

6/98

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de métallurgie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## **PROJET DE FIN D'ETUDE**

*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en métallurgie*

### THEME

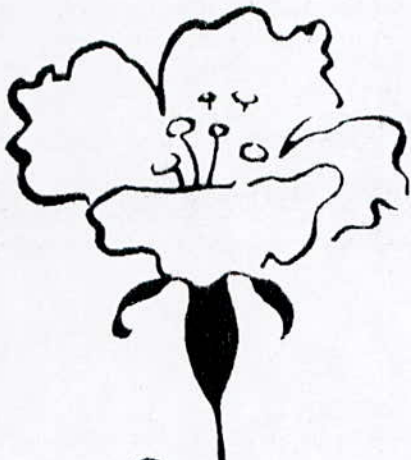
**IDENTIFICATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUE  
DE DEUX NUNCES D'ACIER EN VUE D'UNE  
SUBSTITUTION**

Proposé par : L'O.N.A.A.P.H. ALGER

Traité par : D.AMARI

Dirigé par : Mr BELHADEF  
Mr DELLALI

Promotion : 1997-1998



## Dédicaces

- ✿ À mes très chers parents pour leurs grands sacrifices et leurs dévouements pour mon instruction et mon éducation et afin de voir ce jour arriver.
- ✿ À tous mes frères et sœurs et surtout Lyazid.
- ✿ À tous mes amis qui m'ont encouragés à terminer ce projet surtout Hocine et Fawzi.

Je dédie ce modeste travail.

*Djamel*

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je remercie très vivement mes promoteurs Monsieur Delsali et Monsieur Belhadef pour avoir lu, corrigés et veillés à la réalisation de ce projet.

À Monsieur Hocine Ahmed de L'O.N.A.A.P.H de m'avoir aider à réaliser les tests pratiques.

Enfin, je remercie tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, sans oublier Krímo et Sasah de la bibliothèque.



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# SOMMAIRE



INTRODUCTION .....	1
<b>CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS</b>	
1.1. Définition.....	4
1.1.1. Caractéristiques du fer.....	5
1.1.2. Caractéristiques du carbone.....	6
1.2. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone.....	6
1.3. Caractéristiques du diagramme Fer-Cémentite.....	8
1.4. Les aciers au carbone (Aciers non Alliés).....	11
<b>CHAPITRE II : LES ACIERS DE CONSTRUCTION</b>	
II.1. Définition.....	14
II.2. Les aciers de construction de qualité.....	14
II.3. Influence des éléments chimiques sur les propriétés et structure de l'acier.....	15
II.4. Les traitements thermiques.....	17
II.4.1. Recuit de normalisation.....	17
II.4.2. Trempe.....	18
II.4.3. Revenu.....	20
<b>CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES</b>	
III.1. Polissage.....	22
III.2. L'attaque chimique.....	23
III.3. L'analyse chimique.....	23
III.4. La dureté.....	25
III.5. Essai de traction.....	27
III.5.1. Principe.....	27
III.5.2. Formes et dimension de l'éprouvette.....	27
<b>CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION</b>	
IV.1. Analyse chimique.....	30
IV.2. L'observation microscopique.....	32
IV.3. Résultats de dureté.....	39
IV.4. Résultats de l'essai de traction.....	42
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	56
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	57



## INTRODUCTION

Parmi les nombreux alliages qui existent dans l'industrie, ceux du fer trouvent une large application en raison des bonnes propriétés qu'ils présentent. Les aciers et les fontes sont des alliages fer - carbone, l'acier diffère de la fonte par sa teneur courante qui est inférieure à 2% et par la nature des phases et constituants formés à la fin de la solidification.

Notre sujet qui a été proposé par l'office national d'appareillage et d'accessoires pour personnes handicapées (O.N.A.A.P.H), comporte sur l'étude des lames en acier à ressort utilisées dans les ceintures de bandage et de les comparer à celle traitées en Algérie, de point de vue propriétés physiques, chimiques et mécaniques dans le but d'une intégration.

Ces lames sont appelées baleines, pour bien voir leurs emplacements dans la ceinture, la figure ci-dessous nous schématise l'ensemble.

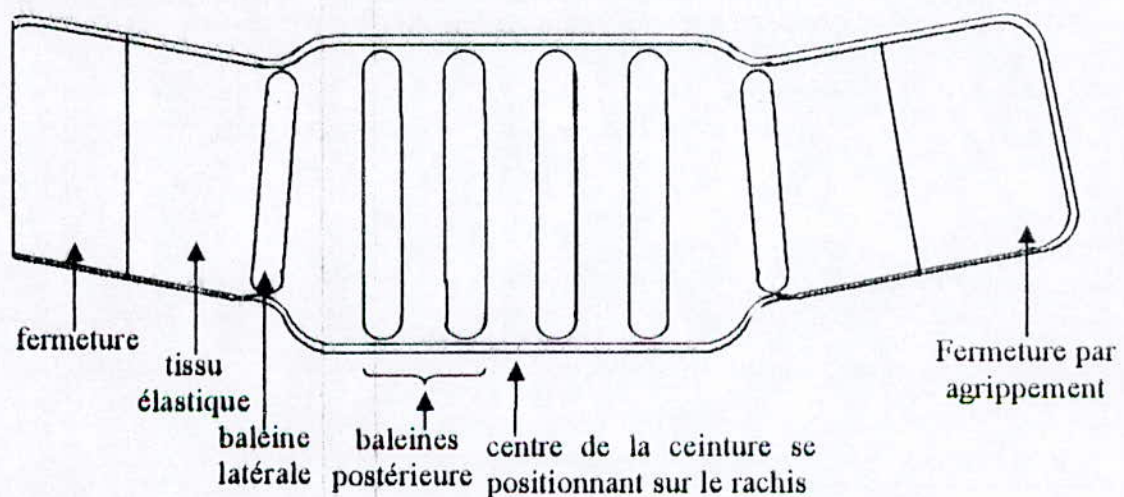


Fig 1. Ceinture baleinée [1].



Ces baleines qui sont en acier à ressort présentent une flexibilité suffisante au mouvement du corps et une composition chimique bien définie qui nous donne des propriétés mécaniques satisfaisantes pour leurs emplois.

Le but de notre étude, se concentre donc sur la détermination de la composition chimique de deux nuances d'aciers (importée et celle traitée en Algérie) et de comparer les différentes propriétés et caractéristiques mécaniques à savoir la dureté et la limite élastique afin de bien les identifier et de voir la possibilité de remplacer les lames importées par les lames traitées en Algérie.

Pour cela nous avons commencé notre travail par une étude bibliographique qui comporte des généralités sur les aciers, leurs propriétés et caractéristiques mécaniques, et c'est l'objet du premier chapitre.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les aciers de construction de point de vue propriétés mécaniques, composition chimique, ainsi que les différents traitements thermiques industriels qui leur sont appliqués.

Au troisième chapitre nous avons donné une description des différentes techniques expérimentales à savoir la technique de l'analyse chimique, la dureté, et la traction

Enfin nous avons terminé notre travail par un quatrième chapitre qui porte sur l'exploitation et l'interprétation des différents résultats obtenus lors de l'expérience, à l'aide des tableaux et des courbes.



CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

## **GÉNÉRALITÉ :**

Il s'agit donc d'une étude sur les aciers à ressort, pour cela on doit donner une définition bien détaillée de l'acier et de citer les différentes nuances utilisées pour leur fabrication, ainsi que les différentes caractéristiques qu'ils présentent.

### **I.1. DÉFINITION :**

Selon la norme NF EN 10020, ( qui en 1989 a remplacé la norme NFA 02-025 ) «on appelle acier un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2% et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut contenir plus de 2%, mais cette valeur de 2% est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte».

La limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptible de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à préciser. C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages.

- La solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite.
- La solidification d'un acier s'achève en conservant tout le carbone en solution solide dans la structure qui peut être  $\delta$ ,  $\delta+\gamma$  ou  $\gamma$ .

Un acier est un alliage à composants multiples constitué essentiellement par du fer et du carbone. Nous allons donc examiner tout d'abord quelles sont les caractéristiques du fer et du carbone.



### I.1.1. Caractéristique du fer :

Le fer est un métal relativement abondant (4,7% en masse dans l'écorce terrestre). C'est un métal blanc aux caractéristiques suivantes :

- Nombre atomique : 26.
- Masse atomique : 55,85.
- Température de fusion : 1539°C.

C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité : par exemple la résistivité électrique  $\zeta$  à 20°C est de  $9,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  et sa conductivité thermique à 20°C est égale à  $73,3 \text{ W} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Il présente deux variétés allotropiques : le fer  $\alpha$  et le fer  $\gamma$ . A 910°C, il passe de la structure cubique centrée à la structure cubique à faces centrées qui reste stable jusqu'à 1392°C. Au-dessus de 1392°C, le fer redevient de type cubique centré et acquiert l'appellation de fer  $\delta$ . Ces transformations sont mises en évidence par des expériences de dilatométrie directe et par des techniques de la radiocristallographie. La figure suivante nous schématise ces transformations.

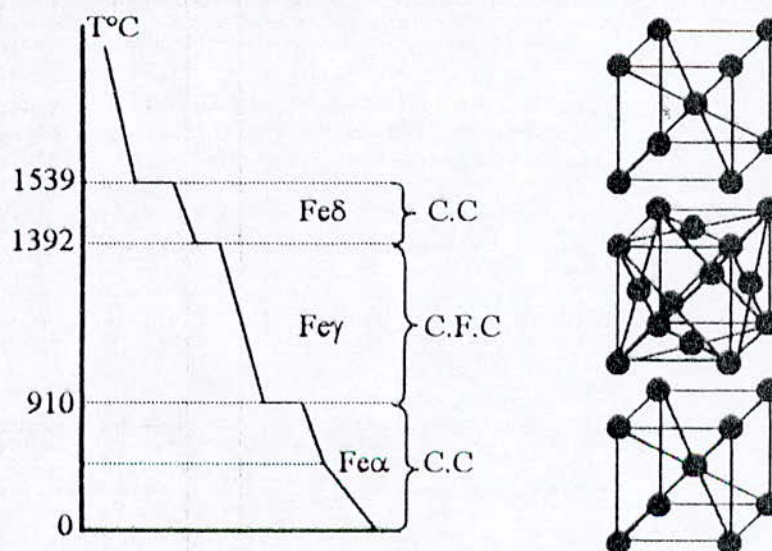


Fig 2. Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température [3].



A son examen, on constate que le fer pratiquement pur n'est pas mécaniquement très performant. Ses caractéristiques de résistance (limite d'élasticité, résistance à la traction mais aussi dureté, ténacité...) sont faibles ; en contrepartie, ses caractéristiques de plasticité (allongement à la rupture, striction, résilience...) sont très élevées. Cependant l'addition d'une faible proportion d'impuretés modifie assez fortement ses propriétés physiques et mécaniques.

### **I.1.2. Caractéristiques du carbone :**

Le carbone est un élément relativement peu abondant (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est très rare à l'état libre sous forme de diamant. C'est un élément non métallique dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Numéro atomique : 6.
- Masse atomique : 12.
- Rayon atomique : 0,77 Å.
- Masse volumique : 2,5 g/cm<sup>3</sup>.
- Température de fusion : 3500 °C.

Il existe sous deux variétés cristallines : le diamant et le graphite.

### **I.2. DIAGRAMME D'ÉQUILIBRE FER - CARBONE :**

Il y a deux types de diagrammes : fer - graphite et fer - cémentite.

- Si l'alliage fer - carbone contient du carbone libre sous forme de graphite et correspond à un état stable, on parle donc du diagramme fer - graphite.

- Si l'alliage contient du carbone sous forme d'une combinaison chimique  $Fe_3C$  ou cémentite, on parle dans ce cas du diagramme fer - cémentite qui correspond à un état métastable.

Notre étude est sur les aciers et comme nous savons que le graphite ne se forme pas dans les aciers, donc le diagramme qu'on aura besoin pour ce travail est le diagramme fer - cémentite ou métastable.

