

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Par :

**Chiboune Kamel**

**Thème**

---

***L'Analyse de l'effet de l'essai de traction sur la déformation de l'acier***

---

Soutenu le 22/09/2021 devant le jury composé de:

Melle ADJOUADI Noura	Président
Mr. BENSALD Nasreddine	Rapporteur
Mr. BOUTAANI Mohamed Said	Examineur

**Année Universitaire 2020-2021**

# Remerciement

Je remercie DIEU le tout puissant, qui m'a éclairé le chemin de la science et de la connaissance et m'a aidé à accomplir ce devoir et m'a accordé la chance pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier le Dr BENSAID qui a dirigé se mémoire dans la continuité de mes études. Tout au long de cette année.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants, collègues et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes études et travaux.

Un remerciement spécial pour mes **parents**, mes frères, et toute ma famille pour leurs soutiens et encouragements.

Enfin, je remercie tous mes amis pour leurs sincères amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance (DADA, TARIK, RAMTANE, YOUVA, SYPHAX, SMAIL ...).

A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

## Résumé.

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement de l'acier soumis à l'essai de traction simple. En s'appuyant sur les résultats extraits de cet essai et sur des théories concernant les domaines élastique et plastique de l'acier on peut déterminer plusieurs caractéristiques concernant l'acier comme le module d'YOUNG, la limite d'élasticité et le coefficient de poisson. On a pu trouver des résultats intéressants tels que l'influence de certains paramètres sur le mode d'usinage et l'influence des contraintes résiduelles durant l'opération de tournage.

## المخلص

الهدف من هذا العمل هو دراسة سلوك الصلب الخاضع لاختبار الشد البسيط. من خلال الاعتماد على النتائج المستخلصة من هذا الاختبار

وعلى النظريات المتعلقة بالمجالات المرنة والبلاستيكية للفولاذ، يمكن تحديد العديد من الخصائص المتعلقة بالفولاذ مثل معامل يونغ وحدة المرونة ونسبة بواسون. تمكنا من العثور على نتائج مثيرة للاهتمام، مثل تأثير معلمات معينة على طريقة المعالجة وتأثير الضغوط المتبقية أثناء عملية الدوران.

## Table des matières

Remerciement	
Résumé	
Sommaire	
Liste de figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature des symboles	
Introduction Générale	

### Chapitre 1

<b>I. Usinage des matériaux par Tournage</b>	<b>2</b>
I.1 Concept de Tournage	2
I.1.1 Définition	2
I.1.2 Mouvement Pièce/Outil	2
I.1.3 Composition d'un tour parallèle	3
I.1.4 Les outils	4
I.1.5 Opérations de tournage	5
I.1.6 Conditions de Coupe	5
I.2 Le Moletage	6
I.2.1 Définition	6
I.2.2 Principe	7
I.3 Les matériaux usinés par tournage	7
I.4 L'acier	8
I.4.1 Définitions des aciers	8
I.4.2 Les différents types des aciers	9
I.4.3 Les propriétés des aciers	11
I.4.4 Identification des aciers	12

### Chapitre 2

<b>II. Essai de traction</b>	<b>15</b>
II.1 Essais mécanique	15
II.1.1 Essai de dureté	15
II.1.2 Essai de compression	16
II.1.3 Essai de flexion	17
II.2 L'essai de traction	18
II.2.1 Définition	18

II.2.2	Courbe obtenue .....	20
II.2.3	Certaines caractéristiques déterminées par l'essai de traction. ....	21
II.2.4	Le comportement des matériaux. ....	22
II.2.5	Loi de HOOKE:.....	24
II.2.6	Module de Young.....	24
II.2.7	Le coefficient de poisson.....	25
II.2.8	Le module de cisaillement.....	26
II.3	Les contraintes résiduelles.....	26
II.3.1	Définition générale des contraintes résiduelles .....	27
II.3.2	Production des contraintes résiduelles.....	27
II.3.3	Effets mécaniques.....	28
II.3.4	Effets thermiques .....	29
II.3.5	Effets d'origine métallurgique .....	30
II.3.6	Effets des contraintes résiduelles sur les performances d'une composante .....	30
II.4	L'érouissage .....	30
II.5	Critères de Plasticité .....	31
II.5.1	Critère de Tresca.....	31
II.5.2	Critère de Von-Mises .....	33

### *Chapitre 3*

<b>III.</b>	<b>Réalisation de l'essai de traction.....</b>	<b>35</b>
III.1	Description de la machine de tournage.....	35
III.2	Description de la machine de traction.....	36
III.3	Les étapes de l'essai .....	37
III.3.1	Réalisation des éprouvettes. ....	37
III.3.2	L'essai de traction .....	38
III.4	Résultats obtenus et discussion .....	41
III.5	Calcul du coefficient d'érouissage .....	49
III.6	Calcul du coefficient de poisson.....	51
III.7	Calcul du coefficient de striction .....	52
	Conclusion générale :.....	53

## Liste de figures

### Chapitre 1

Figure I-1: Surfaces réalisées par le tournage	2
Figure I-2: Les mouvements de coupe dans le Tournage.	3
Figure I-3: Les composants d'un tour parallèle.	3
Figure I-4: Différents types d'outils	4
Figure I-5: Les différentes opérations de tournage	5
Figure I-6: appareil à moleter (molette)	6
Figure I-7: surface cylindrique avec moletage croisé	7
Figure I-8: Acier de construction non allié c35 calibre à froid – rond	9
Figure I-9: Tige filetée en acier allié	10

### Chapitre 2

Figure II-1: Schéma explicatif de l'essai de dureté Brinell.	15
Figure II-2: Schéma explicatif de l'essai de dureté Vickers	16
Figure II-3: Essai de Compression	17
Figure II-4: Essai de flexion « trois points » d'une poutre.	18
Figure II-5: Eprouvette soumise à l'essai de traction	19
Figure II-6: Courbe de la contrainte en fonction de la déformation	20
Figure II-7: Courbe rationnelle de traction	21
Figure II-8: Courbe contrainte-déformation du comportement fragile	23
Figure II-9: Courbe contrainte-déformation du comportement ductile	23
Figure II-10: Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire	24
Figure II-11: Evolution des contraintes pendant la coupe	28
Figure II-12: Evolution des contraintes pendant la coupe	29
Figure II-13: Observation de l'effet de l'érouissage dans l'essai de traction-compression	31
Figure II-14: Représentation du critère de Tresca dans l'espace.	32
Figure II-15: Représentation du critère de Von Mises dans l'espace.	34

### Chapitre 3

Figure III-1: Tour parallèle modèle SN 40 B.	36
Figure III-2: la machine de traction ZWICK	37
Figure III-3: Eprouvette utilisée à l'essai de traction.	38
Figure III-4: Extensomètre de la machine de traction Zwick.	39
Figure III-5: Ecran d'affichage du logiciel testXpert.	39
Figure III-6: Eprouvette de traction après rupture.	40
Figure III-7: Courbe de traction de l'éprouvette N°1	41
Figure III-8: Courbe de traction de l'éprouvette N°2	42

Figure III-9: Courbe de traction de l'éprouvette N°3	43
Figure III-10: Courbe de traction de l'éprouvette N°4	44
Figure III-11: Courbe de traction de l'éprouvette N°5	45
Figure III-12: Courbe de traction de l'éprouvette N°6	46
Figure III-13: Courbe de traction de l'ensemble des éprouvettes testées	47
Figure III-14: Tracé de la courbe $\ln(\sigma) = f(\ln(\epsilon_p))$ ,	50
Figure III-15: Valeurs des constantes K et n de chaque éprouvette	51

## Liste des tableaux

Tableau 1: Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tableau 2: Valeurs du coefficient de poisson de quelques matériaux	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tableau 3: Les résultats obtenus des courbes de traction de chaque éprouvette	48
Tableau 4: Le coefficient de poisson de chaque éprouvette	51
Tableau 5: Le coefficient de striction de chaque éprouvette	52

## Nomenclature des symboles

L	: Longueur instantanée .....	(mm)
L0	: Longueur entre repère .....	(mm)
A%	: Allongement relatif total .....	(%)
$\epsilon\%$	: Allongement relatif .....	(%)
Re	: Résistance à la traction .....	(MPa)
$\sigma$	: contrainte .....	(MPa)
Rm	: Résistance à la rupture .....	(MPa)
F	: Force appliquée .....	(N)
Z%	: Coefficient de striction .....	(%)
Az	: Allongement localisé de striction .....	(mm)
Ar	: Allongement jusqu'au maximum de la charge .....	(mm)
Lu	: Longueur de l'éprouvette après rupture .....	(mm)
Su	: Diamètre après rupture .....	(mm)
E	: Module d'Young.....	(MPa)
S0	: surface de l'éprouvette initiale .....	;;..... (mm <sup>2</sup> )
S	: Surface instantanée de l'éprouvette.....	(mm <sup>2</sup> )
K	: coefficient de résistance.....	(Mpa)
$\nu$	: Coefficient de poisson	
n	: Coefficient d'écrouissage	



*Introduction générale.*

Les aciers sont présents partout dans notre quotidien et sont utilisés dans de nombreux secteurs d'activités. Cependant, la caractérisation mécanique des aciers s'effectue le plus souvent par de simples essais uni-axiaux. Il s'agit par exemple d'essai de traction pour déterminer des caractéristiques mécaniques simples telles que le module d'Young, la limite d'élasticité, l'allongement ou la contrainte à la rupture.

L'essai de traction est l'un des plus utilisé pour caractériser le comportement mécanique statique d'un matériau. Il est simple de mise en œuvre et il permet d'accéder à des paramètres particulièrement importants, très largement utilisés dans la communauté académique et industrielle pour qualifier les matériaux de manière plus précise cette expérience de physique permet de déterminer le comportement élastique d'un matériau et de mesurer le degré de résistance à la rupture.

Notre travail consiste à étudier le comportement de l'acier de construction en le soumettant à un essai de traction simple, on va ensuite déterminer les caractéristiques de cet acier et essayer de comprendre le phénomène de la rupture de ce matériau.

- *Ce mémoire est structuré en trois (03) chapitres :*

**Chapitre I :** Ce chapitre présente une étude bibliographique sur les principales généralités sur les aciers et leurs désignations, de même un aperçu sur le tournage et les différents paramètres liés à ce procédé d'usinage si important dans l'industrie.

**Chapitre II :** Dans ce chapitre nous donnerons un aperçus sur quelques essais mécanique puis nous présenterons la conception du dispositif de traction simple et expliquer plus en détail les phénomènes liés à cet essai.

**Chapitre III :** Dans ce chapitre nous présenterons les résultats des essais de traction. On discutera alors le comportement mécanique et nous dévoilerons les caractéristiques mécaniques de ce matériau.

En fin, en concluant notre travail par une conclusion général.

## I. Usinage des matériaux par Tournage :

### Introduction

Le tournage présente l'un des procédés d'usinage les plus importants dans l'industrie. Ce chapitre a pour objet d'expliquer les principales généralités de tournage, ainsi que d'expliquer les paramètres liés à ce procédé, puis de donner des définitions sur les aciers et leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Les caractéristiques pouvant être retenues pour la classification des aciers sont nombreuses. Couleur, masse volumique, densité, conductibilité thermique ou conductibilité électrique. Permettent de traduire les propriétés physiques de ces matériaux. Sa résistance à la corrosion par les agents chimiques, et surtout par l'oxygène de l'air.

#### I.1 Concept de Tournage :

##### I.1.1 Définition :

Le tournage est un procédé d'usinage permettant l'obtention des surfaces de révolution intérieures et extérieures, des surfaces planes ainsi que d'autres surfaces telles que celles obtenues par filetage...[1]



Figure I-1: Surfaces réalisées par le tournage[1]

##### I.1.2 Mouvement Pièce/Outil :

Pour engendrer une surface de révolution sur un tour parallèle, il faut appliquer à la pièce et à l'outil deux mouvements conjugués:

- **à la pièce** : un mouvement circulaire continu rapide donné par sa rotation: il prend le nom de **Mouvement de coupe** et est désigné par **Mc**.

- à l'outil : un mouvement généralement rectiligne uniforme lent généré par sa translation. Il prend le nom de **mouvement d'avance** et est désigné par **Ma** ou **Mf**.

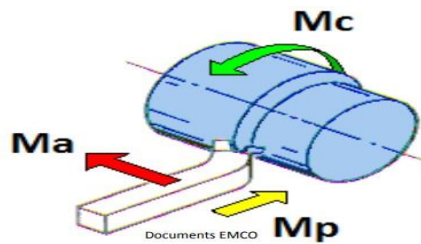


Figure I-2: Les mouvements de coupe dans le Tournage.[1]

Pour que l'outil produise une surface par enlèvement de copeau, un réglage de position est nécessaire. Ce troisième mouvement est appelé **mouvement de pénétration** ou prise de passe et est désigné par **Mp**.

Il existe plusieurs types de machines de tournage, on trouve les tours spéciaux (automatiques et semi-automatiques), et les tours parallèles.

### 1.1.3 Composition d'un tour parallèle :

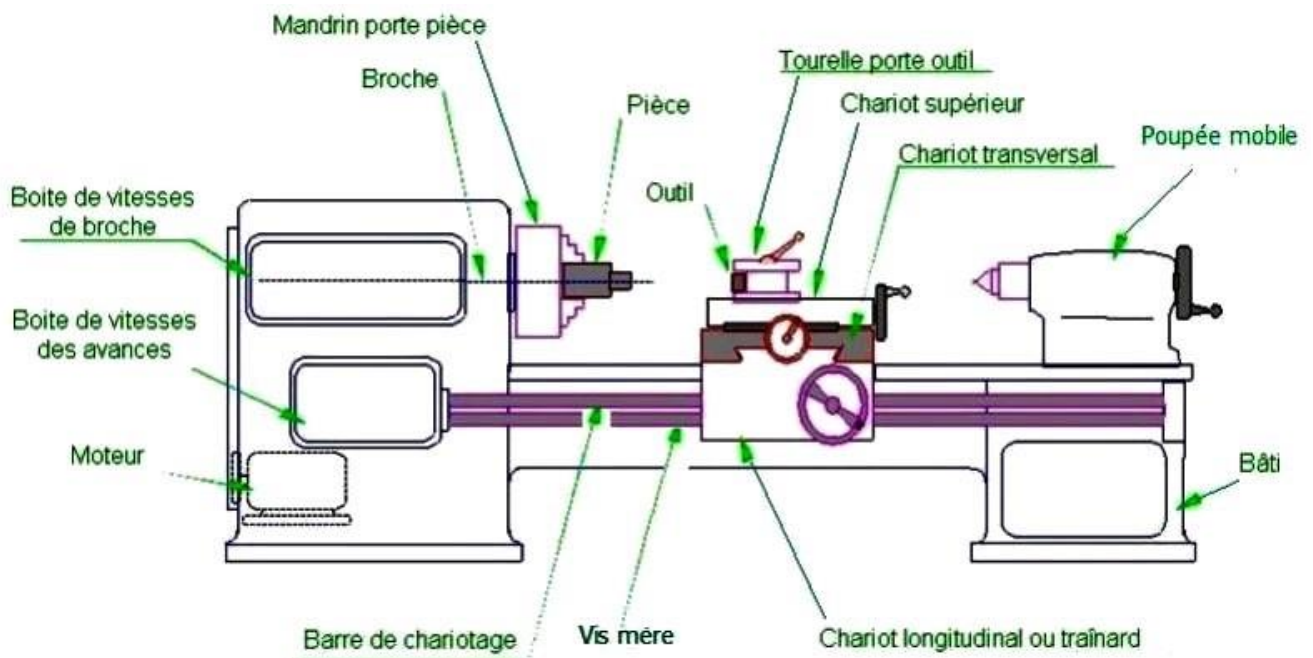


Figure I-3: Les composants d'un tour parallèle.[1]

1.1.4 Les outils



Figure I-4: Différents types d'outils [2].

