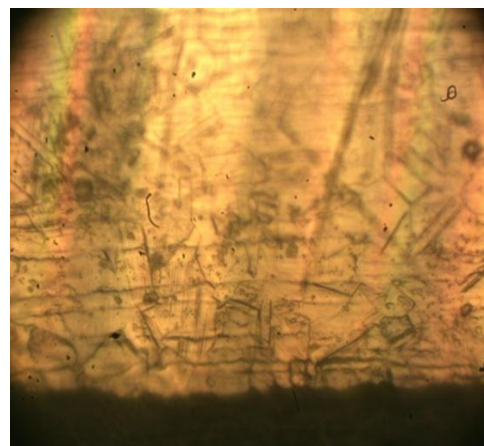


Image L

Image	G	H	I	J	K	L
Angle(°)	90	90	120	120	150	150
Epaisseur (mm)	1.8	3	1.8	3	1.8	3

[Tapez un texte]

III.3.1.2. : *Les différentes microstructures dans la zone milieu*

Grossissement-200



Image M

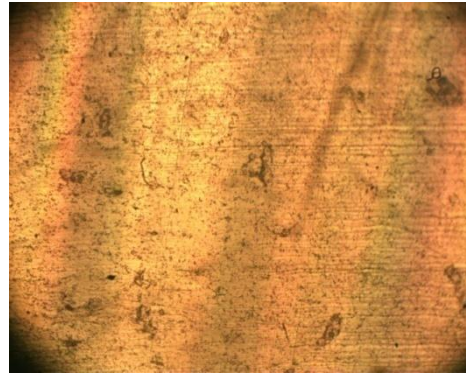


Image N

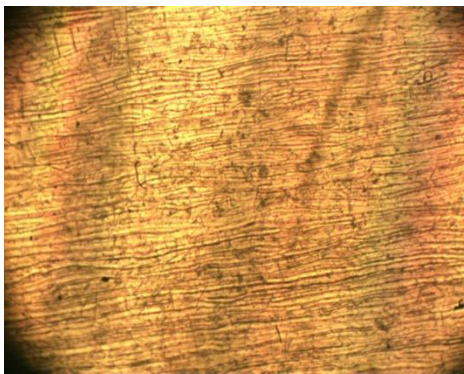


Image O

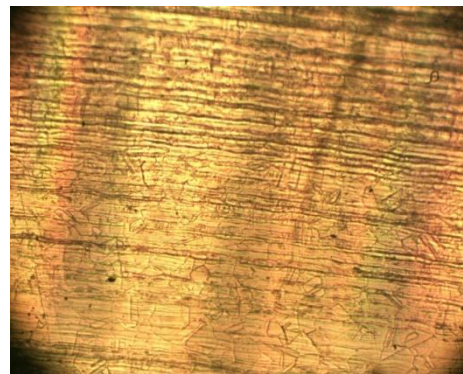


Image P

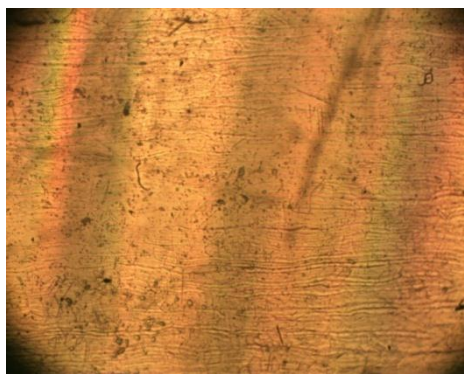


Image Q

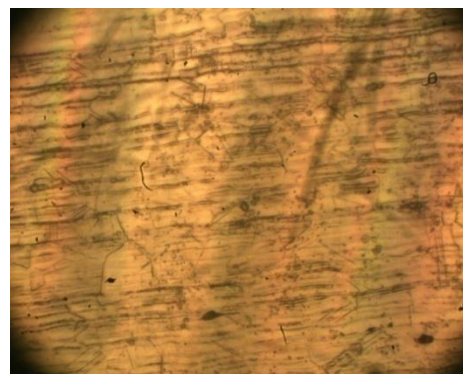


Image R

Image	M	N	O	P	Q	R
Angle(°)	90	90	120	120	150	150

[Tapez un texte]