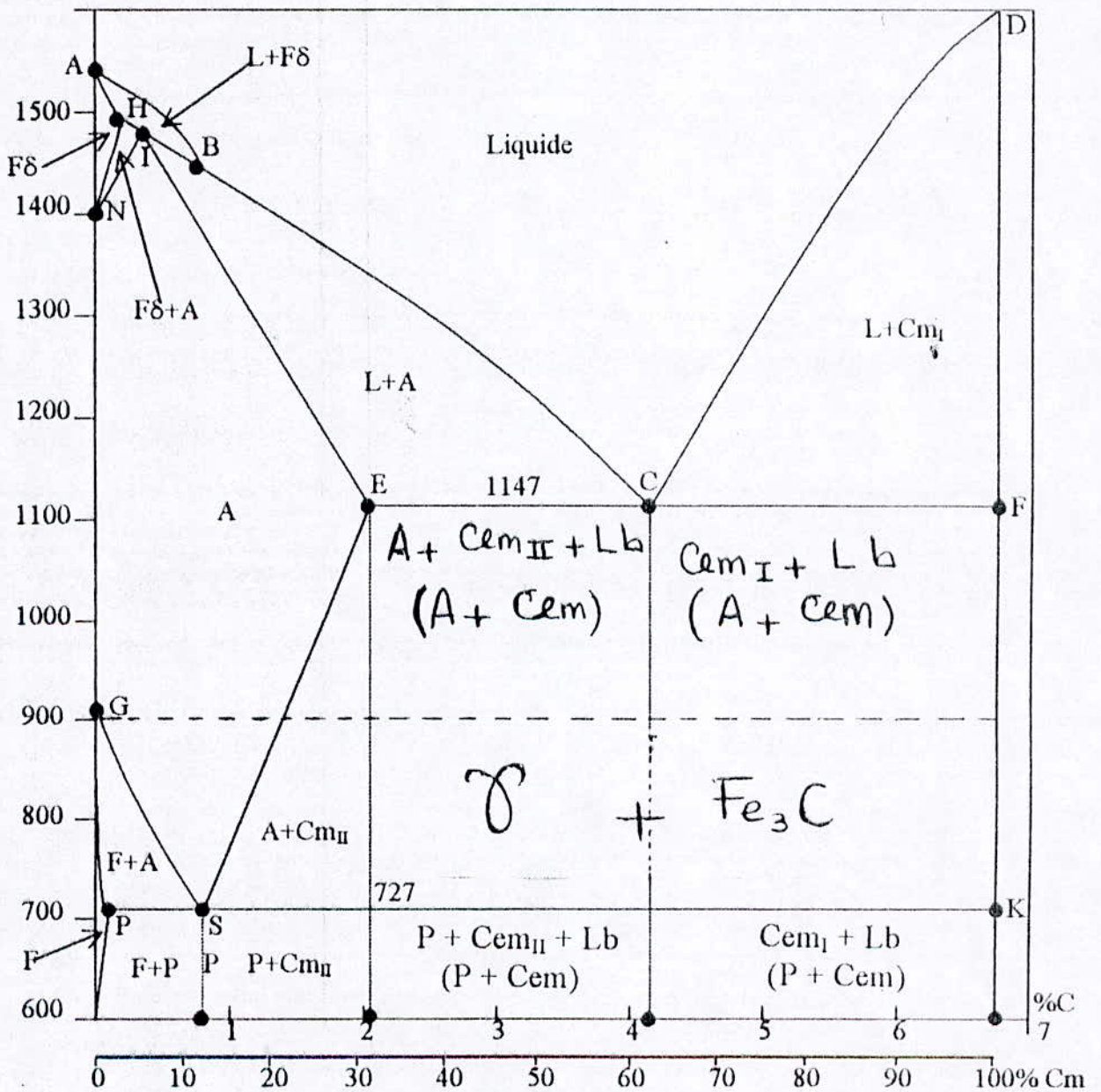


Fig 3. Diagramme d'équilibre fer - cémentite [3].

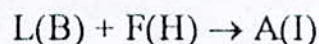


### I.3. CARACTÉRISTIQUES DU DIAGRAMME FER – CÉMENTITE :

Le point A qui correspond à  $T=1539^{\circ}\text{C}$  du diagramme est le point de fusion du fer pur, alors que le point D ( $T\approx 1600^{\circ}\text{C}$ ) correspond au point de fusion de la cémentite (Cem). Quant aux points N ( $T=1392^{\circ}\text{C}$ ) et le point G ( $T=910^{\circ}\text{C}$ ), ils marquent la transformation polymorphe du fer ( $\text{Fe}\delta \leftrightarrow \text{Fe}\gamma$ ,  $\text{Fe}\gamma \leftrightarrow \text{Fe}\alpha$ ) respectivement.

Les points et les lignes caractéristiques du diagramme fer - cémentite sont :

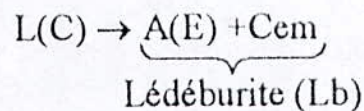
- B : 0,51%C dans la phase liquide en équilibre avec le  $\text{Fe}\delta$  à  $T=1499^{\circ}\text{C}$ .
- I : 0,16%C dans l'austénite (A) à  $T = 1499^{\circ}\text{C}$ .
- H : 0,10%C marque la solubilité limite du carbone dans le  $\text{Fe}\delta$  à  $T=1499^{\circ}\text{C}$ .
- HIB : palier qui marque la transformation péritectique (dégagement de l'austénite de composition I par suite de l'interaction du liquide de composition B et des cristaux de ferrite de composition H) :



- E : 2,14%C marque la solubilité limite du carbone dans l'austénite à  $T=1147^{\circ}\text{C}$ .
- S : 0,8%C dans l'austénite à  $T=727^{\circ}\text{C}$ .
- P : 0,02%C marque la solubilité limite du carbone dans la ferrite  $\text{Fe}\alpha$ .
- AB : liquidus qui marque le début de la cristallisation de la ferrite  $\text{Fe}\delta$  à partir de la solution liquide.
- CD : liquidus qui marque l'apparition de la cémentite primaire (CemI) à partir du liquide.



- AH : solidus qui limite l'existence du liquide (au-dessus) et les cristaux de Fe $\delta$  (au-dessous).
- ECF : solidus qui correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé lédéburite (Lb) :



**Point de transformation des aciers** : Ce sont les points lors de la transformation des aciers dans les conditions d'équilibres ; NFA 02-010.

Ae<sub>1</sub> : température d'équilibre définissant la limite inférieure d'existence de l'austénite : température de transformation eutectoïde, perlite  $\leftrightarrow$  austénite (réaction réversible).

Ae<sub>3</sub> : température d'équilibre définissant la limite supérieure d'existence de la ferrite.

Ae<sub>cm</sub> : température d'équilibre définissant la limite supérieure d'existence de la limite dans un acier hypereutectoïde.

Ae<sub>4</sub> : température d'équilibre définissant la limite entre le domaine d'existence de l'austénite et de la ferrite  $\delta$ . Le point n'a d'importance que pour certains problèmes particuliers (soudage).

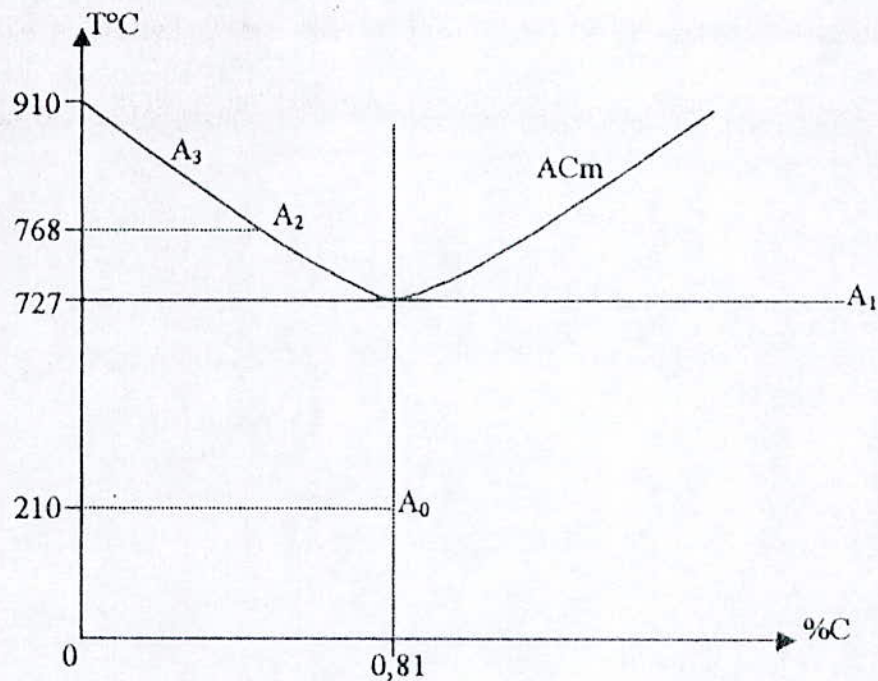
Ainsi les points A<sub>2</sub> (769°C) et A<sub>0</sub> (210°C) sont relativement moins intéressants pour les opérations courantes qui correspondent à des transformations réversibles sans changement de phases.

A<sub>2</sub> (769°C) : point de curie, qui correspond à la perte des caractéristiques ferromagnétiques du Fe $\alpha$ .

A<sub>0</sub> (210°C) : qui correspond à la transformation, au cours du chauffage, de la cémentite ferromagnétique en cémentite non magnétique.



La figure ci-dessous nous présente ces points de transformation.



**Fig 4. Lignes de transformation principaux dans le diagramme Fe – Cem [3].**

A cause de la germination des nouvelles phases et de celle de la diffusion du carbone, l'état d'équilibre est difficile à atteindre ce qui fait les transformations au chauffage notées  $Ac_i$  et au refroidissement noté  $Ar_i$  ne se font pas à la même température ce qui entraîne un décalage appelé hystérésis de l'état d'équilibre  $Ae_i$ .

**Remarque 1 :**

En général l'hystérésis au chauffage est faible et  $Ac$  est une bonne approximation de  $Ae$ .

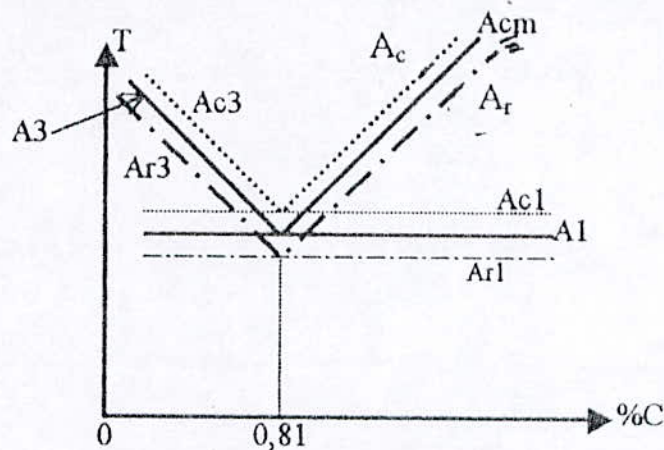
**Remarque 2 :**

$Ar$  dépend plus fortement de la vitesse de refroidissement et peut s'écarter considérablement de  $Ae$ .

**Remarque 3 :**

Les points de transformation  $A_{c_i} - A_{e_i} - A_{r_i}$  et  $A_{cm}$  peuvent être déterminés par les techniques de dilatométrie, analyse thermique... etc.

La figure ci-dessous nous montre l'hystérésis des lignes de transformations de phases dans les aciers au cours du chauffage et du refroidissement.



**Fig 5. Déplacement des lignes de transformations au cours du chauffage et du refroidissement [3].**

Parmi les aciers qui ont une large application à l'échelle industrielle ; et qui sont l'objet de notre étude, les aciers au carbone.

#### **I.4. LES ACIERS AU CARBONE (ACIERS NON ALLIÉS) :**

Ce sont des alliages de teneurs en carbone inférieur à 2% (limite pratique 1,4 à 1,5%) qui contiennent presque toujours les éléments suivants : Le soufre, le phosphore, le silicium, le manganèse et le cuivre.

Ces cinq éléments provenant d'une part des additions d'affinage d'autre part des impuretés contenues dans les matières premières utilisées. Selon la norme française NFA 02-005, la teneur de ces éléments est :



$\text{Si} \leq 1\%$  ;  $\text{Mn} \leq 1,2\%$  ;  $\text{S} \leq 0,10\%$  ;  $\text{P} \leq 0,12\%$  ;  $\text{Cu} \leq 0,03\%$

On remarque que d'après ces teneurs que ces éléments d'élaboration sont relativement faibles, ceci explique qu'on pouvait utiliser le binaire Fe-Fe<sub>3</sub>C pour ce type d'acier dont les frontières sont peu déplacées par la présence de ces divers éléments, afin d'expliquer leurs différentes phases ainsi que leurs différents constituants.