**Acier rapide (noté ARS ou HSS) :** Ces outils sont utilisés pour des petites séries. Leur utilisation est rentable pour les usinages engendrant des vibrations ou des chocs relativement importants à l'outil. Ils conviennent bien aux matériaux tel que l'aluminium, le laiton, le plastique...etc.

**Les outils en carbure:** Résistent mieux à l'usure, Résistent mieux à la température. Sont plus durs que les outils en ARS.[2]

1.1.4.1 Composition de l'outil

Un outil de coupe consiste en un corps et une queue. Un corps est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. La queue de l'outil est la partie par laquelle celui-ci est maintenu. La partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe (les arêtes, la face de coupe et les faces de dépouille) est appelée partie active.

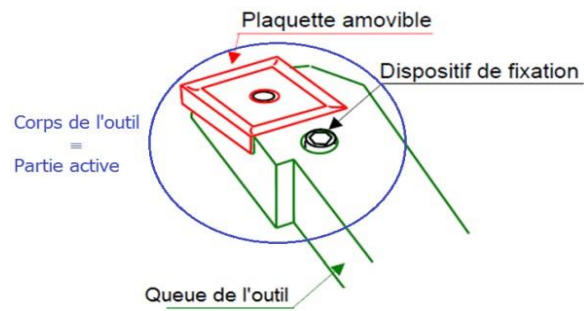


Figure I-5: les composants de l'outil [2].

### I.1.5 Opérations de tournage :

Le tournage permet de faire plusieurs opérations, par exemple :

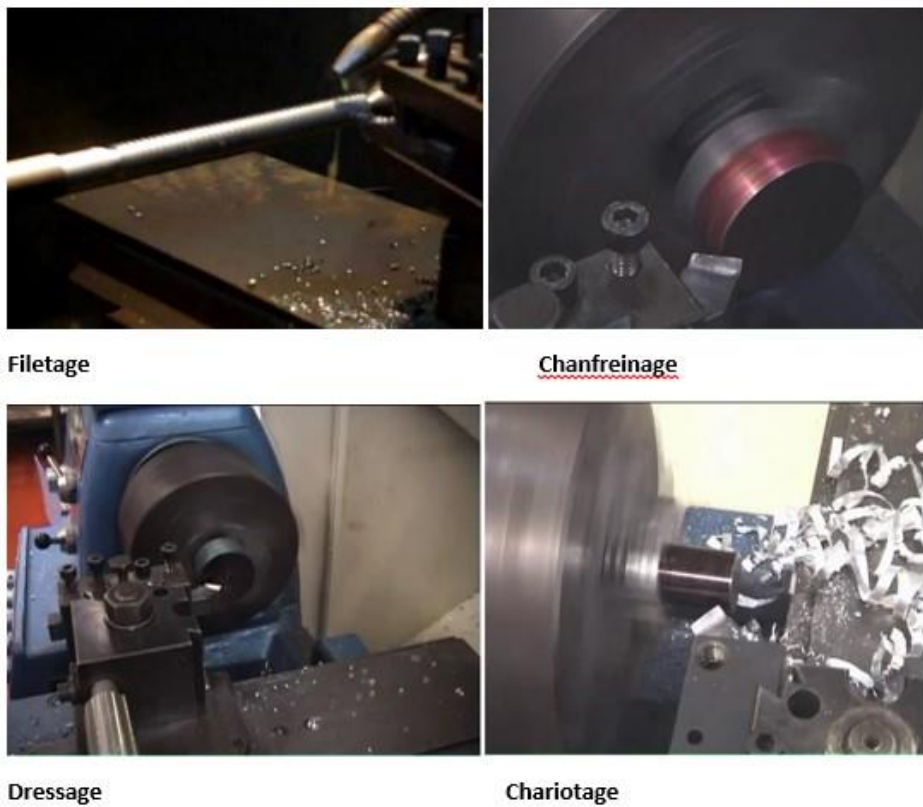


Figure I-6: Les différentes opérations de tournage [2].

### I.1.6 Conditions de Coupe :

Pour une opération de tournage, les paramètres de coupe sont les suivants:

- **V<sub>c</sub>**: vitesse de coupe en m/min.

- **p** : profondeur de passe en mm (noté encore « a » ou « ap »).
- **f** : avance en mm/min.

Et les paramètres à régler sur la machine sont :

- **f** : avance en mm/min.
- **N** : la vitesse de rotation de la pièce en tr/min.

Le choix de la vitesse de coupe dépend de plusieurs paramètres, à savoir:

- Le matériau de la pièce à usiner.
- L'opération de tournage.
- Le matériau de l'outil.
- La profondeur de passe. [2]

## 1.2 Le Moletage :

### 1.2.1 Définition :

Le moletage est une technique d'usinage qui consiste à réaliser des stries sur la surface totale ou partielle d'une pièce. Si le terme moletage désigne le procédé d'usinage, il désigne également les petites stries qui en résultent. La réalisation d'un moletage permet d'améliorer l'adhérence d'une pièce pour en faciliter sa manœuvre ou son adhérence avec un autre composant, mais elle peut tout aussi bien être simplement décorative.

Cette opération est généralement réalisée sur un tour mécanique, à l'aide de différents outils de moletage adaptés à la pièce que le tourneur souhaite usiner. [3]



**Figure I-7:** Appareil à moleter (molette)[3].

### 1.2.2 Principe

Le moletage peut être réalisé de deux manières. Soit par enlèvement de matière sur la pièce à usiner, soit par déformation. Il s'agira, dans ce dernier cas, d'écraser la matière pour y inscrire les stries. Cette méthode pouvant engendrer la déformation du centre des pièces usinées, il est impératif de la réaliser sur des pièces en cours de production, et non des produits finis.

Il y a deux types de moletage :

- le moletage droit, où les stries sont parallèles.
- le moletage croisé, où les stries se croisent.



*Figure I-8: surface cylindrique avec moletage croisé [3]*

### 1.3 Les matériaux usinés par tournage :

Le Tournage permet d'usiner plusieurs types de matières, les aciers (aciers non alliés, faiblement alliés et fortement alliés) les aciers inoxydables, les métaux non ferreux (l'Aluminium, le Cuivre et le bronze) et les fontes etc... [4]

- **L'acier.**

L'acier est l'un des principaux matériaux utilisés par l'industrie. On le retrouve partout. L'acier est proposé dans différents alliages, chaque nuance se distinguant par ses propriétés, en particulier en matière de dureté, de résistance à la corrosion, de déformabilité et de soudabilité.

- **Acier inoxydable.**

Qui dit longévité, pense généralement acier inoxydable. La proportion de nickel et de chrome présents dans l'inox améliore la résistance à la corrosion, c'est-à-dire à la rouille. On

retrouve ainsi l'acier inoxydable dans les secteurs de la médecine, de l'industrie alimentaire ou de la chimie. Les différents alliages se distinguent, notamment, les uns des autres par leur dureté et leur soudabilité.

- **L'aluminium.**

L'aluminium a une faible densité. Il est donc très léger, ce qui explique pourquoi il est souvent utilisé pour les applications nécessitant un poids réduit, par exemple l'aéronautique et la construction navale. L'aluminium résiste également à la corrosion, il est facile à façonner et il conduit bien la chaleur et l'électricité. Sa longévité extrême justifie son prix relativement élevé par rapport aux autres métaux. L'esthétisme de l'aluminium est indéniable, faisant de lui une option séduisante pour beaucoup d'applications.

- **Le cuivre.**

Le cuivre est l'un des premiers métaux à avoir été utilisés par l'homme. Et il l'est encore aujourd'hui. Le cuivre doit notamment son succès à une excellente conductibilité thermique et électrique. On le retrouve ainsi souvent en électrotechnique. D'un point de vue mécanique, le cuivre est relativement souple et donc facile à transformer. Ce métal séduit également par une bonne résistance aux influences environnementales, par exemple aux acides et produits alcalins.[4]

#### *1.4 L'acier.*

##### *1.4.1 Définitions des aciers.*

L'acier est un alliage métallique ferreux, qui est d'ailleurs principalement composé de fer, l'élément additionnel étant le carbone, qui n'est présent qu'à l'état de trace infime. Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre environ 0.005% et 1.5% en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2%. Portant, c'est bien cette teneur en carbone, si infime soit-elle, qui confère à l'acier (de manière assez complexe) les propriétés que l'on lui reconnaît. Par exemple, plus la teneur en carbone d'un acier est importante plus l'acier est dur.[5]



### 1.4.2 Les différents types des aciers

Et, comme c'est le cas pour d'autres alliages, il n'existe pas un acier, mais des aciers. On en répertorie même quelque 3.000 nuances, sans compter celles qui sont créées au jour le jour, sur mesure.

#### 1.4.2.1 Aciers non alliés

##### 1.4.2.1.1 Aciers non alliés d'usage général :



*Figure I-9: Acier de construction non allié c35 calibre à froid – rond [5]*

Ils sont destinés à la construction soudée, à l'usinage, au pliage, ... On distingue:

**Le type S** qui correspond à un usage général de base (construction de bâtiment, ...)

**Le type E** qui est utilisé dans la construction mécanique

La désignation de ces aciers comprend la lettre du type d'acier suivi de la valeur de la limite élastique (Re) en méga-pascal (MPa). S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre G. La désignation peut être complétée par des indications venant supplémentaires (pureté, application dédiée, ...)

Exemples de désignation d'aciers d'usage général : **S185** (anciennement A33), Re = 185 MPa. **E295** (anciennement A50), Re = 295 MPa. **GE295**, acier moulé, Re = 295 MPa.

##### 1.4.2.1.2 Aciers non alliés spéciaux (type C)

Leur composition est plus précise et plus pure et correspond à des usages définis à l'avance. Leurs applications courantes sont les forets (perceuses), ressorts, arbres de transmission, matrices (moules), ... Leur désignation comprend la lettre C suivie de la teneur en carbone multipliée par 100. S'il s'agit d'un acier moulé, on précède la désignation de la lettre G

Exemples de désignation d'acier au carbone type C : **C45**, acier non allié comportant un taux de 0.45% de carbone. **GC22**, acier moulé non allié comportant un taux de 0.22% de carbone

#### 1.4.2.2 ACIERS ALLIÉS

##### 1.4.2.2.1 Aciers faiblement alliés.



*Figure I-10: Tige filetée en acier allié [5]*

Aucun élément d'addition ne dépassant 5 % en masse, ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance.

Exemple de désignation normalisée :

**35NiCrMo16** : contient 0.35% de carbone, 4% de nickel, du chrome et molybdène en plus faible teneur. Cet acier présente une bonne tenue aux chocs ainsi qu'une haute résistance mécanique jusque 600 °C.

##### 1.4.2.2.2 Aciers fortement alliés

Au moins un élément d'addition dépasse les 5 % en masse, destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, réfractaires, maraging (très haute résistance, utilisés dans l'aéronautique), Hadfields (très grande résistance à l'usure), Invar (faible coefficient de dilatation).

Un exemple de désignation normalisée : **X2CrNi18-9** (c'est un acier inoxydable).

Les aciers rapides (high speed steels, HSS) font partie de cette famille.

#### 1.4.2.2.3 Aciers inoxydables

L'acier inoxydable est une des trois grandes familles d'aciers qui présente une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (déformation irréversible). C'est un acier essentiellement allié au chrome, élément qui lui confère la propriété d'inoxidabilité, et au nickel, élément qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques.

Ses applications sont multiples: chimie, nucléaire, alimentaire, mais aussi coutellerie et équipements ménagers. Ces aciers contiennent au moins 10,5 % de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

#### 1.4.2.2.4 Aciers multiphasés

Ces aciers sont conçus suivant les principes des composites : par des traitements thermiques et mécaniques, on parvient à enrichir localement la matière de certains éléments d'alliage. On obtient alors un mélange de phases dures et de phases ductiles, dont la combinaison permet l'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques. On citera, par exemple :les aciers Dual Phase qui sont la déclinaison moderne de l'acier damassé, mais où la distinction entre phase dure (la martensite) et phase ductile (la ferrite), se fait plus finement, au niveau du grain ;

Les aciers duplex formés de ferrite et d'austénite dans des proportions sensiblement identiques les aciers TRIP (TRansformation Induced Plasticity), où la ferrite se transforme partiellement en martensite après une sollicitation mécanique. On débute donc avec un acier ductile, pour aboutir à un acier de type Dual Phase. Les aciers damassés où des couches blanches ductiles pauvres en carbone absorbent les chocs, et les noires, plus riches en carbone, garantissent un bon tranchant.[5]

#### 1.4.3 *Les propriétés des aciers*

Les propriétés d'un acier varient énormément en fonction de sa composition chimique et du traitement thermomécanique appliqué pendant le processus de fabrication. Ces deux caractéristiques déterminent sa microstructure et les traitements de surface interviennent également dans ses propriétés.[6]

#### *1.4.3.1 Propriétés physique*

Les propriétés construction physiques de l'acier en font un matériau particulièrement apte à la métallique et ces différentes propriétés sont les suivantes: **Densité, Dilatation, Conductivité, Soudabilité, Malléabilité, et ductilité.**

#### *1.4.3.2 Propriétés mécanique*

Les caractéristiques mécaniques de l'acier qui font l'objet de garanties dans les normes de produit ou qui attestent la conformité d'une fabrication sont déterminées suivant des processus normalisés, ces propriétés sont les suivantes : **Traction, Compression, Cisaillement, Résistance à la fatigue, Dureté, Résistance au choc, et le Fluage.**[6]

#### *1.4.4 Identification des aciers*

La désignation des aciers a évolué ces dernières années et certains documents peuvent faire référence à des aciers nommés selon une ancienne désignation, aussi nous présentons pour information l'identification des aciers selon les anciennes normes. Les normes applicables sont évidemment les normes actuelles.[7]

##### *1.4.4.1 Les anciennes normes*

Les aciers ont d'abord été désignés selon leur ductilité : extra doux, doux, semi-doux, dur,...

