

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

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE des Sciences de L'ingénierat
DEPARTEMENT Génie Mécanique

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technique

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : Génie des matériaux

Thème

Caractérisation mécanique de l'acier 100Cr6

Présenté par:

BENMOUSSA RYMA

Dirigé par: ***BENGHERSSALAH***

Devant le Jury de soutenance :

- ***H.HAMADACHE***

Président

MENAIL

CHAOUIU

Promotion : 2018

Remerciements

Le plus grands merci à Dieu qui lui seul, nous guide dans le bon sens durant notre vie et qui nous aide à réaliser ce modeste travail.

Je remercie beaucoup mon encadreur

Mr : BENGHERSALLAH

Pour ses précieux conseils.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à toute ma famille
mon père, ma mère, mes frères, mes sœurs, et
mon mari*

Pour mes amies

*Pour mes professeurs du département de
Génie mécanique*

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Etude Bibliographique

- Figure 1.1 diagramme d'équilibre Fe-C
- Figure 1.2 essai de traction
- Figure 1.3 essai de compression sur une éprouvette de béton
- Figure 1.4 essai de traction
- Figure 1.5 essai de flexion
- Figure 1.6 courbe d'essai de traction
- Figure 1.7 le principe de coefficient de poisson
- Figure 1.8 schéma d'éprouvette de résilience
- Figure 1.9 vue 3D des éprouvettes de l'essai de résilience
- Figure 1.10 vue 3D de l'éprouvette de l'essai de fatigue
- Figure 1.11 machine de traction
- Figure 1.12 éprouvette de l'essai de traction
- Figure 1.13 courbe de traction
- Figure 1.14 machine de dureté shore D

Chapitre 2 : Partie Théorique

- Figure 2.1 diagramme d'équilibre Fe-C métastable
- Figure 2.2 cycle thermique de la trempe
- Figure 2.3 cycle thermique de revenu
- Figure 2.4 schéma générale d'un microscope

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

- Figure 3.1 duromètre indentec
- Figure 3.2 le four
- Figure 3.3 la tronçonneuse
- Figure 3.4 microscope métallographique
- Figure 3.5 polisseuse
- Figure 3.6 échantillons d'acier 100Cr6
- Figure 3.7 vue 3D de l'éprouvette de traction en 100Cr6
- Figure 3.8 vue globale de deux échantillons enrobés
- Figure 3.9 échantillon poli
- Figure 3.10 l'attaque chimique sur un échantillon d'acier 100Cr6
- Figure 3.11 100Cr6 recuit X20
- Figure 3.12 100Cr6 (stub) recuit X 100

- Figure 3.13 100Cr6 X200 HV (empreinte)
- Figure 3.14 100Cr6X200HV (empreinte)
- Figure 3.15 100Cr6 (stub) X200 HV (empreinte)
- Figure 3.16 vue montrant l'enlèvement de l'échantillon du four
- Figure 3.17 l'acier 100Cr6 trempé a l'huile X1200
- Figure 3.18 acier 100Cr6 après revenu X1200
- Figure 3.19 essai de traction

Sommaire

Introduction	01
Chapitre 1 : Etude Bibliographique.....	02
1.1 <u>Etude des alliages fer carbone</u>	02
1.1.1 définition de l'acier.....	02
1.1.2 les différents type d'aciers.....	03
1.1.2.1 l'acier extra-doux.....	04
1.1.2.2 l'acier eutectoide'.....	04
1.1.2.3 l'acier hyperoeutectoide.....	04
1.1.3 structure des aciers.....	04
1.1.3.1 la ferrite.....	04
1.1.3.2 la perlite.....	05
1.1.3.3 la cémentite.....	05
1.1.3.4 l'austénite.....	05
1.1.4 les différentes familles d'aciers.....	05
1.1.4.1 les aciers faiblement alliés.....	05
1.1.4.2 aciers à roulement.....	05
1.1.4.3 aciers fortement alliés.....	06
1.1.4.3.1 les aciers rapides.....	06
1.1.4.3.2 les aciers inoxydables.....	06
1.2 <u>Etude de l'acier 100Cr6</u>	07
• Définition de l'acier.....	07
• Désignation de l'acier.....	07
• Composition chimique.....	07
• Caractéristique mécanique.....	07
• Domaine d'application.....	07
• Traitement thermique.....	08
1.3 <u>caractérisation mécanique des matériaux</u>	08
1.3.1 les propriétés mécaniques.....	08
1.3.2 caractérisation mécanique des matériaux.....	09
1.3.2.1 les sollicitations mécaniques des matériaux.....	09
1.3.2.2 la notion des contraintes.....	11
1.3.2.3 classification des essais mecanique.....	11
1.3.2.3.1 l'essai de traction.....	12
1.3.2.3.2 l'essai de compression.....	14
1.3.2.3.3 l'essai de résilience.....	15
1.3.2.3.4 l'essai de fatigue.....	16
1.3.2.3.5 l'essai de dureté.....	16
1.4 <u>les essais mécaniques de base</u>	17
1.4.1 introduction.....	17

1.4.2	essai de traction.....	17
1.4.2.1	description générale d'une machine de traction	17
1.4.2.2	l'éprouvette de l'essai.....	18
1.4.2.3	le principe.....	18
1.4.3	l'essai de dureté.....	19
1.4.3.1	généralité et définition.....	19
1.4.3.2	machine de l'essai.....	19
1.4.3.3	principe de l'essai de pénétration.....	20
Chapitre 2 : Partie Théorique.....		21
2.1	<u>notion sur les traitements thermiques</u>	21
2.1.1	le recuit de recristallisation.....	21
2.1.2	le durcissement par trempe des aciers en carbone et des aciers faiblement alliés.....	22
2.1.2.1	l'austénitisation	22
2.1.2.2	la trempe.....	22
2.1.2.3	le revenu.....	23
2.2	<u>notion sur la microscopie</u>	25
2.2.1	introduction.....	25
2.2.2	éclairage.....	26
2.2.3	grandissement-grossissement.....	26
2.2.4	limite de résolution.....	26
2.2.5	les objectifs de microscope.....	26
2.2.6	les oculaires.....	27
2.3	<u>notion sur la dureté</u>	27
2.3.1	définition de la dureté.....	27
2.3.2	but et avantage de la mesure de la dureté.....	27
2.3.3	les différents type d'essai de dureté.....	27
2.3.3.1	essai Brinell.....	27
2.3.3.2	essai Vickers.....	28
2.3.3.3	essai Rockwell.....	29
Chapitre 3 : Partie Expérimentale.....		30
3.1	le but de travail.....	30
3.2	équipements utilisé.....	30
3.2.1	duromètre.....	30
3.2.2	le four pour le traitement thermique.....	30
3.2.3	la tronçonneuse.....	31
3.2.4	le microscope métallographique.....	32
3.2.5	la polisseuse	32
3.3	les éprouvette (préparation).....	33
3.3.1	éprouvette de l'essai de dureté.....	33
3.3.2	éprouvette de l'essai de traction.....	33
3.4	l'analyse chimique.....	34

3.5 réalisation des essais et analyse des résultats.....	34
3.5.1 préparation des échantillons pour une analyse microscopique.....	34
3.5.2 mesure de la dureté à l'état recuit.....	37
3.6 le mécanisme de la trempe.....	39
3.7 le processus opératoire de revenu.....	40
3.8 mesure de la dureté de l'échantillon après traitement.....	41
3.9 essai de traction.....	41

Introduction :

Le développement dans le domaine des matériaux est plus que nécessaire pour pouvoir produire des équipements stratégiques performants tels que les machines outils les machines agricoles les matériels roulants...etc.

C'est dans ce contexte qu'inscrit notre formation dans le domaine du génie des matériaux

L'objectif principal de cette étude est la caractérisation mécanique de l'acier 100Cr6 à travers la mesure de la micro dureté et la microscopie d'une part et aussi de mettre en évidence les effets de traitement thermique sur la structure et les propriétés mécaniques du deux nuances d'acier à roulement d'autre part.

Le mémoire est agencé en trois chapitres distincts et complémentaires :

- Le premier chapitre propose une analyse bibliographique sur les alliages ferreux, l'étude de l'acier 100Cr6, les méthodes de caractérisation des métaux en générale, et les essais mécaniques.
- Le deuxième chapitre donne un aperçu sur les traitements thermiques, la microscopie et la dureté.
- Le troisième chapitre montre la procédure expérimentale adoptée pour mener à bien les différentes étapes pratique, et la présentation des résultats obtenus à travers les observations microscopique et les prélèvements de la dureté.

I .1.Etude des alliages fer carbone :

I .1.1. Définition de l'acier :

L'acier est un alliage de fer et de carbone. En effet, à l'état naturel, le fer se présente sous forme d'oxyde, de carbone ou de sulfure. En traitant les minerais de fer, on obtient non pas du métal pur, mais un mélange de fer et de carbone. On désigne ce mélange soit de fonte ou d'acier.

Il est considéré comme fonte s'il contient entre 2.5 et 6 % de carbone. Il est considéré comme acier s'il contient moins de 1.8 % de carbone. Si l'acier comporte moins de 0.8% de carbone, il dit hypoeutectoïde. Par contre s'il est plus carburé, il dit hypereutectoïde, 0.8%C est le point appelé « eutectoïde ». Actuellement, on obtient l'acier en se débarrassant du carbone de la fonte produite dans les hauts Fournaux, ce qui signifie que la teneur en carbone est ramenée à moins de 1.8%. Par ailleurs, on essaye d'éliminer le plus d'impuretés possibles, telles que : le soufre ou encore le phosphore. Toutefois, même si ces derniers sont considérés comme étant des impuretés indésirables, on peut aussi ajouter du silicium, du nickel, du chrome, du cuivre, ou du manganèse, en quantité ajustables en fonction de la qualité recherchée du produit. La teneur en carbone peut évoluer entre 0.03 et 1.8%. La quantité de ce dernier modifie les propriétés mécaniques : moins il y a de carbone, plus l'acier est plastique et malléable ; plus il y en a, plus l'acier est dur et résistant.

L'acier est ductile, c'est -à-dire qu'il peut subir des changements de forme par compression ou par expansion, aussi bien à chaud qu'à froid. On dit aussi que certains aciers prennent la trempe (pas pour tous les aciers alliés). Ceci signifie qu'ils peuvent acquérir une grande dureté lorsqu'ils sont chauffés à une température très élevée et puis refroidis brutalement. Bien entendu, il y a plusieurs solutions pour durcir un acier, par exemple la technique d'écrouissage qui est un travail mécanique à froid.

Il existe 2 variétés allotropiques de fer, se qui joue un grand rôle pour les propriétés de l'acier. Le fait essentiel réside dans la différence de solubilité du carbone dans chacune de ces formes. Le fer γ appelé austénite, possède 2% de carbone à 1145°C. Le fer α appelé ferrite possède 0.0218% de carbone à 727°C. À cause de cette faible solubilité, la carbone forme aussi du carbure de fer (Fe_3C), appelé aussi cémentite. Ainsi, l'acier est constitué à température ambiante de ferrite et cémentite. Par contre à température élevée (à partir de 730°C), la ferrite est transformée en austénite. Cette température destinée à transformer l'acier, s'appelle l'austénitisation. Cette présence de carbone joue un rôle important sur les températures nécessaires pour l'austénitisation.

