

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÈRI DE TIZI-OUZOU
Faculté Génie De La CONSTRUCTION
Département De Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
Master Académique en Génie Mécanique**

**Option : Fabrication Mécanique
Et Productive/Génie des matériaux**

Thème

*Étude de l'influence des traitements thermiques
Sur le retour élastique de la tôle Inox 304 l*

Présenté par : AZIZ NAROUN

AIT SAI AZEDINE

Proposé et dirigé par : Mr KEHAL ABDELKRIM

Co-encadreur : Mr BOUDDJA AMAR

Année universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout Allah qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir ce travail.

*Nous remercions sincèrement Monsieur **Kehal Abdelkarim** pour son encouragement, et ces conseils précieux, sa patience et sa disponibilité qui nous a permis de mener à bien ce travail, ainsi que de nous avoir fait partager leur vaste expérience.*

A monsieur le président de jury, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

A monsieur l'examineur membre de jury soit vivement remercié pour avoir accepté d'examiner le présent travail.

Dédicace

Je dédie cet ouvrage

A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'étude.

Quelle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

*A mes frères, mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les
Moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail, ils m'ont chaleureusement
Supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, à mes frères et sœurs qui m'ont soutenu et encouragé pour aller au bout de ce travail.

Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant mes études, mes amis et mes collègues, qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

azedine

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I. 1 Schéma représentatif d'un acier inoxydable.....	2
Figure I. 2 Microstructures des aciers inoxydables ferritiques.	4
Figure I. 3 Microstructure des aciers inoxydables martensitiques.	5
Figure I. 4 Microstructures des aciers inoxydables austénitiques.	6
Figure I. 5 Microstructure des aciers inoxydables Austen ferritiques. (Ferrite en sombre, austénite en clair).	7
Figure I. 6 Diagramme de phase fer-chrome.....	8
Figure I. 7 Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel.....	9
Figure I. 8 Optimisation de la microstructure de la nuance ferritique a. fraction massique des phases en fonction de la température de recuit, calculs d'équilibre exécuté avec Thermo-Calc® b. taille de grains en fonction de la durée du traitement thermique c. micrographie optique suivant la direction normale de la nuance ferritique à l'issue du traitement de recristallisation	11
Figure I. 9 Optimisation de la microstructure de la nuance austénitique a. fraction massique des phases en fonction de la température de recuit, calcul d'équilibre effectués avec Thermo-Calc b. pourcentage de phase ferrite résiduelle et taille de grains en fonction de la durée du traitement thermique c. micrographie optique suivant la direction DL de la nuance austénitique à l'issue du traitement de régression. d. cartographie EBSD des phases suivant le sens normal pour la nuance duplex	12
Figure I 10 Diagramme Temps – Température – Transformation (TTT) 304L.....	14
Figure I. 11 Diagramme de refroidissement d'un acier 30CrNi11 (TRC).	15
Figure I.12 exemples des pièces	18

LISTE DES FIGURES

Chapitre II

Figure II.1 Eprouvette en Acier Inox 304L et d'épaisseur 1.5 mm, découpé avec une guillotine, 150x30 x 1.5mm	19
Figure II.2 Représente une micrographie type à l'état de livraison d'un acier inoxydable AISI 304 L entièrement austénitique	20
Figure II. 3 Four à trempe	22
Figure II.4 Four électrique, modèle « NABERTHERM »	22
Figure II.5 Exemple d'une pièce qui subit un grand retour élastique après une opération de mise en forme de type pliage.	23
Figure II.6 Matrice 450 x 310mm	24
Figure II.7 Les dimensions de serre flan, 68 x55mm.....	25
Figure II.8 Dimension du poinçon 40 x 27mm	26
Figure II. 9 Dispositif utilisé pour l'essai de pliage avec une matrice et un poinçon.	27
Figure II.10 Principe de l'essai de pliage d'une tôle métallique	27
Figure II.11 Modes de déformation en pliage	28
Figure II.12 Clé dynamométrique	29
Figure II.13 Schéma montre le couple de serrage et direction de la force	29
Figure II.14 Relation entre le couple de serrage et l'effort de tension.....	30
Figure II.15 Représentation d'une déformation élasto-plastique et retour élastique dans le réseau cristallin [9]	31
Figure II.16 Mise en évidence du retour élastique en fonction de la profondeur finale après enlèvement de l'outillage et libération de la pièce ($\Delta h_2 = h - h_2$),.....	32
Figure II 17 Les deux formes possibles de la pièce obtenue par pliage après retrait des outils.	33
Figure II.18 Montage de l'outil de pliage sur la machine	34
Figure II.19 Composante de la machine de pliage	35

LISTE DES FIGURES

Figure II.20 Machines de dureté.	36
Figure II.21 Machine d'enrobage type STRUE	37
Figure II.22 Polisseuse mono disque de finition.	38
Figure II.23 Acide oxalique C ₂ H ₄ O ₄	38
Figure II. 24 Batterie 10V associé à l'acide oxalique C ₂ H ₄ O ₄	38
Figure II.25 La microstructure de l'acier après le pliage avec agrandissement de GX 400	39
Figure 26 La barre de logiciel image j	40
Figure II.27 Réglage sur les paramètres de l'image.....	40
Figure II.28 Logiciel Origin Pro8	41

Chapitre III

Figure III .1 Montre l'évolution du retour élastique (RE) en fonction de la profondeur	44
Figure III .2 Essai de pliage sans traitement thermique à des profondeurs de 15, 25, 30 et 40 mm	45
Figure III .3 Essai de pliage après traitement à 950°C et refroidissement dans le four	46
Figure III .4 Microstructure et histogramme de la répartition de la taille du grain de l'acier 304L traité à 950°C et refroidis dans le four et à l'air libre	47
Figure III .5 Effet de la température du traitement thermique sur le retour élastique de l'acier 304 L	49
Figure III 6 Dureté en fonction de la température des traitement thermique	50

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I 1 Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles d'aciers.....	3
Tableau I 2 Caractéristiques des traitements thermiques des aciers inoxydables	10
Tableau I 3 Normes des aciers inox	13

Chapitre II

Tableau II 1 Composition chimique de l'acier inox 304L	20
Tableau II. 2 Propriétés mécaniques de l'acier Inox 304L.....	21
Tableau II 3 vitesses de pliage pour différent matériaux	26
Tableau II 4 Paramètres de l'essai pliage.	28
Tableau II 5 Caractéristiques géométriques des boulons à serrage contrôlé.....	30

Chapitre III

Tableau III. 1 Résultats de test de pliage sans traitements thermiques	43
Tableau III. 2 Présentes les résultats de test de pliage après traitement thermique à différentes températures	48
Tableau III. 3 Dureté en fonction de la température de traitement thermique	50

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

1. Introduction générale..... 01

Chapitre I :

Étude bibliographique de l'acier inox 304L

I 2 Aciers inoxydables..... 02

I 2.1 Composition chimique des aciers inoxydables 03

I 3 Différentes structures micrographiques de l'acier inoxydable 04

I 3.1 Aciers inoxydables ferritiques 04

I 3.2 Aciers inoxydables martensitiques 04

I 3.3 Aciers inoxydables austénitiques 05

I 4 Aciers inoxydables austéno-ferritiques..... 06

I 5 Diagramme d'équilibre 07

I 5.1 Système fer-chrome-nickel 08

I 6 Traitement thermique des aciers inox 304L 09

I 6.1 Traitement thermomécanique 10

I 6.2 Nuance ferritique 10

I 6.3 Nuance austénitique 11

I 6.4 Diagramme de refroidissement continu (TRC)..... 14

I 7 Traitement de mise en forme des aciers inoxydables 15

I 7.1 Usinage 15

Sommaire

I.7.2 Formage à froid.....	15
I.8 Assemblage des aciers inoxydables	16
I.8.1 Soudage et brasage.....	16
I.8.2 Rivetage et boulonnage	17
I.8.3 Découpage.....	17
I.8.4 Décapage et passivation.....	17
I.8.5 Meulage et polissage.....	17
I.9 Domaine d'application.....	18
I.9.1 Exemple de pièces fabriquées en acier inox	18

Chapitre II :

Méthode Expérimentale

II.1 Introduction	19
II 2 Matériau l'acier inox 304 l étudié	19
II 2.1 Composition chimique	20
II 2.2 Propriétés mécanique	21
II 3 Traitements thermiques des échantillons	21
II 4 Essais de pliage	22
II 5 Mise en œuvre	23
II 5.1 La Matrice.....	23
II 5.2 Le serre flanc	24
II 5.3 La pression appliquée sur le serre flanc.....	25
II 5.4 Le poinçon	26
II 5.5 La vitesse de poinçon	26
II 6 Principe de l'Essai de pliage	27
II 6.1 Serrage par la clé dynamométrique	28
II 6 1.1. Le couple de serrage	29
II 7 Le retour élastique	30
II 8 Détermination du retour élastique	32

Sommaire

II 9 La machine de traction /compression	33
II 9.1 Composantes de la machine	35
II 10 Essai de la dureté	35
II 11 Préparation pour le contrôle métallographique.....	36
II 11.1 Enrobage	36
II 11.2 Essai de polissage	37
II 11.3 Attaque Chimique.....	38
II 11.4 Avantages du polissage électrolytique.....	39
II 12 Logiciel de traitement des résultats	39
II 13 Logiciel de traitement des Analyses des données ORIGIN PRO	41
II 14 Conclusion	42

Chapitre III :

Résultats et discussions

III 1 Introduction	43
III 2 Étude du retour élastique de l'acier 304L à l'état de livraison en fonction de la profondeur de pliage.....	43
III 3 Étude de l'effet des traitements thermiques sur le retour élastique de l'acier 304L	45
III 3.1 Choix de la température de traitement thermique	46
III 4 Étude de l'effet de la température du traitement thermiques sur le retour élastique de l'acier 304L	48
Conclusion générale et perspectives	52

Bibliographie

Introduction générale

I.1 Introduction générale

Actuellement, dans la fabrication mécanique ou dans l'industrie en générale, la recherche d'aciers plus performants a conduit à produire des nouveaux aciers à forte valeur ajoutée destinés à des fonctions prédéfinies au service du client. Dans l'industrie automobile par exemple, l'un des soucis majeurs concernant les organes de structures est la réduction de leurs poids tout en maintenant de bonnes propriétés mécaniques. Ainsi, tout en garantissant une bonne rigidité, une bonne résistance aux chocs, à la fatigue, et la ductilité.