Puis par leur résistance à la rupture  $R_r$  exprimée en hb (hectobar), les aciers de classe A Ensuite selon la limite élastique  $R_e$ , les aciers de classe E Ainsi, un acier A37 est équivalent à un E24

Par la suite, la désignation a pris en compte la teneur des différents éléments.

Pour les aciers non alliés : la teneur en carbone en pourcentage multiplié par 100 Deux séries en fonction de la pureté de l'acier :

Série CC :

- CC 10 : teneur en carbone de 0.10%
- CC 20 : teneur en carbone de 0.20%

- CC 35 : teneur en carbone de 0.35%

Série XC : teneur en soufre et phosphore plus basse

- XC 10 : teneur en carbone de 0.09%
- XC 18 : teneur en carbone de 0.19%
- XC 38 : teneur en carbone de 0.38%

Pour les aciers faiblement alliés : la teneur en carbone en pourcentage multiplié par 100, puis les éléments d'alliage avec leur teneur multipliée par 4 ou 10 en fonction de l'élément.

Exemple :

L'acier 30 NCD15 contient 0.30% de carbone, 3.75% de nickel, du chrome et molybdène en plus faible teneur.[7]

#### 1.4.4.2 Les normes actuelles

Les normes actuelles de désignation des aciers définissent les familles suivantes :

◆ **Les aciers non alliés d'usage général** :

Utilisés pour la construction soudée, l'emboutissage, l'ameublement, l'électroménager, ... De type S pour un usage général de base et de type E pour la construction mécanique. La désignation de ces aciers comprend la lettre du type d'acier suivi de la valeur de la limite élastique en Mpa (Re)

S'il s'agit d'un acier moulé, on précède la désignation de la lettre G

Exemple : **S185** (anciennement A33), Re = 185 Mpa **E295** (anciennement A50), Re = 295 Mpa.

**GE295**, acier moulé, Re = 295 Mpa

◆ **Les aciers non alliés spéciaux** : De type C

Leur désignation comprend la lettre C suivie de la teneur en carbone multipliée par 100. S'il s'agit d'un acier moulé, on précède la désignation de la lettre G.

Exemple : **C45**, acier non allié comportant un taux de 0.45% de carbone

**GC22**, acier moulé non allié comportant un taux de 0.22% de carbone

- ◆ **Les aciers faiblement alliés** : Aucun élément d'addition ne dépasse 5%

La désignation reprend la teneur en carbone multipliée par 100, suivie des éléments d'addition et leur pourcentage respectifs multiplié par un facteur spécifique.

Chrome Cr, Cobalt Co facteur 4

Aluminium Al, Beryllium Be facteur 10

Exemple : L'acier **35NiCrMo16** contient 0.35% de carbone, 4% de nickel, du Chrome et du Molybdène en plus faible teneur.

- ◆ **Les aciers fortement alliés** :

Un élément d'addition atteint au moins la teneur de 5% Ils sont désignés par la lettre X, suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100, puis de la désignation des éléments d'addition et leur pourcentage respectif sans facteur multiplicateur.

Exemple : L'acier **X2CrNi 18-9** contient 0.02% de carbone, 18% de chrome et 9% de nickel.[7]

## **Conclusion**

Dans ce chapitre de généralités nous avons parlé du tournage et nous avons expliqués plus en détails ses paramètres, nous avons expliqué comment les aciers sont-ils désignés et nous avons parlé de leurs types et leurs propriétés diverses qui sont en perpétuelles amélioration en quête de découverte en effectuant plusieurs essais bien étudiés.

## II. Essai de traction.

### Introduction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité longitudinal, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces mécanique allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche, on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages.[8]

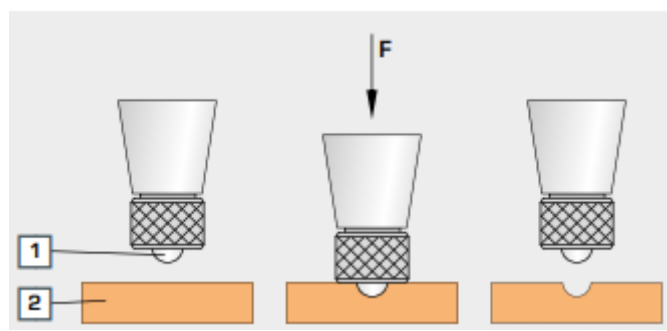
### II.1 Essais mécanique

#### II.1.1 Essai de dureté :

On désigne par le terme de dureté la résistance mécanique qu'un corps oppose à la pénétration d'un autre corps.

##### II.1.1.1 Principe de l'essai de dureté Brinell

Cette méthode d'essai consiste, dans des conditions définies, à enfoncer un corps d'essai normalisé, une bille en métal dur, à l'intérieur du matériau. La surface de l'empreinte laissée est ensuite mesurée optiquement. Puis la surface de l'empreinte est calculée à partir de son diamètre et du diamètre de la bille. La pénétration du corps d'essai entraîne l'apparition d'un état de contrainte triaxiale dans l'éprouvette. [8]



**Figure II-1:** Schéma explicatif de l'essai de de dureté Brinell.[8]

1 : bille en métal dur 2 : éprouvette F force d'essai

La dureté Brinell est calculée à partir de la force d'essai et de la surface de l'empreinte de la section sphérique.

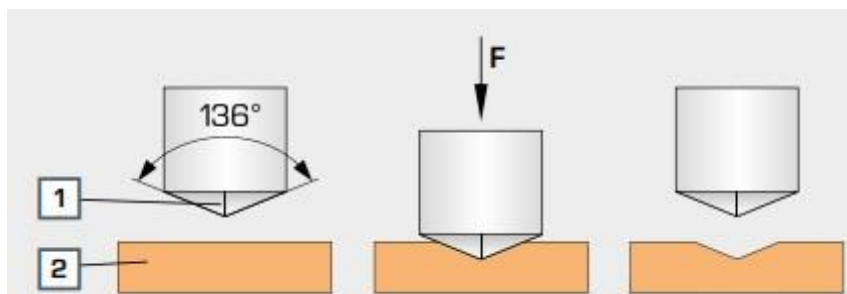
$$HB = \frac{0,102 \times F}{Ab}$$

Avec : B valeur de dureté Brinell, F force d'essai en N, AB surface de l'empreinte en mm<sup>2</sup>

#### II.1.1.2 Principe de l'essai de dureté Vickers

La méthode d'essai est similaire à celle de l'essai de dureté Brinell. Mais à la différence de la méthode Brinell, le corps d'essai utilisé est un diamant de forme pyramidale. La mesure des deux diagonales d1 et d2 et le calcul de la moyenne permettent de déterminer la diagonale de l'empreinte.

La dureté Vickers est le quotient de la force d'essai par la surface de l'empreinte.



*Figure II-2: Schéma explicatif de l'essai de dureté Vickers[8]*

1 : Diamant de forme pyramidale 2 éprouvette 3 forme d'essai

#### II.1.2 Essai de compression :

Un essai de compression mesure la résistance à la compression d'un matériau sur une machine d'essais mécaniques suivant un protocole normalisé. Les essais de compression se font souvent sur le même appareil que l'essai de traction mais en appliquant la charge en compression au lieu de l'appliquer en traction. L'essai de compression comporte un raccourcissement élastique



d'une éprouvette généralement cylindrique et son écrasement au-delà de la limite d'élasticité du matériau.

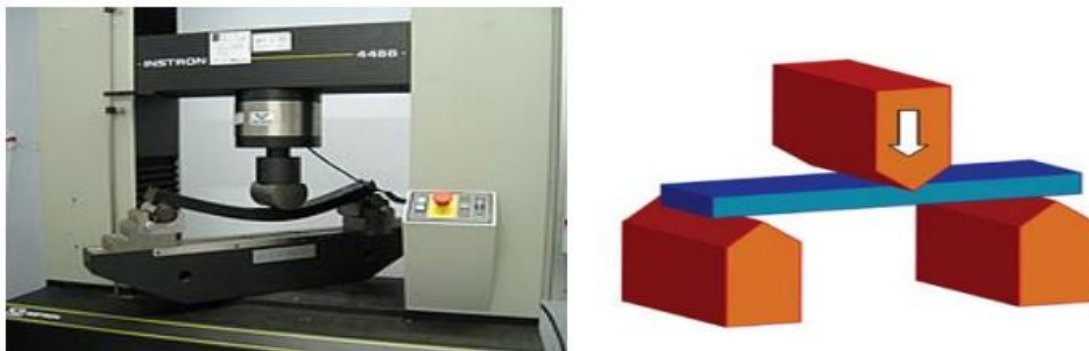
les essais de compression tiennent une place moins importante que les essais de traction dans le contrôle des matériaux métalliques. Mais ils sont toutefois essentiels pour l'étude de matériaux tels que les pierres naturelles, les briques, le béton, le bois de chauffage, etc. Lors de ces essais, l'éprouvette normalisée de coupe transversale connue est soumise à une force de croissance faible dans la direction longitudinale jusqu'à la rupture.[9]



*Figure II-3: Essai de Compression[9].*

### *II.1.3 Essai de flexion*

La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher les deux extrémités de la poutre. Dans le cas d'une plaque, elle tend à rapprocher deux points diamétralement opposés sous l'action. L'essai de flexion d'une poutre est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion. On utilise la flexion dite « trois points » et la flexion dite « quatre points ». [9]



*Figure II-4: Essai de flexion « trois points » d'une poutre.[9]*

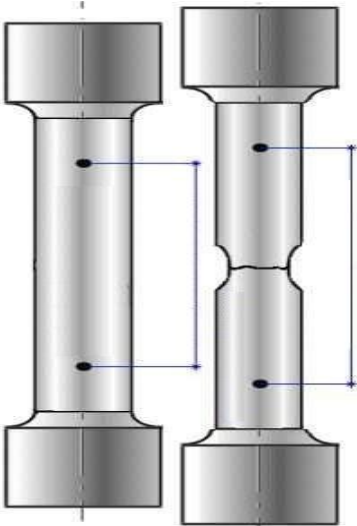
La résistance à la flexion d'un matériau, sous forme de poutre principalement, peut être mesurée par une machine sous différents types de mises en charge. Les mesures des déformations et des contraintes sont réalisées à partir de jauges d'extensomètre et affichées sur un banc de mesure.

## *II.2 L'essai de traction*

L'essai de traction constitue l'essai mécanique le plus classique et le mieux étudié, il consiste à exercer sur une éprouvette, une force croissante ou une déformation constante qui va la déformer progressivement et la rompre.

### *II.2.1 Définition*

Un essai de traction est une expérience de physique **qui** permet de : déterminer le comportement élastique d'un matériau ; mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau ; et ce dans un état de contrainte uniaxiale.[10]



*Figure II-5: Epreuve soumise à l'essai de traction [10]*

### II.2.2 Courbe obtenue

La courbe tracée lors de l'essai est de la forme :  $F(N) = f(\epsilon(\%))$

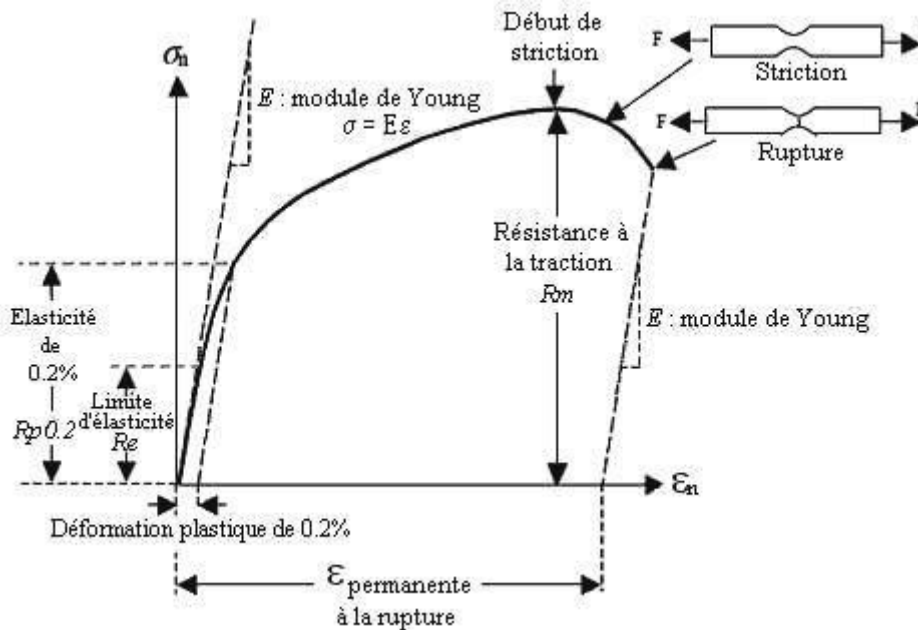


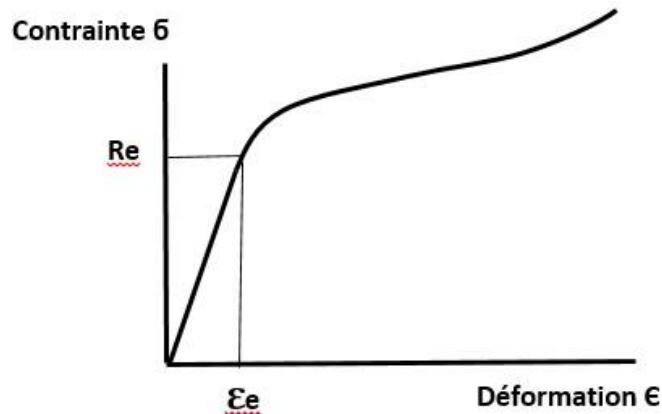
Figure II-6: Courbe de la contrainte en fonction de la déformation[10]

L'application d'une force provoque initialement une **déformation élastique** de l'éprouvette. Cela se traduit sur le diagramme par une droite car la déformation est proportionnelle, pour un métal, à la contrainte (loi de HOOKE). Cette déformation élastique est réversible. Si la contrainte est annulée, l'éprouvette revient instantanément à sa forme initiale. Cette déformation élastique est suivie d'une déformation irréversible (permanente) appelée **déformation plastique**, qui se traduit sur le diagramme par une courbe qui se termine au moment de la rupture de l'éprouvette.

#### II.2.2.1 Courbes conventionnelle et rationnelle de traction.

L'essai de traction nous permet d'obtenir la réponse du matériau sous forme d'une courbe dite courbe de traction du matériau. Dans le cas général, les machines d'essai fournissent une courbe dite conventionnelle puisqu'on l'on rapporte les efforts  $F$  à la valeur initiale  $S_0$  de la section. Cela peut être accepté dans le domaine des petites déformations ( $\epsilon \leq 20\%$ ). Cependant lorsque les déformations deviennent importantes ( $\epsilon \rightarrow \infty$ ), la réduction de la section le devient aussi à cause de l'instabilité plastique à tel point que la contrainte réelle ou vraie  $\sigma_v$  soit

représentée par le rapport de la force à la section instantanée  $S$ . Une courbe rationnelle de traction est donc la représentation graphique de la contrainte vraie  $\sigma_v$  en fonction de la déformation relative  $\varepsilon_v$ . [11]



*Figure II-7: Courbe rationnelle de traction. [11].*

La courbe de traction rationnelle délivre donc des informations plus importantes que l'essai classique. L'intérêt est d'en déduire des lois permettant de modéliser le comportement du matériau. Cependant les propriétés de traction sont souvent définies à partir d'une courbe conventionnelle de traction.