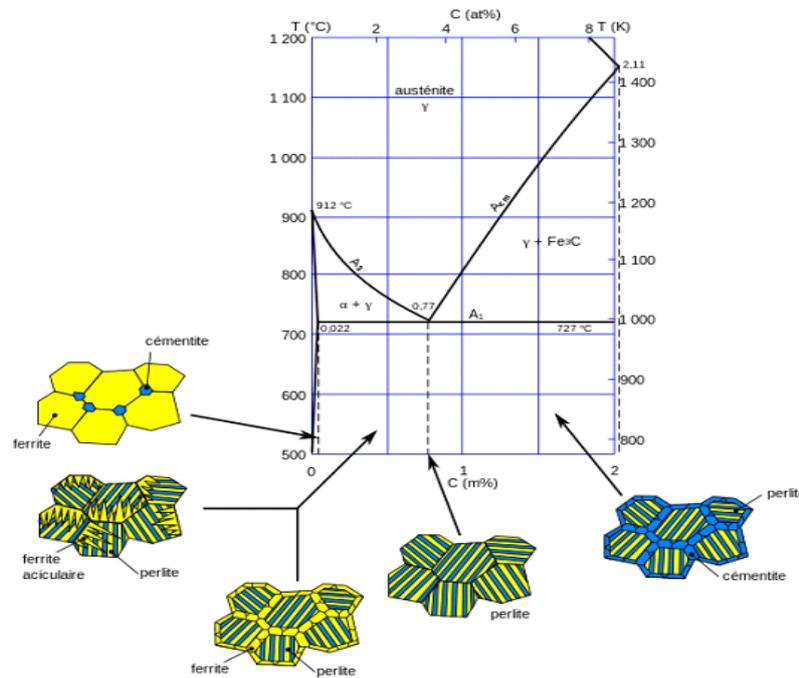


Fig. I.1 : Diagramme d'équilibre Fe-C

-Par exemple :

*pour un acier eutectoïde, l'austénitisation se produit à 730°C

*pour un acier de 1.4% de carbone, l'austénitisation se produit à environ 960°C

I.1.2. Les différents types d'aciers au carbone :

La teneur en carbone a une influence considérable sur les propriétés de l'acier : en dessous de 0.008%, l'alliage est plutôt malléable et on parle de « fer, presque pur » ; au-delà de 2.11%, les inclusions de carbone sous forme de graphite lamellaire fragilisent la microstructure et on parle de fonte. Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage ; on parle d'acier « extra doux, doux, mi-durs, durs, ou extra-durs » (classification traditionnelle).

On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'acier allié. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes) Prenant en surface ou à cœur de la matière ; on parle alors d'aciers traités. Outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeur élevée dans les propriétés mécanique fondamentales.

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone qu'ils contiennent :

I.1.2.1 l'acier extra-doux :

Ont teneur inférieure à 0.022% de carbone ; ils sont hors de la « zone d'influence » de l'eutectoïde (perlite) et n'ont donc pas de perlite ; ils sont durcis par des précipités de cémentite en faible quantité ;

Entre 0.022 et 0.77% de carbone, la cémentite est présente dans la perlite mais n'existe pas sous forme de phase à l'état pur.

I.1.2.2 l'acier eutectoïde :

(0.77% de carbone) contient 100% de perlite (soit sous forme de lamelles alternées de ferrite et de cémentite ou de sphéroïdes).

I.1.2.3 l'acier hypereutectoïde :

(De 0.77 à 2.11% de carbone) qui sont les plus résistants.

La limite de 2.11% correspond à la zone d'influence de l'eutectique (lédéburite) ; il existe toutefois des aciers lédéburitiques.

La structure cristalline des aciers à l'équilibre thermodynamiques dépend de leur concentration (essentiellement en carbone mais aussi d'autre élément d'alliage), et de la température. On peut aussi avoir des structures hors équilibre (par exemple dans le cas d'une trempe).

I.1.3 structure des aciers :

Lors de refroidissement d'un lingot, l'acier se solidifie à l'état d'austénite. Au cours du refroidissement, à 727°C, l'austénite se décompose, soit en ferrite + perlite, soit en perlite + cémentite. La vitesse de refroidissement ainsi que les éléments d'alliages ont une importance capitale sur la structure obtenue, et donc sur les propriétés de l'acier. En effet, les joints de grain bloquent les dislocations, donc augmente la dureté et la limite élastique or, plus les grains sont petits, plus il y a de joints de grain ...

I.1.3.1. la ferrite (F, α) :

C'est une solution solide d'insertion du carbone et des autres éléments (Si, Mn, S, P) dans le fer α ayant un réseau cristallin cubique centré R.C.C, qui a 0.006%C. elle possède une haute conductibilité électrique et calorifique, ainsi qu'une importante malléabilité et résilience, par contre elle est peu résistante et douce. Au microscope elle apparaît sous forme de grains blancs.

*la résistance mécanique : $R=30 \text{ daN/mm}^2$.

*la dureté Brinell : 80HB.

*l'allongement : $A=35 \%$.

I.1.3.2. la perlite (P) :

C'est un mélange physique de ferrite et cémentite, appelée aussi eutectoïde qui a exactement 0.85%C. elle apparaît sous forme de grains sombres, qui a un aspect lamellaire. Ses caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

*R=85 daN/mm².

*dureté Brinell : 200 HB.

*A=10%.

I.1.3.3. la cémentite (Fe₃C) :

C'est un carbure de fer, très dur, sa présence augmente la dureté et la limite élastique, mais diminue la ductilité. C'est son pourcentage de carbone très élevé (6.67%C), qui lui confère cette grande dureté (environ 800).

I.1.3.4. l'austénite :

C'est une solution solide d'insertion du carbone et des autres éléments (Si, Mn, S, P) dans le fer γ , qui a un réseau cristallin cubique à faces centrées R.C.F.C et dont son pourcentage de carbone est variable en fonction de la température. Sa dureté Brinell varie de (170-200) HB.

I.1.4 les différentes familles d'aciers :

Il existe des aciers faiblement alliés, à faible teneur de carbone, et au contraire des aciers contenant beaucoup d'élément d'alliage (par exemple, un acier inoxydable typique contient 8% de nickel et 18% de chrome)

I.1.4.1. aciers faiblement alliés :

Aucun élément d'addition ne dépassant 5% en masse, ils sont utilisés pour les applications nécessitant une haute résistance. Prenons l'exemple de l'acier 100Cr6 : 1% de carbone et 1.5% de chrome, c'est l'acier typique utilisé dans les aciers à roulements.

I.1.4.2 acier à roulement :

Les aciers à roulements doivent satisfaire à des exigences très rigoureuses en ce qui concerne les inclusions non métalliques. Leur présence dans la partie sollicitée, provoque une concentration de contraintes qui entraîne une rupture de fatigue prématurée les bagues, rouleaux et bielles, exigent dans les conditions de travail, une dureté, une tenue à l'usure et une résistance élevées.

A l'état recuit, ces aciers ont une structure polycristalline à grain fins, assez usinable avec une dureté d'environ 187HB. Après une trempe à l'huile et revenu à basse température (200°C) la dureté atteint (61 à 66) HRC. Les bagues, les rouleaux et les bielles sont fabriquées en acier à haut carbone. Dans le cas de grosse pièces, on utilise comme addition, du chrome-manganèse-silicium ou du chrome-nickel (aciers de cémentite). Pour les roulements travaillant dans des milieux agressifs, on emploie l'acier inoxydable à 1.2 % C et 1.4% Cr

Nuances DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HRC)	Applications
105 Cr4	70	63 à 67	Roulement à bagues de 10 à 17 mm de diamètre.
100 Cr6	70	63 à 66	Bague de roulements à billes, disque et anneaux de butées à billes et à galets, sièges de roulements.
100 CrMn6	73	63 à 66	Bagues de plus de 30 mm d'épaisseur de paroi à l'état fini.
X90CrMoV18	85	57 à 59	Roulements inoxydable, rouleaux à billes, à galets.

Tableau I.1 : nuances d'aciers pour roulements et leurs principales applications.

I.1.4.3 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, utilisé 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).

I.1.4.3.1 les aciers rapides :

Les aciers rapides sont généralement utilisés à des duretés importantes (plus 60 HRC) ou ils conservent une résilience acceptable. Ils présentent en générale une forte résistance à l'usure du fait de leur fort alliage et de la présence significative d'éléments producteurs des carbures durs tels que le tungstène et le vanadium.

I.1.4.3.2 les aciers inoxydables :

Ces aciers présentent une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (déformation irréversible). Ils sont essentiellement alliés au chrome, élément qui confère la propriété d'inoxidabilité, et au nickel, élément qui confère de bonne propriété mécanique. Les aciers inoxydables sont classés en 4 familles : ferritique, austénitique, martensitique, et austénito-ferritique.

I.2. Etude de l'acier 100Cr6 :

Les roulements sont des éléments souvent présents dans les systèmes mécaniques lorsqu'une fonction de rotation doit être assurée. Les alliages utilisés pour réaliser le roulement sont choisis en fonction de leurs caractéristiques de la dureté. La plupart présentent l'inconvénient d'être constitués de structures métastable, susceptibles d'engendrer des variations dimensionnelles en service. C'est notamment le cas des structures martensitiques de l'acier 100Cr6, le plus utilisé dans l'industrie du roulement.

La prospection des conditions optimales de traitement thermique de façon à obtenir le meilleur compromis dureté-stabilité dimensionnelle et la détermination d'évolution en service.

-Définition de l'acier 100Cr6 :

Fait partie de famille des aciers faiblement alliés qui peuvent être forgés, acier à outil, au chrome à haute teneur en carbone.

-Désignation de l'acier 100Cr6 :

Norme	Désignation de l'acier 100Cr6
AISI	52 100
NF A 35-573/4	100C6
EN 10027	100Cr6

Tableau I.2. : Désignation de l'acier 100Cr6 selon les normes

-composition chimique :

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%
0.93-1.05	0.15-0.35	0.25-0.45	≤ 0.025	≤ 0.03	1.35-1.60	≤ 0.10

Tableau I.3.: composition chimique de l'acier 100Cr6

-caractéristique mécaniques :

Sensible aux chocs. Bonne ténacité, bonne résistance à l'usure.

Leur module d'élasticité $E = 205000 \text{ N/mm}^2$.

Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	Rr (N/mm ²)	A%	Dureté après trempe	Kv (j/cm ²)
550-850	750-850	850-1250	10-13%	63-63 HRC	3.5

Tableau I.4 : caractéristiques mécaniques de l'acier 100Cr6

-Domaines d'application :

Cet acier typique utilisé dans les roulements à billes, rouleaux ou à aiguilles, cuvettes, butées, cames, galets, très utilisé en mécanique d'outillage : goupilles, poinçons, colonnes de guidage, limes, forets, alésoirs.....

-Traitements thermiques :

Le principe du traitement thermique de l'acier à roulement est de lui donner une structure martensitique qui lui confère :

- *la dureté requise (62HRC environ)
- *la résistance à la fatigue
- *la stabilité dimensionnelle
- *la résistance à l'usure

Le traitement thermique habituellement pratiqué sur le 100Cr6 pour confère à l'acier la dureté et la stabilité indispensables au roulement, est constitué d'une austénitisation entre 830°C et 850°C, d'une trempe à l'huile, puis d'un revenu de détente. Le choix de revenu permet d'obtenir un compromis dureté-stabilité dimensionnelle qui dépend de l'application visée.

Recuit °C	Trempe °C	Revenu °C
720-800	830-870 à l'huile	150-300

Tableau I.5. : Traitements thermiques – températures approximatives.

I.3 Caractérisation mécanique des matériaux :**I.3.1 Les propriétés mécaniques :**

Ce sont des propriétés relatives aux aspects de résistance aux efforts, des déformations résultantes des efforts, des contacts entre solide (chocs, glissement...)

***La rigidité :**

C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer de façon élastique (et donc réversible). La rigidité est définie par le module d'élasticité E, plus le matériau est rigide, plus la force qu'on peut lui appliquer est importante.

***Elasticité :**

C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer sous une charge (un effort) et de retourner à son état initial après décharge.

***Résistance maximale :**

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau. La charge peut être effort en traction ou couple en torsion.

***Limite élastique :**

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau pour se déformer d'une façon élastique.

***Plasticité :**

C'est la déformation d'un matériau sous une charge sans venir à son état initial après décharge.