Les aciers non alliés en se référant au système binaire Fe-Fe<sub>3</sub>C contiennent les phases suivantes :

- Ferrite  $\alpha$  : c'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\alpha$  (solubilité maximale est de 0,02% en masse à 727°C). La ferrite  $\alpha$  est cubique centrée (CC).
- Ferrite  $\delta$  : c'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\delta$  (solubilité maximale est de 0,1% en masse à 1487°C). La ferrite  $\delta$  est cubique centrée.
- Austénite  $\gamma$  : c'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\gamma$ , l'austénite est cubique à face centrée (CFC).
- Cémentite au carbure de fer Fe<sub>3</sub>C : sa composition correspond à une teneur de 6,67% en masse de carbone. Ce carbure est un composé interstitiel à maille orthorhombique. La cémentite est un carbure métastable, qui a tendance à se décomposer en ferrite ou austénite et graphite :  $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}_g$ , réalisée par chauffage prolongé. Mais on ne peut pas passer de l'équilibre stable à l'équilibre métastable, à moins de procéder à une fusion suivie d'un refroidissement convenable.

# CHAPITRE II

## LES ACTES<sup>r.</sup> DE CONSTRUCTION



## II.1. DÉFINITION :

On appelle aciers de construction, les aciers au carbone et les aciers alliés servant dans la fabrication des éléments de machines. Le plus souvent, la teneur en carbone de ces aciers ne dépasse 0,6%.

Les aciers de construction doivent posséder de bonnes propriétés mécaniques, également d'assez bonnes propriétés technologiques, une pénétration de trempe élevée et une faible aptitude aux déformations et aux tapures de trempe.

## II.2. LES ACIERS DE CONSTRUCTION DE QUALITÉ :

Ces aciers ont une composition chimique plus rigoureuse teneur plus faible en soufre ( $<0,04\%$ ) et en phosphore ( $<0,035\%$ ) donc purifiés. Ils sont destinés à la fabrication de nombreuses pièces, selon la teneur en carbone et le travail envisagé pour la pièce.

Les aciers contenant entre 0,6% et 0,85% C possèdent une résistance et une limite élastique plus grandes et une tenue à l'usure plus élevée. Ils s'emploient après trempe et revenu, normalisation et revenu, ainsi qu'après trempe superficielle pour la fabrication des ressorts, tiges, rondelles... etc.

Les aciers au carbone de qualité contiennent du manganèse (0,7÷1%), ce qui permet d'améliorer la résistance en augmentant la pénétration de trempe et de réduire légèrement la plasticité.

Les aciers au carbone à ressort doivent répondre aux exigences suivantes :

- Une bonne résistance aux faibles déformations plastiques
- Une bonne limite de fatigue.
- Un grand pouvoir trempant.

Pour obtenir ces caractéristiques, les aciers à ressort, doivent contenir au moins 0,5% de carbone et être trempés et revenus.

Dans les cas courants, les aciers à ressort sont durcis par trempe et revenu à moyenne température, ou par écrouissage superficiel (grenailage) qui permet d'augmenter la limite de fatigue.

### **Remarque :**

Les pièces en acier allié à ressorts subissent généralement un traitement thermique, car les éléments d'alliages améliorent la pénétration de trempe et la trempabilité, affinissent le grain et améliorent les propriétés mécaniques de l'acier revenu.

Les éléments chimiques Si, Mn, Cr, Ni qui rentrent dans la fabrication des ressorts, assurent la pénétration de trempe, affinent le grain et augmentent la teneur à la relaxation.

### **II.3. INFLUENCE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS ET LA STRUCTURE DE L'ACIER :**

Parmi les éléments on peut citer :

- Le carbone : Après un refroidissement lent, la structure de l'acier comporte la ferrite et la cémentite. L'augmentation de la teneur en carbone accroît la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience. Les propriétés physiques changent ainsi, par exemple :
  - La diminution de la densité et la conductibilité thermique.
  - L'augmentation de la résistivité électrique.



La figure ci-dessous montre l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en carbone.

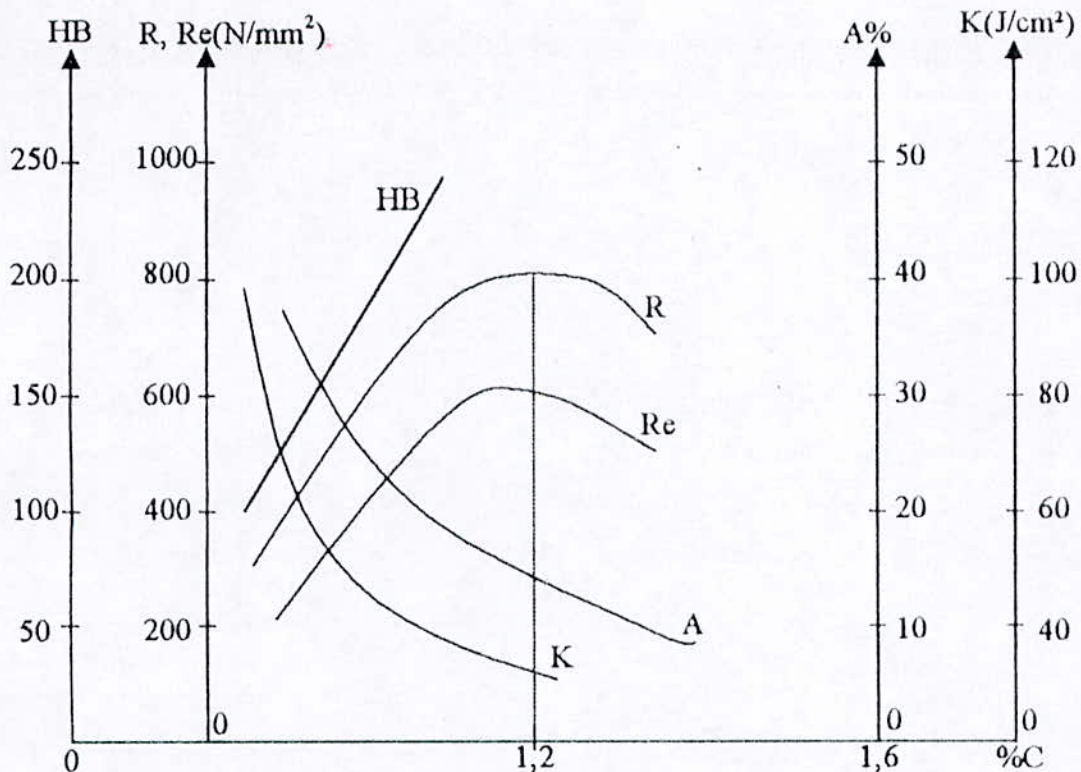


Fig 6. Influence de la teneur en carbone sur les propriétés mécaniques des aciers après normalisation [3].

- **Silicium et Manganèse** : La teneur en silicium présent dans l'acier ne dépasse pas 0,4% et celle de Manganèse 0,8%. Ces deux éléments désoxydent l'acier, le Mn renforce sensiblement la résistance sans diminuer la plasticité. Le Si de la ferrite augmente fortement la limite élastique, ce qui altère l'aptitude de l'acier à l'emboutissage.
- **Soufre** : C'est une impureté qui forme une combinaison chimique FeS insoluble dans le fer. FeS forme avec le fer un eutectique facilement fusible (988°C) et qui est responsable de la fragilité à chaud dans les aciers. La teneur en soufre ne doit dépasser 0,035%.

- Phosphore : C'est une impureté soluble dans le fer $\alpha$  et si sa teneur est assez grande, elle forme le phosphore de fer ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ). Le phosphore perturbe fortement le réseau cristallin de la ferrite, augmente la limite élastique et la charge de rupture tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité. Sa teneur ne doit dépasser 0,045%.
- Azote et Oxygène : Sont contenus dans l'acier sous forme d'inclusions non métalliques fragiles (oxydes, nitrures). Les inclusions (N, O), en se concentrant aux joints de grain, élèvent de seuil de fragilité à froid et altèrent la résistance à la rupture fragile.
- Hydrogène : C'est un élément très nocif qui exerce une forte action fragilisante sur l'acier.

#### **II.4. LES TRAITEMENTS THERMIQUES :**

Dans ce paragraphe nous proposons les principaux traitements thermiques utilisés pour la fabrication des aciers à ressort de nuances XC65 et XC68, pour cela nous basons sur la composition chimique de l'acier, sur le diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C, sur les structures observées et sur les résultats de la microdureté.

##### **II.4.1. Recuit de normalisation :**

Ce traitement conduit à des structures ferrito-perlitique, elles correspondent à des grains ferritiques fins et à de faibles espacements lamellaires dans la perlite. Ces microstructures très homogènes constituent un état initial idéal pour le traitement d'austénitisation avant trempe.



Il comprend :

- Un chauffage jusqu'au domaine austénitique à une température  $AC_3 + 50^\circ\text{C}$ , pour notre nuance XC65 et XC68 ; la température de chauffage est  $T \approx 810^\circ\text{C}$  pour le XC65 et  $T \approx 800^\circ\text{C}$  pour le XC68.
- Un maintien à cette température.
- Un refroidissement à l'air calme.

Le but de la normalisation dépend de la composition chimique de l'acier, pour les nuances XC65 et XC68, la normalisation peut remplacer la trempe et le revenu à haute température. Ainsi les déformations sont moindres et les risques d'apparition de fissures sont éliminés, la figure ci-dessous nous <sup>montr</sup> les différents domaines de température de normalisation.

#### II.4.2. Trempe :

Ce traitement comprend :

- Un chauffage jusqu'à la température d'austénitisation  $T \approx AC_3 + (30 \div 50^\circ\text{C})$  ; pour le XC65 :  $T = 760 \div 810^\circ\text{C}$ , pour le XC68 :  $T = 755 \div 800^\circ\text{C}$ .
- Un refroidissement très rapide pour que la structure austénitique se transforme en martensite.
  - La vitesse de refroidissement  $V_r$  doit être supérieure à la vitesse critique de trempe ( $V_r \geq V_{Cr}$ ).

### II.4.3. Revenu :

C'est une opération finale de traitement thermique, il existe plusieurs types de revenu, pour notre cas nous proposons le revenu à haute température pour XC68 et XC65.

Le revenu à haute température se fait entre 550 et 600°C. Il donne à l'acier la structure sorbite de revenu, il crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier il améliore la limite de rupture et l'élasticité, la striction et surtout la résilience.

Le cycle thermique comprend :

- Un chauffage donc vers une température varie de 550 à 600°C.
- Un maintien à cette température.
- Un refroidissement jusqu'à la température ambiante.
- La durée du revenu à haute température varie de 1 à 2h.



# CHAPITRE III

## TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Pour identifier parfaitement notre matériau (lame en acier), on a besoin d'effectuer les tests suivants :

- L'analyse chimique des échantillons.
- L'analyse de la structure suivant la surface et suivant l'épaisseur.
- La microdureté.
- L'essai de traction

Avant de commencer les essais, les échantillons doivent être préparés pour faciliter toute manipulation.

### III.1. LE POLISSAGE :

Après avoir découpé les échantillons et les enrobés à chaud à l'aide d'une matière durcissante (résine) pour faciliter les manipulations au polissage.

Le polissage est effectué dans les labos du complexe des véhicules industriels de Rouiba (CVI), qui comporte deux étapes :

- Un prépolissage qui consiste à faire passer les échantillons sur des papiers abrasifs de granulométrie décroissante avec rinçage à l'eau, en faisant tourner l'échantillon de  $90^\circ$  à chaque fois qu'on change de papier pour éliminer les raies.
- La finition qui consiste à faire passer les échantillons sur un papier feutre mouillé légèrement à l'aide d'un lubrifiant afin d'obtenir une surface miroir.



### **III.2. L'ATTAQUE CHIMIQUE :**

Après avoir sécher les échantillons, on a passé à l'attaque chimique, qui est faite à l'aide du Nital.