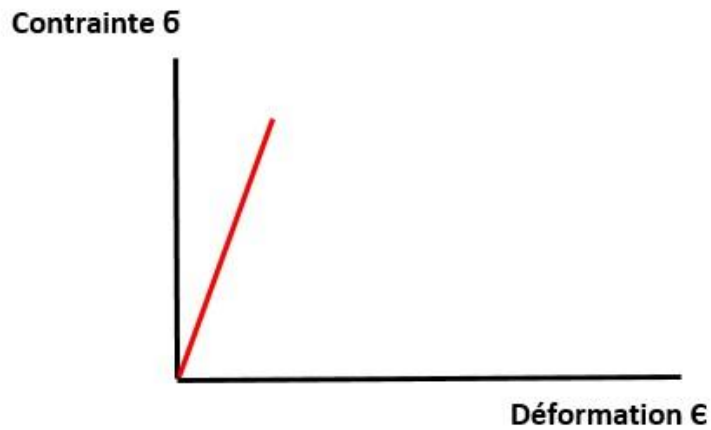
### II.2.3 Certaines caractéristiques déterminées par l'essai de traction.

- **La limite d'élasticité  $R_e$**  : correspond à la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement. En pratique, bien que la définition soit simple, cette limite est difficile à apprécier car le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive. La difficulté de lecture donnerait des interprétations erronées de cette limite d'un laboratoire à l'autre. Pour s'en affranchir, on a déterminé une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% ( $R_e 0,2\%$ ). C'est la contrainte pour laquelle on mesure une déformation plastique de 0,2%.

- **La résistance à la traction  $R_m$**  : se définit comme la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction.
- **L'allongement à la rupture  $\epsilon_r$**  : que l'on peut lire sur le diagramme ou sur l'éprouvette rompue.
- **la rigidité** : est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou les molécules constituant le matériau. On mesure la rigidité principalement par le module d'YOUNG. Plus ce module est élevé, plus le matériau est rigide.
- **la résistance** : caractérise la contrainte maximale qu'un matériau supporte avant de se rompre. Cette résistance est fonction de l'intensité des liaisons mais également de la forme des pièces ou de ses défauts.
- **la ductilité** : correspond à la capacité d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de se rompre. Plus l'allongement à la rupture est élevé, plus le matériau est considéré comme ductile. A l'opposé, lorsque la déformation permanente est très réduite ou nulle, on parle d'un matériau fragile. Un matériau fragile peut présenter une résistance très élevée.[11]

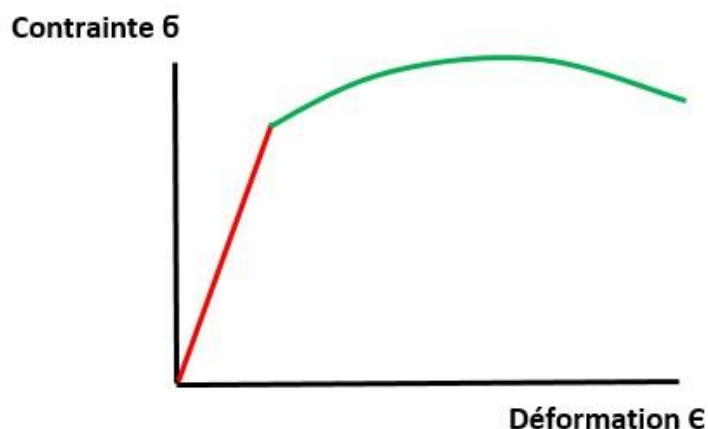
#### II.2.4 *Le comportement des matériaux.*

- **Un comportement fragile.** Le matériau ne présente pas de domaine de déformation plastique, la rupture se produit alors que les déformations sont purement élastiques. Le verre, les céramiques et les polymères thermodurcissables sont des matériaux à rupture fragile. Dans le cas des céramiques dentaires, la phase cristalline dans sa matrice vitreuse constitue l'obstacle majeur aux dislocations. La limite élastique de ces matériaux est très élevée car le déplacement des dislocations est très difficile à température ambiante. Cela est dû à la présence de liaisons covalentes et à l'alternance du signe des ions qui entraîne une modification des plans de glissement.[12]



*Figure II-8: Courbe contrainte-déformation du comportement fragile[12]*

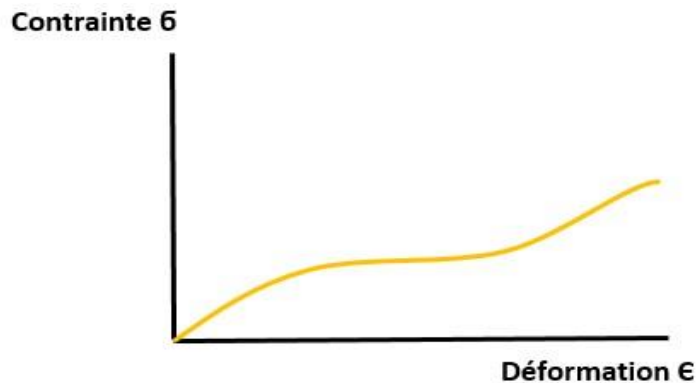
- **Un comportement ductile.** Une déformation plastique irréversible suit la déformation élastique réversible. La majorité des métaux et des alliages et certains polymères thermoplastiques présentant ce type de comportement. Dans les métaux, les liaisons interatomiques ne constituent pas un obstacle majeur à la propagation des dislocations. Les métaux sont donc des matériaux ductiles avec de faibles limites d'élasticité. Aussi, divers procédés permettent d'élever la limite élastique des métaux par blocage des dislocations. Parmi les obstacles qui permettent un durcissement des métaux on distingue : les atomes étrangers, les autres dislocations, les particules précipités et les joints de grains (voir chapitre sur les alliages dentaires).



*Figure II-9: Courbe contrainte-déformation du comportement ductile[12]*

- **Un comportement élastique non linéaire.** La déformation élastique n'est pas proportionnelle à la charge qui la provoque. Un tel comportement est caractéristique de certains polymères thermoplastiques et des élastomères. La force de rétraction élastique est engendrée par des mouvements browniens

(agitation thermique des molécules) qui agitent les segments de chaînes macromoléculaires et cette force est très faible.[12]



*Figure II-10: Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire[12]*

### II.2.5 Loi de HOOKE:

Dans la première partie rectiligne de la courbe, il y a proportionnalité entre la contrainte et la déformation (au moins en première approximation), c'est la loi de HOOKE, la caractéristique est la pente de cette droite qui est le module d'élasticité.

L'essai de traction n'est pas assez précis en général pour la mesure du module d'élasticité car même si l'on amplifie suffisamment, de petites déformations parasites diminuent la valeur de la pente en plus des écarts à la loi de proportionnalité.

Ces écarts sont attribués à des micro-déformations plastiques pour les aciers doux et à des contraintes résiduelles pour certains aciers traités qui conduisent à une plastification progressive de l'éprouvette.[13]

Rappel des définitions des constantes élastiques et leurs relations :

### II.2.6 Module de Young

Le **module de Young** ou **module d'élasticité (longitudinale)** ou encore **module de traction** est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et la déformation pour un matériau élastique isotrope.

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement



relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte. La loi d'élasticité est la loi de Hooke :

$$\sigma = E \varepsilon$$

Où :

- $\sigma$  est la contrainte (en unité de pression),
- $E$  est le **module de Young** (en unité de pression),
- $\varepsilon$  est l'allongement relatif (adimensionnel).

Un matériau dont le module de Young est très élevé est dit rigide. L'acier, l'iridium, le diamant, sont des matériaux très rigides, l'aluminium et le plomb le sont moins, les matières plastiques et organiques sont généralement peu rigides.

D'après l'équation aux dimensions, le module de Young est homogène à une pression, ou plus précisément une contrainte. L'unité internationale est donc le pascal (Pa). Cependant, en raison des valeurs élevées que prend ce module, il est en général donné en **mégapascal (MPa)** ou newton par millimètre carré (**N/mm<sup>2</sup>**).[13]

Matériau	Module d'Young	Limité d'élasticité en traction
Acier de construction non allié	210 000 MPa	285-355 MPa
Alliage d'aluminium	74 000 MPa	240 MPa
Acier faiblement allié à haute résistance	210 000 MPa	750-1450 MPa
Titane	116 000 MPa	260 MPa
Cuivre	100 000 MPa	40 MPa

**Tableau 1:** Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire [14]

### II.2.7 Le coefficient de poisson

Le coefficient principal de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué.

Désigné par la lettre grecque  $\nu$ , le coefficient de Poisson fait partie des constantes élastiques. Il est théoriquement égal à 0,25 pour un matériau parfaitement isotrope et est en pratique très proche de cette valeur.

Dans le cas d'un matériau isotrope, le coefficient de Poisson permet de relier directement le module de cisaillement  $G$  au module de Young  $E$ .

Le coefficient de Poisson est toujours inférieur ou égal à  $1/2$ . S'il est égal à  $1/2$ , le matériau est parfaitement incompressible.[14]

Alliages	
Matériau	$\nu$
Acier de construction	0,27 – 0,30
Acier inoxydable	0,30 – 0,31
Fontes	0,21 – 0,26
Laiton	0,37

**Tableau 2:** Valeurs du coefficient de poisson de quelques matériaux [14]

### II.2.8 Le module de cisaillement

Module de rigidité également appelé module de Coulomb ( $\sim 81$  GPa pour l'acier), il est défini comme le rapport de la contrainte de cisaillement à la déformation de cisaillement. Il est également connu sous le nom de module de rigidité et peut être désigné par  $G$  ou moins communément par  $S$  ou  $\mu$ . L'unité SI du module de cisaillement est le Pascal (Pa).[14]

Il existe une relation entre ces 3 paramètres :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

### II.3 Les contraintes résiduelles

La durée de vie d'une composante structurale est généralement déterminée par l'interaction entre les défauts de la composante et les contraintes auxquelles elle est exposée. Les contraintes sont la combinaison de celles appliquées en service et de celles développées lors de la fabrication, communément appelées contraintes résiduelles. Ces dernières peuvent être bénéfiques et/ou destructives pour la performance d'une composante. Les différents procédés et les différentes méthodes utilisés lors des étapes de fabrication d'une composante jouent donc

tous un rôle important dans la distribution finale des contraintes résiduelles. De ce fait, la distribution des contraintes résiduelles induites lors de l'usinage peut affecter les caractéristiques mécaniques d'une composante. Comme l'usinage implique des efforts ainsi que des phénomènes thermiques importants, il est donc possible que la composante ne soit pas en mesure de résister aux charges et qu'il se produise alors une déformation permanente appelée distorsion.[15]

### *II.3.1 Définition générale des contraintes résiduelles*

Les contraintes résiduelles sont des tensions ou des compressions qui existent dans un volume de matière sans aucune application de force externe (force appliquée ou changement de température). En d'autres mots, les contraintes résiduelles sont des contraintes auto-équilibrées présentes dans le matériel sous des conditions de température uniforme et sans aucune force externe.[15]

### *II.3.2 Production des contraintes résiduelles*

Selon la littérature, les contraintes résiduelles résultent de déformations élastiques ou plastiques non-uniformes qui, de manière permanente, provoquent des incompatibilités dans l'état de déformation (Physique & Industrie, 2006). Une seconde définition dit que les contraintes résiduelles proviennent des mauvais ajustements entre les différentes régions d'un matériau et ce, à différents niveaux : macroscopique et microscopique.

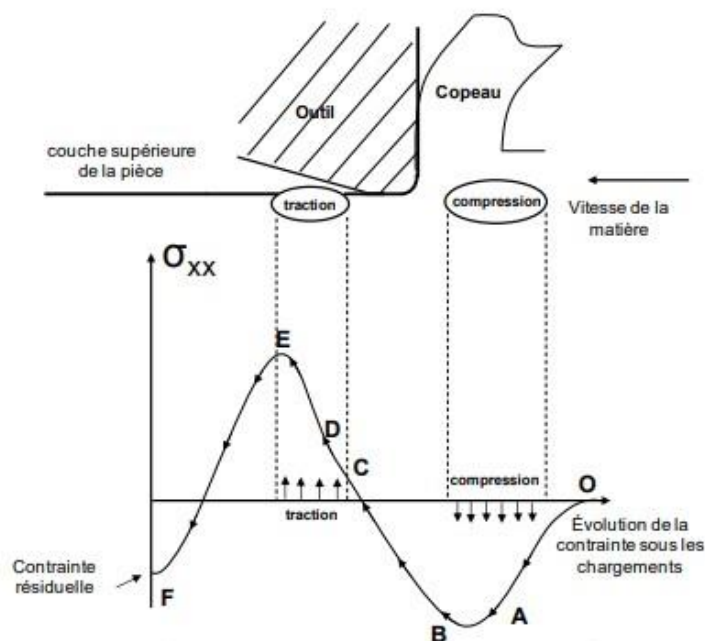
Ces déformations peuvent être induites mécaniquement, thermiquement ou via les phases de transformations d'un matériau. La plupart des procédés manufacturiers et des traitements de surfaces produisent des contraintes résiduelles :

- produits primaires : moulage, formage, forgeage, laminage, pliage, etc;
- enlèvement de matière : usinage, électroérosion, etc;
- assemblage : soudage, brasage, etc;
- traitements de surfaces mécaniques : grenailage, chocs laser, etc;
- traitements thermiques, chimiques et thermochimiques : trempe, recouvrement PVD, CVD, etc.

D'un point de vue technique, les procédés manufacturiers ou les traitements de surfaces ou les assemblages de matériaux vont toujours induire des déformations irréversibles. En réalité, aucune composante mécanique n'est exempte de contraintes résiduelles.[16]

### II.3.3 Effets mécaniques

Dans le cas du tournage, les effets mécaniques sont générés par les fortes pressions locales mises en jeu autour du rayon d'arête de l'outil, au niveau de la zone de cisaillement primaire et tertiaire. Pendant une opération d'usinage, la couche supérieure de la pièce est déformée plastiquement en compression en amont de l'arête de coupe puis subit une deuxième sollicitation en traction, cette fois-ci, en aval de la zone de coupe. Les étapes de formation des contraintes résiduelles d'origine mécanique sont illustrées, à titre d'exemple, par le graphe suivant tracé dans le repère des déformations et contraintes (cas uniaxial). Cet exemple suppose que la matière plastifie à chaque sollicitation. Le tronçon OAB représente la phase de charge en compression, le tronçon BCD la phase de décharge, le tronçon DE la phase de charge en traction et le tronçon EF le retour à une déformation nulle imposée par le substrat. Ce cycle de chargement illustre schématiquement la manière dont sont obtenues les contraintes résiduelles de compression après un chargement mécanique.[17]



**Figure II-11:** Evolution des contraintes pendant la coupe[17]

### II.3.4 Effets thermiques

Les effets thermiques agissent de la même manière que les effets mécaniques en faisant subir à la couche supérieure un cycle de chargement généré par les phases de dilatation et de contraction de la matière sous l'effet de la chaleur. En tournage, les deux principales zones de chargement thermique susceptibles d'affecter la matière de la pièce usinée se situent de part et d'autre de l'arête de coupe. Sur la courbe suivante (figure 1.11), le tronçon OAB représente la mise en compression locale de la matière sous l'effet de l'échauffement dû aux deux sources de chaleur. Le tronçon BCD représente le retour à une déformation nulle. Les forts gradients de température, dus aux mouvements des sources thermiques et aux conditions limites, génèrent de forts gradients de déformation qui font apparaître localement des zones plastifiées. La figure suivante illustre ces phénomènes.