***Ductilité :**

C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement avant rupture. Un matériau qui se déforme plus avant rupture est plus ductile qu'un matériau qui se déforme moins.

***Fragilité :**

C'est la facilité avec laquelle on peut fracturer un matériau, un matériau fragile se déforme plastiquement.

Remarque :

La ductilité et la fragilité sont deux notions opposées. Elles peuvent être exprimées par :

- l'allongement à la rupture A%
- le pourcentage de striction Z
- la résilience déterminée par essai Charpy.

***Ténacité :**

C'est l'aptitude d'un matériau à absorber l'énergie lors d'une déformation plastique. C'est une combinaison entre la bonne résistance à la rupture et la bonne ductilité. Une des façons de définir la ténacité est la surface engendrée par la courbe de traction. La ténacité peut être mesurée par l'essai de résilience « Charpy ».

I.3.2 Caractérisation mécanique des matériaux :

Les caractéristiques mécaniques des matériaux sont définies à partir d'essais mécaniques normalisés; chacun de ses essais reprenant à son compte une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

Les caractéristiques d'un matériau vont permettre de le classer en différentes catégories pour pouvoir le choisir le moment venu.

Les critères de choix sont :

- *légèreté
- *résistance/fragilité
- *dureté superficielle
- *durée de vie/fatigue...

I.3.2.1 les sollicitations mécaniques :

Toute structure, donc tout matériau, est sollicitée en permanence par actions mécaniques. Chaque sollicitation peut être décomposée par une ou plusieurs sollicitations mécaniques simples qui sont :

Traction

Compression

Cisaillement

Torsion

Flexion

***Sollicitations mécaniques simples (définition simplifiées) :**

a-Traction : sollicitation mécanique qui consiste à « tirer » dans le sens de la pièce.

Exemple : la traction d'un câble télésiège

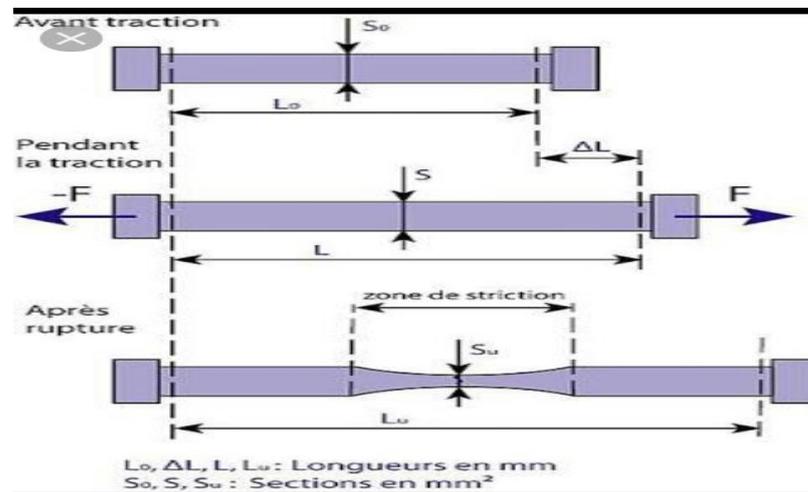


Fig. I.2 : Essai de traction

b- Compression : sollicitation mécanique qui consiste à « comprimer » une pièce
Exemple : la compression subie par le pilier d'un pont, écrasement d'une canette vide.



Fig. I.3 : Essai de compression sur une éprouvette de béton.

c- Cisaillement : sollicitation mécanique qui consiste à « trancher » une pièce

Exemple : les ciseaux coupant une feuille de papier, cisaillement d'une vie, le cisaillement d'une craie.

d-Torsion : sollicitation mécanique qui consiste à « tordre » une pièce suivant son axe
Exemple : la torsion d'un tournevis lors de son utilisation.

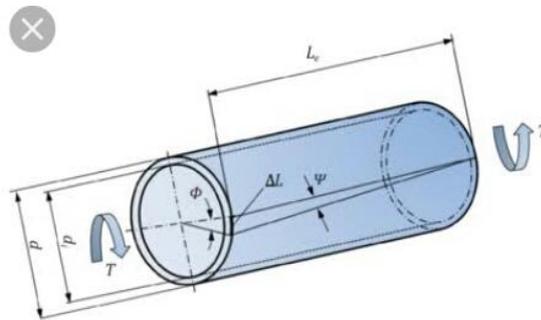


Fig. I.4 : Essai de torsion

e- Flexion : sollicitation mécanique qui consiste à « déformer » une pièce par effort perpendiculaire à sa fibre neutre.

Exemple : le fléchissement du tablier d'un pont

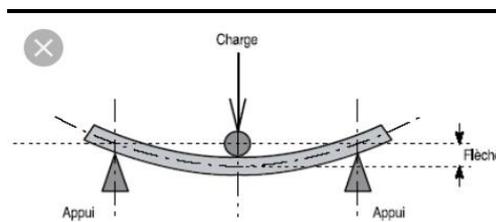


Fig. I.5 : Essai de flexion

I.3.2.2 la notion de contrainte :

Lorsqu'on sollicite un matériau, sa réaction est simple : il se déforme, parfois jusqu'à la casse. C'est une grandeur physique appeler la CONTRAINTE qui va agir sur le matériau. La contrainte est une grandeur physique qui dépend de la force et de la surface du matériau. Elle est exprimée en : MPa si la force est en N et la surface en mm².

$$\sigma = F/S_0 \quad [1.1]$$

I.3.2.3 classifications des essais mécaniques :

Les essais mécaniques sont classés en deux grandes familles : les essais destructifs nécessaires des éprouvettes d'essais et les essais non destructifs pouvant être directement appliqués sur la pièce à étudier. On distinguera :

Destructifs	Non destructifs
L'essai de traction	L'essai de fatigue ou d'endurance
L'essai de compression	L'essai de fluage
L'essai de résilience	L'essai de dureté

Tableau I.6. : Classification des essais mécaniques

I.3.2.3.1 L'essai de Traction :

L'objectif de l'essai de traction est principalement d'identifier :

- *La rigidité du matériau
- *La Résistance d'un matériau

-Le principe :

Il consiste à soumettre une éprouvette de forme et dimensions à une force de traction suivant son axe jusqu'à rupture de l'éprouvette.

-Diagramme du l'essai :

Voila la courbe que l'on obtient lors d'une éprouvette en acier.

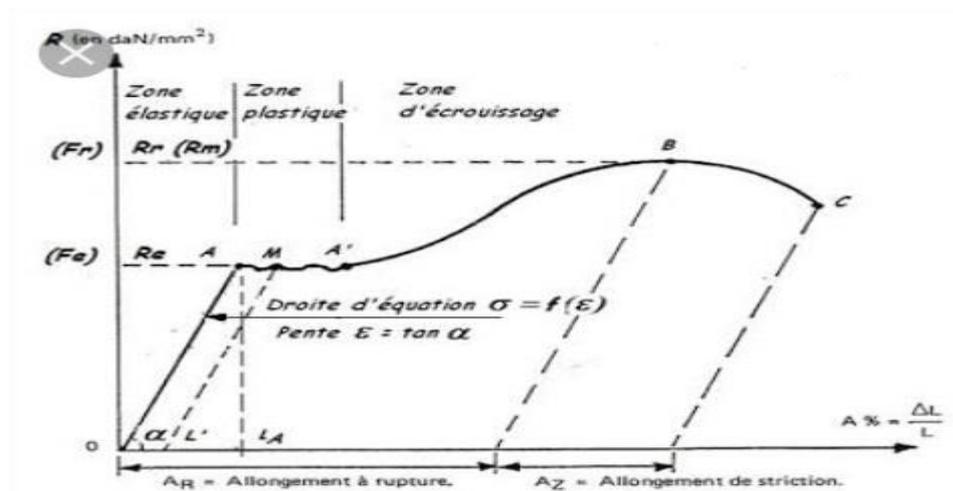


Fig.I.6 Courbe d'un essai de traction

Le domaine élastique (I) :

- *tous les matériaux disposent d'un domaine élastique.
- *c'est un comportement élastique réversible : le matériau s'allonge quand on tire dessus et l'arrêt de traction entraîne un retour élastique du matériau à son état d'origine aucune déformation définitive.

C'est une zone dans laquelle la contrainte σ est en fonction de la déformation ϵ : Comportement linéaire de pente E, module de Young en Nm^2 .

$$\sigma = E \epsilon \quad [1.2]$$

- *la fin de la zone élastique marque la fin du comportement linéaire du matériau.

*elle a lieu pour un contrainte appelée limite élastique du matériau et notée R_e (Mpa) : contrainte maximale avant déformation définitive de la matière. R_e correspond au seuil d'écoulement plastique.

Si $\sigma < R_e$ alors aucune déformation définitive du matériau.

$$R_e = F_e / S_0 \quad [1.3]$$

Le domaine élastique (II) :

Dans ce secteur, il y a déformation définitive du matériau, il ne revient plus dans son état initial plus la contrainte augmente, plus la déformation est importante. La fin de ce domaine se situe pour une contrainte que l'on considérera comme contrainte maximum admissible par le matériau avant sa casse. Il s'agit de la contrainte R_m : contrainte à rupture ou résistance mécanique à rupture (en Mpa)

$$R_m = F_m / S_0 \quad [1.4]$$

Remarque :

Un matériau qui subit une déformation plastique garde son comportement élastique. Si on relâche l'effort de traction, le retour élastique du matériau a lieu. Il n'est par contre pas complet, le matériau restera déformé définitivement. L'élasticité du matériau est donc conservée jusqu'à sa destruction.

La zone d'endommagement (III) :

Dans cette zone, le matériau commence à se détériorer irrémédiablement (fissures). La casse peut intervenir à tout moment (et sans prévenir...) un matériau ayant cassé reste quand même élastique. Sa longueur finale à rupture est exprimée en% de sa longueur initiale : $A\%$: allongement à rupture

$$A\% = 100 \cdot \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad [1.5]$$

-Dernier paramètre :

Tout matériau qui va s'allonger dans un sens va forcément rétrécir dans l'autre sens. Cela est dû à la conservation de la matière. Une éprouvette qui s'allonge va donc voir son diamètre diminuer. En notant ε s'allongement longitudinal et ε_r l'allongement transversale, on peut exprimer le coefficient de poisson :

$$\nu = \frac{(d - d_0) / d_0}{(l - l_0) / l_0} \quad [1.6]$$

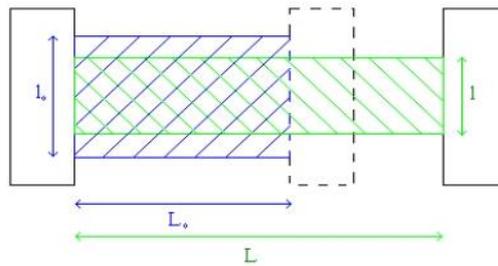


Fig. I.7. Le principe du coefficient de poisson

*Striction à la rupture :

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_f}{S_0} \quad [1.7]$$

I.3.2.3.2 L'essai de compression :

-Le principe :

Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette. On mesure simultanément les contraintes et les déformations au cours de l'essai. Pour obtenir des résultats comparatifs en compression il est nécessaire d'employer des éprouvettes de forme, de dimensions et de soumettre à l'essai dans des conditions bien définies.

-La machine d'essai :

La machine d'essai est du type à vitesse de compression constante, elle est constituée de :

- *un plateau fixe
- *un plateau mobile
- *un mécanisme d'entraînement de mouvement uniforme en vitesse contrôlée
- *un indicateur d'effort
- *indicateur de déformation

-Caractéristique obtenue :

$$\sigma = F/S_0 \quad [1.8]$$

F s'exprime en Newtons (N), la section en mm², la contrainte en MPa.

$$\varepsilon = \Delta l/l_0 \quad [1.9]$$

l_0 : longueur initiale, Δl : déformation relative.