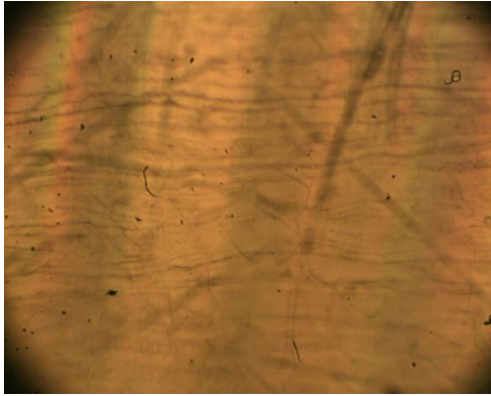


Image S

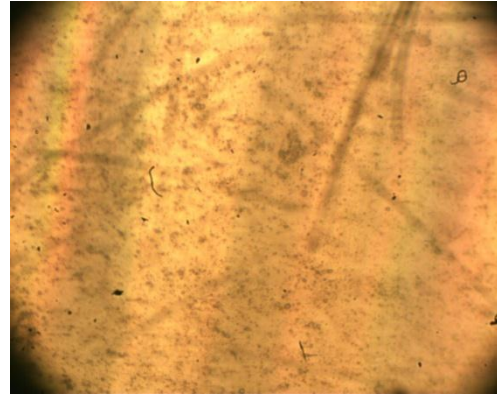


Image T

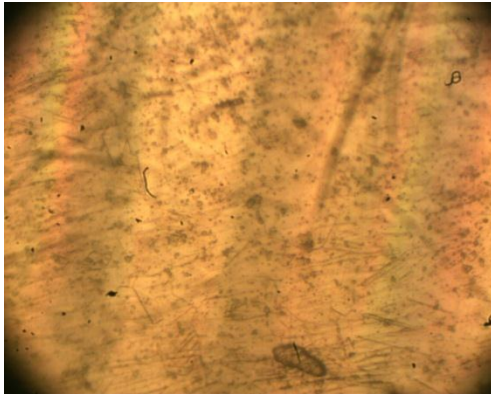


Image U

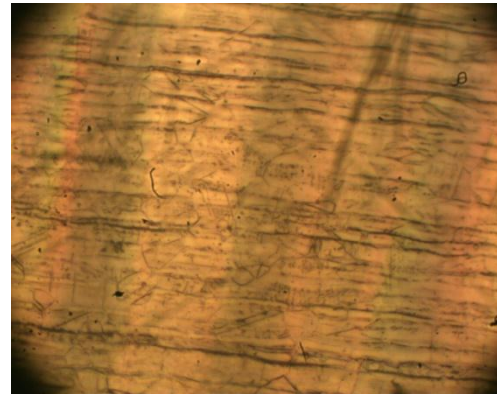


Image V

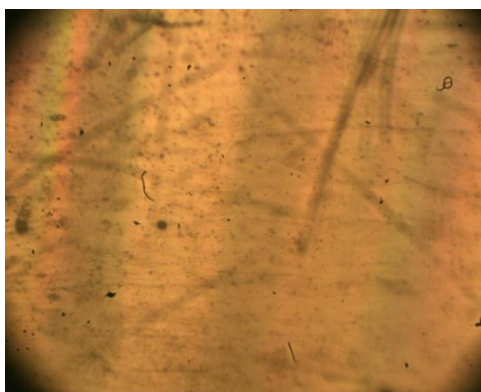


Image W

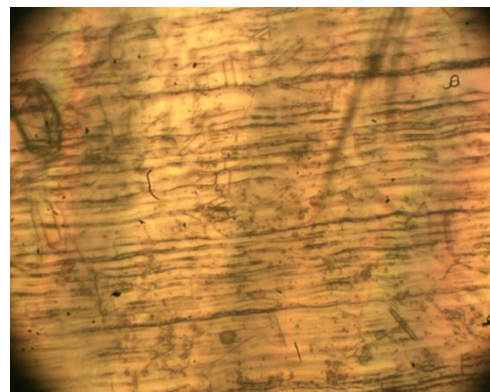


Image X

Image	S	T	U	V	W	X
Angle(°)	90	90	120	120	150	150
Epaisseur (mm)	1.8	3	1.8	3	1.8	3

[Tapez un texte]

Les Différentes microstructures dans la zone tendue

Grossissement 200

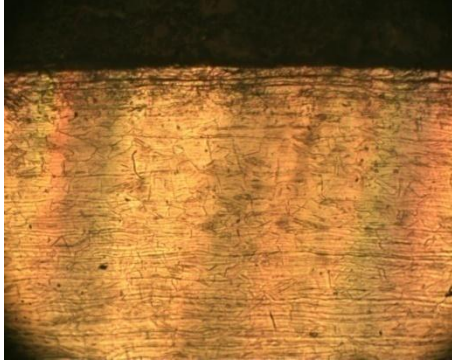


Image A1

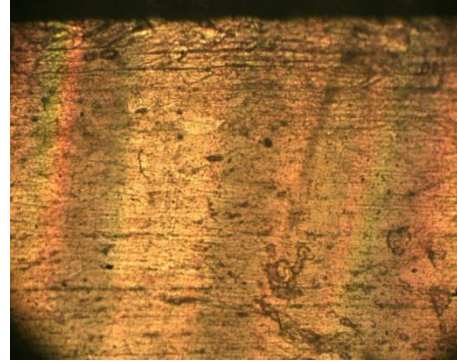


Image A2

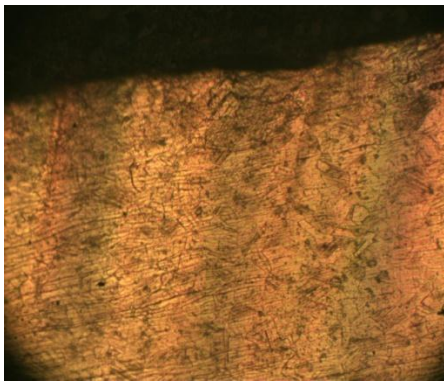


Image A3

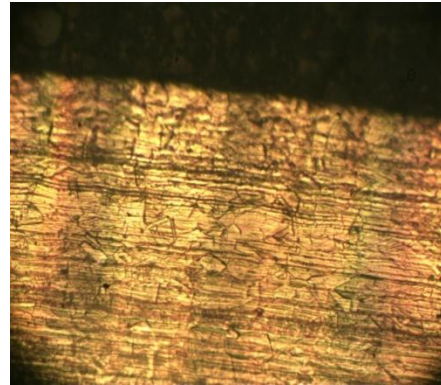


Image A 4

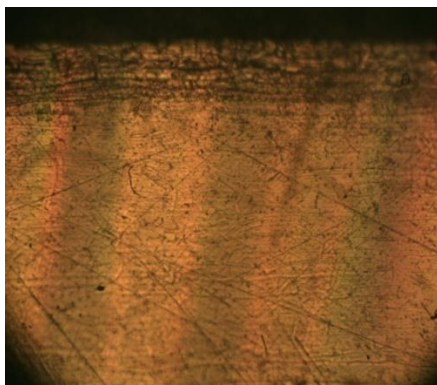


Image A5

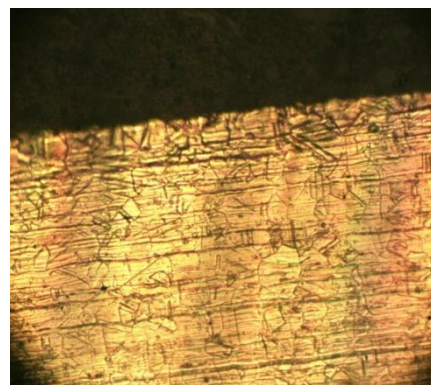


Image A6

Grossissement-

	1	2	3	4	5	6
Angle (°)	90	90	120	120	150	150
Epaisseur (mm)	1.8	3	1.8	3	1.8	3

[Tapez un texte]