#### **Remarque :**

Le Nital est une solution alcoolique nitrique qui comporte environ 4% d'acide nitrique  $\text{HNO}_3$  et environ 96% d'éthanol.

Après ces opérations on a passé à l'observation des échantillons à l'aide d'un microscope métallographique. Les images des structures observées sont traitées dans le chapitre résultats et interprétation.

### **III.3. L'ANALYSE CHIMIQUE :**

L'analyse chimique de nos échantillons a été faite au complexe des véhicules industriels (CVI) de Rouiba, à l'aide d'un spectromètre de masse.

Le principe de fonctionnement d'un spectromètre de masse repose sur l'action d'un champ électromagnétique sur une particule chargée afin, en particulier, d'en déterminer le rapport masse / charge (rapport  $m/z$ ).

Le spectromètre de masse permet de mesurer la masse d'un ion et de déterminer son abondance.

La figure ci-dessous représente un schéma de principe d'un spectromètre de masse, dont ces parties sont :

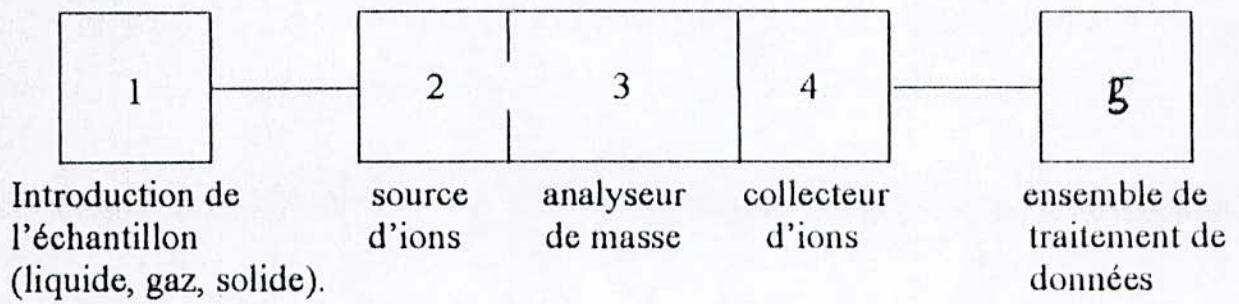


Fig 8. Éléments d'un spectromètre de masse [2].

- Un système d'introduction qui permet de faire entrer la substance à analyser dans le spectromètre de masse : le système va dépendre de la nature de l'échantillon : gaz, liquide, solide.
- Une source d'ion qui a pour rôle d'ioniser l'échantillon, d'extraire et de transmettre les ions dans la partie analyseur de l'instrument.
- Un analyseur dont le but est de trier les ions en fonction de leur rapport  $m/z$  ce tri est réalisé par l'application et le balayage d'un champ magnétique ou électrique.
- Un détecteur qui est constitué d'un collecteur et d'un ensemble électronique de mesure et d'amplification des signaux associés aux ions de différentes masses séparées par l'analyseur.
- Un ensemble informatique de traitement de données est associé à l'ensemble de détection.



### III.4. LA MICRODURETÉ :

La détermination de la microdureté a pour but de caractériser les pièces de faibles dimensions et surtout les phases des métaux et alliages, et les couches traitées superficiellement. Le dispositif d'essai est constitué d'un système pour l'enfoncement d'une pyramide en diamant à base carrée sous une faible charge et d'un microscope métallographique. La dureté H est donnée par la relation :

$$H_V \equiv H = 1,8544.P/d^2 \dots\dots\dots(1)$$

P : charge appliquée en Kg.

d : la diagonale de l'empreinte en  $\mu\text{m}$ .

#### Remarque :

La préparation des échantillons destinés à l'essai de microdureté nécessite un polissage et une attaque chimique comme pour une étude métallographique.

La figure suivante nous montre le principe de la méthode :

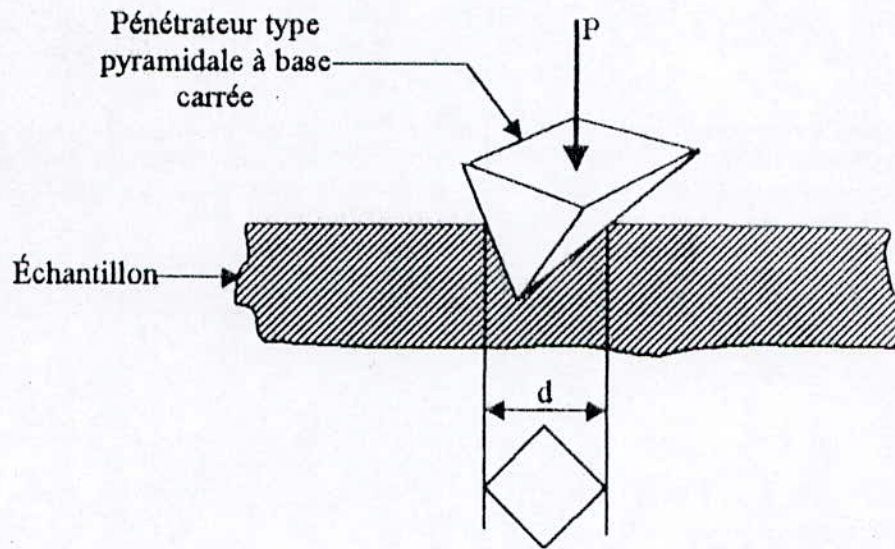


Fig 9. Principe de la méthode de microdureté [3].

**Remarque :**

Un autre type de pénétrateur appelé pénétrateur KNOOP, peut être utiliser, il est pyramidal à base en losange.

Signalons enfin, qu'il existe une correspondance entre les mesures de dureté et de résistance à la traction. Il suffit de trouver les bonnes corrélations qui dépendent de la nature du matériau et de son état structural. On peut utiliser pour les aciers, la formule empirique suivante:

$$H_V = 1,4.R_E + 1,6.R_M \dots\dots\dots(2)$$

où :

$R_E$  : limite élastique.

$R_M$  : contrainte à la rupture.



### **III.5. ESSAI DE TRACTION :**

#### **III.5.1. Principe :**

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction et généralement jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

On impose en général une déformation croissante à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de  $L_0$  et on mesure simultanément l'effort  $F$  et l'allongement  $L-L_0$ .

#### **III.5.2. Forme et dimension de l'éprouvette : NF 403-160**

Elle comporte une partie calibre et très généralement deux têtes d'amarrage et d'une section droite rectangulaire.

La figure ci-dessous nous montre cette éprouvette, qui est définie par :

- $a$  : épaisseur de l'éprouvette.
- $b$  : largeur de l'éprouvette.
- $L_0$  : largeur initiale entre repères.
- $L_c$  : longueur de la partie calibrée.
- $L_t$  : longueur totale de l'éprouvette.
- $S_0$  : section initiale.

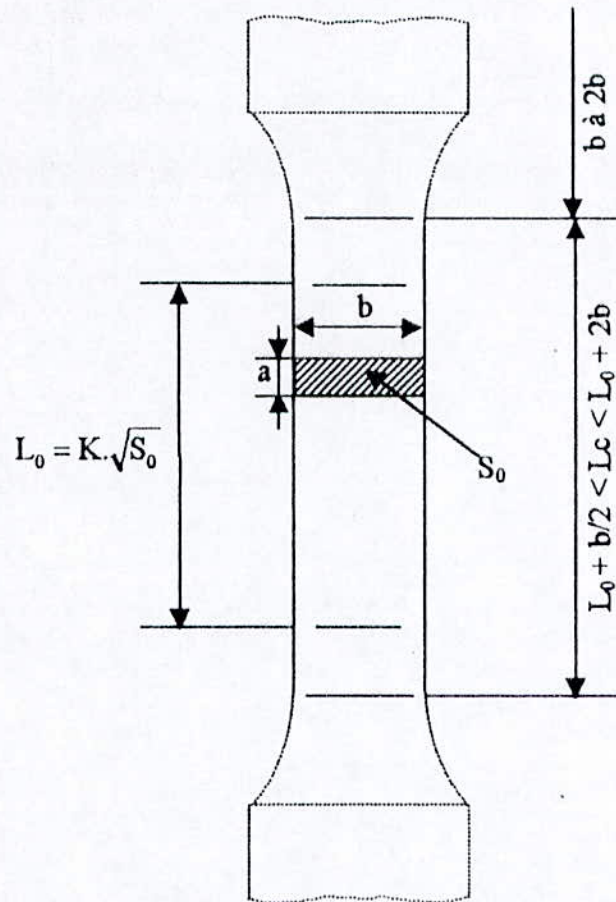


Fig 10. Éprouvette de traction de section rectangulaire [4].

Selon la norme NF A 03-160, on peut travailler avec les dimensions suivantes :

$$L_0 + b/2 < L_c < L_0 + 2b \text{ et } L_0 = K\sqrt{S_0} \text{ avec } K = 5,65$$

Les éprouvettes dont leurs longueurs initiales entre repères  $L_0$  sont déduites de la section initiale  $S_0$ . Par la formule et  $L_0 = K\sqrt{S_0}$  avec  $K = 5,65$  sont dites éprouvettes proportionnelles.



CHAPITRE 10

RÉSULTATS

ET

INTERPRÉTATIONS

#### IV.1. ANALYSE CHIMIQUE :

L'analyse de nos échantillons a été faite au complexe des véhicules industriels de Rouiba (CVI). Les résultats que nous avons obtenus sont représentés dans les tableaux suivants en pourcentage massique.

Échantillon Éléments (%)	Lames importées Rigides	Lames importées Souples
C	0,554 à 0,549	0,709
Si	0,354 à 0,353	0,230
Mn	0,956 à 0,958	0,80
Cr	0,157 à 0,158	< 0,10
Ni	0,06	-
S	0,023	-

**Tableau 1. Composition chimique des lames importées.**

Échantillon Éléments (%)	Lames souples traitées en Algérie	Lames rigide traitées en Algérie
C	0,689	0,622 à 0,670
Si	0,260	0,296 à 0,306
Mn	0,750	0,870 à 0,931
Cr	< 0,120	0,207 à 0,227
Ni	-	0,143
S	-	0,015

**Tableau 2. Composition chimique des lames traitées en Algérie.**



- Selon la norme NF A35-551, l'analyse chimique des lames importées rigides donne la nuance XC55.
- Selon la norme NF A35-551, l'analyse chimique des lames importées souples donne la nuance XC70.
- Selon la norme NF A35-553, l'analyse chimique des lames souples traitées en Algérie donne la nuance XC68.
- Selon la norme NF A35-551, l'analyse chimique des lames rigides traitées en Algérie donne la nuance XC65.

Donc d'après l'analyse chimique et la norme NF 35-551 et NF 35-553, il s'agit bien des aciers au carbone non alliés.

Ces aciers XC55, XC70, XC68 et XC65 sont utilisées après traitements thermiques pour la fabrication des lames à ressorts travaillants pour des faibles sollicitations.

Si nous examinons bien cette analyse chimique, nous relevons une forte teneur en Mn ( $\% \text{ Mn} \approx 0,75 \div 0,95$ ) dans tous les échantillons. En effet le Mn renforce sensiblement la résistance sans diminuer la plasticité, augmente la résistance aux chocs, augmente la résistance à la traction et augmente aussi la trempabilité et la désoxydation de l'acier.

Tandis que nous relevons une teneur moyenne en Si ( $\% \text{ Si} \approx 0,23 \div 0,35$ ), sa présence nous donne des caractéristiques mécaniques très intéressantes comme l'augmentation de la limite élastique et l'augmentation aussi de la trempabilité et de la désoxydation, malgré ça, on trouve que sa teneur est moyenne et même on peut dire qu'elle est faible.

Cette faible teneur en Si est dû au fait que le silicium ne favorise pas l'affinage du grain ferritique (augmente le grossissement du grain). Cette dernière c'est-à-dire l'affinage du grain ferritique est l'une des caractéristiques principales pour la fabrication des ressorts car nous savons que lorsque la grosseur moyenne du grain ferritique diminue on aura une très grande limite élastique ( $R_e$  élevée),

il se trouve aussi en faible teneur car le silicium freine (diminue) la solubilité du carbone.

Pour les autres éléments leurs présences est très faibles ( $\% \text{Cr} \approx 0,1 \div 0,2$ ), ( $\% \text{Ni} \approx 0,06 \div 0,14$ ) car la propriétés principales sont assurées par le Mn et le Si.