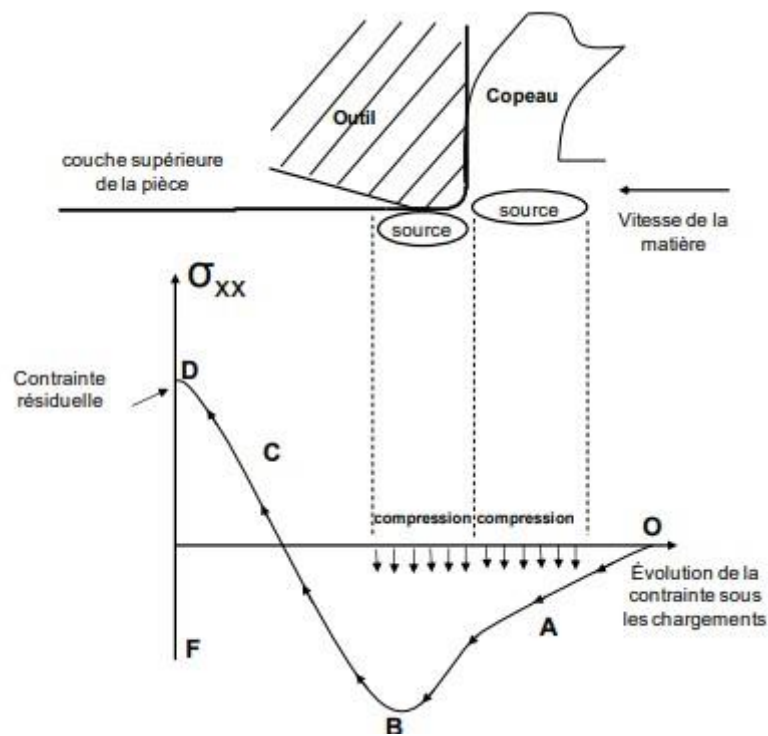


Figure II-12: Evolution des contraintes pendant la coupe [17]

Les chargements thermiques provoquent aussi des modifications au niveau des propriétés physiques et mécaniques du matériau en diminuant, par exemple, les valeurs du module de Young ou bien en augmentant la conductivité thermique [Mahdi1998] ce qui joue un rôle sur

le processus de génération de contraintes résiduelles en abaissant la valeur de la limite d'élasticité.

### *II.3.5 Effets d'origine métallurgique*

Les effets d'origine métallurgique sont indissociables des effets d'origine thermique. En effet, lorsque la matière usinée est soumise à des hausses de température, dans certains cas, des transformations de phases apparaissent. Ces transformations de phases ont pour effets : Une modification locale des propriétés thermiques (coefficient de dilatation, conductivité thermique..), Une modification locale des propriétés mécaniques (dureté, limite d'élasticité,..) de la matière usinée, Un changement de structure.

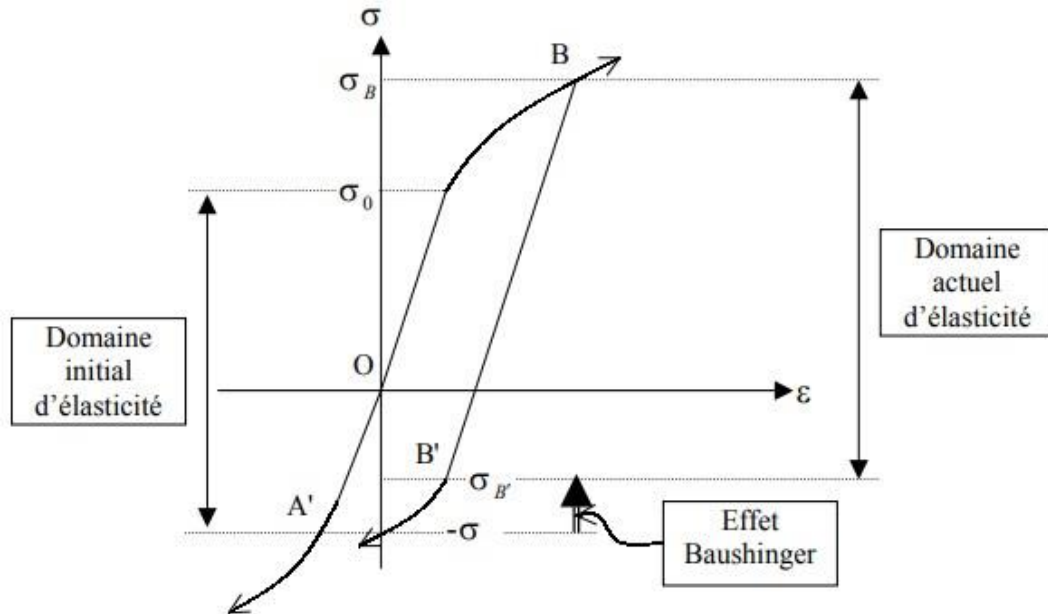
### *II.3.6 Effets des contraintes résiduelles sur les performances d'une composante*

L'importance des contraintes résiduelles dépend du matériau utilisé, de la composante fabriquée et des applications de cette dernière. Aucune réponse unique ne peut être donnée puisque les contraintes résiduelles peuvent être bénéfiques ou destructives pour les performances d'une composante. Elles peuvent également être critiques ou insignifiantes. Chaque cas doit donc être étudié selon son propre mérite. Généralement, les contraintes résiduelles en compression ont un effet bénéfique sur la durée de vie en fatigue et sur la corrosion car elles retardent l'initiation et la propagation de fissures (Physique & Industrie, 2006). Au contraire, les contraintes résiduelles en tension réduisent les performances mécaniques. Dans le domaine élastique, les contraintes résiduelles peuvent être simplement additionnées à la contrainte appliquée.

## *II.4 L'écrouissage*

L'écrouissage se traduit par le durcissement d'un métal ou d'un alliage provenant de la déformation cristalline. Il correspond à une modification structurale. Cette opération engendre une augmentation des caractéristiques de résistance (dureté, limite d'élasticité ...) et une diminution des caractéristiques de ductilité (allongement, striction ...). L'écrouissage est produit par une déformation plastique effectuée au-dessous de la température de recristallisation. Généralement obtenu à froid, un durcissement par déformation est possible à chaud mais largement réduit par la restauration et la recristallisation. L'écrouissage apporte au métal, surtout dans le cas des tôles, fils et pièces étirées, certaines propriétés mécaniques que

ne peuvent conférer les traitements thermiques. On peut supprimer les effets de l'érouissage par recuit de recristallisation.[18]



**Figure II-13:** Observation de l'effet de l'érouissage dans l'essai de traction-compression[18]

L'érouissage en traction qui correspond à un relèvement de la limite d'élasticité en traction, s'accompagne d'une diminution (en valeur absolue) de la limite d'élasticité en compression. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Bauschinger. Le segment  $[-\sigma, \sigma_0]$  définit le domaine initial d'élasticité du matériau en traction-compression simple tandis que le segment  $[-\sigma_{B'}, \sigma_B]$  définit le domaine actuel d'élasticité après érouissage en traction simple jusqu'à la valeur  $\sigma$ .

### II.5 Critères de Plasticité

On appelle critère de plasticité, une loi définit explicitement la forme de la surface de plasticité. Les critères de plasticité ont été initialement développés pour les métaux et ont ensuite été utilisés pour les sols, notamment en tant que critères de rupture.[19]

#### II.5.1 Critère de Tresca

Tresca [1864], après des essais sur le Plomb, conclut que la plastification arrive quand la contrainte tangentielle maximale atteint une certaine limite. On peut écrire donc :

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 - 2K$$

Où  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

Si les contraintes principales sont  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$ , où,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  alors la plastification commence quand

$$\sigma_1 - \sigma_3 = Y K$$

où : Y : un paramètre matériel déterminé expérimentalement.

k : paramètre d'écrouissage.

Le seuil de la valeur de Y est habituellement la contrainte qui est déterminé de l'essai de traction simple (unidimensionnel)

Pour la condition première plastification, on a :

$$\text{Max} \left[ \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} \right] = \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} = \frac{\sigma_y}{2}$$

$\sigma_y$  : est la contrainte d'épuisement initiale en traction simple.

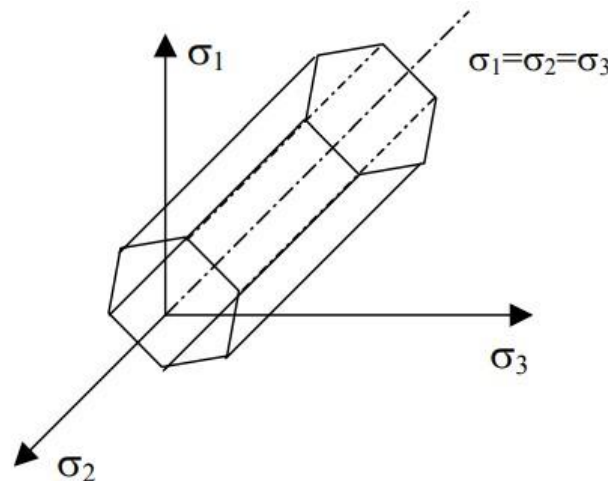


Figure II-14: Représentation du critère de Tresca dans l'espace.[20]

Dans l'espace de contraintes principales  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$ , la surface définie par la fonction de charge est un prisme parallèle à l'axe (1,1,1) à base hexagonale régulière.



### II.5.2 Critère de Von-Mises

Le fait que le critère précédant ne prend pas en compte la contrainte principale intermédiaire est une faiblesse et pour la surmonter, Von-Mises [1913] proposa que, la plastification ne commence que quand le deuxième invariant du tenseur des contraintes déviatoriques  $J_2$  atteint une valeur limite, c'est-à-dire :

$$F = J_2 - k^2 = 0$$

La plastification se produit quand :

$$\sqrt{3J_2} \geq \sigma_y$$

où  $J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$

où  $F = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] - k^2 = 0$

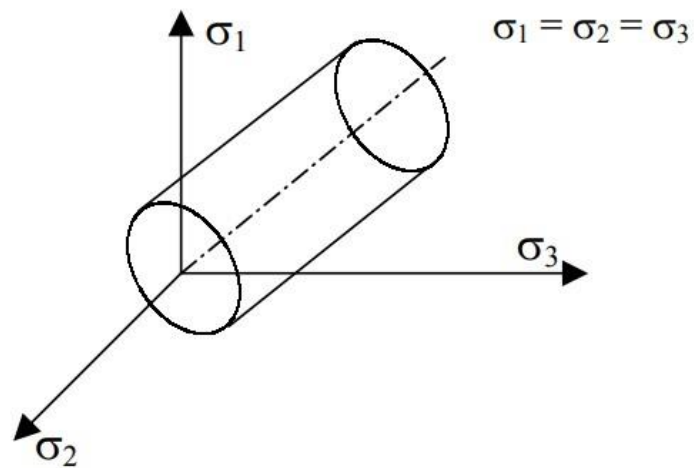
où  $k$  : est une constante. On peut remarquer facilement que dans le cas du cisaillement simple plan, on a :

$$J_2 = \sigma_1^2 = k^2$$

Donc la constante  $k$  représente la contrainte maximale admissible en cisaillement simple. Dans l'espace des contraintes principales  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$  à 3 dimensions l'équation devient :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} = \sigma_y$$

C'est l'équation d'un cylindre à base circulaire axé sur la trisectrice du repère  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ , Sa section par le plan  $\pi (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = 0)$  est un cercle dont le rayon est  $k\sqrt{2}$ .



*Figure II-15: Représentation du critère de Von Mises dans l'espace.[20]*

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les essais mécaniques et nous avons parlé plus en détail sur l'essai de traction ainsi que toutes les valeurs qu'il détermine. Ensuite nous avons expliqué les contraintes résiduelles issues du tournage et leurs origines et aussi l'érouissage, deux phénomènes qui influencent les propriétés mécanique par conséquent les résultats de notre essai.

### *III. Réalisation de l'essai de traction*

#### **Introduction**

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de notre expérience de traction qui va se dérouler sur une éprouvette d'acier ordinaire A60, nous allons détailler les étapes de l'essai, calculer les caractéristiques de notre matériau, dessiner les courbes de tractions et donner des interprétations pour les résultats obtenus.

#### *III.1 Description de la machine de tournage.*

Les éprouvettes ont été réalisées sur un tour parallèle modèle SN 40 B.

Comme la plupart des tours il se compose essentiellement de cinq parties :

- Le bâti, partie inférieure qui supporte le reste de la structure ainsi que le bac à copeaux et le réservoir du lubrifiant-refrigérant.
- La poupée fixe ou bloc support de broche et système de pignonnages (vitesses, avances de chariotage et filetage). Cet ensemble a remplacé le système de poulies étagées et de courroies ainsi que le système de harnais de tour.
- Le banc avec les glissières longitudinales,
- L'ensemble chariot longitudinal, le chariot transversal, tourelle porte-outils et systèmes d'avance.
- La contre-poupée ou poupée mobile.