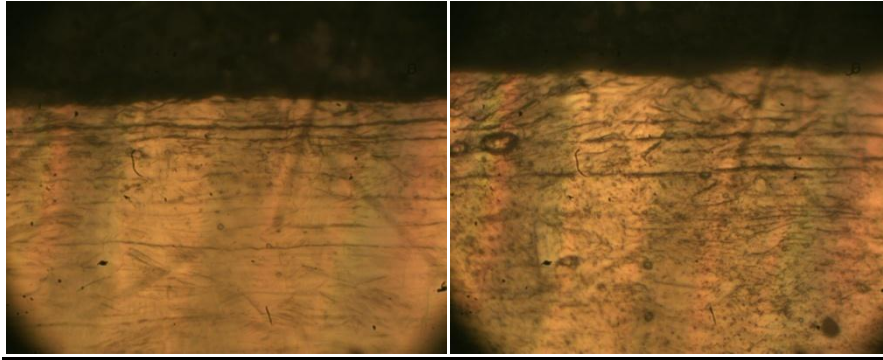


Image A7

Image A8

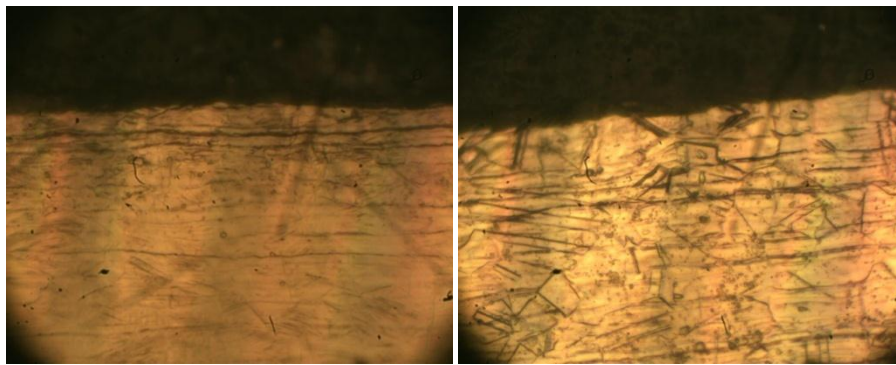


Image A 9

Image A10

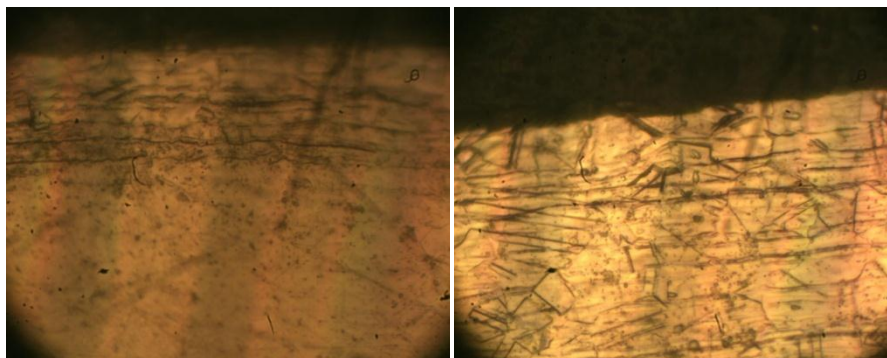


Image A 11

Image A12

III.3.2. Résultats obtenue sur le MEB :

Image	7	8	9	10	11	12
Angle(°)	90	90	120	120	150	150
Epaisseur (mm)	1.8	3	1.8	3	1.8	3

[Tapez un texte]

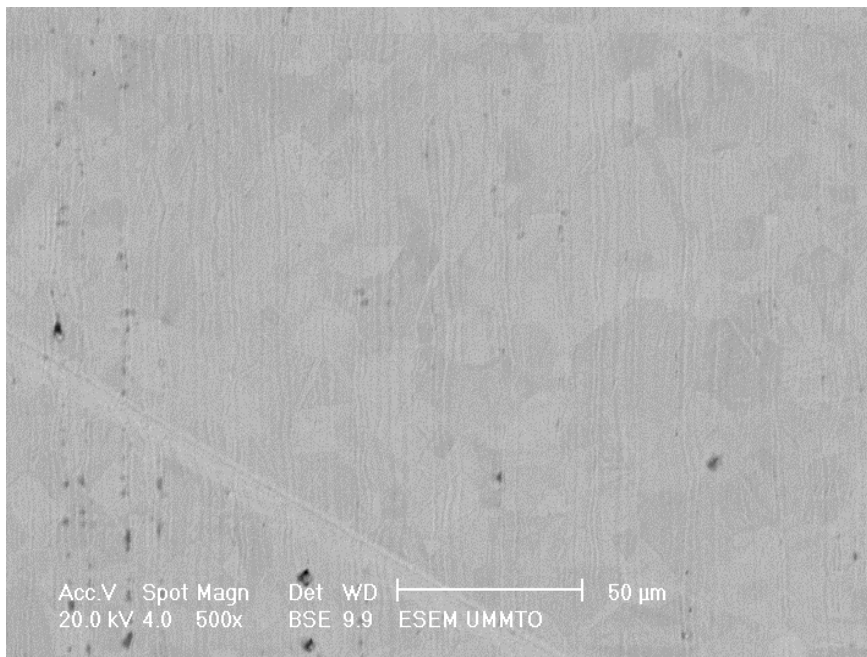
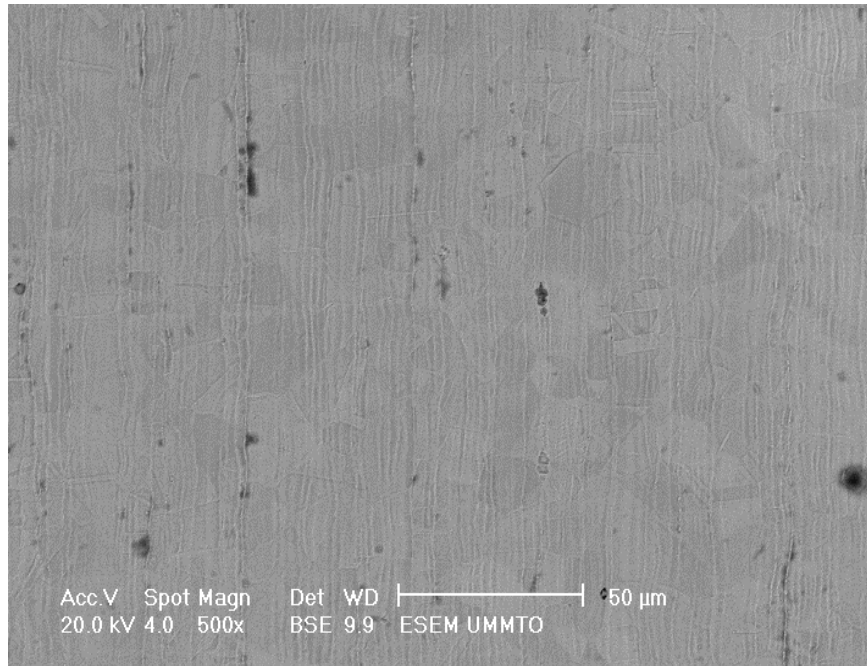