Les caractéristiques citées précédemment à savoir une grande limite élastique, une grande résistance à la traction, une grande pénétration de trempe et une grande affinité du grain ferritique, assurées par le manganèse et le silicium font de bons aciers au carbone utilisés pour la fabrication des ressorts employés pour des moyennes ou faibles sollicitations.

### **Remarque :**

Le soufre est présent en très faible teneur ( $\% \text{S} \approx 0,015 \div 0,02$ ), car ces aciers sont appelés aciers de construction de qualité, donc ils sont purifiés des éléments nocifs.

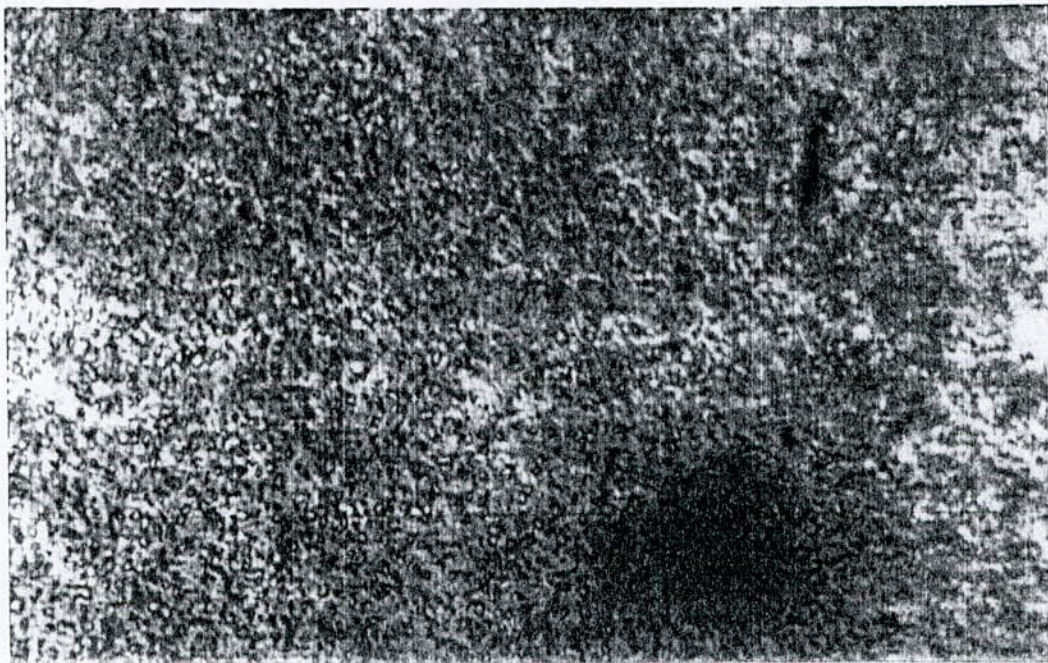
## **IV.2. L'OBSERVATION MICROSCOPIQUE :**

La prise de photos avec le microscope optique nous a donné les résultats suivants :

- 1- Pour les lames souples traitées en Algérie de nuance XC68 il s'agit d'une structure Bainito – Sorbitique en surface et en épaisseurs.
- 2- Pour les lames rigides traitées en Algérie de nuance XC65, il s'agit également d'une structure Bainito – Sorbitique en surface et en épaisseur, en plus nous relevons des points noirs d'oxydes ou d'inclusion en surface.



- 3- Pour les lames souples importées de nuance XC70 nous relevons de globules fins de carbures repartis sur une matrice sorbitique en surface et en épaisseur, de plus nous observons des points noirs d'oxydes ou d'inclusions.
  
- 4- Pour les lames rigides importées de nuance XC55, il s'agit d'une structure Sorbitique en surface et en épaisseur avec la présence d'oxydes ou d'inclusion.



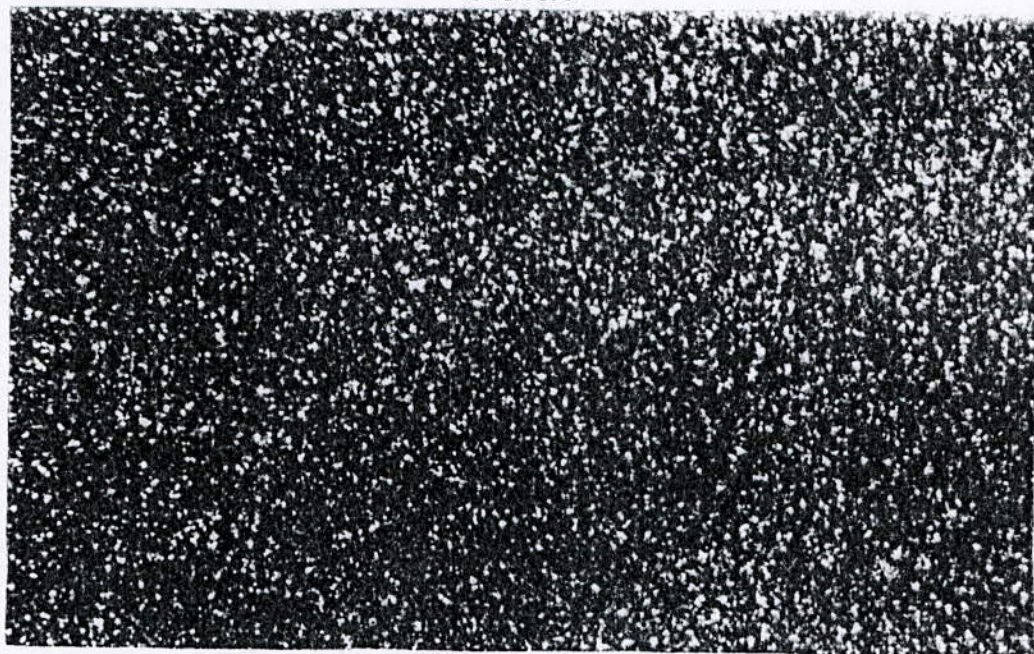
G : 500

Structure globulaire

en surface et en épaisseur



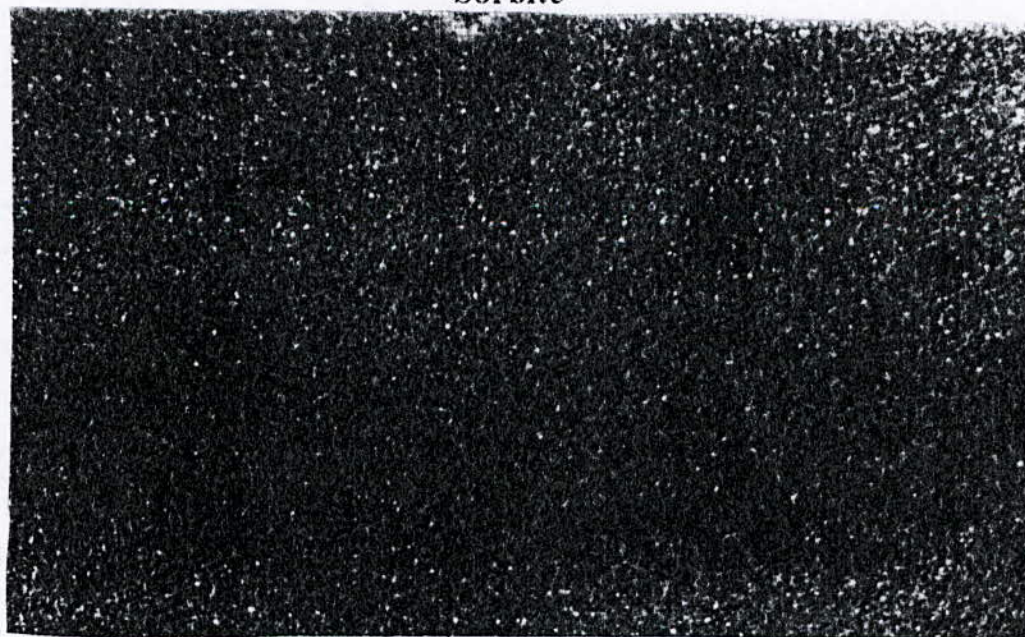
Sorbite



G:250

Échantillon importé rigide (XC55 en surface)

Sorbite

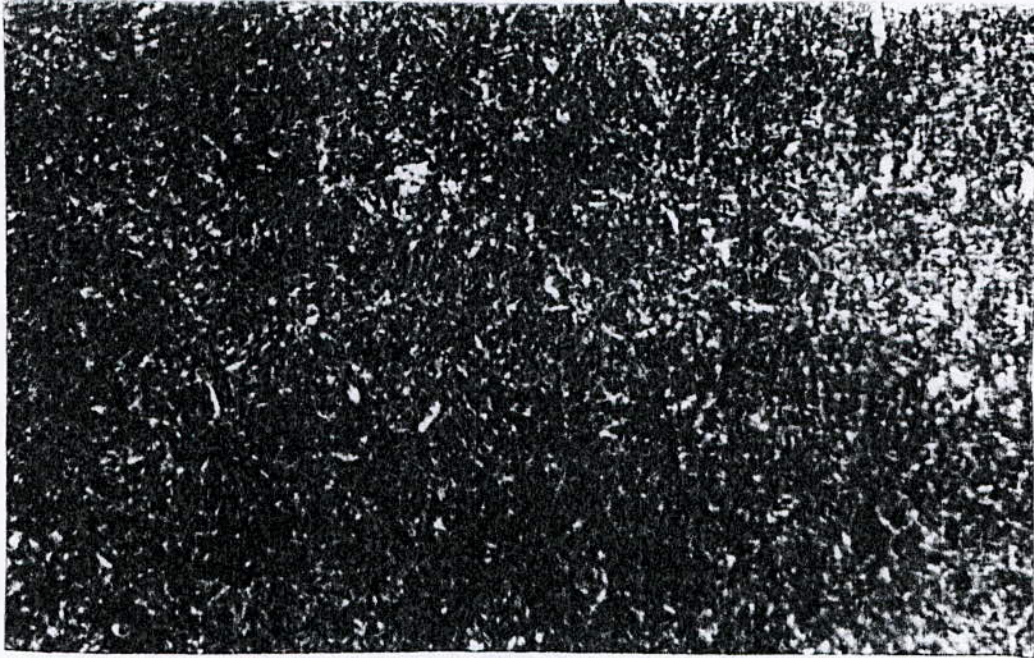


G:250

Échantillon importé rigide (XC55 en épaisseur)



**Bainito - Sorbitique**



*G: 250*

Échantillon traité en Algérie Rigide (XC65 en surface)

**Bainito - Sorbitique**

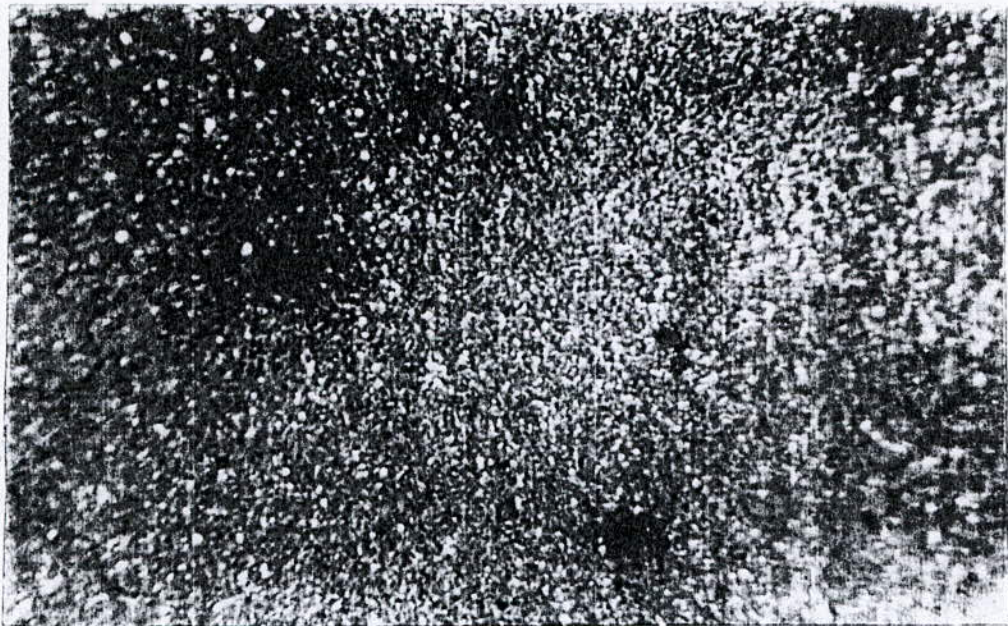


*G: 250*

Échantillon traité en Algérie Rigide (XC65 en épaisseur)