Les nouveaux aciers doivent répondre aux attentes du secteur automobile en donnant lieu à des voitures, Pour répondre à ces exigences, les constructeurs automobiles ont développé des nouveaux aciers, Parmi les nouvelles nuances d'acier développées, on trouve les acier inox 304L, sont les aciers inoxydables au chrome et chrome-nickel. Ceux-ci peuvent être alliés à d'autres éléments pour améliorer les propriétés sous conditions d'applications spécifiques. Un matériau exempt de rouille n'est pas nécessairement inoxydable, c.-à-d. résistant à la rouille ou à la corrosion. La pratique montre que ces aciers peuvent rouiller dans des conditions spécifiques. Une autre propriété de ces alliages est qu'ils sont résistants à l'oxydation jusqu'à une certaine température. Une couche d'oxydes est formée à la surface qui protège le métal contre l'oxydation et attaque chimique. Des additions d'autres éléments d'alliages peuvent augmenter la résistance à l'oxydation, Ces nouveaux matériaux se différencient par un compromis résistance /ductilité particulièrement élève, Au cours d'un chargement thermomécanique dans ces aciers.

Le but de notre travail étant l'étude du retour élastique au cours des opérations de pliage de l'acier inoxydable 304L. Notre travail est présenté en trois chapitres : et des perspectives

Chapitre 1 : Etudes bibliographiques sur les l'acier inoxydable.

Chapitre 2 : Présentation des méthodes expérimentales utilisées lors de la réalisation du Projet.

Chapitre 3 : Présentations des résultats et discussions

Une conclusion générale est dégagée en fin de ce travail résumant les principaux résultats obtenus

CHAPITRE II
Méthodes expérimentale

II.1 Introduction :

Ce chapitre sera consacré à la présentation des différentes méthodes et techniques expérimentales qu'on a utilisé au cours de cette étude.

Le matériel utilisé est celui existé au niveau du laboratoire de notre faculté. Les échantillons du matériau d'étude sont découpés à partir d'une tôle Inox 304L de démenions 150 x 30 x 1.5 mm et d'épaisseur de 1.5 mm à une direction par rapport à la direction du laminage.

Deux logiciels ont été utilisé, pour le traitement de nos résultats numériques : le logiciel ORIGIN V8 pour le tracé des courbes et le logiciel IMAGE J pour la détermination de la taille moyenne des grains.

Les principaux processus de mise en œuvre de nos essais sont les traitements thermiques, et le pliage en utilisant la machine d'essais de traction en mode compressive

II.2 L'acier à étudier :

L'acier inox est un acier inoxydable entièrement austénitique de type 304L, la lettre (L) signifie que l'acier à une faible teneur en carbone. Selon la norme AFNOR sa désignation est X2 Cr Ni 18-9. Le matériau a été découpé sous forme de pièces rectangulaires, avec une épaisseur de tôle de 1.5 millimètres.



Figure II.1 éprouvette en Acier Inox 304L et d'épaisseur 1.5mm, découpé avec une guillotine, 150x30 x 1.5mm

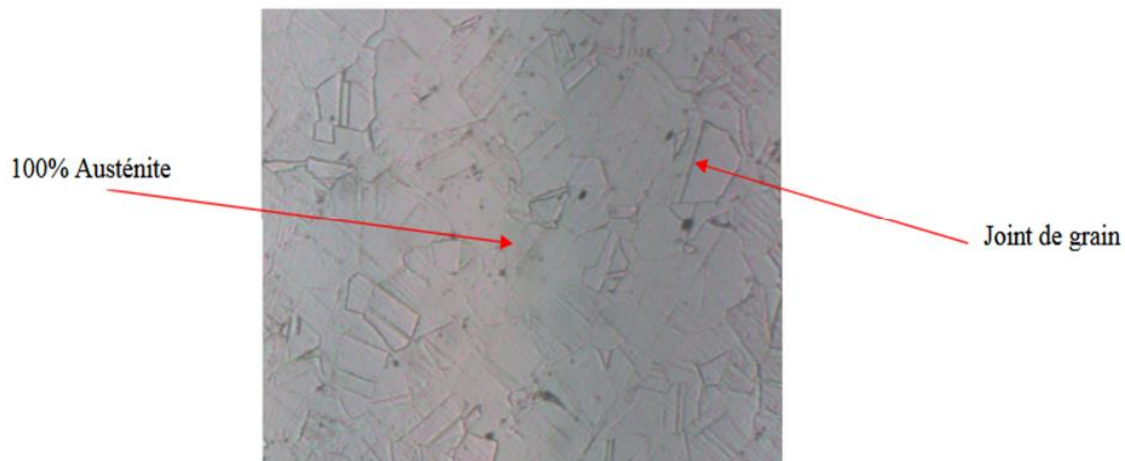


figure II.2 représente une micrographie type à l'état de livraison d'un acier inoxydable AISI 304 L entièrement austénitique.

II.2.1 Composition chimique :

La composition chimique du matériau d'étude est présentée dans le tableau II.1. Dans ce tableau la norme donne des valeurs max pour les éléments C, Mn, N, Si, P, S et une fourchette pour les éléments de base qui sont le chrome et le nickel. L'analyse chimique déterminée par la fiche technique de l'acier [**ACIER INOX EUROPA**] est dans les limites de cette fourchette. Comme tous les alliages métalliques la composition a un impact non négligeable sur l'élasticité du matériau. Un autre élément indésirable et inévitable lors de la production de l'acier inox est l'oxygène, Selon la littérature la présence de cet élément influe les propriétés mécaniques des alliages métalliques à base de fer, plus sa teneur est importante plus la limite élastique et la contrainte à la rupture seront élevées, et au contraire, l'allongement et donc la ductilité du matériau diminue avec la teneur en oxygène.

Tableau 1 Composition chimique de l'acier inox 304L

Composition chimique en %								
composant	C	Cr	Mn	N	Ni	P	S	Si
Min		17.500			8.000			
Max	0.030	19.500	2.000	0.100	10.50	0.045	0.0150	1.000
Proportion %	0.028	17.665	1.657	0.082	8.035	0.032	0.0046	0.0385

II.2.2 Propriétés mécanique :

Les propriétés mécaniques des aciers inoxydables 304L sont singulières. La combinaison des deux phases permet l'obtention d'une limite élastique élevée (caractéristique de la ferrite) et d'une bonne ductilité (caractéristique de l'austénite). Outre l'effet cumulé des deux phases, le comportement mécanique est fortement influencé par la composition chimique et les Traitements thermomécaniques Les détails des propriétés mécaniques sont donnés dans le tableau (II.2).

Tableau II. 2 Propriétés mécaniques de l'acier Inox 304L.

Propriétés Mécanique				
Dureté Vickers	Elongation à la rupture (%)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à	Résistance aux chocs IZOD (Jm-1)
150-180	60	190-210	460-1100	20-136
Propriétés physique				
Densité (g.cm-3)			Point de fusion	
7.93			1400-1455 (°C)	
Propriétés Thermiques				
Coefficient d'expansion thermique à 20- 100°C (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)			Conductivité thermique à 23 °C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	
18.0			16.3	

II.3 Traitements thermiques des échantillons :

Afin d'accélérer nos travaux expérimentaux nous avons utilisé deux fours de traitement thermique, un four sa température max est de 700 °C, Alimenté sous une tension de 380V, sa résistance électrique, a une puissance de 7 KW. Son isolation est assurée par la laine d'alumine. Il est utilisé dans le laboratoire de SDM de Département de Génie Mécanique. **Figure II.3**



Figure II. 2 four à trempe

Un autre four à résistance électrique, dont la puissance est de 11KW et peut aller jusqu'à 1200°C. il est équipé d'un thermocouple pour et un système de régulation pour le contrôle de la température. Son isolation est réalisée par la laine d'alumine ce four existe au niveau du laboratoire SDM de Génie Mécanique. **Figure II.4**



Figure II.3 Four électrique, modèle « NABERTHERM »

II.4 Essais de pliage :

L'essai de pliage appelé aussi "emboutissage en U" est l'essai de déformation plastique utilisé dans cette étude. C'est un essai qui combine deux sollicitations différentes traction et flexion. Un des intérêts de cet essais telles qu'il présente deux plis non similaires :

- Le premier pli ; du fait que la partie centrale de l'éprouvette est bloquée par raison de

symétrie de l'outillage, est du type pliage en V.

- Le second pli ; du fait du déplacement relatif de la tôle par rapport à (poinçon) est en fait un pliage. On peut alors dans certaines conditions observer un phénomène, qui est un phénomène opposé au retour élastique

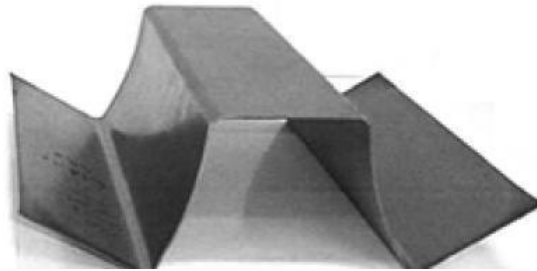


Figure II.4 Exemple d'une pièce qui subit un grand retour élastique après une opération de mise en forme de type pliage.

L'essai de pliage sur l'acier INOX 304L suivi, permettra d'obtenir des mesures du retour élastique en fonction de trois paramètres :

- Couple du serrage
- La profondeur de pliage.
- Traitement thermique.

Dans cet objectif, différents essais ont été réalisés afin de mettre en évidence le lien qu'il peut exister entre ces paramètres du procédé et l'évolution du retour élastique.

Notant que le dispositif utilisé pour la réalisation de l'opération de pliage est conçu avec le logiciel Solid Works et réalisé par usinage au niveau du dans le hall Technologique d'OUED AISSI.

II.5 Mise en œuvre

II.5.1 La Matrice :

La matrice contient une empreinte creuse, elle est réalisée dans un bloc de matière d'acier dur A60, l'empreinte représente la pièce à créer.

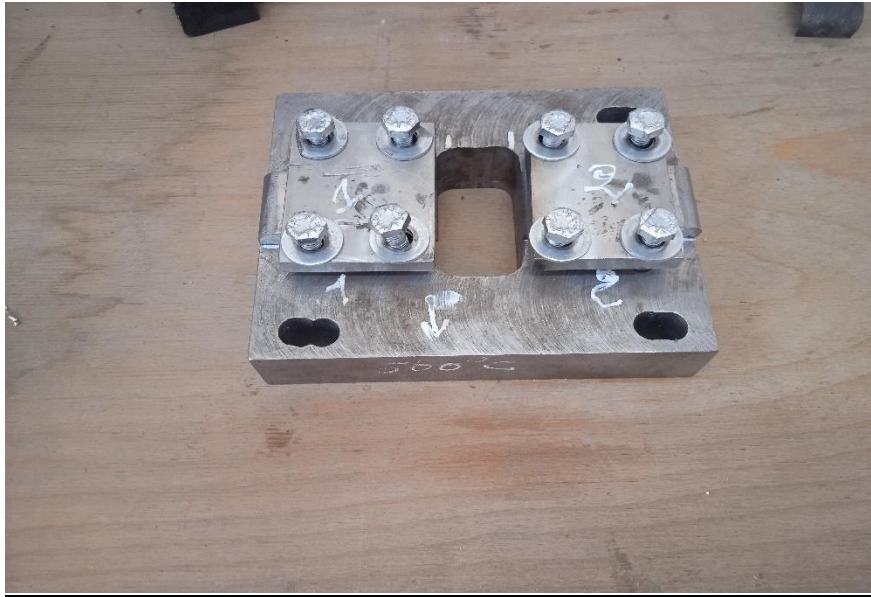


Figure II.5 Matrice 450 x 310mm

II.5.2 Le serre flanc :

C'est un dispositif qui permet la fixation de la pièce sur les deux côtés de la machine de traction/compression, cette partie de la matrice est fabriqué en lame de ressort, fabriqué au hall de technologie d'OUED AISSI, et rectifié par rainure en forme de l'éprouvette inox 304L dimension 150x30 x 1.5mm.