Figure III .3 microstructures de MEB

[Tapez un texte]

III.3.3. Interprétation des résultats :

Après l'observation microscopique on constate qu'à l'étape de pliage ; les éprouvettes qui sont soumises à une force qui provoque le changement de phase, la martensite est hétérogène et s'apparaît sur les trois zones.

Le taux de martensite augmente dans la zone tendue qui est libérée par rapport à la zone comprimée.

Nous pouvons conclure que le taux de martensite est plus important à la zone tendue que la zone comprimée de l'échantillon et il diminue au centre.

III.3.4. résultats de l'essai de dureté :

- Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus pendant les essais de dureté pour les éprouvettes d'épaisseur 1.8mm et 3mm.

Epaisseur (mm)	Angle(°)	Zone comprimée	Zone milieu	Zone tendu
1.8	90	181.23	163.69	208.78
1.8	120	157.68	125.92	203.18
1.8	150	137.36	131.45	197.38

Epaisseur (mm)	Angle(°)	Zone comprimée	Zone milieu	Zone tendu
3	90	192.63	157.68	197.80
3	120	200.78	150.43	203.18
3	150	192.63	153.99	197.15

Tableau III.4. Résultats des essais de dureté Vickers au pliage

[Tapez un texte]

III.3.4.1. -Interprétation des résultats :

La répartition de la dureté HV suivant la position des points relevés sur l'éprouvette.

D'après les trois zones, la dureté est inférieure au milieu des éprouvettes.

On remarque aussi sur les deux tableaux que la dureté aux zones comprimées inférieures à celles tendues.

III.4. Résultats de dépliage : après l'opération de pliage on passe à la discussion de résultats obtenue après dépliage.

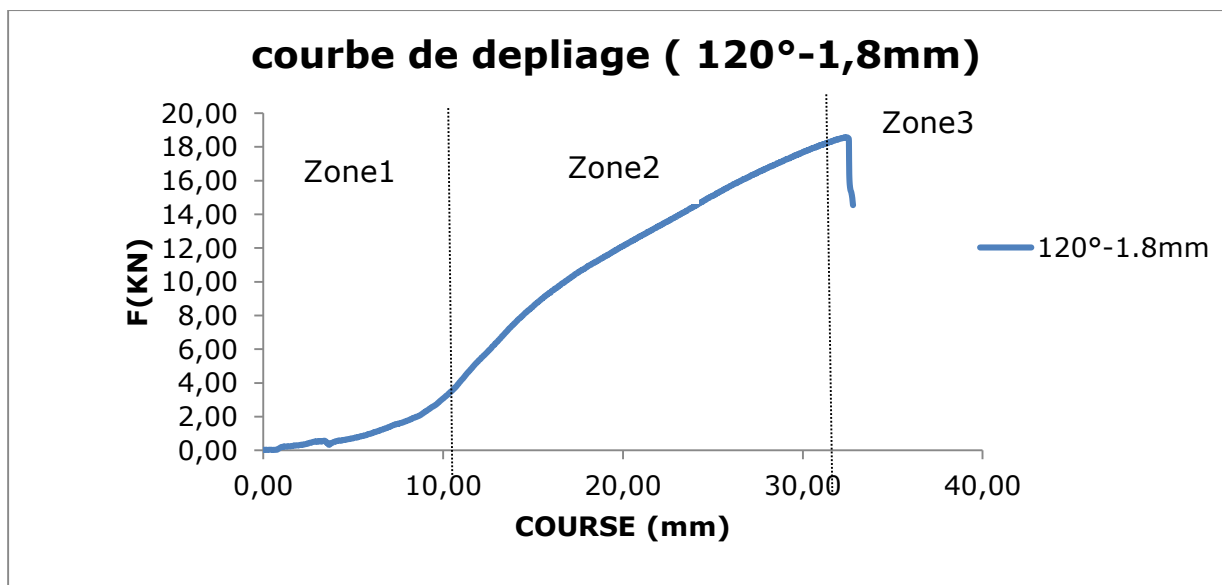
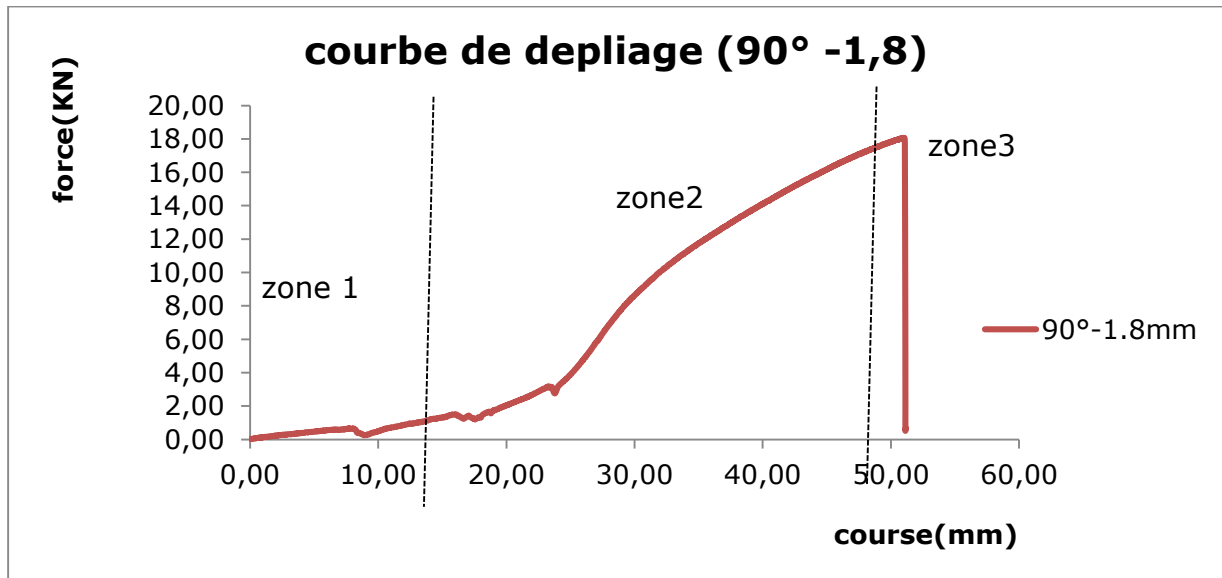
III.4.1. Les résultats de l'essai de dépliage :