I.3.2.3.3 L'essai de résilience :

Les paramètres de ténacité (si l'énergie à fournir pour produire une fracture dans une éprouvette est importante, on dira que le matériau est « tenace ») déterminée par l'essai de traction n'ont plus de sens lorsque la charge est de l'ordre de 1/100 de seconde. La Résistance au choc ou résilience est caractérisée par quotient de l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette à un seul coup par l'air de la section rompue.

-Le principe :

Il consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On mesure l'énergie absorbée par le choc et on en déduit la résilience. Elle est notée K_{cu} ou K_{cv} en (j/cm^2) .

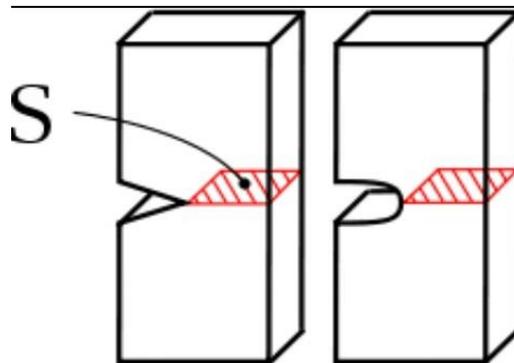


Fig. I.8. Schéma d'éprouvette de résilience entaillée en V et en U

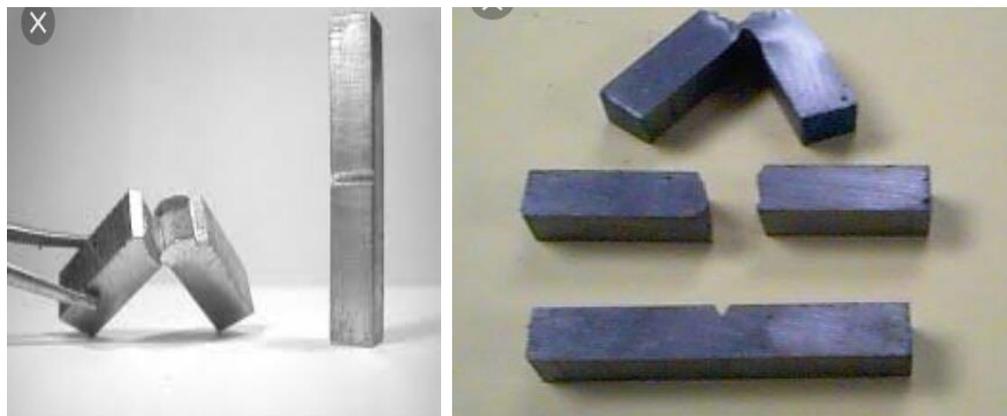
- L'éprouvette de l'essai :

Fig. I.9. Vue 3D des éprouvettes de l'essai de résilience

I.3.2.3.4 L'essai de fatigue :

- le principe :

La fatigue est un endommagement structural, progressif et localisé qui se produit quand un matériau est sollicité cylindriquement à des niveaux de contrainte inférieure à sa contrainte à rupture.

Les essais de fatigue caractérisent la capacité d'un matériau à résister à une sollicitation cyclique. Si le nombre de cycle est petit, on parlera de fatigue oligocyclique. Il existe plusieurs modes de sollicitation possibles :

Telles que la flexion, la traction, la torsion,...

-l'éprouvette de l'essai :

Les éprouvettes peuvent être de géométrie variées, en fonction de ce que l'on cherche à caractériser. Classiquement, elles peuvent être à section circulaire ou parallélépipédique, et d'épaisseur constante ou variable. Les plus générales sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable, comme celle présentée sur l'image de la figure (1.11).



Fig. I.10 vue 3D de l'éprouvette de l'essai de fatigue

I.3.2.3.5 Les essais de dureté :

La dureté d'un matériau est la résistance qu'il oppose à sa pénétration par un autre corps. La dureté H dépend de l'essai effectué. Elle est équivalente au rapport d'une charge sur une surface.

-le principe :

*pénétration lente d'un corps dur (indenteur) dont la forme dépend du type de test.

*mesure de la force sur l'indenteur et sa profondeur de pénétration.

I.4 Les essais mécaniques de base :

I.4.1 Introduction :

Les essais sont des expériences dont le but est de caractériser le comportement des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre les contraintes et les déformations (allongement unitaire sans démentions). Il est à noter qu'il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation.

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la forme de la pièce et la matière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc : la forme de la pièce dont est fait le matériau : on parle d'éprouvette normalisée ; comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette ; on parle d'essai normalisé.

I.4.2 Essai de traction :

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, les limites d'élasticité, la résistance à la rupture, le coefficient de poisson, le coefficient de striction, etc.

I.4.2.1 descriptions générales d'une machine de traction :

Une 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 à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine 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 diverse façon. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis.

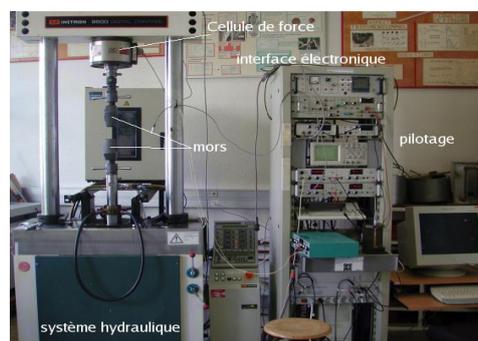


Fig. I.11 machine de traction

I.4.2.2 L'éprouvette de l'essai :

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées ses têtes d'amarrages avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter les concentrations de contrainte excessives.

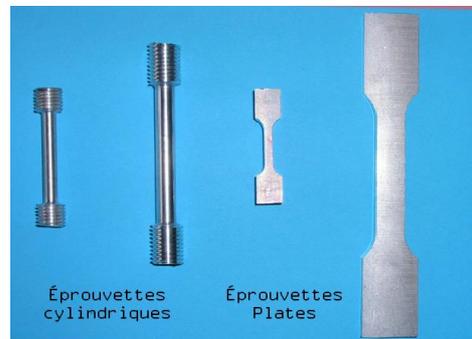


Fig. I.12 Eprouvette de l'essai de traction

I.4.2.3 le principe :

L'éprouvette est tenue en deux points (par une pince ou par crochet). Une force de traction est appliquée à vitesse constante. Ces essais permettent de tracer une courbe dite de traction à partir de laquelle les caractéristiques suivantes peuvent être déduites

- Le module de Young notée E
- La limite élastique souvent notée Re, ou bien la limite d'élasticité à
- La déformation plastique
- La résistance à la traction ou tension de rupture souvent notée Rr.

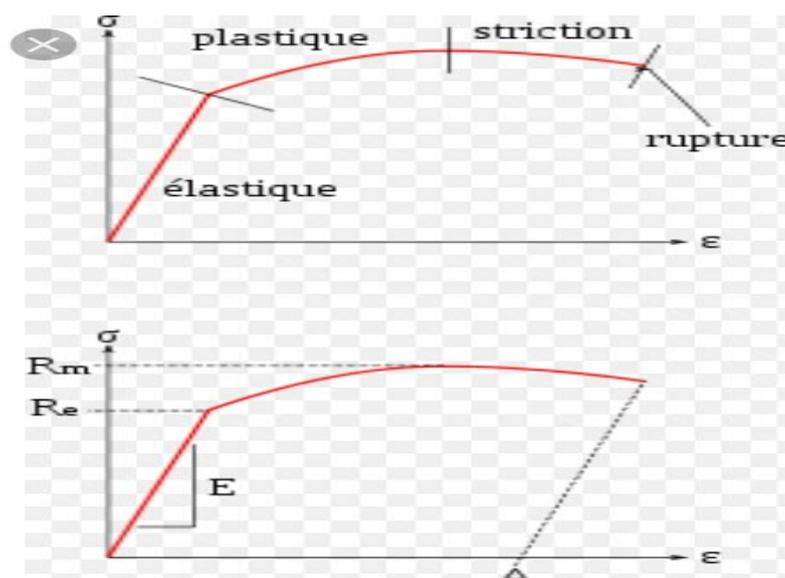


Fig. I.13 Courbe de traction

I.4.3 Essais de dureté :**I.4.3.1 Généralités et définition :**

Les essais de dureté sont d'une grande utilité pour les métallurgistes à cause de leur simplicité et de leur caractère peu destructif mais il faut bien noter n'est pas une propriété simple des matériaux métallique. La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classements. Cependant, le processus opératoire doit être précis pour assurer la reproductivité et la fidélité des résultats. C'est ce qui explique le grand nombre de normes dans ces domaines, pour les essais proprement dits, les machines d'essais et les étalons.

I.4.3.2 Machine d'essai :

Les machines d'essais de dureté universelles actuelles utilisent une technologie novatrice pour des essais de haute précision dans un large domaine d'application, et plus particulièrement pour l'assurance qualité, les essais sur chaînes de production et essai en laboratoire.

L'utilisation simple permet une prise en main très rapide de la machine d'essai de dureté. Les déroulements d'essai-configurable individuellement, peuvent être aisément chargés ou sauvegardés. Une analyse, automatique, complètement intégrée de l'image pour une précision élevée et fiabilité de la mesure de pénétration et de plus proposée en option.

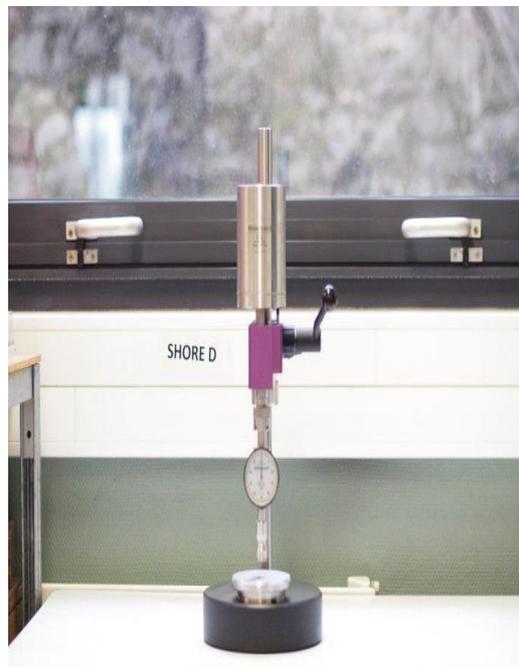


Fig. I.14 machine de dureté shore D

1.4.3.3. Principe de l'essai de pénétration :

Il consiste à enfoncer une pénétration dans le métal à essayer. La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte et l'autant plus grand que le métal est moins dur. La dureté H s'exprime par la force sur la surface de l'empreinte. On aurait donc tendance à exprimer H en méga pascals, mais pour insister sur le caractère conventionnel de l'essai de dureté, les chiffres de dureté sont sans dimension. Les essais les plus classiques sont les essais Brinell Vickers et Rockwell.

$$H=F/S$$

[1.10]

II.1 Notion sur les traitements thermiques :

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud et destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, certains traitements sont quasi obligatoires pour obtenir une performance optimale. Ces traitements sont la trempe et le revenu. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de l'acier. : Limite élasticité, résistance à la traction, ténacité, dureté et résilience aux besoins de l'utilisation. D'autres traitements, normalement destinés comme recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique.

Ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermique ou mécanique. Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels le refroidissement a entraîné l'hétérogénéité de la composition chimique (ségrégation) de l'austénite. Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique à une température aussi élevée que possible afin d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage. Le recuit de régénération ou normalisation sert à affiner le grain (le rendre plus petit) pour les pièces qui ont subi un grossissement de grain parce qu'ils étaient exposés à une température élevée lors d'une opération de forgeage, moulage ou soudage. Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques minutes, entre 50 à 100 °C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique.