Figure II.6 les dimensions de serre flan, (68 x55mm).

II.5.3 La pression appliquée sur le serre flan : [7]

Le serre flan joue un rôle principal dans la régulation d'écoulement du métal en exerçant une force de serrage prédéfini sur la tôle. La force de serrage permettant la commande de l'écoulement du métal dans la matrice.

Le rôle du serre flan consiste à empêcher la formation de plis sur le rebord du flan en exerçant une pression appropriée. La présence du serre flan ne s'impose que si

$$.d \leq 0.95 \quad d'ou \quad e \leq 0.2 .(D - d)$$

Dans la pratique, il faut que le serre flan soit et rectifié. La pression est réglée à l'aide d'une clés dynamométrique :

- Si la paroi est sans plis et d'aspect brillant, la pression est adaptée.
- Si la paroi est bonne mais que les bords supportent des marques de dentures, c'est que la pression est trop faible.
- Ce produit un déchirement lors de la descente du poinçon, c'est que la pression est trop importante. Ainsi, pour un embouti cylindrique de diamètre d et de flan de diamètre D , l'effort du serre flan pour différents matériaux est déterminée par la

formule simplifiée suivante : $F_s = p \cdot (D^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4} (daN) \dots\dots\dots(01)$

II.5.4 Le poinçon :

C'est un outil qui a pour fonction de faire l'emboutissage, le pliage, le perçage et de laisser une marque sur une autre pièce Notre poinçon est fabriqué en acier dur GX Z200,



Figure II.7 dimension du poinçon 40 x 27mm

II.5.5 La vitesse de poinçon : [8]

Dans la pratique industrielle on utilise des vitesses qui dépendent du type de matériau

Tableau 3 vitesses de pliage pour différent matériaux

Matériau	Vitesses (mm/s)
L'acier	200
le zinc	200
les aciers doux	280
l'aluminium	500
le laiton	750

Elle est définie par la vitesse du poinçon au moment de l'attaque de la tôle. Une vitesse trop faible,

tend à générer un écrouissage trop important sur le métal, le rendant moins malléable. Une grande vitesse tend à empêcher la propagation de la force du poinçon jusqu'au niveau du flan. Cette alteration pouvant alors se traduire par une rupture du flanc.

II.6 Principe de l'Essai de pliage :

Dans cette étude, les essais de pliage ont été assurés par un dispositif en U adapté sur une machine de traction et compression. En utilisant la machine de traction et de compression au laboratoire de Génie Civil plusieurs essais ont été réalisées. Cette machine est menée d'un logiciel pour calculer le déplacement et la force et un registre en temps réel la valeur de la profondeur de pliage. Comme indiqué sur la **Figure II.9** La matrice est déposée sur le plateau de la machine de traction tandis que le poinçon est en position fixe au niveau de la partie supérieure de la machine. Pendant l'opération de pliage, les deux extrémités de la pièce sont maintenues sous charge entre les serres flancs et la matrice à l'aide des boulons diamètre 14 mm et rondelles à tête hexagonale (4 boulons sur chaque extrémité). Le dispositif peut donner également la possibilité de faire varier la valeur de la force de serrage en utilisant une clé dynamométrique.



Figure II. 8 Dispositif utilisé pour l'essai pliage avec une matrice et un poinçon.

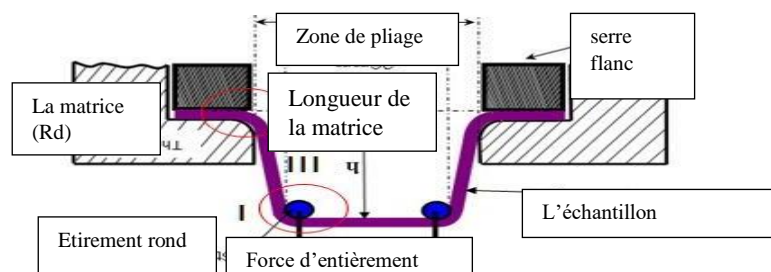


Figure II.89 Principe de l'essai pliage d'une tôle métallique

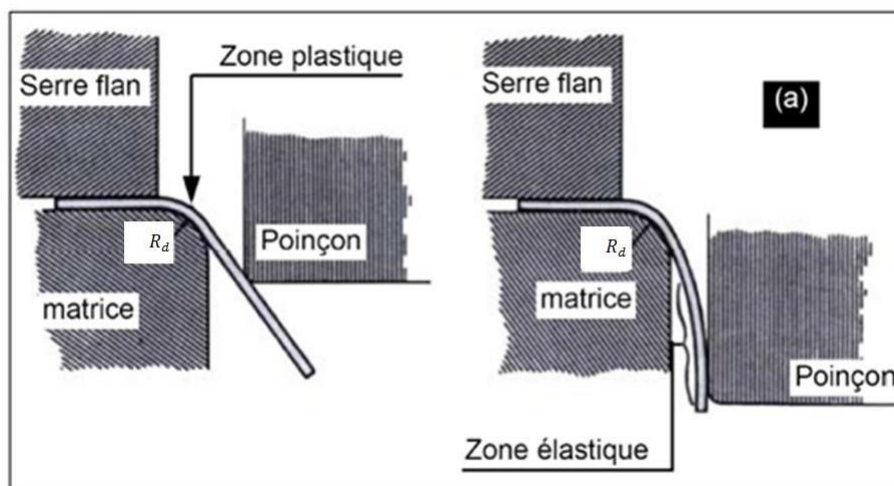


Figure II.9 Modes de déformation en pliage

Tableau 4 Paramètres de l'essai pliage.

Parameters de l'essai	Valeurs expérimentales
Matériau d'étude	Inox 304L
Rayon de courbure du poinçon(r_p)	4mm
Vitesse du poinçon	10mm/min
Dimensions de l'éprouvette	150×30 ×1.5(mm)
Lubrification	sans
Profondeur d'étirage	30mm
Force de serrage(CF)	13kN
Surface de contact entre le flanc et la matrices	$S=360mm^2$

II.6.1 Serrage par la clé dynamométrique

Une clés dynamométrique est un outil qui permet de contrôler le couple de serrage des écrous et des vis afin que ceux-ci soient montés de manière optimale. Quelle que soit la technologie, on peut, à l'usage, classer ses clés en deux groupes : les clés à déclenchement qui signalent l'atteinte de la valeur du couple, et celles avec une lecture directe qui affichent la valeur en cours.

Les clés à déclenchement peuvent être à valeur fixe ou réglables (en général à l'aide d'une bague que l'on positionne sur le couple choisi).

La majorité des clés ne permettent pas le contrôle d'un couple vers la gauche (la majorité des vis étant avec une hélice à droite).



Figure II.10 Clés dynamométrique

II.6.1.1 Le couple de serrage

Après deux essais de serrage avec 23KN, on a trouvé que le meilleur couple de serrage c'est 13KN. Le Couple de serrage est donné par $C = \text{Force (F)} \times \text{Distance (L)}$. Généralement Les couples de serrage sont calculés à 85 % de la limite élastique de la vis. Ils sont indiqués, pour chaque type de vis, en newton-mètre (Nm). La force de pré charge, elle, est indiquée en Newton

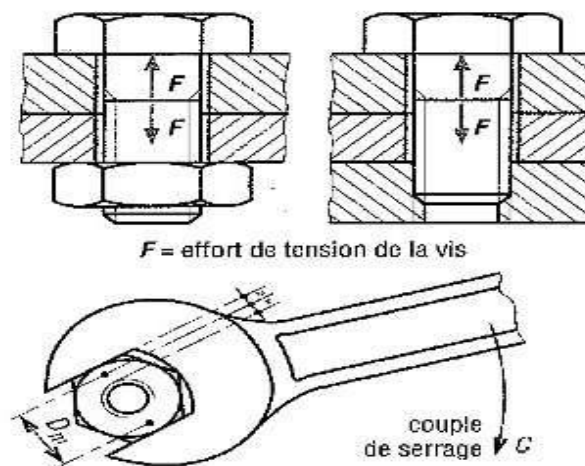


Figure II.11 Schéma montre le couple de serrage et direction de la force

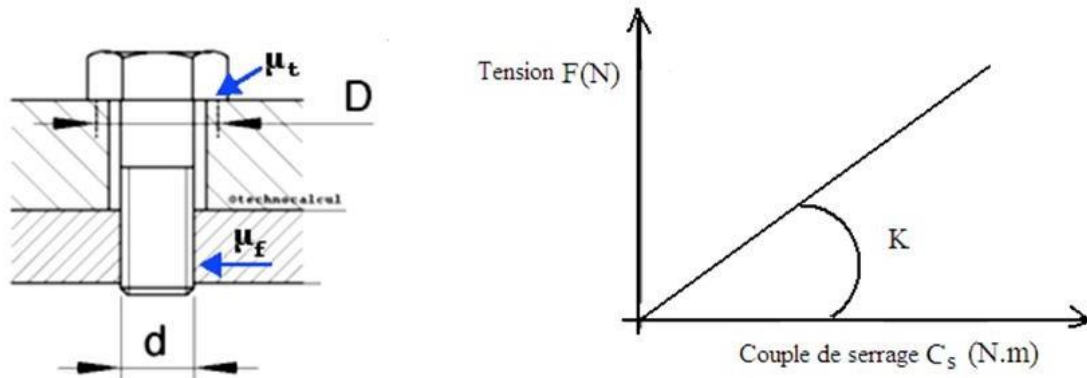


Figure II.12 Relation entre le couple de serrage et l'effort de tension

Le serrage de la tôle sous le serre-flanc s'effectue à l'aide de deux boulons sur chaque extrémité. Les caractéristiques géométriques des boulons à serrage contrôlés ont donné dans le tableau 5

Tableau 5 Caractéristiques géométriques des boulons à serrage contrôlé

Caractéristiques du boulon	Valeurs
Diamètre nominal	15mm
Pas de lavis	1,5mm
Diamètre moyen de filetage	9mm
Diamètre moyen sous tête	14 mm

II.7 Le retour élastique :

Après une mise en forme par déformation plastique (pliage, emboutissage, etc.), il est rare que la pièce produite conserve parfaitement sa forme après retrait des outillages, la forme et les dimensions que les outils lui ont imposées. Cette modification de forme est due essentiellement au retour élastique. Le problème peut être extrêmement préjudiciable à la qualité géométrique du produit dans le cas où les tolérances recherchées doivent être serrées notamment si la pièce produite doit être utilisée dans un assemblage. Par conséquent, pour que la pièce fabriquée soit conforme aux exigences du cahier des charges, il faut préalablement définir des formes d'outillage qui anticipent ce retour élastique. Le phénomène du retour élastique s'explique par le fait que le

changement de distribution des contraintes pour respecter une nouvelle configuration d'équilibre après retrait de l'outillage, modifie la forme de la pièce et posent des problèmes de maîtrise de géométrie. Dans le cas d'un essai de traction, le retour élastique résulte de la disparition de la composante élastique de la déformation totale imposée à l'éprouvette.