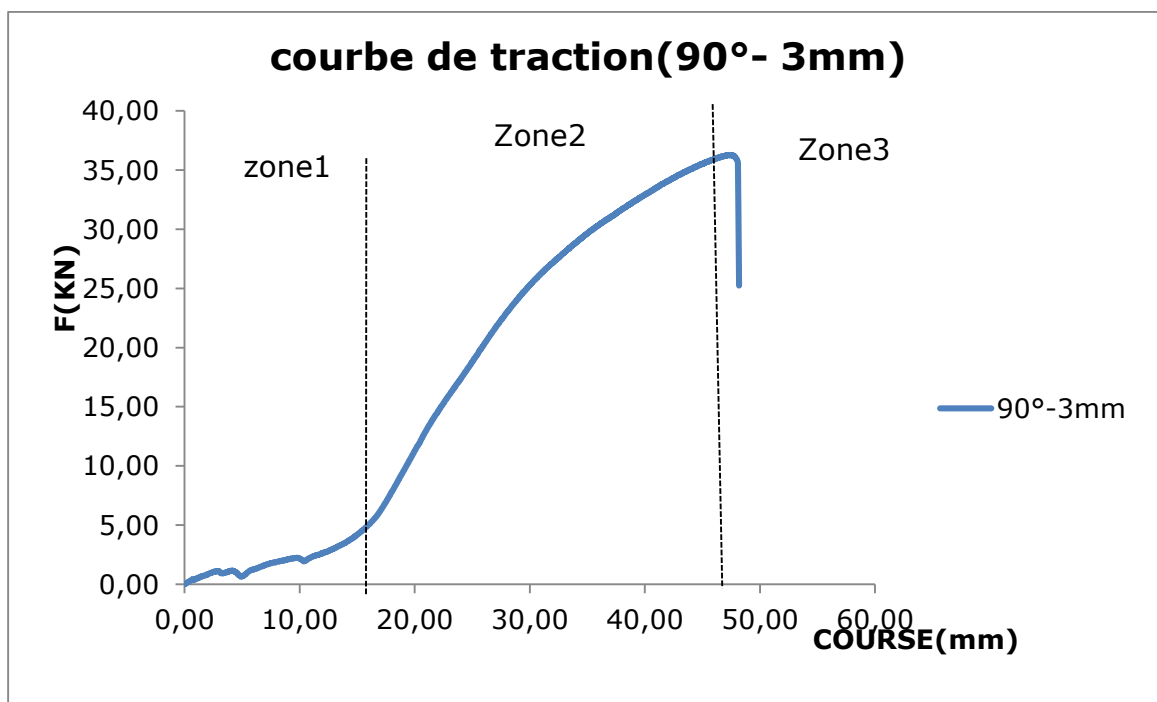
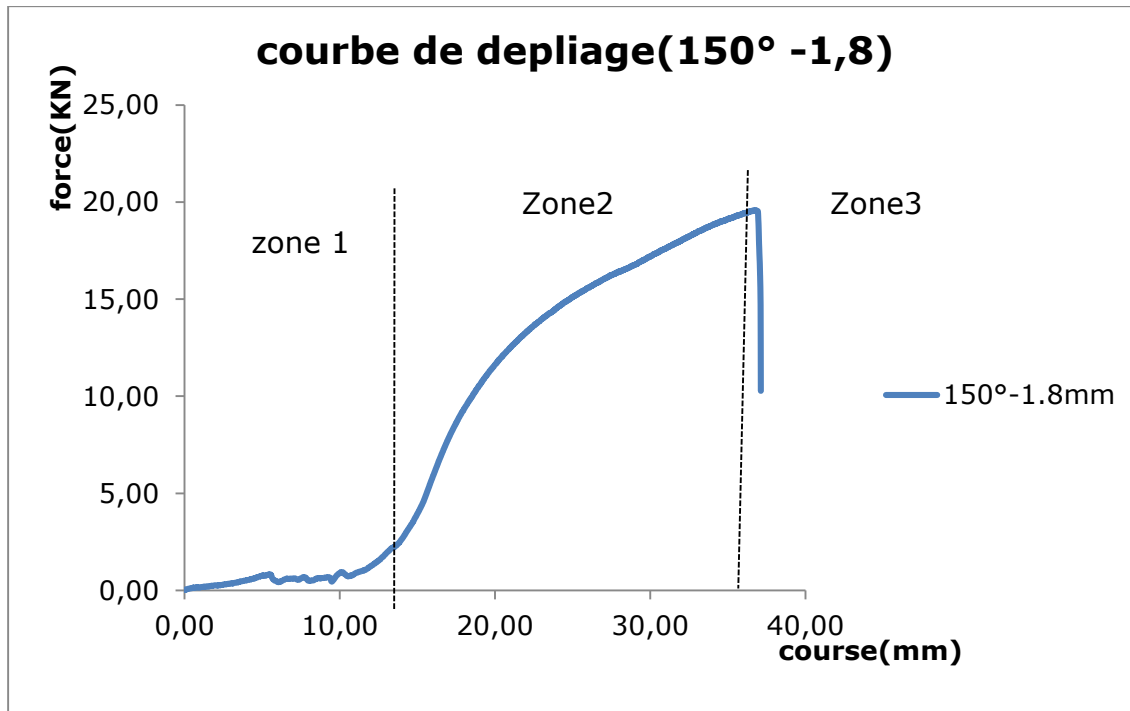
Figure III.4. : Les éprouvettes après dépliages.