Le refroidissement (normalement à l'air) ne doit pas être trop lent pour éviter un grossissement de grain de la ferrite. Sous les mêmes conditions, mais pour une durée un peu plus longue (15 à 30 min) on pratique le recuit d'adoucissement sur les pièces trempées pour faciliter ensuite leur usinage et formage.

Le recuit détente remet l'alliage en équilibre mécanique en diminuant les contraintes résiduelles (contraintes internes) résultant un travail à froid ou d'une opération de soudage.

II.1.1 Le recuit de recristallisation :

Sert à diminuer la fragilité d'un métal écroui et de lui redonner sa capacité de déformation. Pour un acier ordinaire, ce traitement s'effectue au-dessus de 600°C. Il est clair qu'un des ces traitements mentionnés peut remédier à plusieurs défauts à la fois.

Ceci est évident puisque les domaines de température des différents traitements se recouvrent particulièrement. Le but de cette expérience st de réaliser les traitements thermiques de trempe et revenus, sur des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés ainsi que de mettre en évidence, par des mesures de dureté, l'influence de teneur en carbone et des éléments alliés. La deuxième partie de l'expérience sera consacrée à l'essai Jominy, qui permet d'étudier de façon simple et directe l'effet de la vitesse de refroidissement lors da la trempe en bout et d'étudier la trempabilité d'un acier.

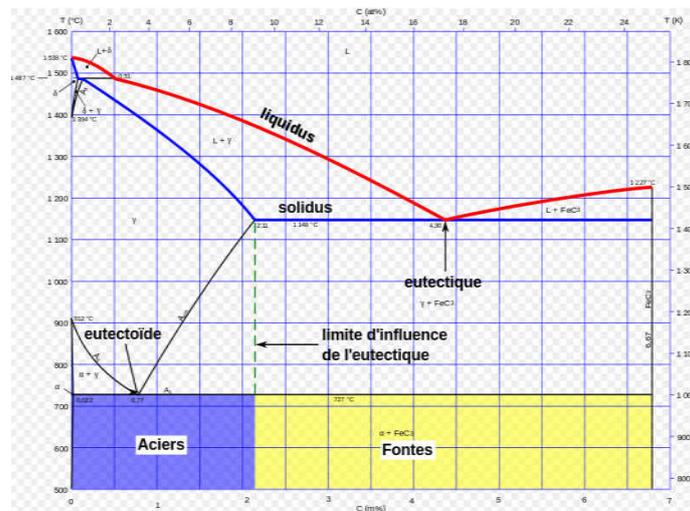


Fig. II.1 diagramme d'équilibre Fe-C métastable

II.1.2 Le durcissement par trempe des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés :

Le durcissement par tempe se déroule en trois étapes : l'austénitisation, la trempe et le revenu.

II.1.2.1 l'austénitisation :

L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 min dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformation les éléments microstructuraux ferritiques (α cc) en austénite (γ cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

II.1.2.2 la trempe :

- **Définition de la trempe :**

C'est un traitement thermique qui consiste à faire chauffer l'acier au-dessus de la température des points de transformation (A_{c1} et A_{c3}), à le maintenir à cette température pendant un certain temps donné et puis à le refroidir rapidement.

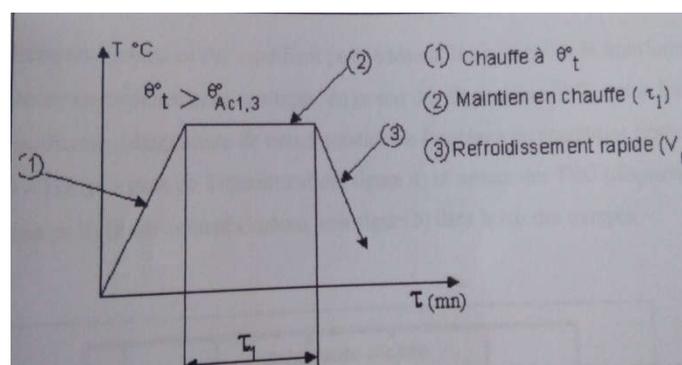


Fig. II.2 cycle thermique de la trempe

- **But de la trempe :**

La trempe est utilisée pour améliorer les qualités d'emploi ou de service de l'acier, qui se traduit par l'augmentation des caractéristiques de résistance (la dureté H, la limite élastique R_e ainsi que la résistance de rupture à la traction R_m). Toutefois, on constate la diminution des caractéristiques de plasticité (la résilience K et l'allongement A), ce qui procure un acier dur mais fragile.

La trempe apporte des modifications au niveau de :

- La constitution physico-chimique des grains (changement de phase)
- La structure (grosseur du grain et répartition des constituants).
- L'état mécanique (création de contraintes internes ou tension internes)

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitique et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée « température de trempe », dépend de la teneur en carbone de l'acier, elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C la trempe s'effectue en général soit à l'eau, à huile ou à l'air.

Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. L'austénite n'était pas stable à basse température et la ferrite n'était pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion.

L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influence par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages.

II.1.2.3 Revenu :

- **Définition :**

Le revenu est un traitement thermique appliqué essentiellement après la trempe. Il consiste en un chauffage à une température inférieure à la ligne de transformation critique A_{c1} , à un maintien à cette température pendant un certain temps donné, puis suivi d'un refroidissement relativement rapide

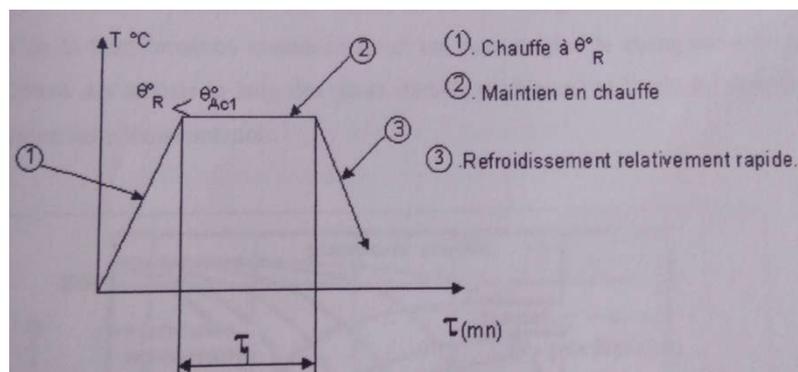


Fig. II.3 cycle thermique de revenu

- **But de revenu :**

Le revenu réalise un compromis entre deux exigences mécaniques souvent très contradictoire, qui sont :

- Maintenir une haute dureté de l'alliage.
- Diminution de la fragilité de l'acier.

Il a aussi tendance à supprimer presque totalement les contraintes internes, qui ont pris naissance au cours de refroidissement brutal de la pièce (diminution de la fragilité), donc rétablissement de l'équilibre mécanique. Il augmente l'allongement et la résilience tendit que la dureté et la résistance ont vocation à décroître sensiblement. Par ailleurs, ce traitement provoque la formation d'une structure plus stable, c'est-à-dire plus proche de l'état d'équilibre physico-chimique et structural.

Un acier trempé est dur, mais généralement très beaucoup fragile pour être utilisé directement, le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau.

Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur de la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissure de trempe).

D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique – métastable – vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et le cas échéant des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite.

Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées.

II.2 Notion sur la microscopie :

II.2.1 Introduction :

Le microscope est un instrument de base de caractérisation optique qui permet l'observation visuelle de petits objets ou de détails d'objets proches de l'observateur, usuellement indiscernables à l'œil nu. Ainsi, à l'instar de la loupe, une des propriétés principales de cet appareil est son grossissement, c'est-à-dire son aptitude à fournir une image grandie angulairement de l'objet étudié. Cependant, ce paramètre ne suffit pas à lui seul à caractériser les performances de l'appareil. Il faut en effet que cette propriété s'applique à tous les détails de l'objet, y compris les plus fins. La seconde propriété clé du microscope est donc son pouvoir de séparation, qui implique de travailler avec des optiques de grandes ouvertures numériques limitées par la diffraction. Les bons microscopes sont donc obligatoirement des systèmes optiques et mécaniques complexes de haute qualité, relativement fragiles et de prix élevé. Bien que la microscopie optique soit une science ancienne (XVI^{ème} siècle), elle n'en demeure pas moins une technologie de pointe toujours active.

Vous retrouverez incorporé dans beaucoup d'outils de caractérisation (profilomètre, microscope à force atomique, masqueur-aligneur, testeur sous pointes,...) un système de microscopie optique permettant le positionnement des échantillons à analyser. Le plus souvent le microscope associé à ces outils dispose d'une visualisation sur moniteur.

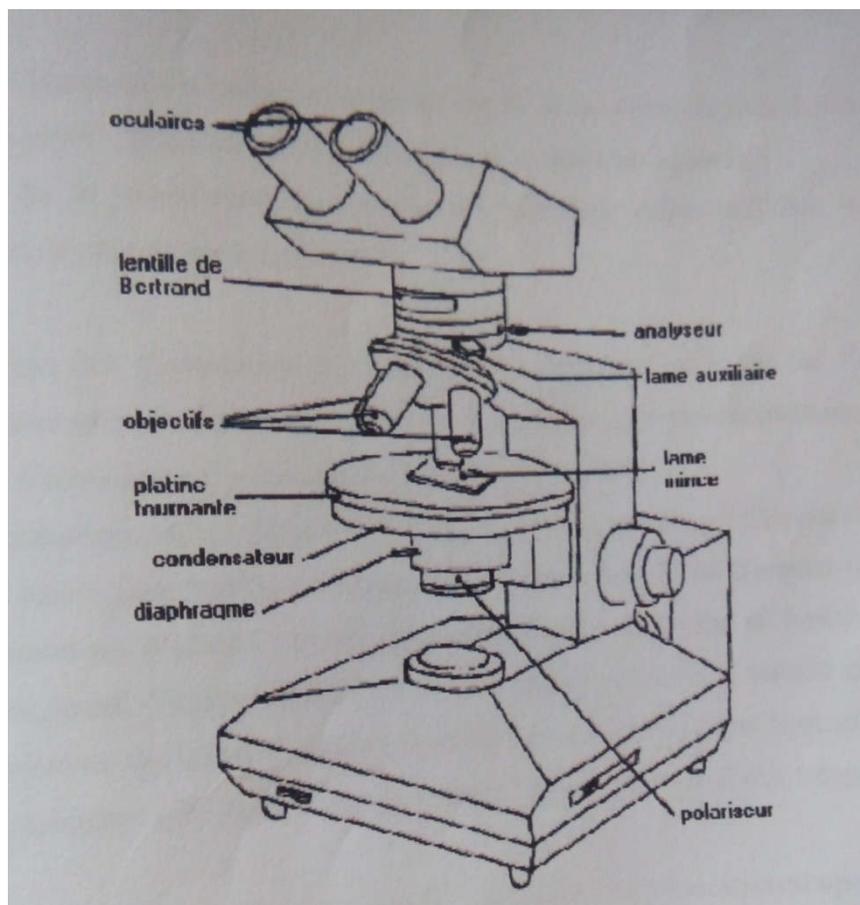


Fig. II.4 Schéma général d'un microscope optique

II.2.2 Éclairage :

Une observation de qualité d'un objet ne peut se concevoir que si celui-ci est bien éclairé. Les propriétés d'un bon éclairage en microscopie sont les suivantes :

- Uniformité de l'éclairage (pour voir l'objet et non les défauts de l'éclairage)
- Limitation de la zone éclairée au champ vu dans le microscope (pour limiter la lumière parasite)
- Contrôle de l'ouverture numérique (ou autrement dite de la cohérence partielle) de l'éclairage
- Contrôle souple de la luminosité de l'éclairage (confort de l'utilisation)
- Contrôle de la température de couleur de l'éclairage (reproductibilité des couleurs, important de photographie couleur)

On distingue les microscopes à réflexion (la lumière est réfléchiée par l'objet) et les microscopes à transmission (la lumière traverse l'objet). Pour tous les microscopes, le dispositif le plus courant d'éclairage est le condenseur de Köhler.