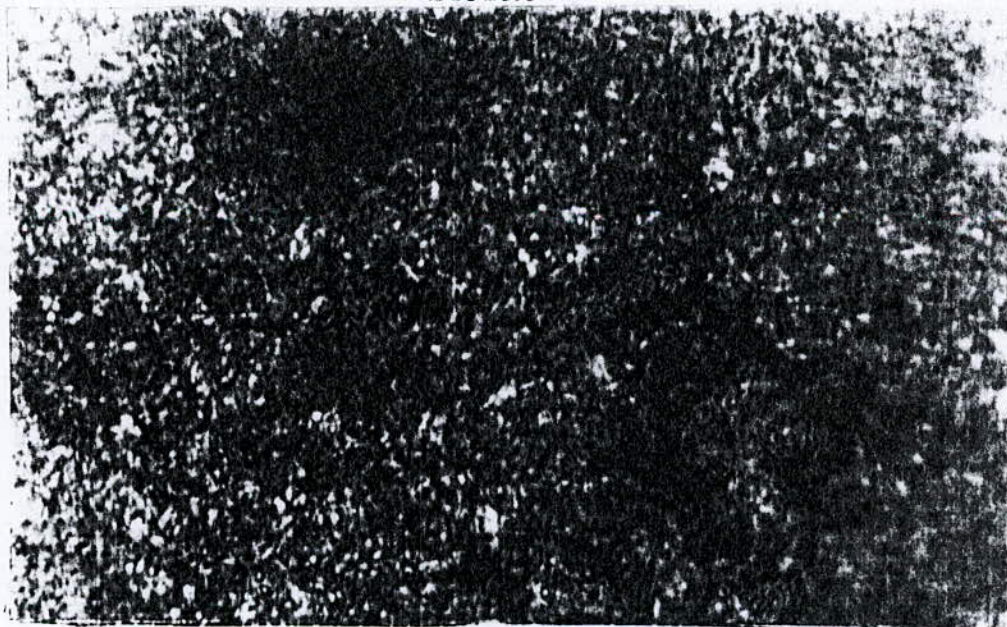
Sorbite



$G: 500$

Échantillon importé souple (XC70 en surface)

Sorbite

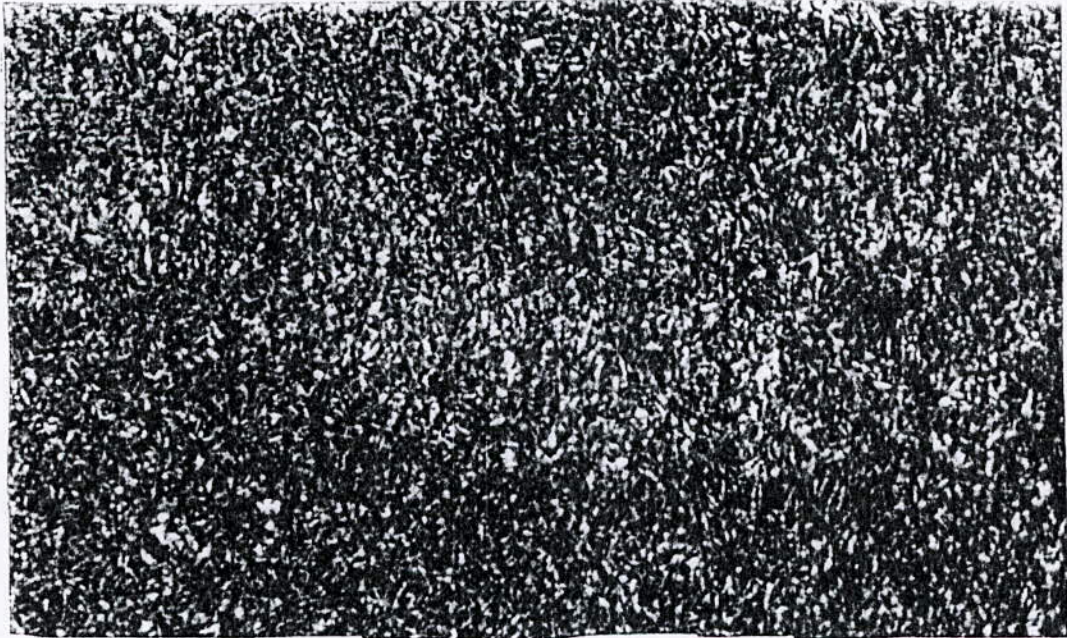


$G: 500$

Échantillon importé souple (XC70 en épaisseur)



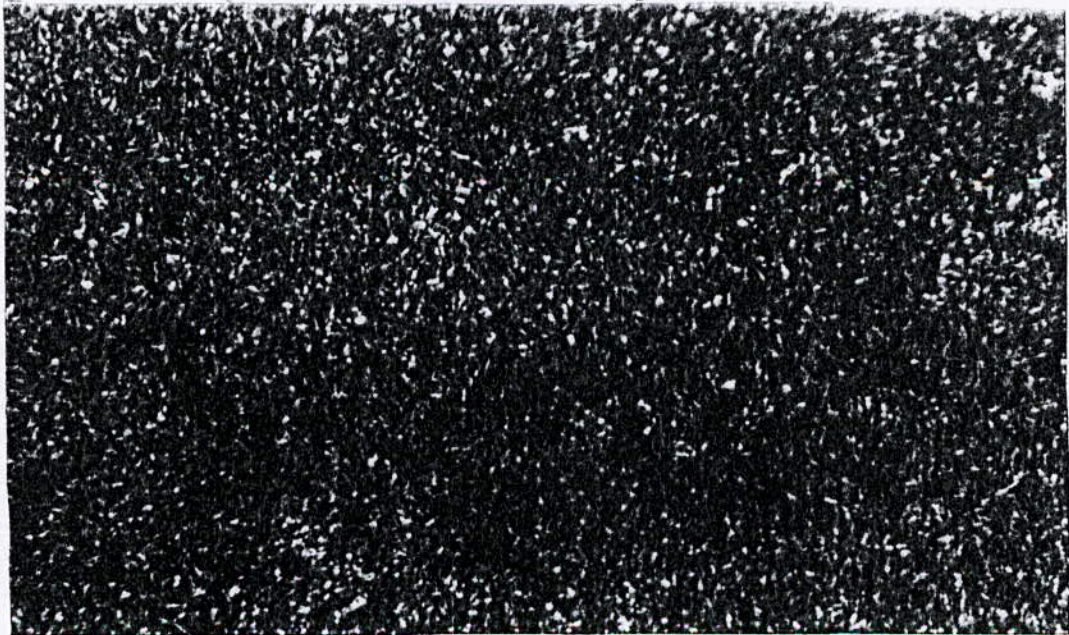
**Bainito - Sorbitique**



$G : 500$

Échantillon traité en Algérie souple (XC68 en surface)

**Bainito - Sorbitique**



$G : 500$

Échantillon traité en Algérie souple (XC68 en épaisseur)



D'après ces résultats nous pouvons conclure que pour les lames importées (souples et rigides) sont de structure totalement Sorbitique, tandis que les lames traitées en Algérie ont une structure Bainito – Sorbitique.

Cette différence de structure entre l'acier importé et l'acier traité en Algérie est due aux défauts dans les traitements thermiques de ce dernier, à savoir le mauvais réglage des fours aux températures convenable (chauffage et maintien) et aussi le mauvais contrôle des vitesses de refroidissement. Rappelons que l'acier importé (souple et rigide) répond largement à nos besoin avec ces caractéristiques structurales.

### IV.3. RESULTATS DE DURETE:

La dureté effectuée sur les nuances XC55, XC65, XC68 et XC70 sous une charge de 1000 gr nous a donné les résultats suivants :

Lames importées souples XC70					moyenne
Hv	473,2	505,7	498,3	509,9	496
HRC	47,1	49,5	49	49,7	48 :

Tableau 3. dureté HV de XC 70

Lames importées rigide XC55					moyenne
Hv	451	450	462,8	473,2	459
HRC	45,6	45,3	46,3	47,1	46

Tableau 4. dureté HV de XC 55

Lames souples traitées en Algérie XC68					Moyenne
Hv	545,5	558,9	545,5	542,7	548
HRC	52	52,9	52	51,9	52

Tableau 5. dureté HV de XC 68

Lames rigide traitées en Algérie XC65					moyenne
Hv	613	602	575,8	591,3	595
HRC	55,9	55,3	53,9	54,7	55

Tableau 6. dureté HV de XC 65



D'après ces résultats, nous remarquons bien que la dureté Hv des constituants de nos échantillons varie comme suite :

- Pour les échantillons importés (souples et rigides),  $Hv \approx 450 \div 500$ , dans le cas de la Sorbite.
- Pour les échantillons traités en Algérie (souples et rigides),  $Hv \approx 550 \div 600$ , dans le cas de la structure Bainito – Sorbitique.sorbite.

Donc d'après ces résultats expérimentaux nous remarquons :

- 1- Une différence de structure entre l'acier importé et celui traité en Algérie.
- 2- Une dureté relativement élevée pour l'acier traité en Algérie par rapport à celui importé.

De là nous pouvons dire et confirmer qu'il y a certainement un défaut dans les traitements thermiques des lames traitées en Algérie.

Le but de la mesure est l'étude des caractéristiques et de la répartition des phases de l'acier (micro-constituants). En effet la mesure nous a donné la dureté de la sorbite micro-constituant de l'acier importé,  $450 \div 500$  Hv et la dureté du micro-constituant bainito-sorbitique de l'acier traité en Algérie  $550 \div 600$  Hv.

#### Remarque :

Il est difficile de trouver la valeur exacte de la microdureté car cette dernière dépend de plusieurs facteurs à savoir l'état de surface de l'échantillon et la fixation du microduromètre.

#### IV.4. RÉSULTAT DE L'ESSAI DE TRACTION :

L'essai de traction a été réalisé à l'École Nationale Polytechnique (département de Génie mécanique) sur une machine de type VBK, PETERCEM (France).