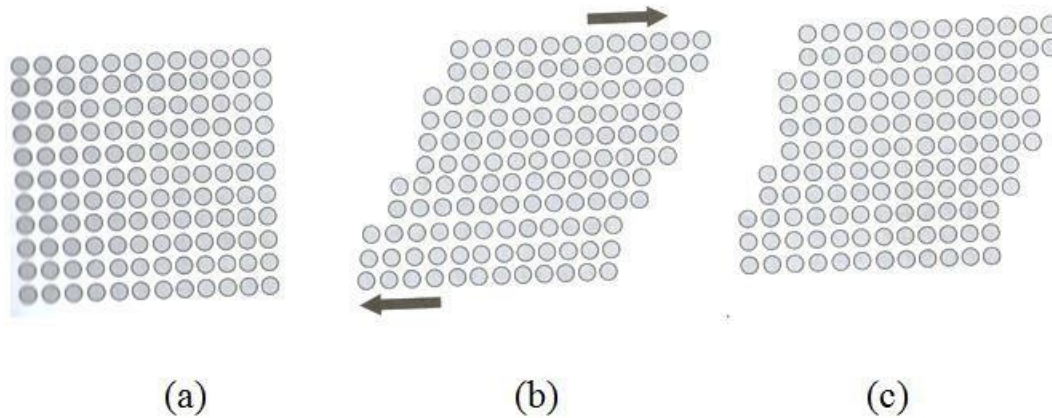


Figure II.13 Représentation d'une déformation élasto-plastique et retour élastique dans le réseau cristallin [9]

A priori le retour élastique affecte sensiblement la forme et la précision géométrique au regard de celles demandées par le cahier des charges. Son intensité dépend de plusieurs paramètres liés principalement :

- À la forme et aux dimensions de la pièce,
 - À la géométrie de l'outillage (rayon de courbure de la matrice, rayon de courbure du poinçon, etc.),
 - Aux propriétés du matériau mis en œuvre (composition chimique, propriétés mécaniques, taille des grains, texture de la tôle,
-
- Aux effets des paramètres du procédé de fabrication tels que la vitesse de déplacement du poinçon, force de serrage, profondeur d'enfoncement, conditions de contact, température, etc.

II.8 Détermination du retour élastique

La détermination du retour élastique était exprimée par :

- l'angle $\Delta\theta$ et en fonction du profondeur Δh_2 juste après l'enlèvement des outils et libération totale de la pièce.

Pour obtenir une précision optimale sur les mesures, le retour élastique angulaire $\Delta\theta$ est donné par la valeur moyenne des angles mesurés aux deux extrémités de la pièce.

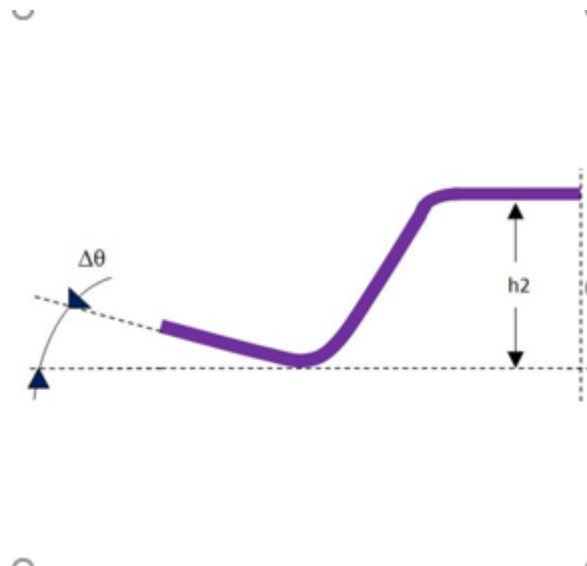


Figure II.14 Mise en évidence du retour élastique en fonction de profondeur Δh_2 finale après enlèvement de l'outillage et la libération de la pièce ($\Delta h_2 = h - h_2$),

Comme il a été souligné au début de ce chapitre, le procédé étirage-pliage est régi par un ensemble de paramètres dont l'influence sur le retour élastique n'est pas négligeable. Par conséquent, la détermination de l'effet de ces paramètres sur le retour élastique est d'une importance cruciale pour la conception et la production des outils. Dans le cadre de cette étude, différents tests sont mis en évidence afin d'évaluer le lien qui peut exister entre les paramètres d'influence et l'évolution du retour élastique. Après retrait des outils de mise en forme et pour différentes conditions de sollicitation, la pièce

finale peut présenter deux formes possibles comme l'indique la **Figure II. 17**

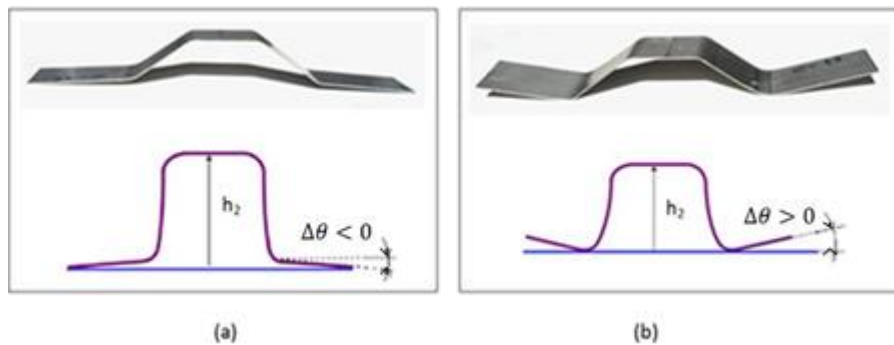


Figure II 15 Les deux formes possibles de la pièce obtenue par pliage après retrait des outils

(a) retour élastique négatif ($\Delta\theta < 0$; $\Delta h_2 < 0$,

(b) retour élastique positif ($\Delta\theta > 0$; $\Delta h_2 > 0$,

II.9 La machine de traction /compression :

Machine d'Essai Universelle Électromécanique contrôlé par ordinateur fabriquée selon les normes ISO. Cette machine d'essai, du fait de sa capacité de 200 KN est adaptée pour une large gamme de matériaux et permet selon les accessoires fournis en option d'effectuer des essais de traction, compression, flexion, cisaillement, etc. Elle est fournie en standard avec un ordinateur de type PC, les résultats d'essai, de traiter et d'imprimer les données.

Elle permet d'effectuer des essais sur des éprouvettes métalliques, des ressorts, des textiles, des caoutchoucs, des plastiques et d'autres matériaux (pour certains matériaux, des mors spéciaux devront être utilisés et disponibles sur demande).

Cette machine est parfaitement adaptée pour une utilisation dans des laboratoires de recherche ou dans des laboratoires d'enseignement supérieur.

- Charge d'essais : 200KN ;
- Vitesse d'essai : 10mm/min
- Alimentation électrique T=220V, F=50Hz.



Figure II.16 Montage de l'outil de pliage sur la machine

II.9.1 Composantes de la machine :

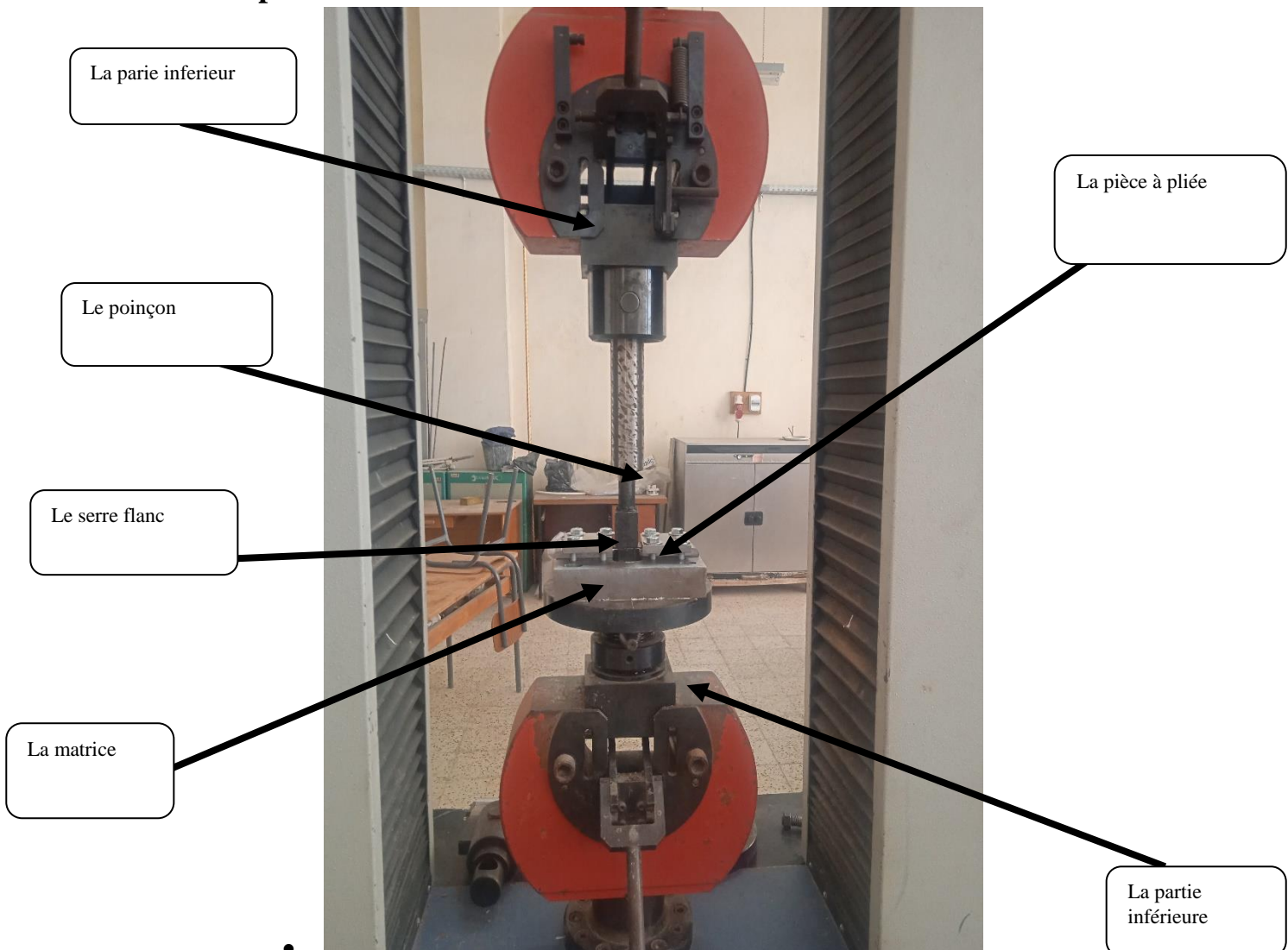


Figure II.17 composante de la machine de pliage

II.10 Essai de la dureté :

Cet essai est destiné à vérifier la dureté superficielle d'une pièce. Il consiste à indenter la surface de la pièce à tester à l'aide d'un pénétrateur pyramidal à base carrée (du type 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.18 la machines de dureté.