[Tapez un texte]

III.4.1.1. Les résultats des courbes après dépliage :



[Tapez un texte]



[Tapez un texte]

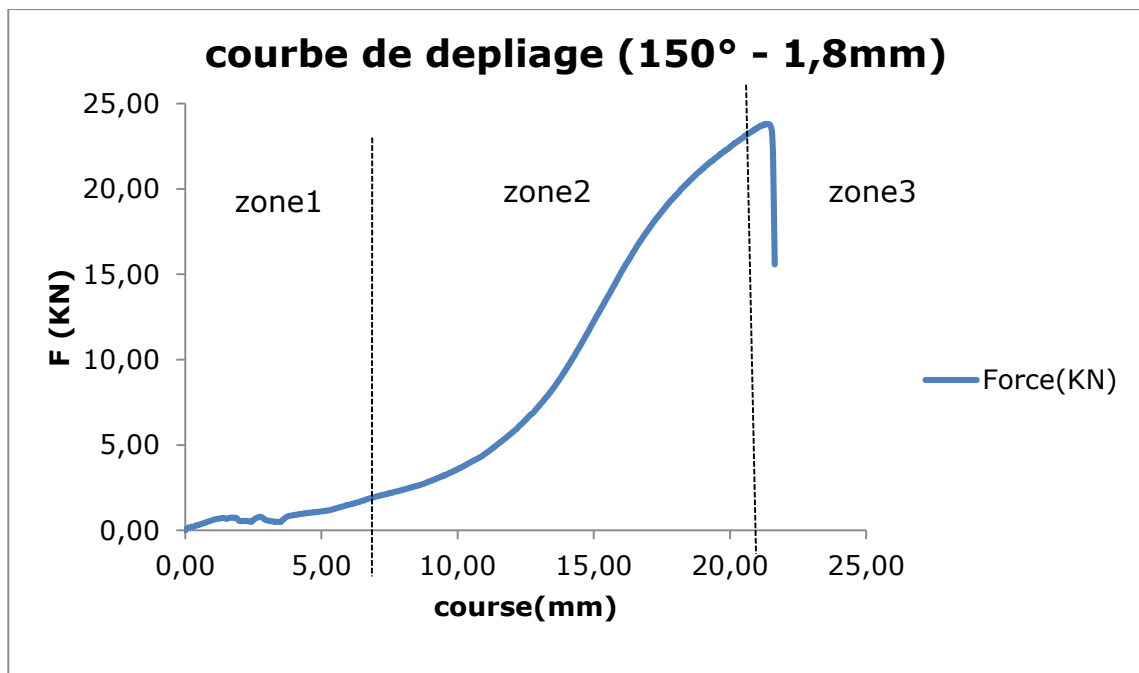
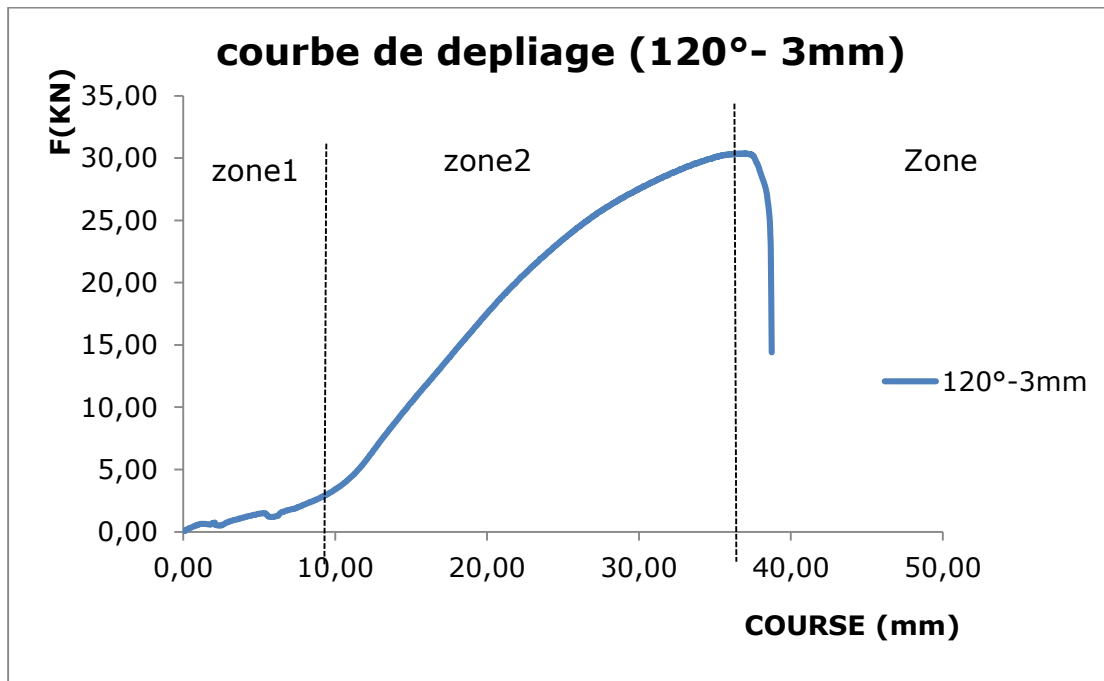
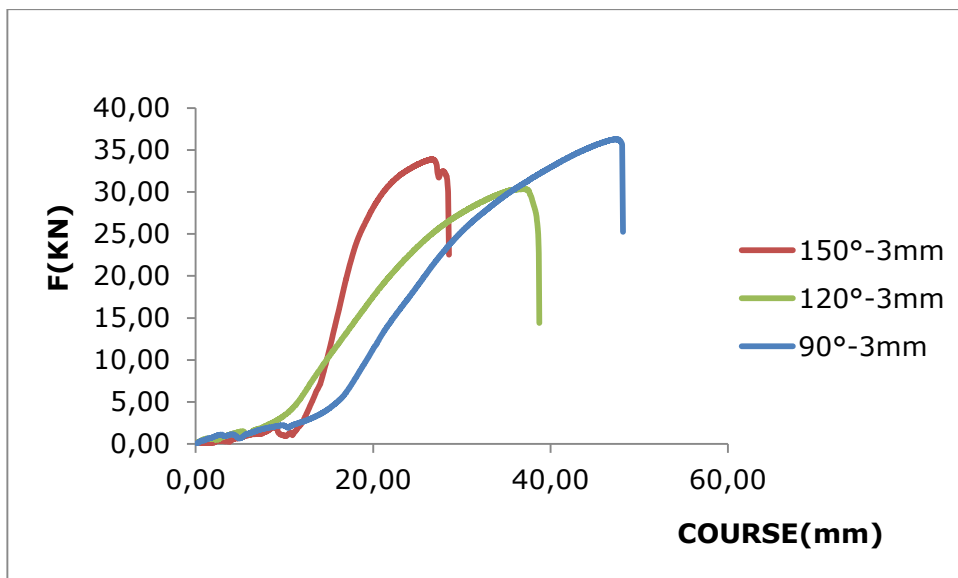
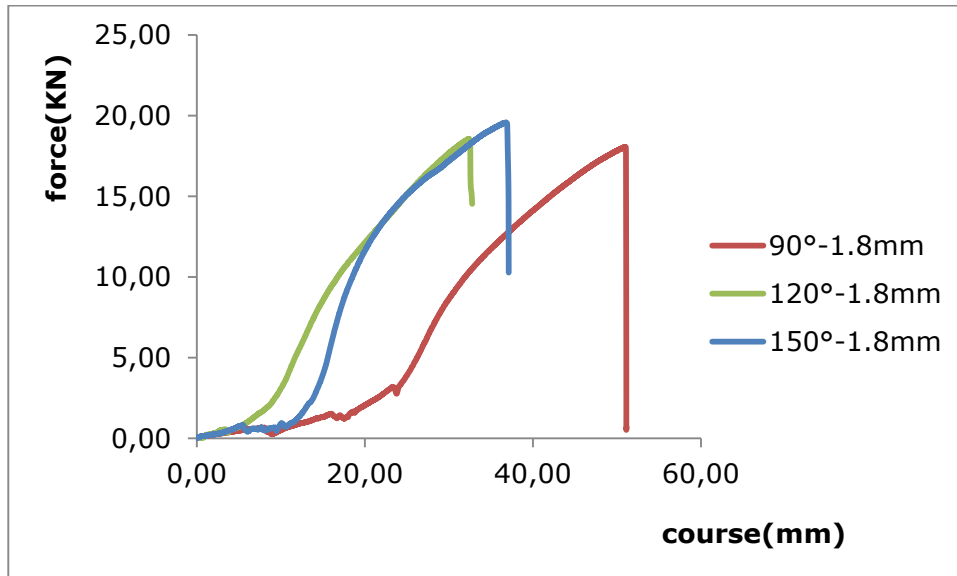