Les résultats que nous avons obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Lames rigides importées XC55									
Charge F(Kgf)	126	243	514	600	836	865	894	915	930 <sup>R</sup>
Allong <sup>t</sup> $\Delta L$ (mm)	2	4	6	8	10	12	14	16	18

**Tableau 7. La charge  $F = f(\Delta L)$  pour XC55.**

Lames rigides traitées en Algérie XC65									
Charge F(Kgf)	198	274	616	766	900	944	955 <sup>R</sup>	-	-
Allong <sup>t</sup> $\Delta L$ (mm)	2	4	6	8	10	12	14	16	18

**Tableau 8. La charge  $F = f(\Delta L)$  pour XC65.**



Lames souple importées XC70								
Charge F(Kgf)	76	152	242	297	365	381	393	-
Allong <sup>t</sup> $\Delta L$ (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8

**Tableau 9. La charge  $F = f(\Delta L)$  pour XC70.**

Lames souple traitées en Algérie XC68								
Charge F(Kgf)	63	142	220	288	377	398	408	420
Allong <sup>t</sup> $\Delta L$ (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8

**Tableau 10. La charge  $F = f(\Delta L)$  pour XC68.**

À l'aide de ces résultats nous avons tracer les courbes conventionnels  $\sigma=f(e)$  suivantes :

$$\sigma = F/S_0 ; [\sigma] = \text{Kgf/mm}^2$$

$$e = \Delta L/L_0 * 100 ; [e] = \%$$

Lames rigides	largeur : $b=13,80$ mm								
Importées XC55	Épaisseur : $a=0,85$ mm								
	Section initiale : $S_0=b*a=11,73$ mm <sup>2</sup>								
	<u>Dimensions</u> : longueur initiale : $L_0=19,35$ mm								
	$L_0 = K \cdot \sqrt{S_0}$ ; $K = 5,65$								
	$L_c < L_0 + 2b$								
$\sigma$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	10,74	20,71	43,82	51,15	71,27	73,74	76,21	78,00	79,28
$e$ (%)	10,30	20,60	31,00	41,30	51,60	62	72,30	82,60	93,00

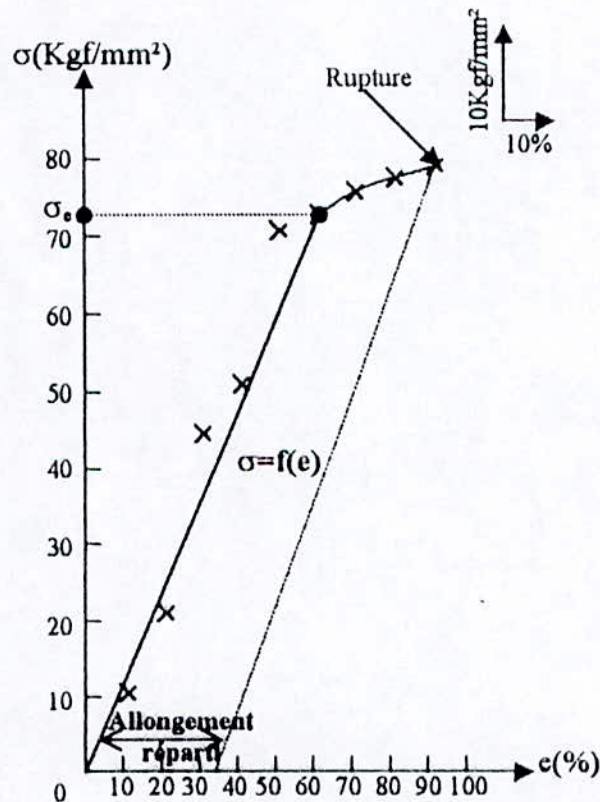


Fig 11. Courbe conventionnel de traction XC55.



Lames rigides	largeur : $b=14,00$ mm								
Traitées en Algérie XC65	Épaisseur : $a=0,90$ mm								
	Section initiale : $S_0=b*a=12,6$ mm <sup>2</sup>								
	<u>Dimensions</u> : longueur initiale : $L_0=20,05$ mm								
	$L_0 = K \cdot \sqrt{S_0}$ ; $K = 5,65$								
	$L_c < L_0 + 2b$								
	$L_c$ : largeur de la partie calibrée								
$\sigma(\text{Kgf/mm}^2)$	15,71	21,74	48,88	60,79	71,42	74,92	75,79	-	-
$e(\%)$	9,97	19,95	29,92	39,9	49,87	59,85	69,82	-	-

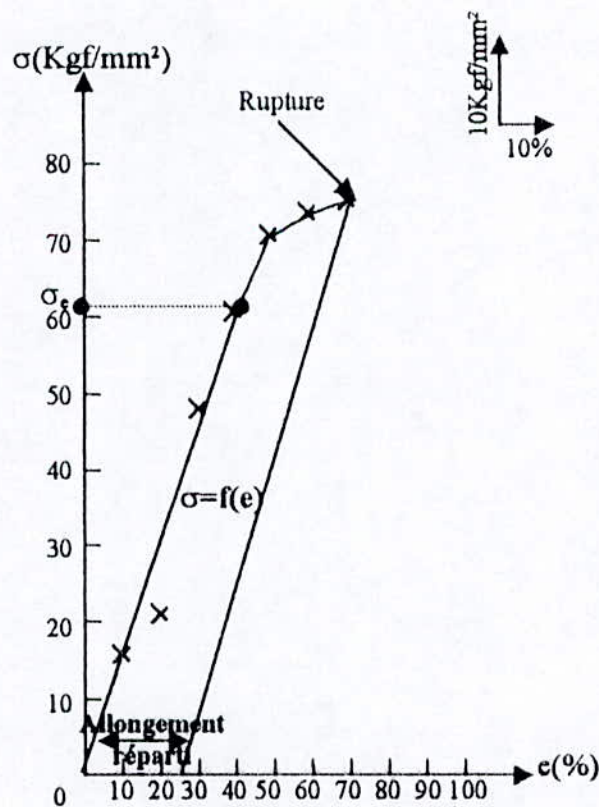


Fig 12. Courbe conventionnel de traction de XC65.

Lames souples		largeur : $b=12,00$ mm							
Importées XC70		Épaisseur : $a=0,40$ mm							
		Section initiale : $S_0=b*a=5,08$ mm <sup>2</sup>							
		<u>Dimensions</u> : longueur initiale : $L_0=12,73$ mm							
		$L_0 = K \cdot \sqrt{S_0}$ ; $K = 5,65$							
		$L_c < L_0 + 2b$							
$\sigma$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	14,96	29,92	47,63	58,46	71,85	75	77,36	-	-
e(%)	7,85	15,71	23,56	31,42	39,27	47,13	54,98	-	-

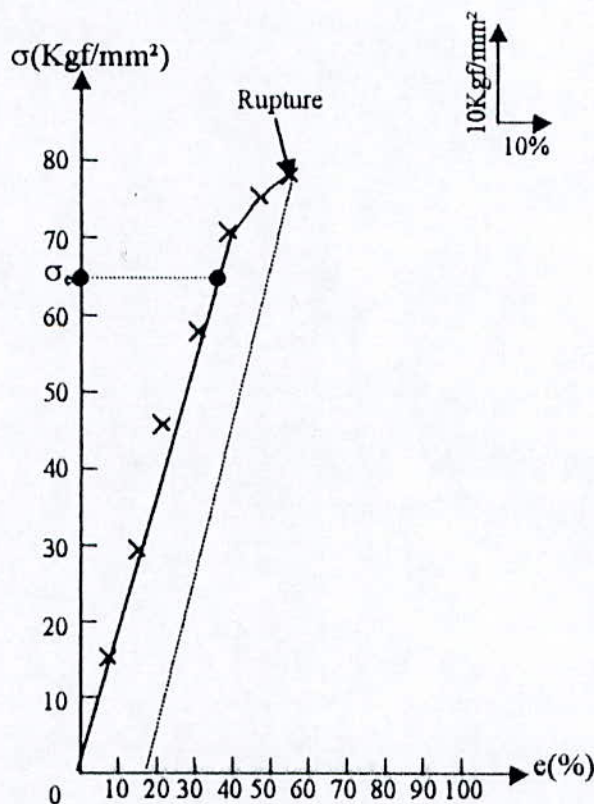


Fig 13. Courbe conventionnel de traction de XC70.



Lames souples	largeur : $b=13,10$ mm								
Traitées en Algérie XC68	Épaisseur : $a=0,40$ mm								
	Section initiale : $S_0=b*a=5,24$ mm <sup>2</sup>								
	<u>Dimensions</u> : longueur initiale : $L_0=12,93$ mm								
	$L_0 = K \cdot \sqrt{S_0}$ ; $K = 5,65$								
	$L_c < L_0 + 2b$								
$\sigma$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	12,02	27,09	41,98	54,96	71,94	75,95	77,86	80,15	-
e(%)	7,73	15,46	23,20	30,93	38,66	46,4	54,13	61,87	-

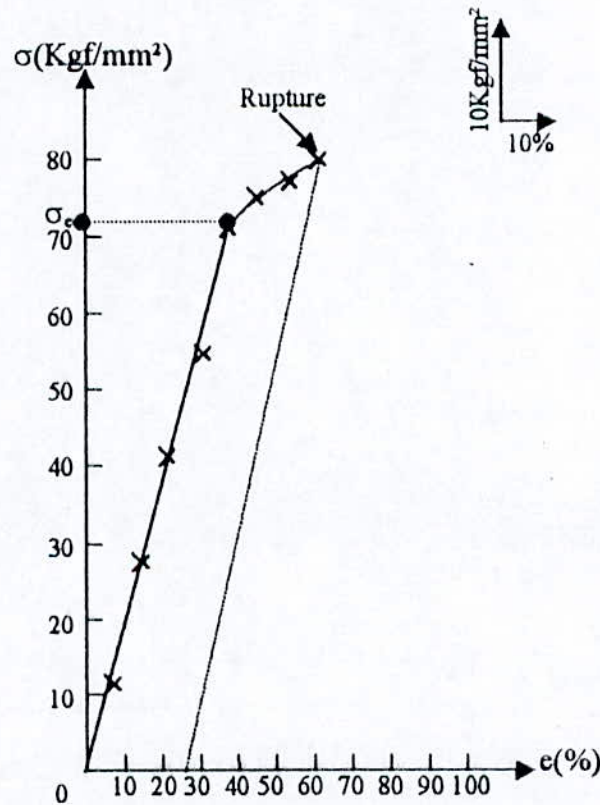


Fig 14. Courbe conventionnel de traction pour XC68.

D'après ces courbes conventionnels pour les 4 nuances, nous remarquons qu'elles contiennent un grand domaine élastique et un domaine plastique relativement faible, ce qui caractérise justement les aciers durs tel que les aciers à ressorts.

Les caractéristiques mécaniques les plus importantes que nous pouvons tirer de ces courbes sont :

a) Pour les lames rigide XC 65 et XC55:

- Une grande limite élastique  $\sigma_e \approx 62 \text{ Kgf/mm}^2$  équivalente à 620 MPa pour le XC65.
- Une grande limite élastique aussi pour XC55,  $\sigma_e \approx 74 \text{ Kgf/mm}^2$  équivalente à 740 Mpa.
- Le point de rupture a lieu pour  $\sigma_r \approx 75 \text{ Kgf/mm}^2 \approx 750 \text{ Mpa}$  pour le XC65 et pour XC55 au point  $\sigma_r \approx 79 \text{ Kgf/mm}^2$  équivalente à 790 Mpa.
- La résistance à la traction  $R_m = F_m/S_0$ , avec  $F_m$  la charge maximale, égale à  $75,79 \text{ Kgf/mm}^2 \approx 757,9 \text{ Mpa}$  pour le XC65 et égale à  $79,28 \text{ Kgf/mm}^2 \approx 792,8 \text{ Mpa}$  pour XC55 pour un allongement repart de 25% et 35% respectivement.
- Le coefficient de striction  $Z = (S_0 - S_u)/S_0 * 100$ , avec  $S_u$  la section minimale de l'éprouvette après rupture est très faible pour le XC65 et même pour le XC55, ce qui caractérise les aciers durs.

b) Pour les lames souples XC70 et XC68 :

- Une grande limite élastique  $\sigma_e \approx 64 \text{ Kgf/mm}^2$  équivalente à 640 Mpa pour XC70.



- Une grande limite élastique aussi pour le XC68,  $\sigma_e \approx 72 \text{ Kgf/mm}^2$  équivalente à 720 Mpa.
- Le point de rupture a lieu pour  $\sigma_r \approx 77,5 \text{ Kgf/mm}^2 \approx 775 \text{ Mpa}$  pour le XC70 et pour XC68 au point  $\sigma_r \approx 80 \text{ Kgf/mm}^2$  équivalente à 800 Mpa.
- La résistance à la traction  $R_m = 77,36 \text{ Kgf/mm}^2 \approx 773,6 \text{ Mpa}$  pour le XC70 et égale à  $80,15 \text{ Kgf/mm}^2 \approx 801,5 \text{ Mpa}$  pour XC68.
- Le coefficient de striction  $Z$  est très faible pour le XC70 et aussi pour le XC68, car  $S_0$  et  $S_c$  sont très proche donc les deux nuances sont durs.

Si nous examinons bien ces résultats, nous trouvons que les limites élastiques des nuances XC65 et XC55 sont proche, ainsi que pour les nuances XC70 et XC68, bien sûr dans la mesure des erreurs commises par la machine ainsi que pendant la lecture des résultats.

### Remarque :

Parfois les courbes conventionnels ne passant pas par tous les points, ça est dû à la sensibilité de la machine de traction qui est faible donc nous avons tracer des courbes moyennes de tel manière qu'elles passent par le maximum de valeurs.

Donc de point de vue caractéristiques mécaniques déduite de l'essai de traction nous pouvons dire que les nuances traitées en Algérie sont proches de celle de l'importation.

Pour tenir compte de la variation de la section au cours de l'essai nous avons tracer les courbes rationnelles pour les quatre nuances  $\sigma_v = f(\epsilon)$ .