Cette étape est nécessaire afin de déterminer le durcissement de la tôle étudié. On a appliqué une charge de 60KN.

II.11 Préparation pour le contrôle métallographique

II.11.1 Enrobage :

L'enrobage est un procédé consistant à appliquer une couche de liquide ou de poudre sur la surface d'un produit de base de forme quelconque afin de lui conférer des propriétés particulières.

S'effectue avec des poudres (bakélite) ces poudres sont compressées dans une chambre chauffée :

Bakélite 120à130C° et compression de 81 à100 kg/cm².



Figure II.19 machine d'enrobage type STRUE

II.11.2 Essai de polissage :

Le polissage est une opération qui consiste à rendre la surface à analyser plane, brillante et dénuée de toute rayure. L'opération du polissage s'est faite d'une façon graduelle. On a commencé par un polissage au papier Sic avec les grades successifs 400, 800, 1000, 1200. L'opération est effectuée sur une polisseuse électrique de type « Struer », à seul 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 150trs/mn, 300trs/mn. - Pour la finition, les échantillons sont frottés sur des disques de feutre ou de drap imbibé d'une suspension d'abrasifs.



Figure II.20 Polisseuse mono disque de finition.

II.11.3 Attaque Chimique :

Après polissage pour révéler la morphologie des différentes phases, Les échantillons sont attaqués chimiquement elles présentent ainsi que des joints de grains austénitiques. Cette attaque est une attaque électrolytique. Elle est réalisée avec une solution d'acide oxalique, sa composition chimique est de 10g de $C_2H_4O_4$ et 100ml HO_2 . Les paramètres de l'attaque sont les suivants : **1min :35secondes** de temps d'attaque.



Figure II.21 acide oxalique
 $C_2H_4O_4$



Figure II. 22 Batterie 10V associe a l'acide
oxalique $C_2H_4O_4$

II.11.4 Avantages du polissage électrolytique :

- L'élimination des bavures détachables.
- L'élimination des inclusions ferriques.
- Un décapage sans risque de fragilisation.
- Une grande facilité de nettoyage.
- Une mise en propreté parfaite.
- L'élimination des couches métalliques perturbées par l'usinage.
- Aucun risque de corrosion inter cristalline.
- Une plus grande tenue à la corrosion.
- Une plus grande brillance des surfaces traitées.

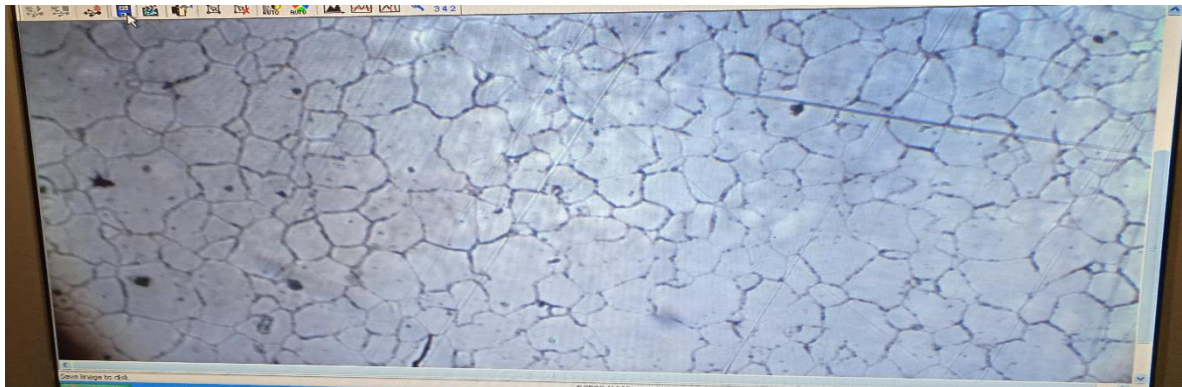


Figure II.23 la microstructure de l'acier après le pliage avec agrandissement de X400

II.12 Logiciel de traitement des résultats [15]

Image est un logiciel multiplate-forme, ImageJ se présente sous la forme d'une fenêtre principale flottante qui ouvre des fenêtres de données, elles aussi flottantes. La fenêtre principale contient les menus et les boutons des outils disponibles (sélection rectangulaire, ovale, main libre, etc.).

Il nous a permis de calculer la taille et la surface des grains, sur une image microscopie avec un calibre déférents. La plupart des opérations courantes de traitement d'images sont réalisables avec Image : visualisation et ajustement de l'histogramme des niveaux de gris, débruitage, correction d'éclairage, détection de contours, transformation de Fourier directe et inverse, seuillage, opérations

logiques et arithmétiques entre images, et d'une manière générale, tout type de transformation linéaire par définition personnalisée de masques.

En analyse d'image, Image permet de dénombrer des particules, d'évaluer leurs ratios d'aspect, de mesurer diverses grandeurs (distances, surfaces), d'extraire des coordonnées de contours..

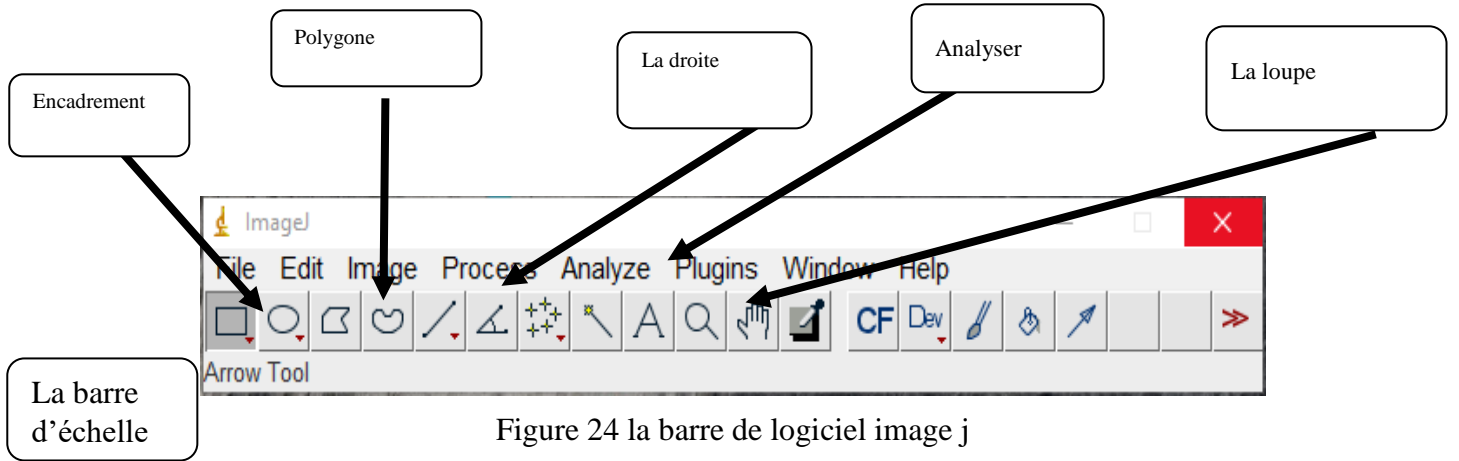


Figure 24 la barre de logiciel image j

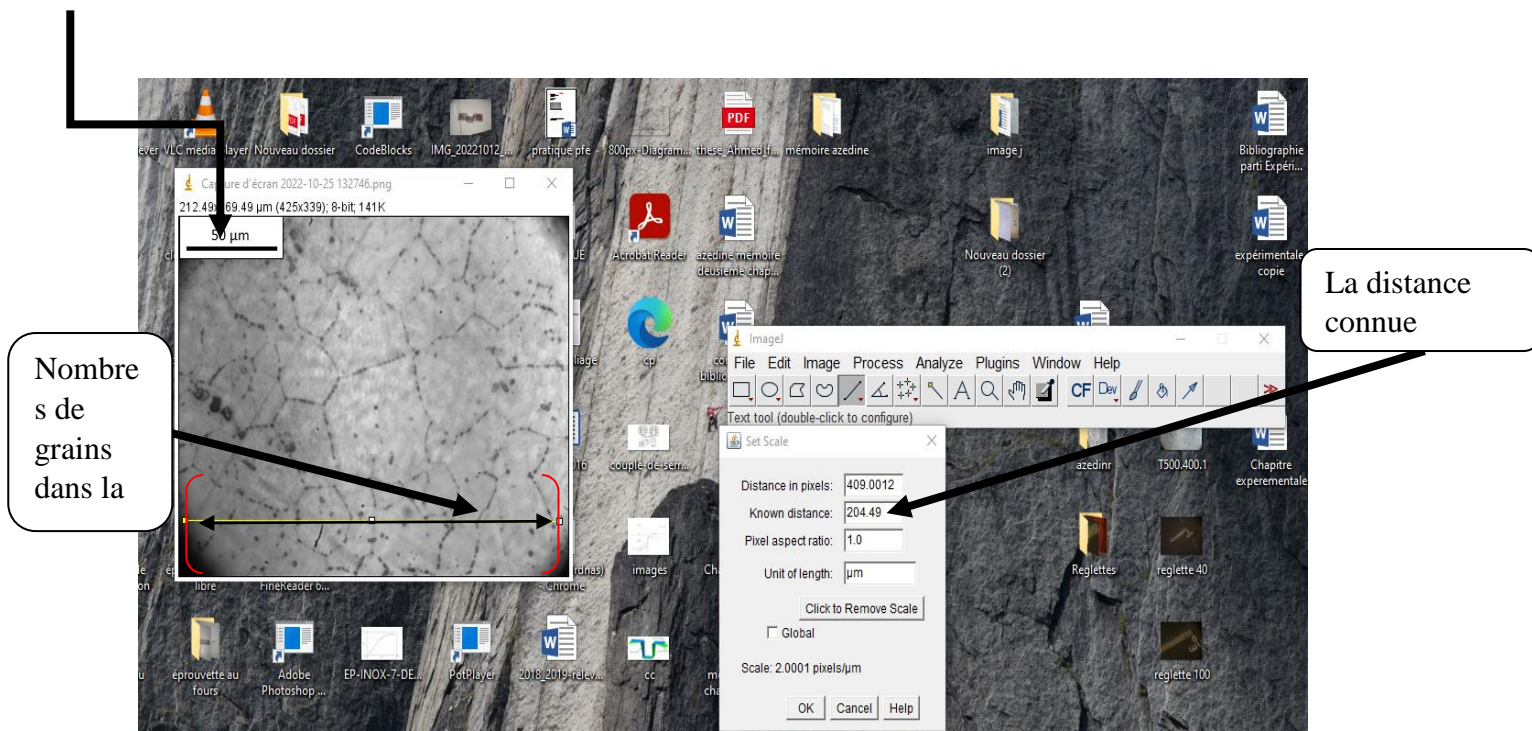


Figure II.25 réglage sur les paramètres d'image

II.13 Logiciel de traitement des d'analyse des données ORIGIN PRO :