II.2.3 Grandissement-Grossissement :

Il convient de rappeler comment on distingue le grandissement du grossissement.

- Le grandissement est le rapport de la hauteur de l'image, non accessible car sur la rétine, sur la hauteur de l'objet (utilisé pour caractériser l'objectif de microscope).
- Le grossissement est le rapport de l'angle sous lequel on observe l'image virtuelle de l'objet à travers le microscope sur l'angle sous lequel on observait l'objet s'il n'y avait pas d'optique (utilisé pour caractériser l'oculaire).

II.2.4 Limite de résolution :

La nature ondulatoire de la lumière relie cette dernière propriété à l'ouverture numérique (O.N.) de l'objectif. Pour un objectif limité par la diffraction (et non par ces défauts ou aberration), la limite de résolution est de l'ordre de (λ / a) ou λ est la longueur d'onde de travail est a son O.N. on utilise donc en microscopies des objectifs de très forte O.N limité par la diffraction. De tels objectifs, qui nécessitent de nombreuses lentilles très précisément positionnées les unes par rapport aux autres, sont relativement fragiles et coûteux. Par ailleurs, pour obtenir les résolutions les plus élevées, il est intéressant de travailler dans un objet d'indice supérieur à 1.

II.2.5 Les objectifs de microscopes :

L'ouverture numérique (ON, NA) est une caractéristique essentielle d'un objet, $ON = n \sin \alpha$ ou n est l'indice de milieu, le plus souvent il s'agit de l'indice de l'air. C'est elle qui est directement responsable de la luminosité et de la résolution d'un objectif. Elle dépend directement de l'indice de réfraction du milieu et de l'angle formé par trois points particuliers sont : le centre de la lentille. Deux autres caractéristiques de l'objectif dépendent de l'ouverture numérique : ce sont la distance de travail et la profondeur de champ.

II.2.6 Les oculaires :

L'oculaire permet de définir le champ d'observation. Il est caractérisé par son grossissement et son indice de champs qui correspond au diamètre de la zone circulaire observable (de 12 à 25 mm pour les oculaires dits à grand champ).

Le diamètre observé dans l'oculaire est alors égal à l'indice/Gobi (mm).

Exemple : microscope avec un objectif 63x/1.4 et un oculaire 10x/25

Le grossissement est donc égal à 630.

Pour un oculaire grand champ, le diamètre observé est alors égal à $(25/63)=0.397$ mm ou 397 μ m

II.3 Notion sur la dureté :

II.3.1 Définition de la dureté (sens physique) :

La dureté caractérise la résistance qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps plus dur que lui. La dureté dépend des caractéristiques du matériau mais aussi de la nature et la forme de pénétrateur et du mode de pénétration. Il s'agit en fait de mesurer l'aptitude d'un matériau à résister la pénétration ou à la rayure d'un indenteur plus dur. La hauteur de rebondissement d'une petite masse dure est également considérée comme un moyen de définition de la dureté (dureté shore).

II.3.2 But et avantages de la mesure de la dureté :

Elle nous renseigne sur la variation de la structure et la nature de matériau, de même qu'elle donne un bon aperçu sur les autres caractéristiques mécanique. La rapidité et la simplicité d'exécution de l'essai, ainsi que le moyen qu'il présente pour apprécier les propriétés d'une pièce métallique sans la détruire, contribuent à sa large extension pour le contrôle de la qualité du métal et des pièces d'une façon générale.

II.3.3 Les différents types d'essai de dureté :

Dans la plupart des essais, on effectue une indentation (pénétration) sans choc dans le matériau à l'aide d'un pénétrateur spécial de nature et géométrie variable selon le type d'essai.

Le principe de mesure de la dureté repose sur la détermination de la surface ou de la profondeur de l'empreinte laissée par le pénétrateur, en fonction de la charge appliquée.

II.3.3.1 Essai Brinell :

L'essai de dureté Brinell fait appel à une bille en acier ou en carbure de tungstène, maintenu pendant un temps bien défini (15 à 30 secondes) et avec une force bien déterminée. Si F la charge d'essai (exprimée en newtons), D le diamètre (en millimètres) de la sphère (de la bille) et d le diamètre (en millimètres) de l'empreinte, la dureté Brinell est donnée par la relation :

$$HB = \text{constante} \cdot \frac{\text{(la charge de l'essai)}}{\text{(l'aire de l'empreinte)}} \quad [\text{II.1}]$$

$$HB = 0,102. \frac{2F}{\pi.D(D-\sqrt{D^2-d^2})}$$

Deux symboles sont utilisés pour indiquer une dureté Brinell :

- HBS pour l'essai effectué avec une bille en acier.
- HBW pour l'essai effectué avec une bille en carbure de tungstène.

Il existe une relation entre la dureté et la résistance à la traction ou rupture R_m , pour les aciers au Carbone $R_m = 3.5 HB$.

-Domaine d'utilisation :

Pièces laminées ou moulées, matériaux de dureté faible ou moyenne, pièces déformables et produits plats (mesures en atelier).

II.3.3.2 Essai Vickers :

Le principe de l'essai de dureté vickers est le même que celui de l'essai Brinell, mais le pénétrateur est ici une pyramide en diamant à base carrée d'angle au sommet 136° . Appliquée avec une force F de 49 à 980 N. on mesure la longueur d moyennes des deux diagonales de l'empreinte, à l'aide d'un système optique approprié. La dureté vickers HV est donnée par la relation suivante :

$$HV = \text{constante} \cdot \frac{(\text{Charge de l'essai})}{(\text{Aire de l'empreinte})} \quad [2.2]$$

$$HV = 0,189. \frac{F}{d^2}$$

La dureté vickers peut être étendue aux faibles charges (1.961 à 49.03) N, on parlera alors d'essai de micro dureté Vickers. C'est l'essai le plus précis des trois.

-Domaine d'utilisation :

Pièce de faible épaisseur, pièce réfléchissantes de dureté moyenne et élevée (mesures en laboratoire). Les pièces doivent avoir un état de surface très soigné et leur épaisseur e doit être :

$e > 1,5 d$, ou d , représente la diagonale de l'empreinte en (mm).

II.3.3.3 Essai Rockwell :

L'essai consiste à imprimer (sans choc) et en deux temps, dans la couche superficielle du métal un pénétrateur normalisé, et puis à mesurer l'accroissement rémanent e_3 de la profondeur de pénétration.

La procédure d'essai comporte trois étapes. Tout d'abord, le pénétrateur est mis en contact avec la surface du matériau à mesurer. Une recharge F_0 de 98 N lui est appliquée et l'indicateur d'enfoncement est mis à zéro. La deuxième étape consiste à appliquer une surcharge F_1 permettant d'atteindre la charge d'essai. La dernière étape consiste à retirer la surcharge (mais laisser le pré charge) et de lire la valeur de l'enfoncement.

Le nombre Rockwell est déduit des formules suivantes :

a) Pour les échelles A et C, on a : **$HRA (HRC)=100-e$**

b) Pour l'échelle B, on a : **$HRB=130-e$**

-e ; représente la déformation rémanence et est égale à :

$$e = \frac{e_3}{0.002} = \frac{e_2 - e_0}{0.002}$$

- e_3 ; représente l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration (mm).

Epaisseurs des pièces éprouvées (h) :

-h > 8e (pour les aciers) ; ou h est la hauteur de l'empreinte en (mm)

-h > 10e (pour les alliages légers, Al, Cu)

III.1 Le but du travail :

Le but de notre travail consiste à définir les caractéristiques mécaniques de l'acier 100Cr6 et savoir l'influence du traitement thermique (trempe et revenu) sur la dureté et la structure de l'acier.

III.2 Équipements utilisé :

III.2.1 Duromètre :

On a utilisé un duromètre indentec de modèle 8187.5 LKV ZWick/Roell ses caractéristiques sont :

- Vickers : 3.5 et 100 kgf
- Brinell : with 1mm diamètre ball indenter 5 et 10 kgf
- Rockwell: 10, 60,100 kgf



Fig. III.1 : Duromètre indentec

III.2.2 Le four pour le traitement thermique :

On a appliqué un trempe et revenu dans un four de modèle Barntead/thermolyne Benchtop Muffle Furnaces, type 48000, thermo scientifique. C'est un four à moufle compacts de table de fonction avancée de contrôle électrique. L'isolant en céramique offre efficacité énergétique maximale. La température maximale est de 1200 °C. Avec affichage numérique.



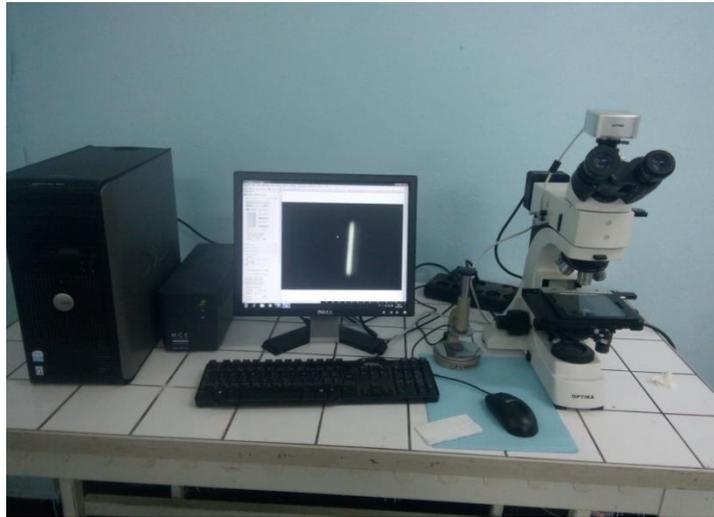
Fig. III.2 le four

III.2.3 La tronçonneuse :

On a utilisé une tronçonneuse metkon de modele servocut 301 MM. Elle sert à découper un tube d'acier à plusieurs échantillons à des dimensions selon notre besoin.



Fig. III.3 : la tronçonneuse

III.2.4 Le microscope métallographique :**Fig. III.4** Microscope métallographique**III.2.5 Polisseuse :**

On a fait un polissage à l'aide d'une polisseuse de modèle struers planopol_v, et papiers abrasifs. Ses papiers sont montés sur des tourets de polissage la vitesse est de 300-400 tr/min équipés d'un système d'arrosage à l'eau dont courante, pour l'échauffement des échantillons.

**Fig. III.5** Polisseuse

III.3 Les éprouvettes (préparation) :**III.3.1 Éprouvette de l'essai de dureté :**

Nous avons préparé 2 échantillons d'acier 100Cr6 et 2 échantillons d'acier 100Cr6 (stub) qui ont les mêmes caractéristiques géométriques pour chaque type de ces 2 aciers.