Figure : III.5. Courbes après dépliage

[Tapez un texte]

III.5. Superposition des courbes de dépliage :



[Tapez un texte]

III.4.1.3.-Interprétation des résultats :

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture. L'essai de traction consiste à appliquer sur une éprouvette normalisée du matériau d'étude un effort (F) et à mesurer l'allongement (ΔL) correspondant, ou inversement. F et ΔL sont des grandeurs physiques liées à la structure ici à l'éprouvette. Afin de les interpréter et ainsi de caractériser le matériau, on introduit des variables relatives au matériau : la contrainte et la déformation.

Les étapes successives qu'on observe sur les courbes (course, force) lors d'un essai de dépliage sont :

Zone 1 : elle représente le domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales

Zone 2 : dans cette zone la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements augmentent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

Zone 3 : la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction on aboutit à la rupture.

[Tapez un texte]

III.4.3.Essai de dureté :

Cet essai est destiné à vérifier la dureté superficielle d'une pièce. Il consiste à indenter la surface de la pièce tester à l'aide d'un pénétrateur pyramidale a base carrée (dureté Vickers) sur lequel on a appliqué une charge connue, la mesure de l'aire de l'empreinte rapportée à la charge appliquée permet de déduire la dureté .

➤ **Tableau III .Les tableaux qui présent la dureté des éprouvettes après dépliages :**

Angles(°)	90	120	150
Epaisseur (mm)	1.8	1.8	1.8
Dureté HV	396.09	240.62	227.06

Angles(°)	90	120	150
Epaisseur (mm)	3	3	3
Dureté HV	398.09	367.81	289.44

Tableau III

➤ **-Interprétation des résultats :**

La répartition de la dureté HV suivant la position des points relevés sur les éprouvettes.