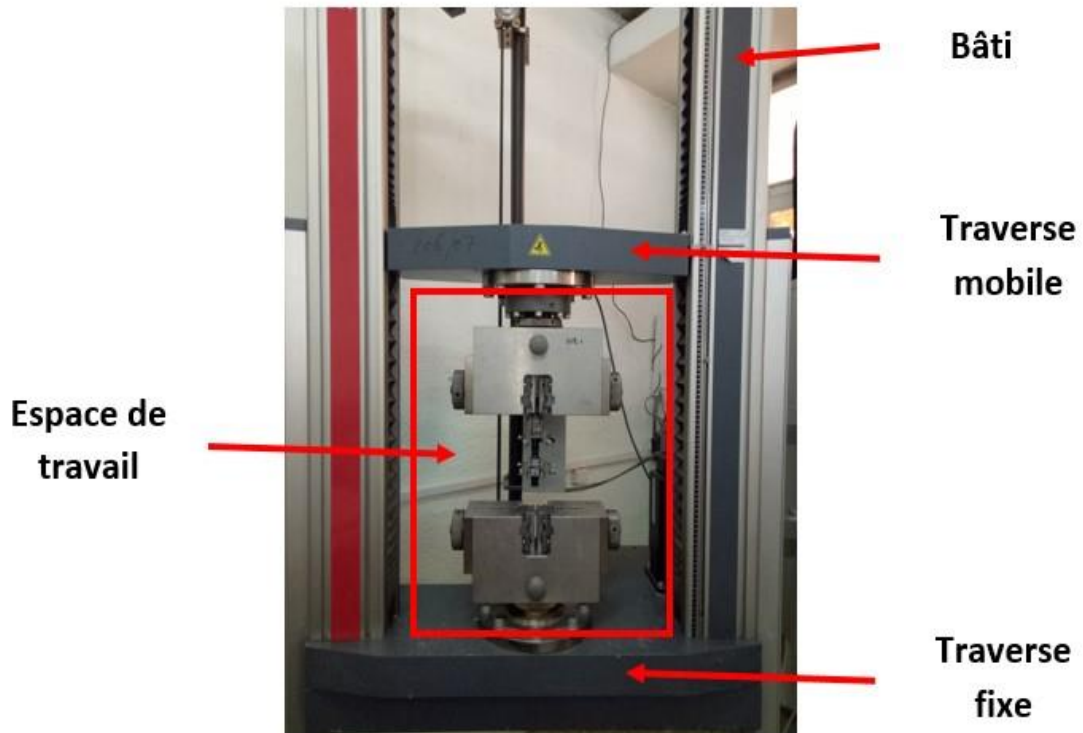


*Figure III-1: Tour parallèle modèle SN 40 B.*

### *III.2 Description de la machine de traction*

On a effectué l'essai de traction au moyen de la machine d'essai ZWICK Z100, avec cette machine on peut faire des essais de traction statiques de tous les matériaux à température ambiante ainsi qu'à une température élevée jusqu'à 1200°C.

Cette machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et sa partie supérieure à la traverse mobile. Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Elle comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage. L'utilisation d'un extensomètre en céramique facilite l'exécution de la mesure directe du changement de la longueur de l'échantillon pendant les phases sensibles de l'essai de traction.



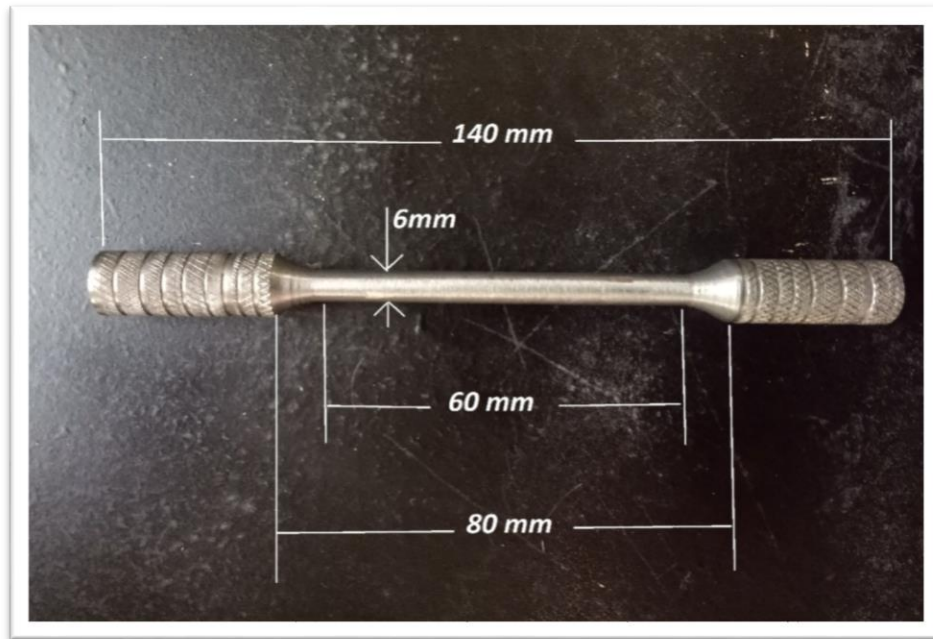
*Figure III-2: la machine de traction ZWICK.*

### *III.3 Les étapes de l'essai*

#### *III.3.1 Réalisation des éprouvettes.*

Les éprouvettes ont été réalisées sur un tourparallèle à l'atelier de l'université de Bejaia et elles portent les dimensions suivantes.

- Longueur totale : 140 mm
- Longueur utile (entre repères) : 60 mm
- Diamètre utile : 6 mm



*Figure III-3: Epreuve utilisée à l'essai de traction.*

L'acier A60 ou A60-2 selon la désignation française : a généralement une composition chimique en pourcentage de :

**P** : Phosphore  $\leq 0.055$  %

**S** : Soufre  $\leq 0.055$  %

**N** : Azote  $\leq 0.014$  %

**C** : Carbone  $\sim 0,4$  %

**Fe** : Fer Le reste. [21]

### III.3.2 L'essai de traction

L'essai a été fait à l'université de Setif avec la machine de traction Zwick, On a commencé à paramétrer la machine sur un ordinateur qui est relié à cette dernière, en introduisant plusieurs paramètres comme la vitesse de sollicitation et les dimensions de l'éprouvette (chaque une avec ses dimension pour plus de précision) et le nombre d'éprouvettes etc ...

On a placé l'éprouvette entre les deux mors plats de la machine et on a appliqué un petit serrage avec la main pour maintenir la pièce en place. Puis sur l'ordinateur on a lancé l'extensomètre qui va automatiquement placer ses deux couteaux sur la partie utile de la pièce déjà inscrite dans le logiciel (longueur de 60 mm).

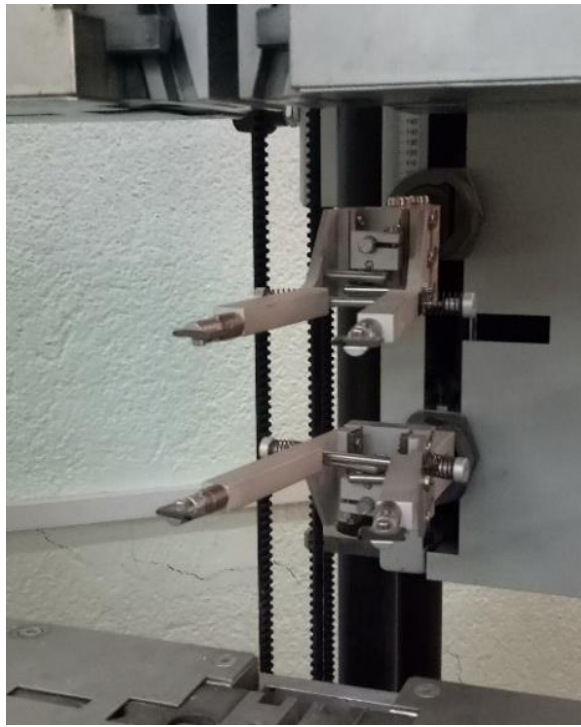


Figure III-4: Extensomètre de la machine de traction Zwick.

Puis on a lancé l'opération de traction avec une vitesse de sollicitation constante de **2 mm/min.**

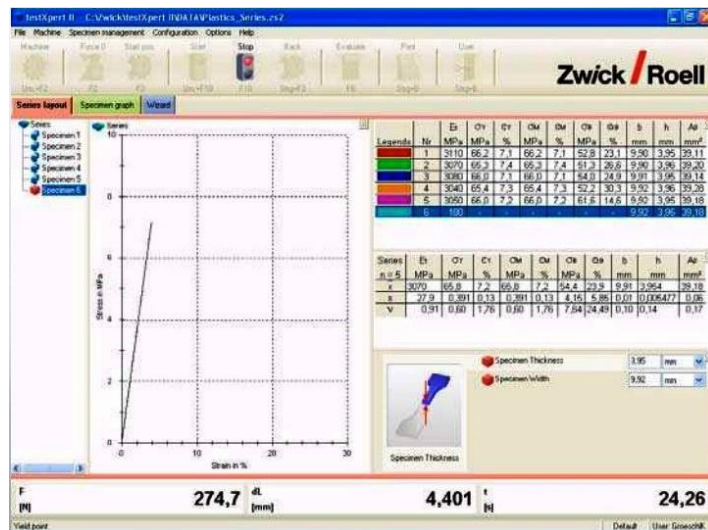
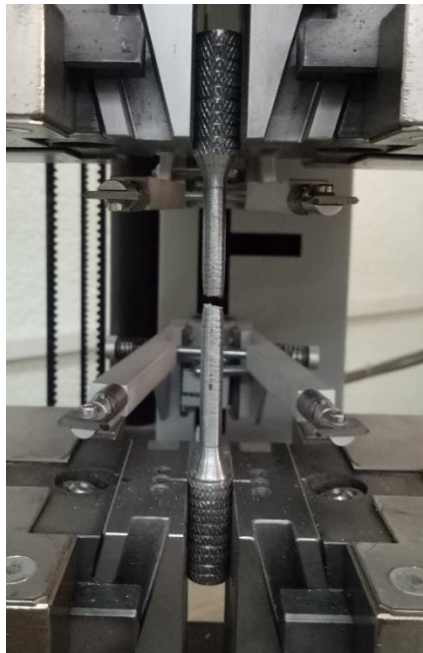


Figure III-5: Ecran d'affichage du logiciel testXpert.

Sur l'écran d'ordinateur on a pu voir l'évolution de la déformation en fonction de la force en temps réel jusqu'à la rupture.



*Figure III-6: Epreuve de traction après rupture.*

Puis après que l'éprouvette se rompt, on a extrait les résultats obtenu (déformation, force et contraintes) sous forme de tableaux sur des fichiers Excel.

Après avoir calculé les déformations relatives et dessiner les courbes de contrainte en fonction des déformations on a obtenu les résultats suivants :



III.4 Résultats obtenus et discussion

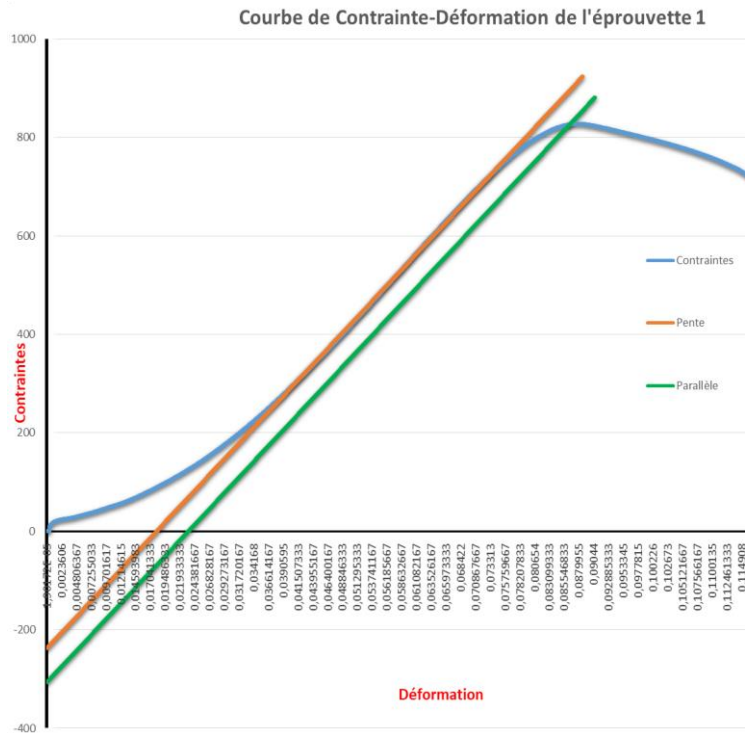
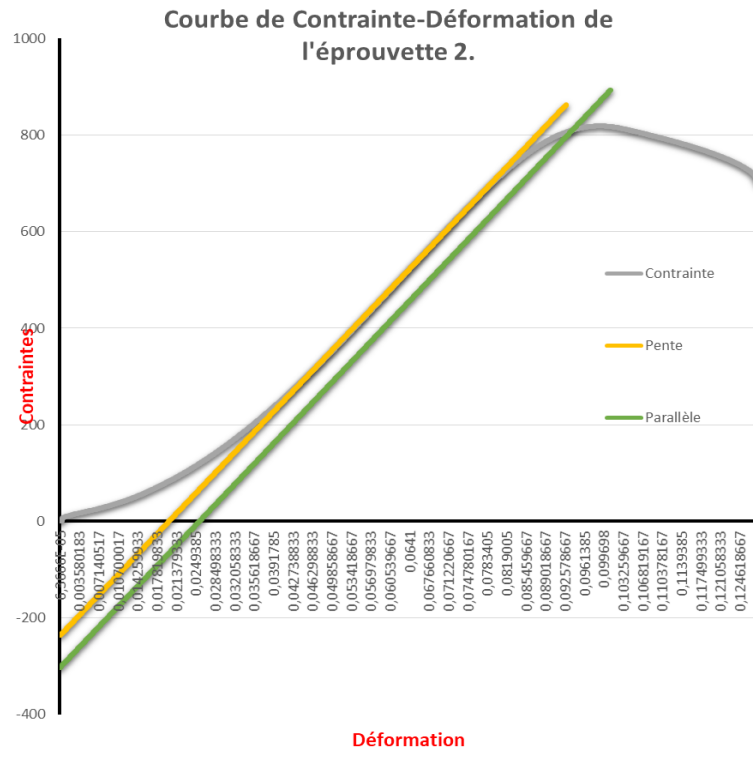


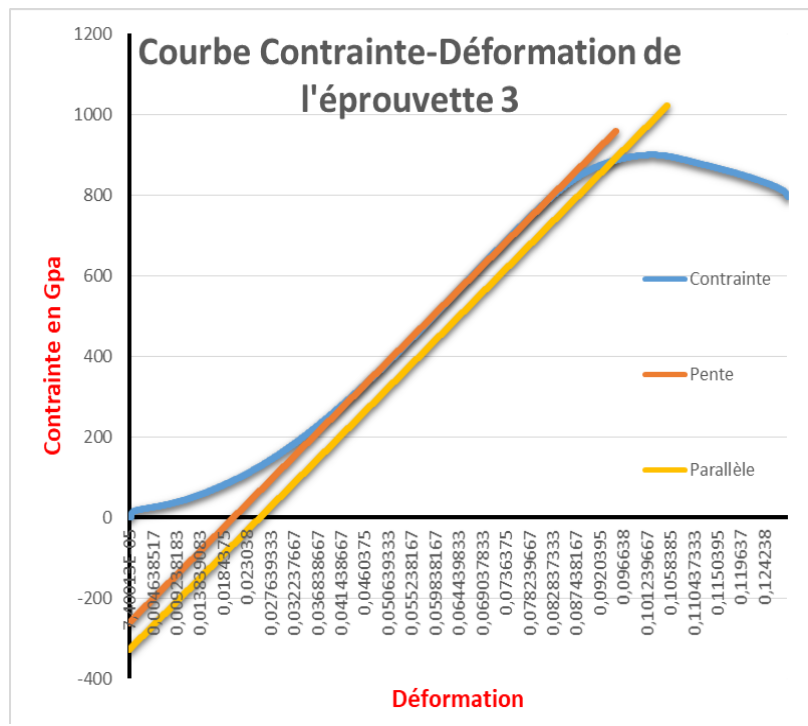
Figure III-7: Courbe de traction de l'éprouvette N°1

La courbe possède une droite ayant une pente de 218,252 cette valeur désigne le module d'YOUNG exprimée en Gpa. Cette droite cesse d'exister à une certaine valeur  $R_e$  égale à 721,05 Gpa, une valeur assez grande et ça est dû à la composition chimique de notre acier qui est probablement assez riche en phosphore. Et comme cette valeur est grande donc cela augmente l'élasticité du matériau et réduit le domaine plastique et c'est aussi à cause de ça que la parallèle qui passe par la limite élastique conventionnelle est très proche du sommet de la courbe. Puis y a une valeur très essentielle qu'on peut tirer de cette courbe c'est  $R_m$  qui présente la résistance maximum à la traction et c'est là que commence la striction c'est à dire la concentration de contrainte en une région ce qui va diminuer progressivement la surface de cette partie jusqu'à la rupture de l'éprouvette.