Fig. III.6 Echantillons d'acier 100Cr6

III.3.2 Éprouvette de l'essai de traction :

Éprouvettes pour l'essai de traction (100Cr6)

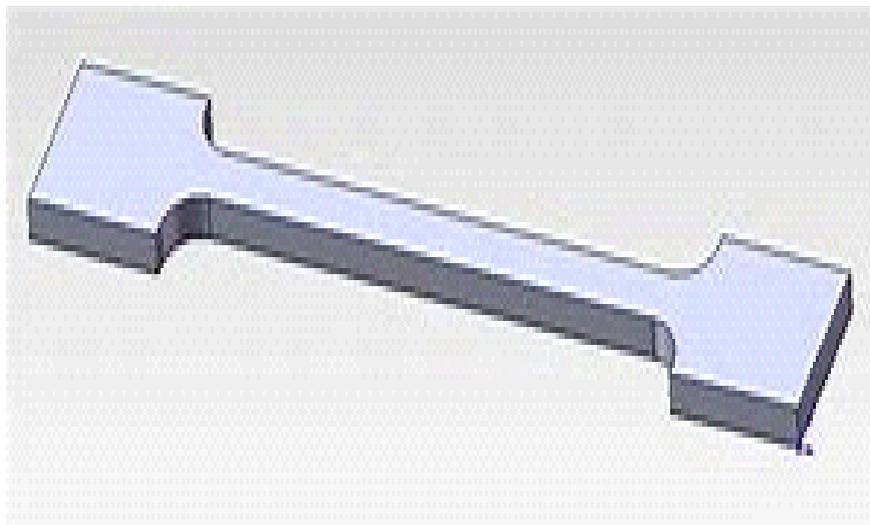


Fig. III.7 Vue 3D de l'éprouvette de traction en 100Cr6

III. 4 L'analyse chimique :

Les résultats de l'analyse chimique du 100Cr6, sont montrés dans le tableau ci-dessus :

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	CU	Valeurs
-	0.15	0.20	-	-	-	1.35	-	-	-	Mini Afnor
1.082	0.252	0.35	-	-	0.077	1.382	0.017	0.005	0.150	Mesurées Lot 3
1.10	0.35	0.40	0.025	0.030	-	1.60	0.10	-	-	Maxi Afnor

Tableau III.1 composition chimique de l'acier 100Cr6

III.5 Réalisation des essais et analyse des résultats :**III.5.1 Préparation des échantillons pour une analyse microscopique :**

* **Enrobage de l'éprouvette** : l'enrobage des pièces s'est fait à froid, par le biais d'une résine à 2 composants (poudre et sirop) auto-polymérisant (résine mecaprex KM-T, type acrylique). Avant la coulée de la résine, les échantillons sont préalablement disposés dans un moule approprié. Une fois l'enrobage terminé, la phase de polissage sur une polisseuse mono plateau peut alors commencer.



Fig. III.8 Vue globale de deux échantillons enrobés

- **Le polissage** : dans notre cas le polissage est obtenu manuellement, il vise à rendre les surfaces lisses et polies comme un miroir, pour faciliter la réflexion des faisceaux. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide de papiers abrasifs revêtus de carbure de silicium (S1C) à indice de granulation progressif 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, jusqu'au 2400 (papiers de finition). Ces papiers sont montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante, pour éviter l'échauffement des échantillons.

La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'afficher progressivement l'état de surface et de diminuer la rugosité moyenne, compte tenu de la

différence de dureté existant entre le carbure et la matrice métallique, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines.

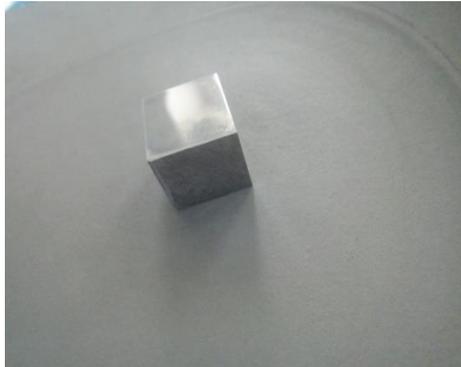


Fig. III.9 échantillon poli

- **L'attaque chimique** : le but de l'attaque chimique est de révéler la microstructure entière, avant de mettre en évidence les différentes phases constituant notre alliage, caractériser par les grains et les joints de grains. On a utilisé un réactif spécifique à notre éprouvette, qui n'est autre que du nital à 4% composé de 0.96% d'alcool et 0.04% d'acide nitrique (HNO_3). Le temps d'application de réactif chimique, doit être très court, afin d'éviter la détérioration de la surface à observer.



Fig. III.10 L'attaque chimique sur un échantillon d'acier 100Cr6

- **Observation au microscope optique** : on fait l'observation microscopique à l'aide d'un microscope métallographique et on trouve les résultats suivantes :
- **Pour l'acier 100Cr6** :
 - État recuit** : la structure est composée de deux constituants structuraux de **perlite** (noire) + **cémentite** (blanche) se précipitent au niveau de joints de grains.



Fig. III.11 100Cr6 recuit X20

- Pour l'acier 100Cr6 (stub) :
-Etat recuit :

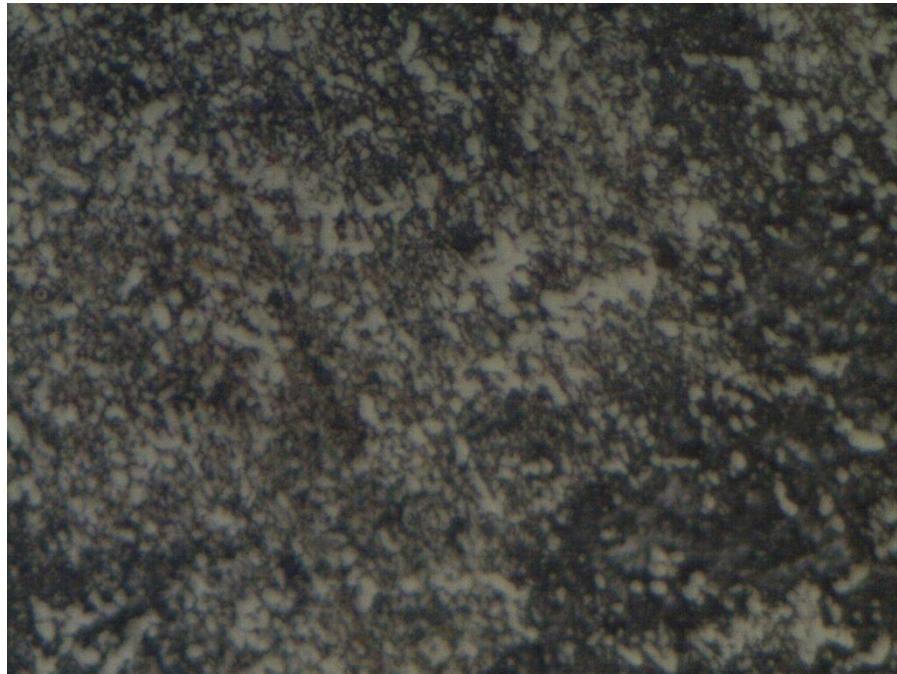


Fig. III.12 100Cr6 (stub) recuit X1000

III.5.2 Mesure de la dureté à l'état recuit :

Nous avons mesuré la dureté des échantillons à l'état recuit à l'aide d'un appareil de mesure de la dureté on a obtenu les résultats suivant :

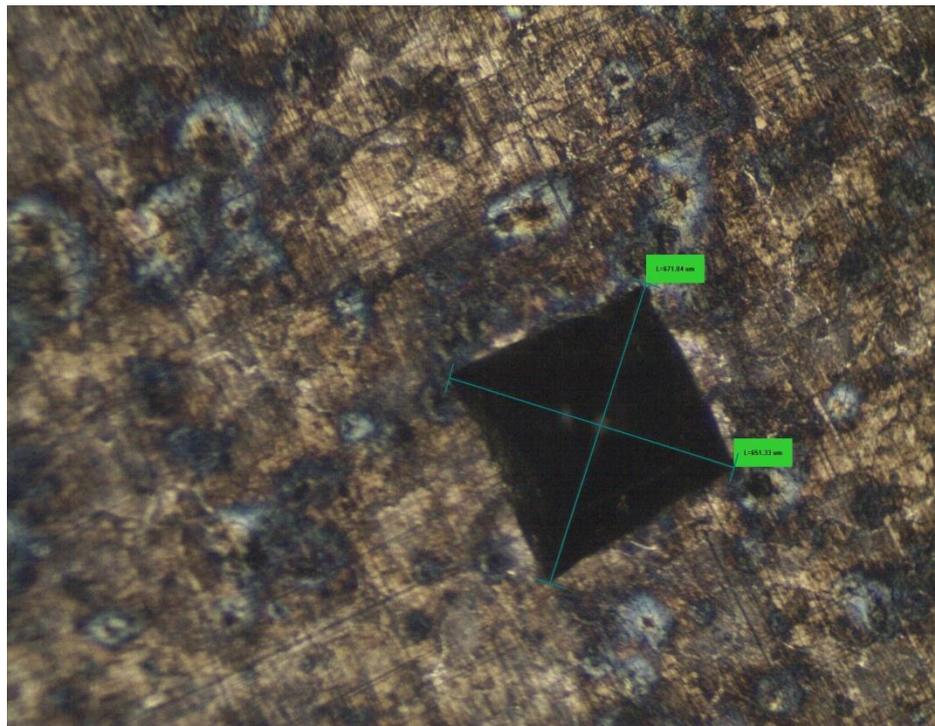


Fig. III.13 100Cr6 X 200HV (empreinte)

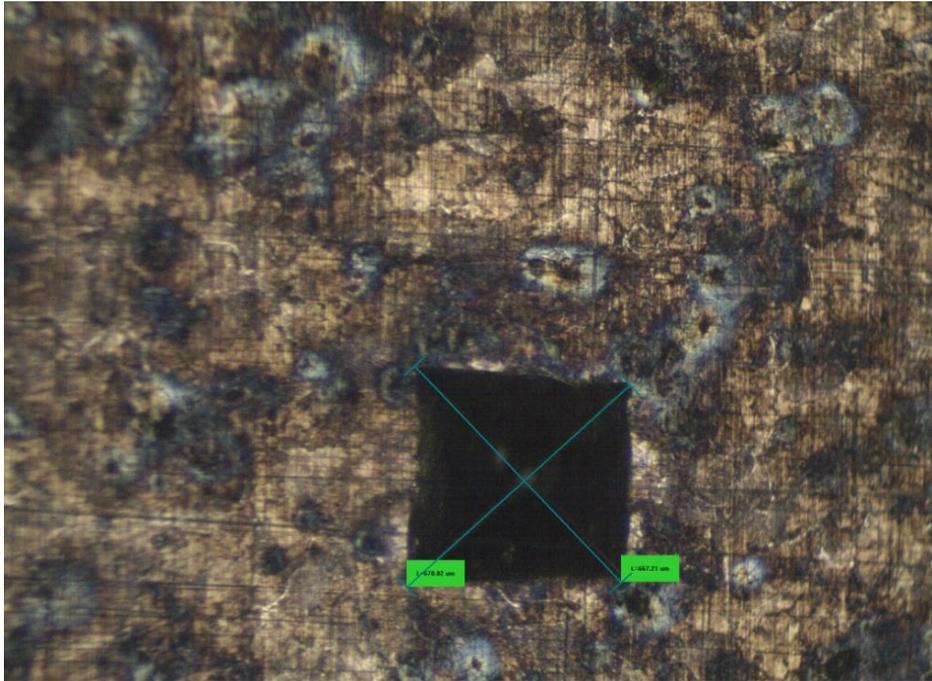


Fig. III.14 100Cr6 X200HV (empreinte)