Il permet notamment de tracer des graphes 2D et 3D et possède des fonctions d'analyse de pics. Il est aussi capable d'importer des fichiers de divers formats tels que Excel, et d'exporter les graphes en format JPEG, etc..

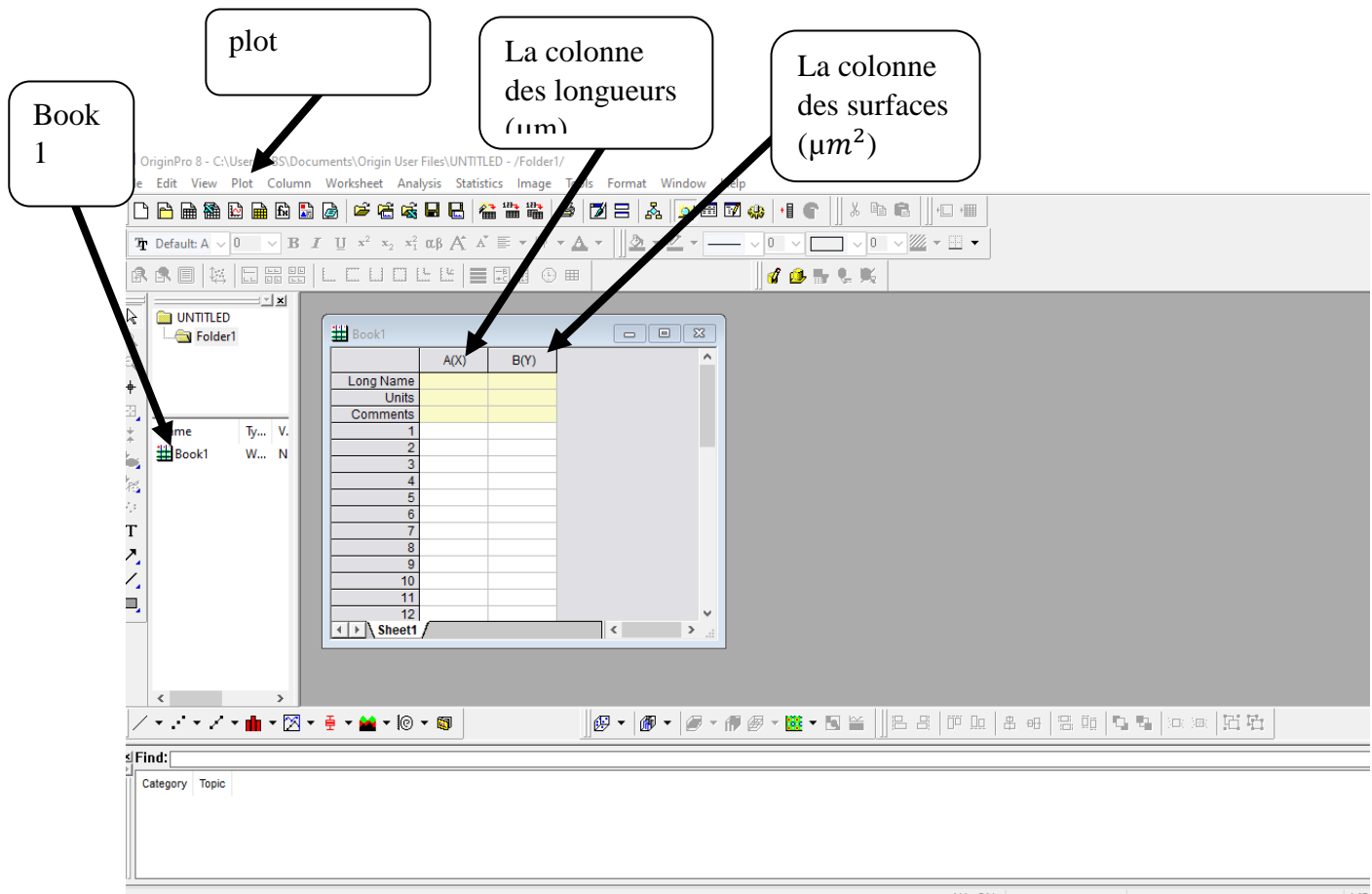


Figure II.26 logiciel OriginPro8

II.14 Conclusion :

Dans ce chapitre, après avoir définie le procédé de pliage et de mise en forme, nous avons mise en clair tous ce qui concerne le pliage industriel et la machine de presse et ces composantes, on a conclu que le comportement mécanique des aciers austénitiques en général dépend essentiellement de la transformation martensitique induite par la déformation plastique de l'austénite pendant le pliage.

Cette partie de document dresse sur les techniques expérimentales de pliage, et nous avons fais une compression entre deux paramètres, la profondeur de pliage et la température du four pour un maintien fixe.

Les essais de mise en forme des pièces pliées réalisées dans notre travail expérimental ont a permet de comprendre :

.la force de serre flanc : l'effort de serrage est grand plus la résistance au déplacement du poinçon est grande.

CHAPITRE III
Résultats et discussions

Résultat et discussion

Comme déjà abordé dans le deuxième chapitre plusieurs paramètres peuvent influencer sur la qualité de pliage et le retour élastique cette partie expérimentale sera consacré à discuter les résultats d'étude du retour élastique de l'acier inox 304l en fonction de la température du traitement thermique. Notons que le dispositif réalisé par l'un de nos collègue doctorant a été utilisé pour la mise au point des tests de pliage.

Ce travail expérimental est composé de deux parties :

1. Étude du retour élastique de l'acier 304L à l'état de livraison en fonction de la profondeur de pliage.
2. Étude du retour élastique de l'acier 304L en fonction de l'effet de la température des traitements thermiques

III 2. Étude du retour élastique de l'acier 304L à l'état de livraison en fonction de la profondeur de pliage

A l'état de livraison l'acier possède les propriétés déjà présenté dans le tableau III.1, il est obtenu par laminage, et au cours de cette opération de mise en forme il a subi après chaque opération de laminage un traitement de recristallisation afin d'augmenter sa plasticité. Avec cette façon il est fabriqué dans le but de faciliter de sa mise en forme ultérieur pour déférents applications mécaniques, donc la seule exigence pour une tel qualité d'acceptation est l'aptitude à la déformation plasticité sans risque de rupture ou de fissuration, dans cette partie nous présentons la profondeur possible à réaliser sans rupture et selon la limite d'utilisation de notre matrice de mise en forme.

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats du retour plastique en fonction de la profondeur de déformation, la Figure III .1 présente l'allure de variation en fonction du retour élastique exprimé en degré.

Tableau III. 1 Résultats des tests de pliage sans traitements thermiques

Profondeur de déformation en (mm)	Charge maximale (KN)	Retour élastique (Re) en degrés (°)
15	34,49	7.2
25	24,57	6.6
30	31,69	7.00
40	13,06	6 ,00

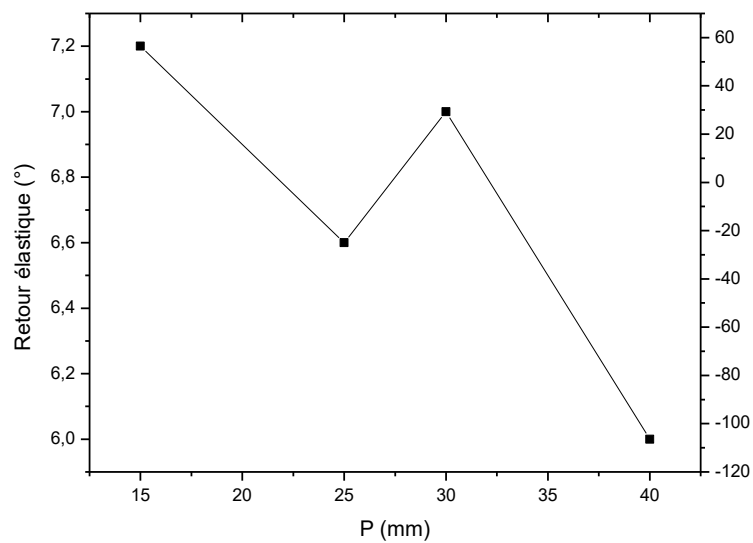
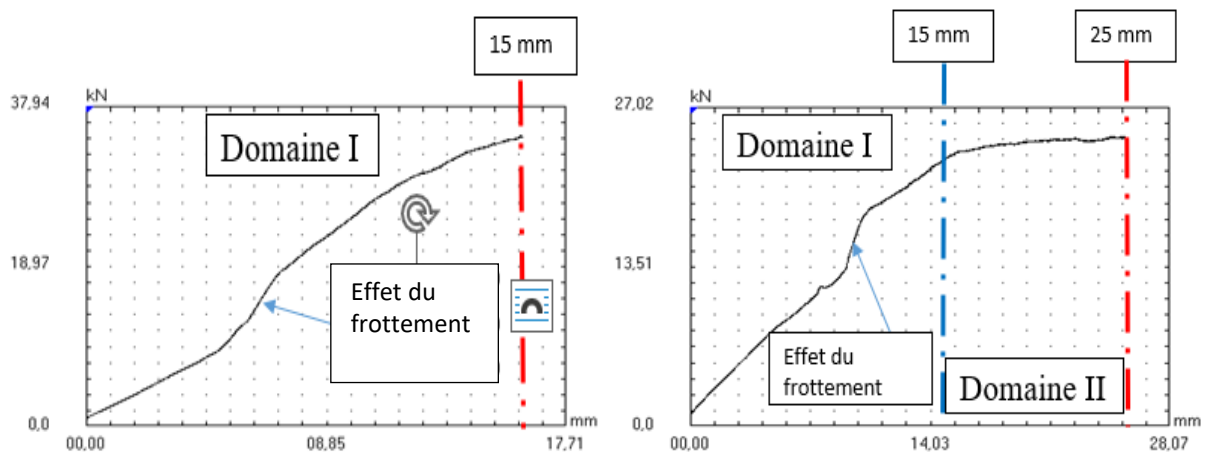


Figure III .1 montre l'évolution du retour élastique (Re) en fonction de la profondeur,

La Figure III .1 montre l'évolution du retour élastique (Re) en fonction de la profondeur, de ce graphique on remarque que (Re) peut être influencé par la profondeur de pliage et varie autour d'une moyenne de 6.5°, il varie d'une façon proportionnelle avec la charge maximale, et d'une façon aléatoire avec la profondeur de pliage, On pense que cela est dû aux états de surfaces sur laquelle sont fixées les tôles contre les mors de fixation de la matrice, enfin cela influence sur le coefficient de frottement et par conséquent sur les efforts qui entrent en jeu lors de l'opération de pliage.