D après les tableaux en conclu que la dureté après dépliage, est supérieur a les éprouvettes de l'angle 90°puis il diminuiez par apport a l' augmentation d'angle .

On conclu que la dureté des éprouvettes dépliées supérieure a celle pliée.

[Tapez un texte]

III.5. Résumé du chapitre

Les modes de déformation plastique hétérogène des métaux et alliages sont multiples et différents autant par leurs causes que par leurs effets.

On distingue les hétérogénéités stationnaires qui se développent localement et peuvent mener jusqu'à la rupture, telle que la striction et les hétérogénéités propagatrices qui, sans être aussi dommageables que la striction, restent redoutées pour leurs effets néfastes sur le matériau. Parmi ces hétérogénéités, l'écoulement plastique saccadé associé au phénomène de Portevin- Le Chatelier se distingue par son caractère permanent durant la déformation.

Conclusion générale



L'acier TRIP est un monophasé constitué de grains entièrement austénitiques ; avec l'influence de température et la déformation plastique, on obtient une nouvelle structure à deux phases, l'austénite et la martensite qui lui confère des caractéristiques mécaniques très élevées. Dans le premier chapitre a permis de présenter les travaux portant sur la phénoménologie de l'effet TRIP dans les aciers à structure entièrement ou partiellement austénitique, instable lors d'un chargement thermomécanique conditionnement l'apparition des plaquettes de martensite. Les conséquences de la transformation martensitique et de sa cinétique des aciers à effet TRIP et plus localement la transformation dépend de la densité de dislocation et d'autres défauts dans le matériau. La transformation martensitique est un facteur très important pour expliquer le comportement thermomécanique des aciers inoxydables.

Une transformation martensitique sous déformation plastique est mise en évidence, elle a été vérifiée à la fois par l'essai de dureté VIKERS ainsi que par le microscope optique et le MEB.

On conclut qu'au pliage, l'apparition de la martensite est plus importante à la zone tendue que la zone comprimée.

En effet la dureté en zone tendue et comprimée est plus élevée par rapport à celle de milieu (écrouissage sur les deux zones).

A l'étape de pliage le matériau est instable lors de la déformation plastique.

[Tapez un texte]

Dans le but d'étudier l'étape de dépliage différentes techniques ont été réalisées dans ce travail, tel que l'essai de traction uni axiale à fin de caractériser le comportement thermomécanique et l'essai de dureté pour caractériser les cinétiques de durcissement.

On constate que la dureté augmente plus au dépliage qu'au pliage, est l'acier trip il à une bonne résistance à la déformation.

[Tapez un texte]

Référence bibliographiques

[1] : G.Beranger, G.Henry, G.Sanz. < Livre de l'acier>,Ed ,SOLLAC ,1996.

[2] :C.CHAUSSIN et G.Hilly <Métallurgie, alliages métalliques >Tome1, édition DUNOD, Montréal, 1972

[3] : a et b Pierre-Jean Cunat, « Aciers inoxydables, critères de choix et structures », traité « Matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur, mars 2000, M4540.

[4] : Cunat Pierre-Jean, «Aciers inoxydables, Critères de choix et structure», In : Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, 2000, vol. MB4, dossier M4540, Paris.

[5]: Ochen Mohamed 2013 Universite hadj lakhdar

[6]: Desestret 1990

[7] : Sassoulas Hervé, «Traitements thermiques des aciers inoxydables», In : Techniques De l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, 1997, vol.MD1, dossier M115

[8] : Mohamad Réda berrahomoun,transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austénitique instable 301In2006

[9] :M.MARYA ,X,Q.GAYDEN.Development of requirement for resistance spot welding Dual-phase (DP600) steels part 2-Statiscal analyses and process maps. Welding journal ,Vol.84-S,N°12pp.197-204,2005

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

[11]: ANGEL, T., Formation of martensite in austenitic stainless steels. J. of the Iron and Steel Inst. (1954), **177**, pp154-174.

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

[13]: 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

[Tapez un texte]

et Part II. Met. Trans. A (1982), **13A**, pp619-635.

[14]: 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).

[15] : Kubler R(2004). Comportement Thermomécanique à effectue des aciers à effet TRIP : approche micromécanique et phénoménologique .Application à la mise en forme .thèse de doctorat .ARIS et METIERS PARIS TECH ; centre de Metz

[16] : These LABAUSSIAS THOMAS

[17]: Patel J.R et Cohen M. (1953) .contenion for the action of applied; stress in the martensite transformation .Acta Metall.1.p531-538

[18] : Soulim A.(2007).Modélisation du comportement des aciers à100%austénitique à transformation de phase .Application aux calculs des Vitesses de propagation en fatigue .thèse de doctorat l'université poul verline de Metz

[19] : Série J. (2006).caractérisation expérimentale et modélisation du comportement plastique d'acier à transformation martensitique .Application à la mise en forme, thèse de doctorat l'université poul verline de Metz.

[20]: C. L. Magee, "Phase transformations," ASM, Met. Park. *OH*, vol. 115, 1970.194

[21]: G. W. Greenwood and R. H. Johnson, "The deformation of metals under small stresses during phase transformations," Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. *Phys. Sci.*, vol. 283, no. 1394, pp. 403–422, 1965.

[22]: István Mészáros and János Prohászka, «Magnetic investigation of the effect of α' -martensite on the properties of austenitic stainless steel», Journal of Materials Processing Technology, 2005, vol. 161, issues 1-2, pp 162-168.

[23]: Pat L Mangonon. Jr. and Gareth Thomas, «The Martensite Phases in 304 Stainless Steel», Metallurgical Transactions *A*, 1970, vol. 1, pp. 1577-1586.

[24]: Mohsen Botshekan, Suzanne Degallaix and Yannick Desplanques, «Influence of Martensitic transformation on the low-cycle fatigue behaviour of 316LN stainless steel at 77 K», Materials Science and Engineering *A*, 1997, vol. 234-236, pp 463-466

[Tapez un texte]

[25] : These bonnet-Lebouvier 2001 Universite de Metz