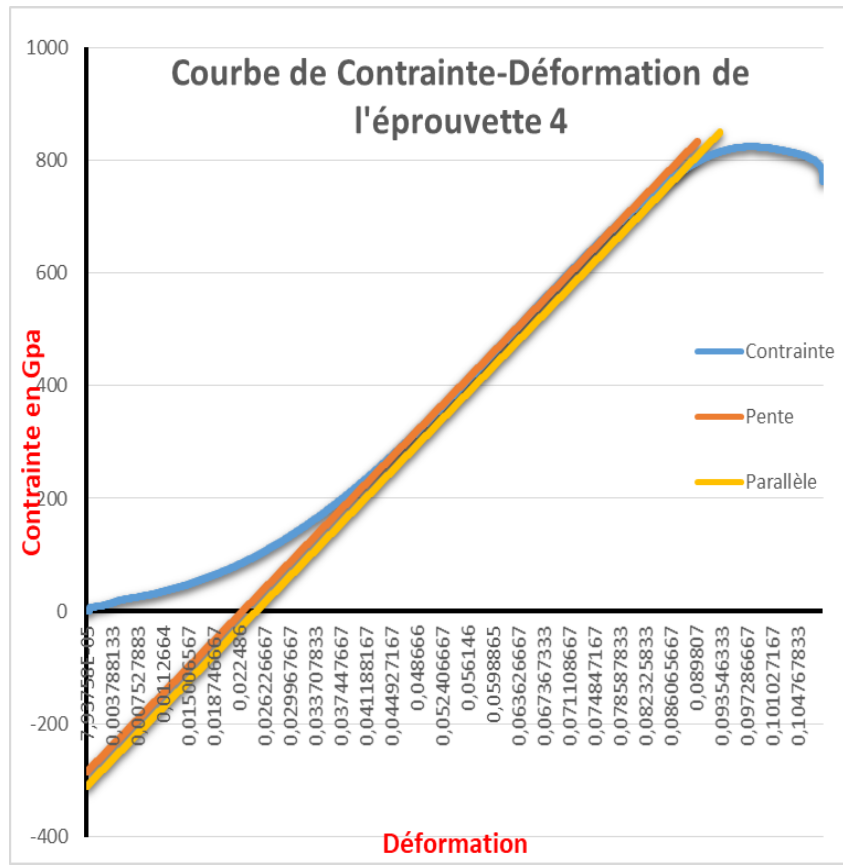
**Figure III-8:** Courbe de traction de l'éprouvette N°2

De même pour l'éprouvette N° 2, La pente dans cette courbe a une valeur de 197,475 Gpa. Sa résistance élastique est 701,146 Gpa et sa résistance Rm est de 818,77 Gpa, les valeurs sont assez proches par rapport aux autres éprouvettes et les petites différences reviennent aux défauts d'usinage et de l'essai lui-même.



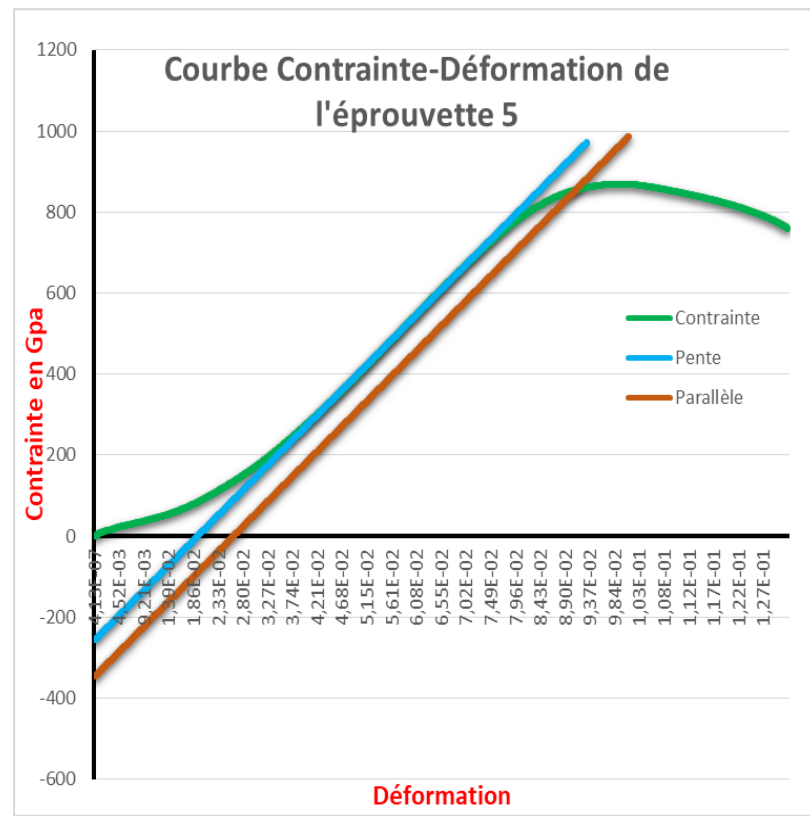
**Figure III-9:** Courbe de traction de l'éprouvette N°3

La pente dans cette courbe a une valeur de 213,692Gpa. Sa résistance élastique est 775,68Gpa et sa résistance Rm est de 899,28Gpa.



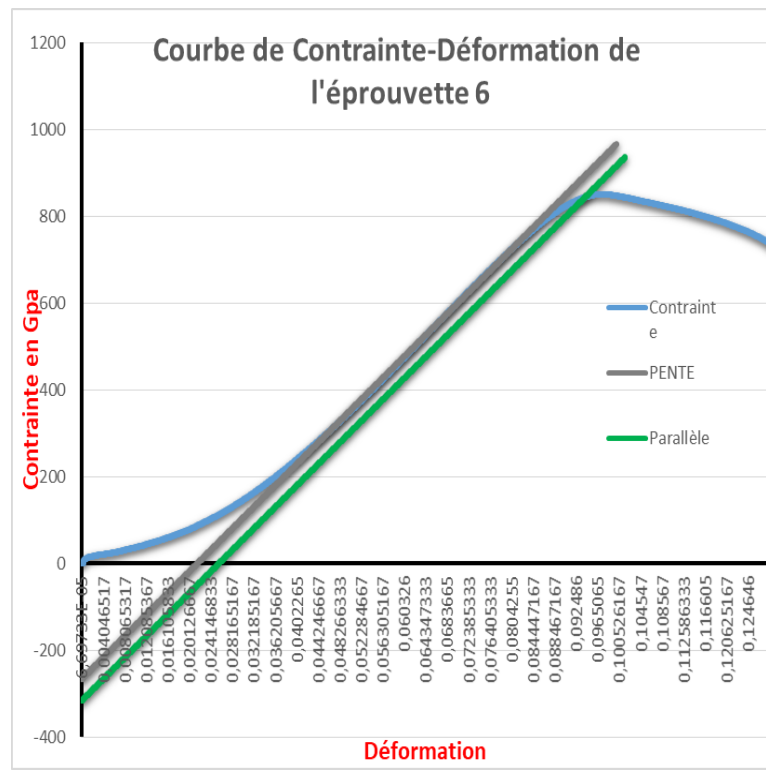
**Figure III-10:** Courbe de traction de l'éprouvette N°4

La pente dans cette courbe a une valeur de 207,364 Gpa. Sa résistance élastique est 673,95 Gpa et sa résistance Rm est de 823,65 Gpa. On voit que la droite qui est parallèle à la pente de la courbe et qui passe par une déformation de 0,2 % est très proche de la pente et c'est à cause du glissement qui est parvenu au début de l'expérience qui est assez important ce qui a donné des valeurs un peu décalées par rapport aux vrais déformations.



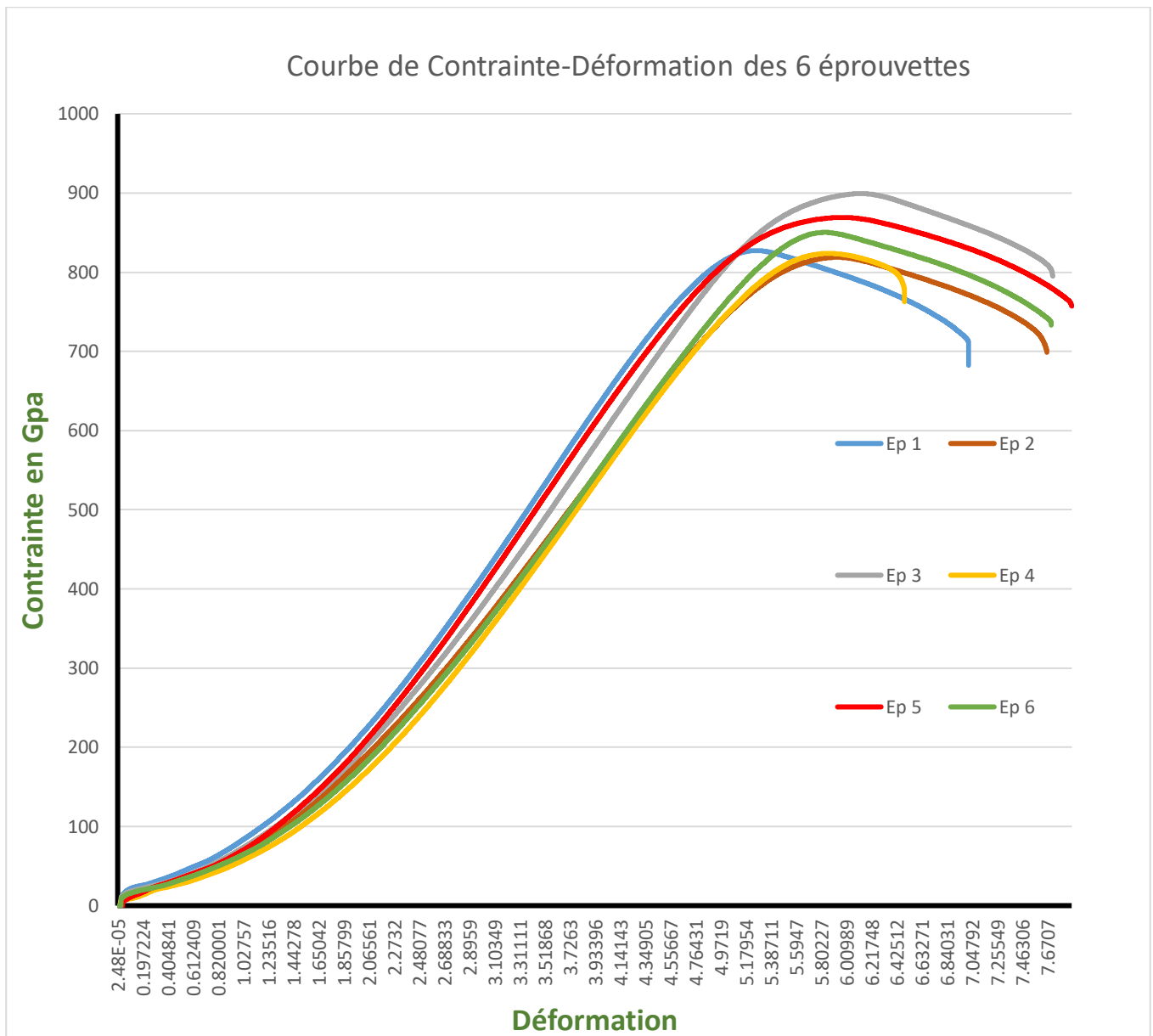
**Figure III-11:** Courbe de traction de l'éprouvette N°5

La pente dans cette courbe a une valeur de 219,659Gpa. Sa résistance élastique est 764,4Gpa et sa résistance Rm est de 869,21Gpa.



**Figure III-12:** Courbe de traction de l'éprouvette N°6

La pente dans cette courbe a une valeur de 205,401 Gpa. Sa résistance élastique est 761,522 Gpa et sa résistance Rm est de 850,29Gpa.



*Figure III-13: Courbe de traction de l'ensemble des éprouvettes testées*

**Interprétation des résultats.**

Les courbes ont bien l'allure des courbes de traction, mais on voit bien qu'il n'y a pas une proportionnalité au début de la courbe et ça à cause des petits glissements qui parvient quand la machine saisie l'éprouvette, juste après on voit qu'y a bien une droite (c'est-à-dire une proportionnalité entre l'allongement et la déformation).

La pente de cette droite est le module de Young, on peut constater que les pentes sont un peu différentes et ça à cause de plusieurs paramètres comme les défauts de dimensions (les

éprouvettes ont pas parfaitement la même dimension), et les défauts des contraintes résiduelles. Dans cette zone d'élasticité les déformations ne sont pas permanentes c'est-à-dire que l'éprouvette reprend sa forme initiale après décharge, on voit que ce domaine élastique est assez important et ça revient à la nature de notre acier qui est assez ductile et sa composition chimique. À partir d'un certain allongement, la courbe s'infléchit : c'est le début de la déformation plastique. On définit alors la limite d'élasticité **Re**, cette valeur n'est pas très précise surtout dans le cas des courbes des matériaux ductiles comme l'acier dans notre cas puisque la rupture de pente n'est pas franche. D'où l'on introduit une valeur conventionnelle **R<sub>0,2</sub>**. La courbe de traction présente ensuite un maximum qui détermine la résistance à la traction conventionnelle **Rm**.

À partir de ce point, la déformation est concentrée dans une zone, c'est la striction (« étranglement »). La force enregistrée diminue, puisque la section diminue dans la zone de striction.

Lorsque la rupture se produit l'éprouvette se contracte de manière brutale en restituant l'énergie stockée. Cette contraction s'accompagne d'une émission sonore qui a pour origine la transformation de l'énergie élastique en énergie cinétique.