A partir des courbes de la Figure III .2 issues de la machine de pliage, on observe que l'allure de ces courbes dans le domaine I (dans l'intervalle de déplacement de 15 mm) débute par un comportement



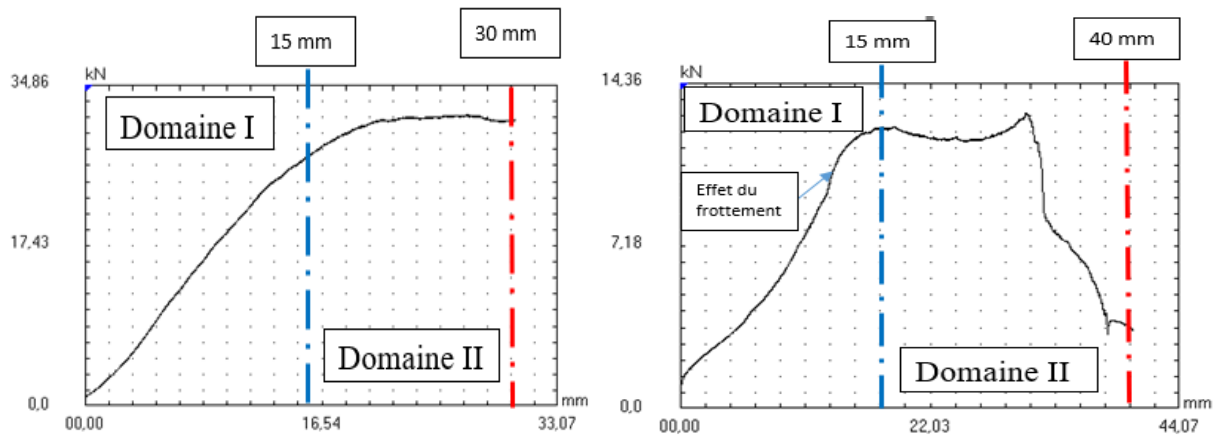


Figure III .2 Essai de pliage sans traitement thermique à des profondeurs de 15, 25, 30 et 40 mm

Linéaire élastique, puis après certain déplacement change de comportement qui se manifeste par ralentissement dans le déplacement et augmentation dans la charge appliquée, ce qui est signe d'instabilité dans le coefficient de frottement ce qui probablement peut expliquer le comportement aléatoire de (RE) en fonction de la profondeur de pliage.

Tandis que pour le domaine II l'allure est presque identique où on remarque un aplatissement continue jusqu'à la fin du parcours fixé, sauf pour l'essai de la profondeur de 40 mm, une chute libre de la force de pliage est observée.

En conclusion, la profondeur de pliage a peu d'influence sur le retour élastique de l'acier 304L par contre l'état de surface et les efforts engendrés par le contact mécanique entre les morts de fixation (serre flan) influe sur le retour élastique par l'effet du frottement.

III.3 Étude de l'effet des traitements thermiques sur le retour élastique de l'acier 304L

Avec les mêmes conditions d'essais on cherche dans cette section d'étude de voir l'effet des traitements thermique sur le retour élastique, pour ce faire on a opté pour le choix d'une profondeur de travaille fixe pour tous nos essais qui suivent d'une profondeur de 30 mm, pour les paramètres de traitement on a voulu faire une étude préliminaire pour le choix du meilleure mode de refroidissement qui assure une mise en forme par déformation avec moins de risque de rupture à la profondeur choisis, pour cela deux essais ont été réalisée un essais de traitement thermique à 950 °C avec deux mode de refroidissement :

- Refroidissement long dans le four
- Refroidissement rapide à l'air libre

Le temps de refroidissement était de 30 mn fixe pour tous les éprouvettes

III.3.1 Choix de la température de traitement thermique

Le critère de choix est fait sur la base du :

- Comportement mécanique au cours de l'essai de pliage
- Valeur du retour élastique
- Qualité métallographique

Après test de pliage :

L'éprouvette refroidis à l'air libre, à bien résisté jusqu'à la profondeur de 30 mm, par contre celle refroidis dans le four, elle s'est rompue à une profondeur de 18 mm

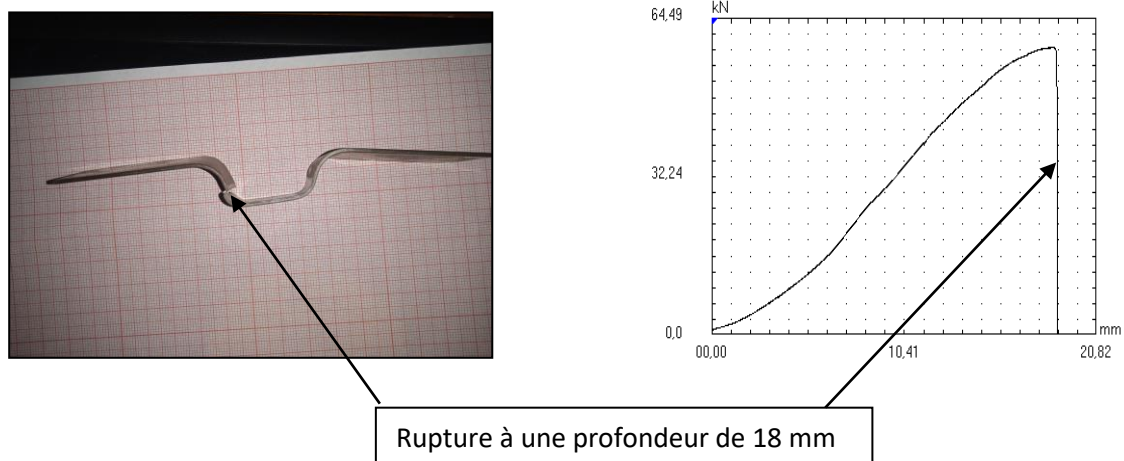


Figure III .3 Essai de pliage après traitement à 950°C et refroidissement dans le four

Pour expliquer ce comportement on a procédé à un prélèvement d'un morceau de la pièce rompue au moment du pliage après traitement et refroidissement dans le four et ce pour une observation au microscope optique, puis on a fait une comparaison de l'image micrographique avec un échantillon sans traitement thermique et une autre :

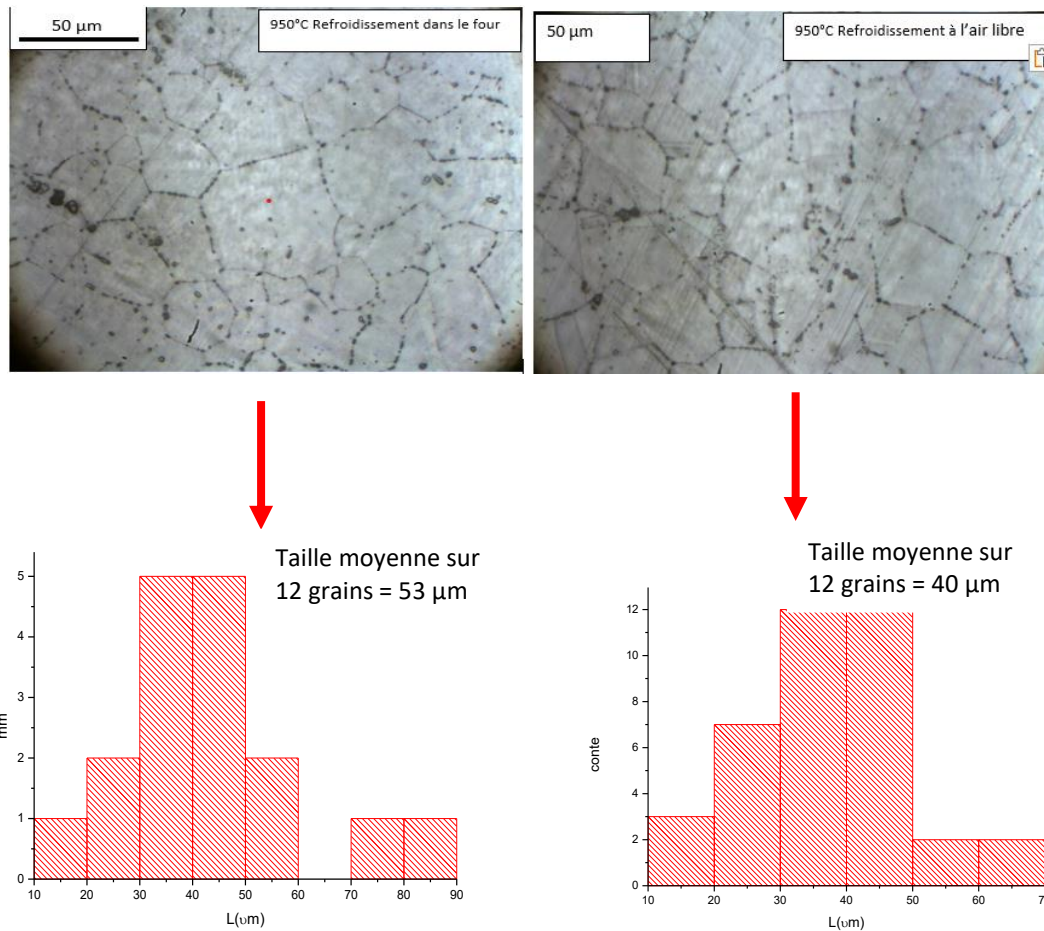


Figure III .4 Microstructure et histogramme de la répartition de la taille du grain de l'acier 304L traité à 950°C et refroidis dans le four et à l'air libre

Donc comme le montre des images micrographiques et les histogrammes de répartition de la taille des grains le refroidissement au four donne lieu à une structure plus grossière donc plus fragile que celle obtenue par un refroidissement plus rapide à l'air libre, cela peut être expliqué par le fait que le refroidissement dans le four donne assez de temps pour la diffusion des éléments chimiques dans les grains est conduite à leur grossissement, à son rôle grossissement du grain éloigne les dislocations du bord des joints de grain ce qui conduit à leur densification dans le grain avant qu'il soit neutralisé par les joints de grain, leur densification dans un seul endroit conduit à la formation de microfissures qui peuvent se propager sous l'effet de l'évolution de la contrainte appliquée, et au contraire le refroidissement rapide à l'air libre donne lieu à une structure plus fine et plus résistante

En conclusion, le refroidissement dans le four donne assez de temps pour la diffusion des éléments chimiques dans les grains est conduite à leur grossissement, à son rôle grossissement du grain éloigne les dislocations du bord des joints de grain ce qui conduit à leur densification dans le grain avant qu'il soit neutralisé par les joints de grain, leur densification dans un seul endroit conduit à la formation de microfissure qui peuvent se propager sous l'effet de l'évolution de la contrainte appliquée, et au contraire le refroidissement rapide à l'air libre donne lieu à une structure plus fine et plus résistante.