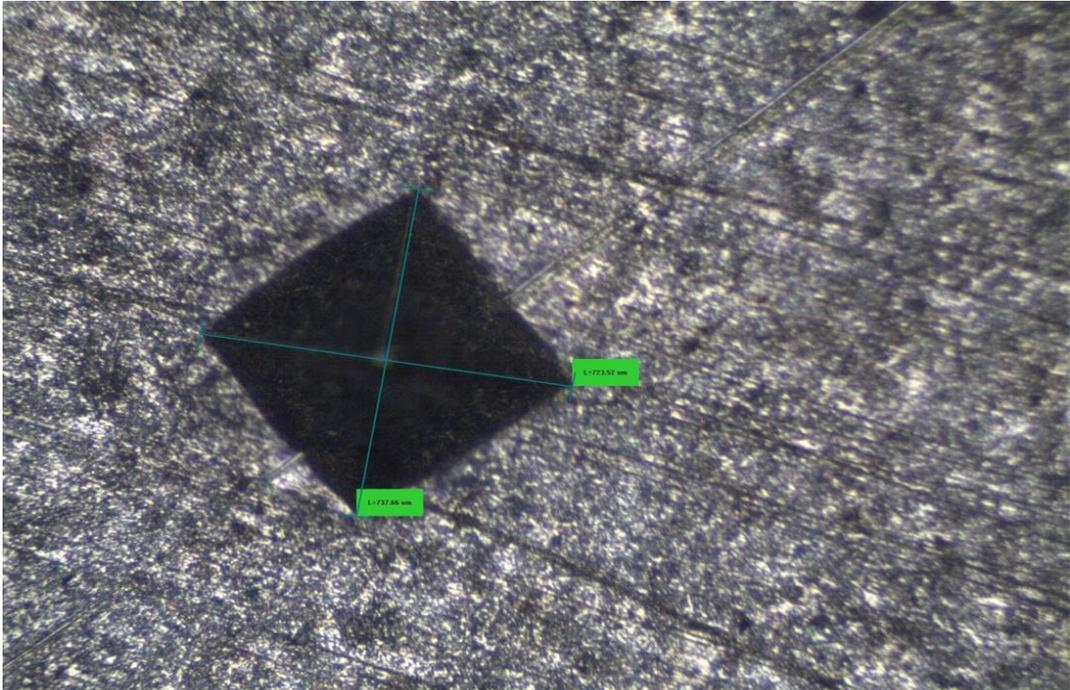


Fig. III.15 100Cr6 (stub) X200 HV

N°	Nuance de l'acier	Etat	Moyenne dureté en HV	Moyenne dureté en HRC
1	100Cr6	Recuit	309.2	30.63
2	Stub	Recuit	261.5	23.55

Tableau III.2 mesure de la dureté à l'état recuit des échantillons

III.6 Le mécanisme de la trempe :

- Chauffage lent jusqu'à 790 °C, correspond à la phase d'austénitisation, on a choisit les températures de trempe des échantillons à partir de diagramme d'équilibre Fe-C, on a chauffé l'échantillon à une température supérieures à ces points de transformation critique.
- Maintient en chauffe (s'séjour isotherme) à cette température, pendant 30 min, cette phase est utile, pour permettre un austénitisation complète. La durée de maintien dépend du volume de la pièce,
- Refroidissement rapide à l'huile.

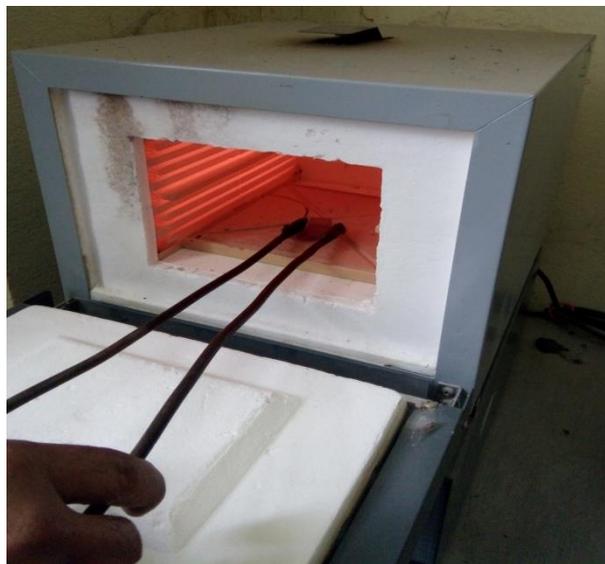


Fig. III.16 Vue montrant l'enlèvement de l'échantillon du four pour immersion dans un bain d'huile

III.7 le processus opératoire du revenu :

- Chauffage vers 200 °C selon les résultats souhaités et le pourcentage de carbone
- Maintien en température (la durée est aussi fonction du volume et dimension de la pièce à traiter)
- Refroidissement lent (à l'air libre).

* observation microscopique de l'échantillon après traitement thermique :



Fig. III.17 l'acier 100Cr6 trempé à l'huile X 1200



Fig. III.18 l'acier 100Cr6 après revenu X1200

III.8 Mesure de la dureté de l'échantillon après le traitement :

N°	Nuance de l'acier	Etat	Moyenne dureté en HV	Moyenne HRC	Rm(Mpa)
1	100Cr6	trempe	600	57	1650
2	100Cr6	Trempe + revenu	396.7	40.3	1260-1290

Tableau III.3 mesure de la dureté à l'état trempé et revenu des échantillons**III.9 Essai de traction :**

- **Mode opératoire :**
 1. Introduire les informations d'identification de l'éprouvette dans le logiciel (numéro d'identification, épaisseur ou diamètre pour le rond à béton, largeur)
 2. Placer l'éprouvette dans les mors de la machine suivant l'axe vertical de la traction.
 3. Remettre la force à zéro avant la fermeture des mors inférieurs.
 4. Fermer les mors inférieurs.
 5. Lancer l'essai et suivre l'évolution sur l'assistant graphique.
 6. Enregistrer les résultats d'essai (la résistance à la rupture, la limite d'élasticité) affichés par le logiciel.
 7. Calculer l'allongement après essais
 8. Remettre la position LE (écart libre entre mâchoires de la machine).
- Vérifier la conformité des résultats par rapport aux normes produits, en cas de non-conformité des résultats un contre essai est obligatoire

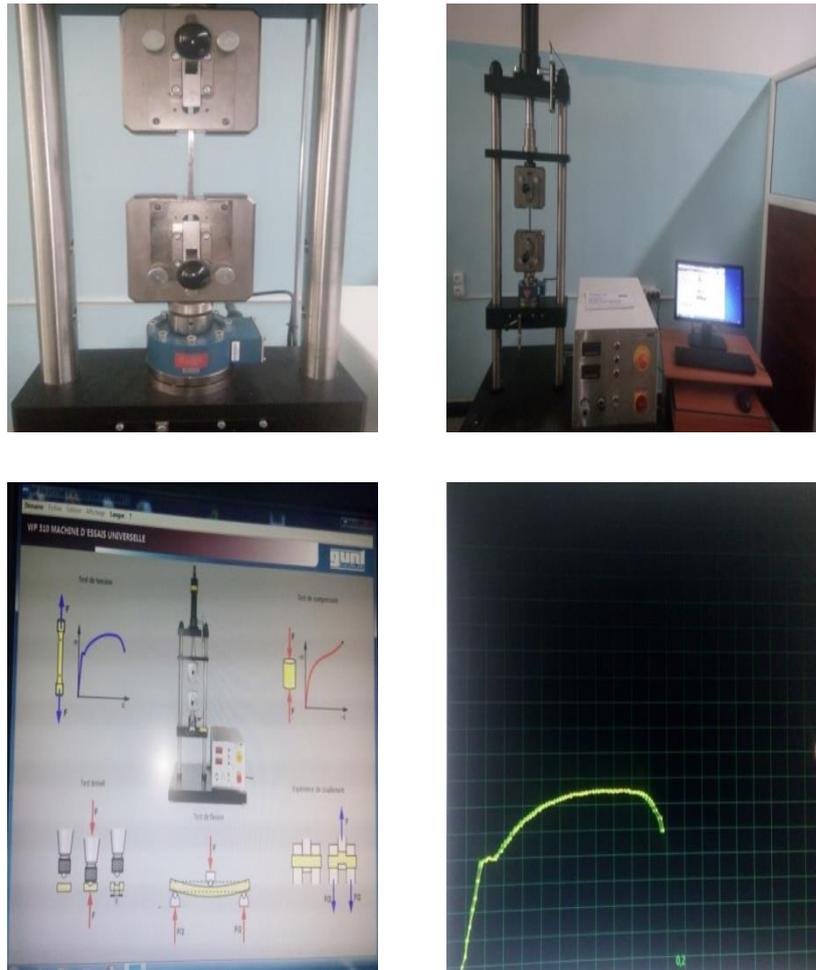


Fig. III.19 Essai de traction

Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	Rr (N/mm ²)	A%	Dureté après trempe	Kv (j/cm ²)
550-850	750-850	850-1250	10-13%	63-63 HRC	3.5

Tableau III.4 : caractéristiques mécaniques de l'acier 100Cr6

- Valeurs mesurées par l'expérience :

Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	Rr (N/mm ²)	A%	Dureté après trempe	Kv (j/cm ²)
700	1430	1350	11%	57HRC	3.5

Tableau III.5 : Caractéristiques mécaniques de l'acier 100Cr6

- Les valeurs mesurées par l'expérience réalisée pour caractériser l'acier 100Cr6 sont comprises dans l'intervalle des valeurs données dans la littérature. Cela est bien sûr évident car le matériau est fabriqué suivant plusieurs processus. Forgeage, laminage...etc.

Conclusion Générale

De cette étude, plusieurs points importants peuvent être retenus et qui se résument en ce qui suit :

- On a acquis un certain savoir faire, donc une expérience dans le domaine de la préparation métallographique et les traitements thermiques), qui nous seront très utiles à l'avenir tant sur le plan pédagogique.
- A noter que l'on a procédé à une opération d'enrobage avec de la résine, suivi d'un polissage et d'une attaque chimique et ensuite l'application des divers traitements thermiques.
- Les traitements thermiques pratiqués sur les échantillons, que ce soit la trempe ou le revenu, ont donné de très bons résultats qui concordent avec ceux de la littérature.
- L'observation microscopique de la structure après trempe, a révélé la présence de la martensite, constituant très dur mais aussi très fragile, conduisant à un écrouissage intense.
- L'application de revenu après trempe, a eu pour effet justement la diminution de cette fragilité, qui s'est traduite par une chute sensible de la dureté.
- La trempe à l'huile, a donné de meilleurs résultats par rapport à celle pratiquée à l'eau, étant donné l'absence totale de défauts tels que les tapures observées sur les échantillons trempés à l'eau.
- La bonne réussite de ces traitements thermiques appliqués sur ces aciers, est confirmée par les divers résultats de mesure de la micro dureté, auxquelles on a abouti.

Références Bibliographiques :

- [1] <http://www.usinenouvelle.com/expo/controle-destructif-o939.html>
- [2] <http://www.directindustry.fr/prod/zwick/machine-d-essai-universelle-15660-220523.html>
- [3] <http://www.oodoc.com/traction-acier,start,0-search.php>
- [4] Des Matériaux, JP. Bâillon et JM. Dorlot, 3^{ème} édition, Presses internationales Polytechnique,2000.
- [5] http://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_de_traction
- [6] http://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_de_traction%C3.89prouvette_de_traction
- [7] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_
- [8] http://wikipedia.org/wiki/Essai_de_flexion_par_choc_sur_%C3%A9prouvette_entail%
- [9] [http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9silience_\(physique\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9silience_(physique))
- [10] <webdav/site/lmm/shared/E%20Contro%C3%B4le%20nom%20destructive.pdf>
- [11] gle.com/search?Hl=Fr.&q=D%C3%A9finition+de+1%20E2%80%99acier
- [12] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Acier>
- [13] http://fr.wikipedia.org/wiki/Acier_rapide
- [14] http://fr.wikipedia.org/wiki/Acier*Acier_fortement_alli%C3%A9s :
- [15] http://fr.wikipedia.org/wiki/Acier*Diff%C3%A9rents_CAB_familles_C2.BB_d.27aci%C3%A9rs
- [16] http://fr.wikipedia.org/wiki/Acier*Acier_faiblement_alli%C3%A9s
- [17] http://fr.wikipedia.org/wiki/Acier_inoxydable
- [18] http://fr.wikipedia.org/wiki/Acier*Acier_fortement_alli%C3%A9s
- [19] http://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_thermique
- [20]
- http://www.depita.net/materiels/biomasse/Traitement_thermique_agroalimentsprincipes.pdf
- [21] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Revenu>
- [22] http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2003/martin/03_intro.pdf
- [23] précis de métallurgie. Elaboration, structures-propriétés et normalisation. J. Barralis et G. Maeder, Ed Afnor Nathan, Mars 1983