Sachant que nos pièces ont été extraites d'un tube à qui on a diminué le diamètre pour obtenir notre diamètre voulu donc il sera essentiel de parler de l'influence de la vitesse de refroidissement lors de la mise en forme de la pièce qui n'est pas la même au centre et à la périphérie de la pièce. Cette vitesse influence l'emprisonnement des éléments chimiques qui ont pu se diffuser dans le solide cristallin à haute température. Les éléments chimiques se retrouvant prisonniers dans la phase de température basse créent alors des tensions dans les mailles cristallines qui contribuent à l'augmentation de certaines caractéristiques mécaniques de la pièce.

**Les résultats correspondants à ses graphes sont présentés dans ce tableau ci-dessous**

*Tableau 3: Les résultats obtenus des courbes de traction de chaque éprouvette*



N° d'Ep	Module de Young en (Gpa)	Résistance élastique Re en (Gpa)	ε élastique en (mm)	Résistance élastique R <sub>0,2</sub> (Gpa)	ε à R <sub>0,2</sub> (Gpa)	Contrainte Max Rm (Gpa)	ε à Rm (mm)	ε Max (mm)
<b>1</b>	218,252	721,05	4,39	826,61	5,2	827,43	5,27	7,02
<b>2</b>	197,475	701,146	4,763	809,229	5,624	818,77	5,921	7,681
<b>3</b>	213,692	775,68	4,85	878,78	5,6	899,28	6,13	7,72
<b>4</b>	207,364	673,95	4,62	784,85	5,29	823,65	5,87	6,5
<b>5</b>	219,659	764,4	4,7	849,53	5,38	869,21	5,99	7,87
<b>6</b>	205,401	761,522	5,02555	842,79	5,63355	850,29	5,83278	7,718
<b>moyenne</b>	<b>210,307</b>	<b>732,958</b>	<b>4,724</b>	<b>831,964</b>	<b>5,454</b>	<b>848,105</b>	<b>5,83563</b>	<b>7,418</b>

Le module d'Young (E) peut directement être déduit de la courbe de traction. Il est proportionnel à la pente de la droite dans la zone élastique. Ou bien en appliquant la loi de HOOK.

$$E = \frac{\epsilon}{s} = \frac{F}{S} \times \frac{1}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Les autres valeurs elles sont lues sur les graphes des courbes de traction.

### III.5 Calcul du coefficient d'écrouissage

Une des lois les plus simples est la loi de HOLLOMON cette loi ne s'appuie que sur deux paramètres K et n.

Le paramètre n représente le coefficient d'écrouissage, il rend compte de la capacité du matériau à se déformer plastiquement. Le paramètre K représente le coefficient de résistance du matériau (exprimé en Mpa).

$$\sigma = K (\epsilon p)^n \Rightarrow \ln(\sigma) = \ln(K) + n \ln(\epsilon p)$$

Si l'on trace la courbe  $\text{Ln}(\sigma) = f(\text{Ln}(\epsilon_p))$ , la droite obtenue nous donnera les paramètres  $n$  et  $K$ .

La courbe nous a donné :

Eprouvette 1 :

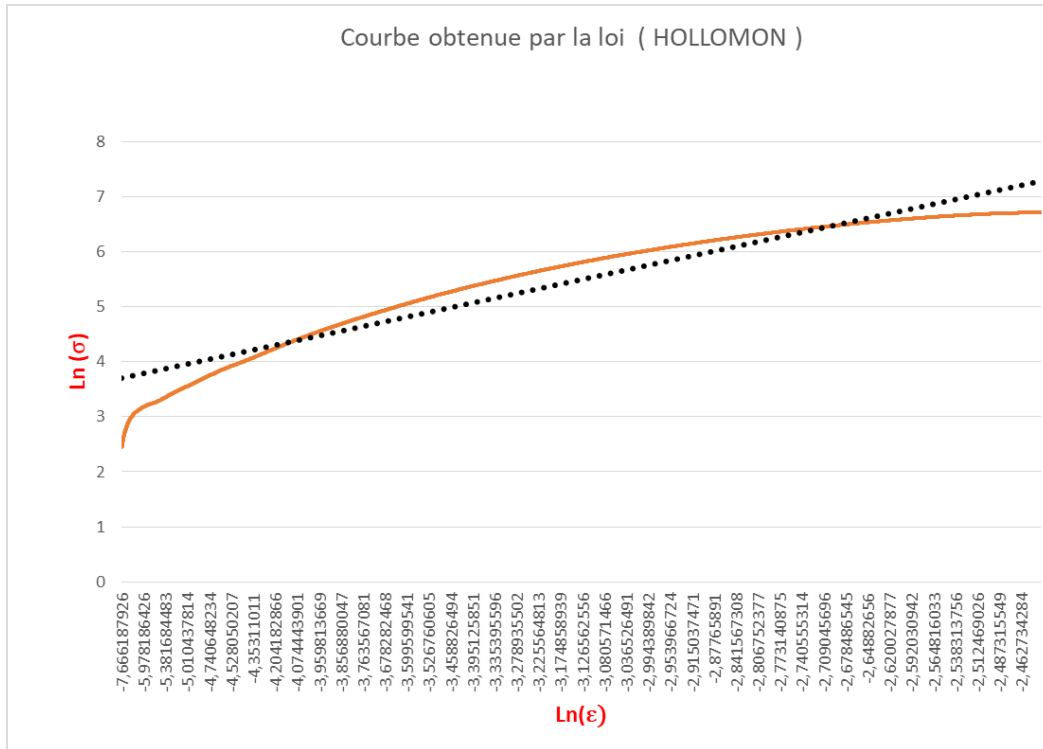


Figure III-14: Tracé de la courbe  $\text{Ln}(\sigma) = f(\text{Ln}(\epsilon_p))$ ,

On a trouvé pour l'éprouvette N° 1:  $\text{Ln}(\sigma) = 0,83(x) + 8,77$

D'où : **K = 712,870**

**n = 0,833**

On refait la même chose sur les 5 autres éprouvettes pour extraire la valeur moyenne, les résultats trouvés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

N° d'éprouvette	K (coefficient de résistance)	N (coefficient d'écroissage)
1	712,87	0,833
2	684,713	0,913
3	802,715	0,84
4	730,697	0,88
5	725,6	0,91

<b>6</b>	719,099	0,82
Moyenne	<b>729,282</b>	<b>0,866</b>

*Figure III-15: Valeurs des constantes K et n de chaque éprouvette*

On a donc trouvé le coefficient de résistance **K = 729,282 Mpa**

Le coefficient d'érouissage **n = 0,866**

### III.6 Calcul du coefficient de poisson

Le coefficient de poisson est calculé suivant cette relation

$$\nu = \frac{\text{rétrécissement transversal relatif}}{\text{rétrécissement longitudinal relatif}} = \frac{(l_0 - l) / l_0}{(L - L_0) / L_0}$$

Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

N° d'éprouvette	Rétrécissement transversal	Rétrécissement longitudinal	Coef de poisson
EP 1	<b>0,117</b>	<b>0,05</b>	<b>0,427</b>
EP 2	<b>0,128</b>	<b>0,066</b>	<b>0,52</b>
EP 3	<b>0,128</b>	<b>0,05</b>	<b>0,388</b>
EP 4	<b>0,108</b>	<b>0,066</b>	<b>0,615</b>
EP 5	<b>0,131</b>	<b>0,05</b>	<b>0,381</b>
EP 6	<b>0,128</b>	<b>0,05</b>	<b>0,388</b>
Moyenne	<b>0,123</b>	<b>0,055</b>	<b>0,453</b>

*Tableau 4: Le coefficient de poisson de chaque éprouvette*

On voit que la valeur du coefficient de poisson trouvée est différente de la valeur du coefficient de poisson des aciers de construction qui est comprise entre 0,27 et 0,3. Et ça est dû aux défauts liés à l'éprouvette, l'allongement de l'éprouvette est accompagné d'une contraction homogène (uniforme) sur toute la longueur de l'échantillon. À partir d'un certain taux de déformation critique (contrainte maximale) la contraction de la section cesse d'être homogène et devient de plus en plus importante en un seul endroit. On parle du phénomène de striction. Dès le début du processus de striction, la section locale diminue rapidement et la résistance à l'allongement de l'éprouvette qui est proportionnelle à la section diminue également. Ce

phénomène provient du glissement irréversible de certains plans les uns par rapport aux autres après une certaine contrainte critique.

### III.7 Calcul du coefficient de striction

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture. Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

Avec  $S_0$  : section initiale et  $S_u$  : section après rupture.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

N° d'éprouvette	S0	SU	Z
1	26,42	7,065	0,732
2	31,17	12,56	0,597
3	30,19	7,065	0,765
4	29,22	12,56	0,570
5	27,81	7,065	0,745
6	29,32	7,065	0,759
<b>Moyenne</b>	<b>29,02</b>	<b>8,896</b>	<b>0,695</b>

*Tableau 5: Le coefficient de striction de chaque éprouvette*

Le coefficient de striction est supérieur à 0,5 donc notre matériau est bien ductile.

*Conclusion générale :*

Le présent travail a porté sur l'étude du comportement d'acier soumis à l'essai de traction, plus précisément les aciers de construction, l'étude a été faite sur des éprouvettes normalisées que nous avons réalisées par tournage.

Les travaux de ce mémoire ont été orientés pour voir comment exploiter l'essai de traction et déterminer les caractéristiques mécaniques des aciers tels que la résistance élastique  $R_e$ , la résistance mécanique  $R_m$  et l'allongement  $A\%$ . Notre étude a été menée en s'appuyant sur une recherche bibliographique qui met en évidence, les propriétés mécaniques des aciers tels que la résistance élastique  $R_e$  et résistance mécanique  $R_m$  et un aperçu sur les essais mécaniques (essai de flexion, dureté). Ainsi qu'une présentation sur le phénomène d'écrouissage et les contraintes résiduelles.

Les résultats obtenus dans ce travail reposent sur des essais de traction qui ont été réalisés sur des éprouvettes en acier de construction A60. La traduction de ces résultats nous permet une bonne compréhension des domaines élastique et plastique. Toutefois, l'effet du procédé d'usinage et le déroulement de l'essai ainsi que les conditions de mise en forme de la pièce à savoir la vitesse de refroidissement, influencent beaucoup les résultats obtenus. Ce qui a permis d'observer l'influence de ces paramètres sur nos résultats.

## *Références bibliographiques*

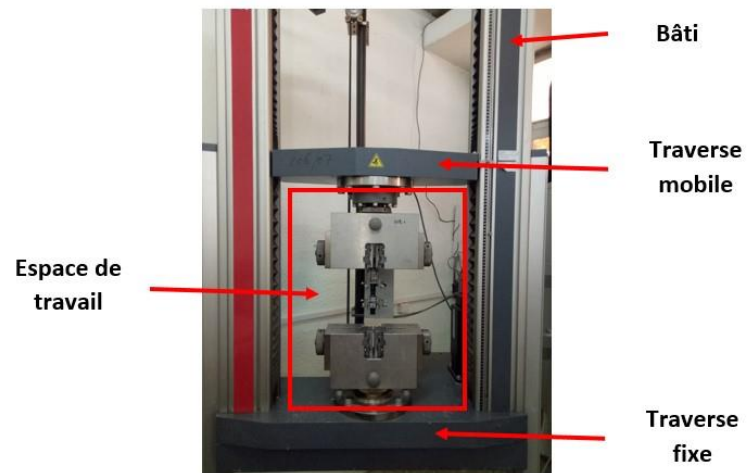
- [1] JONES D. R. H. ASHBY M. F. Matériaux: propriétés et applications. Dunod, 1996.
- [2] LIGNON, Je. et MIJON. Technologie des fabrications mécanique : matériaux, traitements, propriétés, normalisation (fascicule 9), Paris, Delagrave, 1962.
- [3] RICHARDET, G. Structure et propriétés des métaux Paris, Dunod, 1969.
- [4] ENSIMON, R. les aciers, tomes I et II, Paris, PYC-édition, 1971.
- [5] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION INC. Manual of steel Construction, 6th ed., New York, 1967.
- [6] MARC Bletry, méthode de caractérisation mécanique des matériaux (2006-2007).
- [7] RICHARDET, G. Structure et propriétés des métaux Paris, Dunod, 1969.
- [8] Iost, R. Bigot, L. Boudreau, matériaux et techniques, l'essai de dureté Vickers : applications et influence de la charge.77-79, 1995.
- [9] A. Cornet and F. Hlawka. Propriétés et comportement des matériaux. Ellipses, 2006.
- [10] ASM Handbook. Mechanical testing and evaluation, volume 8.
- [11] D. Francois, A. Pineau, and A. Zaoui. Comportement Mécanique des Matériaux. Hermès, 1995.
- [12] G FRADE ; Métallographie essais mécaniques ; 1970.
- [13] A. Brosse, F. Valiorgue, H. Hamdi, J. Rech, J-M. Bergheau, Une nouvelle approche des conséquences thermomécaniques induites par les procédés d'usinage : application à la rectification et au tournage, CFM, 2007.

- [14] L. KATCHANOV, *Eléments de la théorie de la plasticité*, traduction française, éditions Mir 1975.
- [15] Christophe B, Ponjet J : « *Mécanique des solides déformables* », Hermès Science Publications, Paris, 2000.
- [16] LIPINSKI P., KRIER J., and BERVEILLER M. *Elastoplasticité des métaux en grandes déformations: comportement global et évolution de la structure interne*. *Physics Abstracts*, 25:361-388, 1990.
- [17] L.SEDOV, *mécanique des milieux continus*, IZDATELVSTVO « Hayka » 1973, Traduction française, Editions Mir 1975.
- [18] ULLER D. *Influence de l'écrouissage non local et de l'hétérogénéisation intragranulaire sur le comportement des aciers polycristallins*. Thèse de Doctorat, Institut Supérieur de Génie Mécanique et Productique, Université de Metz, 1994.
- [19] EDGAR S.Bain, *Functions of the alloying Elements in steel*, Pitsburg, Pa., U.S.A., 1939.
- [20] D. François, A. Pineau et A. Zaoui. *Comportement mécanique des matériaux*. Hermès, Paris, 1991.
- [21] G.BERANGER, G.HENRY, G.SANZ. « *le livre de l'acier* ». *Technique et documentation*, Lavoisier, 1994
- [21] B. Halphen et J. Salençon. *Élastoplasticité*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1987.
- [22] J. Lemaitre et J.L. Chaboche. *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, Paris, 1985.
- [23] J. Owen et E. Hinton. *Finite Elements in Plasticity : Theory and Practice*. Pineridge Press, New York, 1980.

- [24] Dominique FRANÇOIS « Essais mécaniques des métaux- Détermination des lois de Comportement » M 120.
- [25] TAYLOR G. 1. Plastic strain in metals. J. Inst. Metals, 62:307-324, 1938.
- [26] QALLI HOUSSAINI A. Champs thermiques et mécaniques induits par le mouvement des dislocations. Thèse de Doctorat, Institut Supérieur de Génie Mécanique et Productique, Université de Metz, 1996.



Annexe



Machine de traction Zwick.



Tour parallèle modèle.