III.4 Étude de l'effet de la température du traitement thermique sur le 03 espaces retour élastique de l'acier 304L

Le tableau III. 2 présente les résultats de test de pliage après traitement thermique à différentes températures :

Force Température	Force maximum (KN)	Déplacement maximum (mm)	Retour élastique maximum (°)
Sans traitement thermique	25,56	31,07	12,38
500°C	28,09	32,14	10.38
600°C	24,23	32,17	6.9
700°C	35,35	32,08	4.76
800°C	52,28	26,17	Rupture
950°C	41,90	32,06	3.8
1000°C	57,85	12,03	Rupture

Ces résultats sont présentés dans la Figure III .4, d'après cette Figure nous remarquons qu'il y a une nette diminution dans la valeur du retour élastique RE, on a un gain d'amélioration de plus de 60% lorsque l'acier est traité à une température de 950 °C et ce en comparaison à l'acier à l'état de livraison. Par rapport à l'évolution de la température, le RE diminue au fur et à mesure que la température augmente sauf pour la température 800°C et 1000 °C on a enregistré une rupture avant l'arrivée à la profondeur de 30 mm. pour la meilleure résultats de retour élastique obtenue à 950 °C, cela peut être expliqué que à cette température de

traitement thermique de l'acier la microstructure est composé par deux phases, la phase alpha (ferrite) plus ductile et la phase gamma et comme il est bien connu dans la littérature que les matériaux polyphasés sont plus résistants à la rupture que les matériaux monophasés, on peut justifier cette résistance par la qualité de la microstructure qui au refroidissement peut être composée par deux phases alpha et gamma

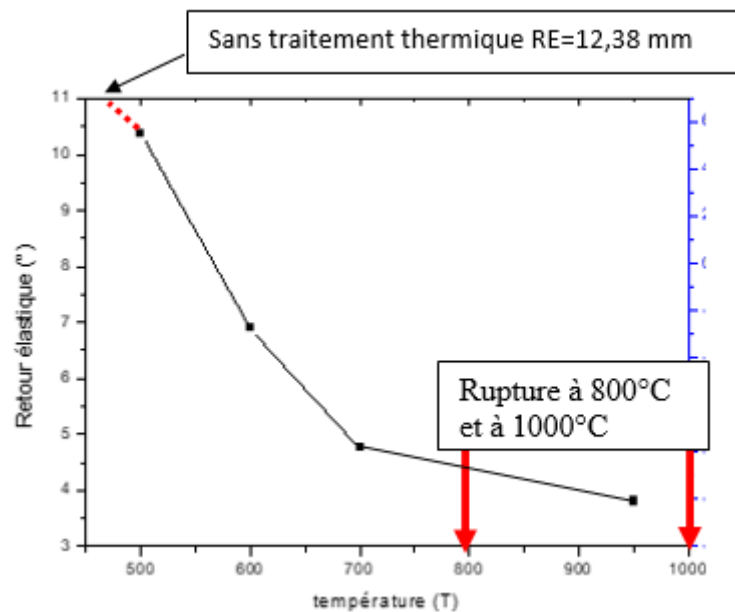


Figure III .5 Effet de la température du traitement thermiques sur le retour élastique de l'acier 304L

Pour la rupture à 800 °C et à 1000°C on pense que cela est dû à faible dureté comme il est montré dans le tableau III. 3 et représenté dans la figure III .5, ainsi que l'effet du phénomène du grossissement de grain dans la zone de la phase gamma, et même chose pour la température de 1000°C on a enregistré une faible dureté et le grossissement du grain dans la zone de deux phases alpha et gamma peut également provoquer la rupture de l'éprouvette.

Tableau III. 3 Dureté en fonction de la température de traitement thermique

	Températures de traitement thermique (°C)	HV
Echantillon 1	Sans traitement thermique	155
Echantillon 2	500°C	165
Echantillon 3	600°C	159
Echantillon 4	700°C	165
Echantillon 5	800°C	153
Echantillon 6	950°C	178
Echantillon 7	1000°C	148
Echantillon 8	Refroidissent au four traité à 950°C	150

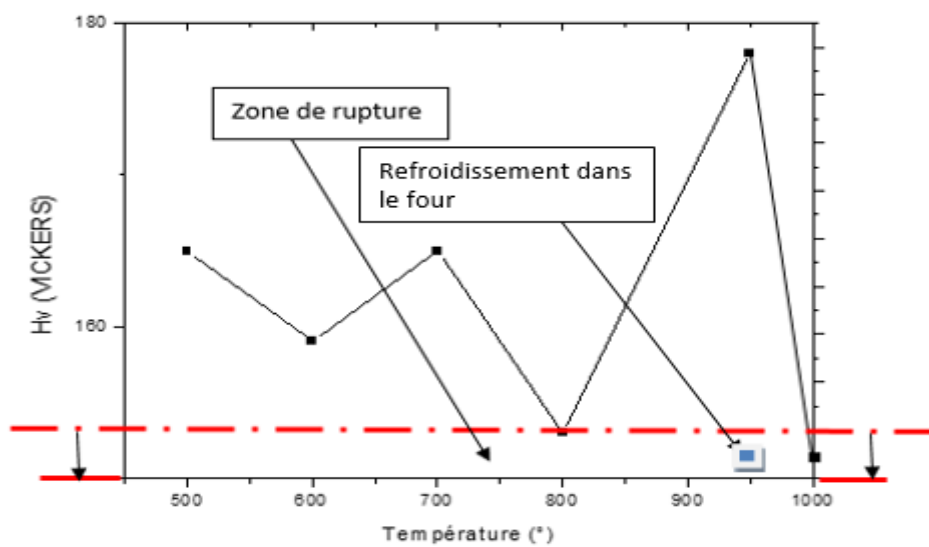


Figure III 6 Dureté en fonction de la température de traitement thermique

En conclusion, Une nette amélioration a été enregistrée sur la diminution du retour élastique de l'acier 304L en fonction de la température de traitement thermique, on a pu réduire le retour élastique R_e de 60% par rapport à l'état de livraison et cela à une température de traitement de 950°C.

Le retour élastique n'a pas une relation proportionnelle avec la dureté, par contre une faible dureté favorise le risque de rupture de des éprouvettes

Conclusion générale

Conclusion générale

Durant ce travail on a essayé de déterminer la relation qui peut exister entre le phénomène du retour élastique et certains paramètres de fabrication tel que la profondeur de pliage, la charge appliquée la dureté et les traitements thermiques, pour se faire, on a utilisé une matrice de pliage qui existe déjà au labo Génie Civil et des éprouvettes de tôle inox 304L déjà préparées. Une étude bibliographique réalisée dans le premier chapitre nous a permis de cerner les limites de notre étude expérimentale.

Les principaux résultats qu'on a obtenu sont comme suite ;

- La profondeur de pliage a peu d'influence sur le retour élastique de l'acier 304L par contre l'état de surface et les efforts engendrés par le contact mécanique entre les mors de fixation (serre flan) influe sur le retour élastique par l'effet du frottement.
- Le refroidissement dans le four donne assez de temps pour la diffusion des éléments chimiques dans les grains est conduite à leur grossissement, à son rôle grossissement du grain éloigne les dislocations du bord des joints de grain ce qui conduit à leur densification dans le grain avant qu'il soit neutralisé par les joints de grain, leur densification dans un seul endroit conduit à la formation de microfissure qui peuvent se propager sous l'effet de l'évolution de la contrainte appliquée, et au contraire le refroidissement rapide à l'air libre donne lieu à une structure plus fine et plus résistante.
- Une nette amélioration a été enregistrée sur la diminution du retour élastique de l'acier 304L en fonction de la température de traitement thermique, on a pu réduire le retour élastique RE de 60% par rapport à l'état de livraison et cela à une température de traitement de 950°C
- Le retour élastique n'a pas une relation proportionnelle avec la dureté, par contre une faible dureté favorise le risque de rupture de des éprouvettes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. CHAUSSIN et G. HILLY « Métallurgie, alliages métalliques » Tome 1, édition DUNOD, Montréal, 1976.
- [2] A.ROOS.B.Milet *procis de métallorgie Appliquée*'' Edition Technique et Documontation-Lavoisier , Paris, 1982.
- [3] J. Paul bailon, J. Marie dorlot. « Des matériaux », 3eme édition 2000-2001.
- [4] Experimental and numerical study of the mechanical behavior and kinetics of the martensitic transformation in 304L TRIPsteel: applied to folding(2018) Z. Sidhoum1 & R. Ferhoum1 & M. Almansba2 & Bensaada2 & M. Habak3 & M. Aberkane1
- [5] a et b pierre –jean cunat. « Aciers inoxydables, critères de choix et structures » ,traite « Matériaux métallique » , Technique de l'ingénieur ,mars 2000 ,M4540
- [6] Hervé SASSOULAS, traitements thermiques des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur, 1997, M1115.
- [7] Thèse EVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE D'UN ACIER INOXYDABLE LEAN DUPLEX LORS DU VIEILLISSEMENT Jean-Yves Maetz HAL
- [8] la microstructure des aciers et des fontes Genése et interpretation Madeleine Durand-Charre Institut National polytechnique de Grenoble
- [9] L'emboutissage des aciers, Paris, Dunod, 2010.Alain, Col, 2010),
- [10] (en) M.D Abramoff et paulo J. Magalhaes, « image processing with image J ' » [archive], sur Biophotonics international, 2004 (consulté le 30 aout 2021)