Avec :

$\sigma_v$  : la contrainte vraie.

$\epsilon$  : la déformation rationnelle.

$\sigma_v = F/S$  ; nous admettons que la variation du volume de la partie calibrée  $\Delta V=0$ .

$$\text{D'où : } S_0 L_0 = SL = S(L + \Delta L) \Rightarrow S = \frac{S_0}{1 + \frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{S_0}{1 + e}$$

$$\Rightarrow \sigma_v = \frac{F(1 + e)}{S_0} = \sigma_c (1 + e)$$

$$\sigma_v = (1 + e) \cdot \sigma_c$$

$\sigma_c$  : contrainte conventionnelle.

$e$  : le taux d'allongement (%).

L'allongement rationnel  $\varepsilon$  peut être calculé par

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) ; \ln : \text{le logarithme népérien.}$$

Le tracé de la courbe rationnelle n'a pas de différence avec le tracé de la courbe conventionnelle pour la partie élastique car les déformations élastiques sont faibles. Dans le domaine de déformation plastique, la courbe prend une allure parabolique de type  $\sigma_v = K \cdot \varepsilon^n$  généralement.

Pour calculer le coefficient d'écrouissage "n" ou de consolidation nous avons tracer la courbe  $\ln \sigma_v = f(\ln \varepsilon)$  qui sera donc une droite et la pente nous donnera directement n.

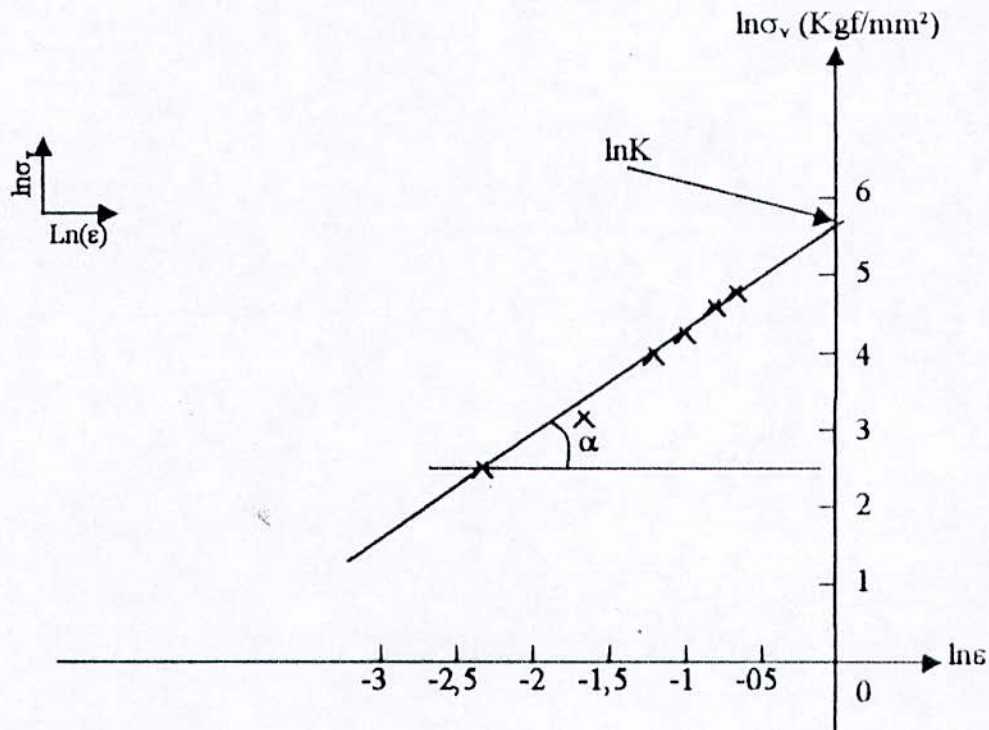
$$\text{donc : } \ln \sigma_v = \ln(K \cdot \varepsilon^n) = \ln K + \ln \varepsilon^n = \ln K + n \ln \varepsilon.$$

$$\ln \sigma_v = \ln K + n \ln \varepsilon ; K \text{ est une constante.}$$

n définit l'aptitude d'un matériau à se déformer en expansion.



XC55	$\sigma_v$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	11,84	24,97	57,4	72,27	108	119,45	131,3	142,42	153,0
	$\epsilon$ (%)	9,8	18,73	27	35,57	41,6	48,24	54,4	60,21	65,75
	$\ln(\sigma_v)$	2,47	3,21	4,0	4,28	4,68	4,78	4,87	4,95	5,03
	$\ln(\epsilon)$	-2,32	-1,675	-1,3	-1,03	-0,87	-0,72	-0,6	-0,5	-0,42



**Fig 15. Courbe rationnelle :  $\ln\sigma_v = f(\ln\epsilon)$   
analytique pour le XC55.**

L'intersection de la droite nous donne la constante K.

Donc  $\ln K \approx 5,75 \Rightarrow K = e^{5,75} \approx 314,2 \text{ Kgf/mm}^2$

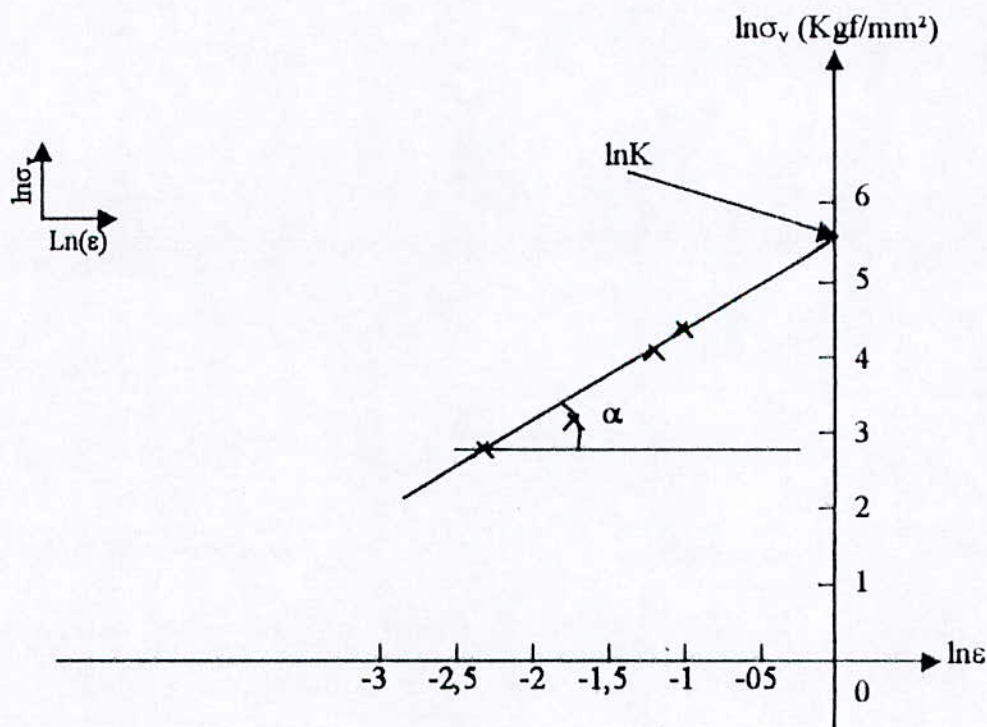
$K = 314,2 \text{ Kgf/mm}^2$

Pour déterminer n:

$$n = \text{tg}\alpha = \frac{4,87 - 2,47}{-0,6 - (-2,32)} \approx 1,395 \approx 1,4$$

$n \approx 1,4$

XC65	$\sigma_v$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	17,27	26,50	63,5	85,04	107,03	119,75	128,7
	$\epsilon$ (%)	9,5	18,19	26,17	33,57	40,45	46,9	52,95
	$\text{Ln}(\sigma_v)$	2,84	3,26	4,15	4,44	4,67	4,78	4,85
	$\text{Ln}(\epsilon)$	-2,35	-1,704	-1,34	-1,09	-0,9	-0,75	-0,63



**Fig 16. Courbe rationnelle :  $\ln \sigma_v = f(\ln \epsilon)$   
analytique pour le XC65.**



Donc  $\ln K \approx 5,6 \Rightarrow K = e^{5,6} \approx 270,4 \text{ Kgf/mm}^2$

$$K = 270,4 \text{ Kgf/mm}^2$$

Pour déterminer n:

$$n = \text{tg}\alpha = \frac{4,44 - 2,84}{-1 - (-2,35)} \approx 1,18$$

$$n \approx 1,18$$

XC70	$\sigma_v \text{ (Kgf/mm}^2\text{)}$	16,13	34,92	58,85	76,82	100	110,34	119,89
	$\epsilon \text{ (\%)}$	7,55	14,59	21,15	27,32	33,12	38,61	43,81
	$\text{Ln}(\sigma_v)$	2,78	3,54	4,07	4,34	4,6	4,70	4,78
	$\text{Ln}(\epsilon)$	-2,58	-1,92	-1,55	-1,29	-1,10	-0,95	-0,82

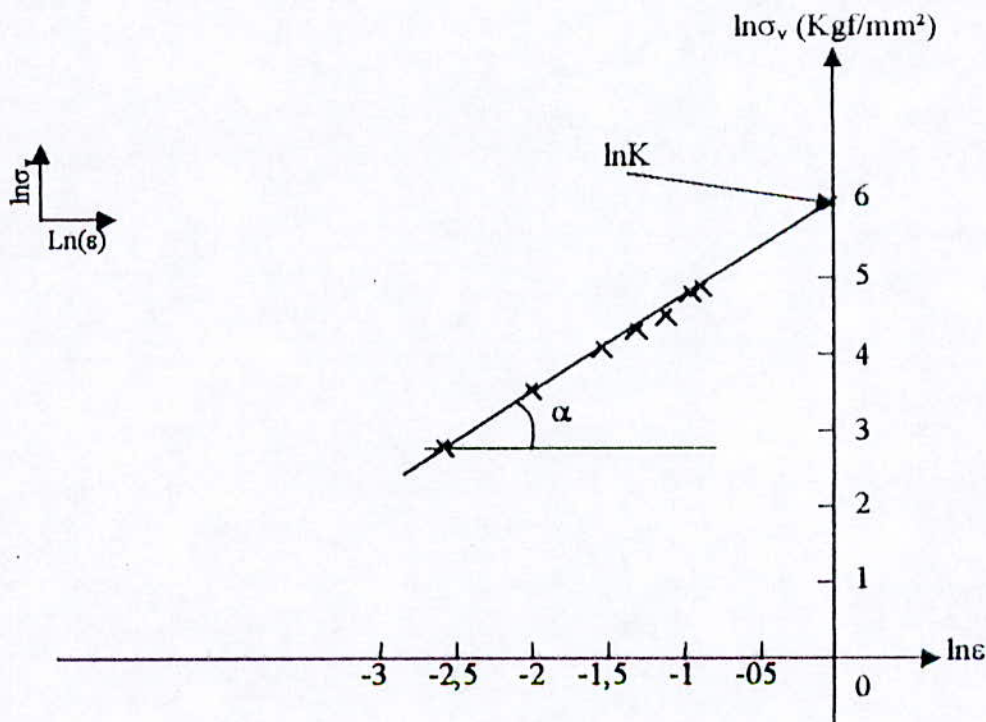


Fig 17. Courbe rationnelle :  $\ln \sigma_v = f(\ln \epsilon)$   
analytique pour le XC70.

Donc  $\ln K \approx 6 \Rightarrow K = e^6 \approx 403,42 \text{ Kgf/mm}^2$

$$K = 403,42 \text{ Kgf/mm}^2$$

Pour déterminer n:

$$n = \text{tg}\alpha = \frac{4,78 - 2,87}{-0,82 - (-2,58)} \approx 1,13$$

$$n \approx 1,13$$

XC68	$\sigma_v \text{ (Kgf/mm}^2\text{)}$	12,94	31,27	51,71	71,95	99,75	111,19	120,0	129,73
	$\epsilon \text{ (\%)}$	7,44	14,37	20,86	26,94	32,68	38,11	43,26	48,16
	$\text{Ln}(\sigma_v)$	2,56	3,44	3,94	4,27	4,6	4,71	4,78	4,86
	$\text{Ln}(\epsilon)$	-2,59	-1,94	-1,56	-1,31	-1,11	-0,96	-0,83	-0,73

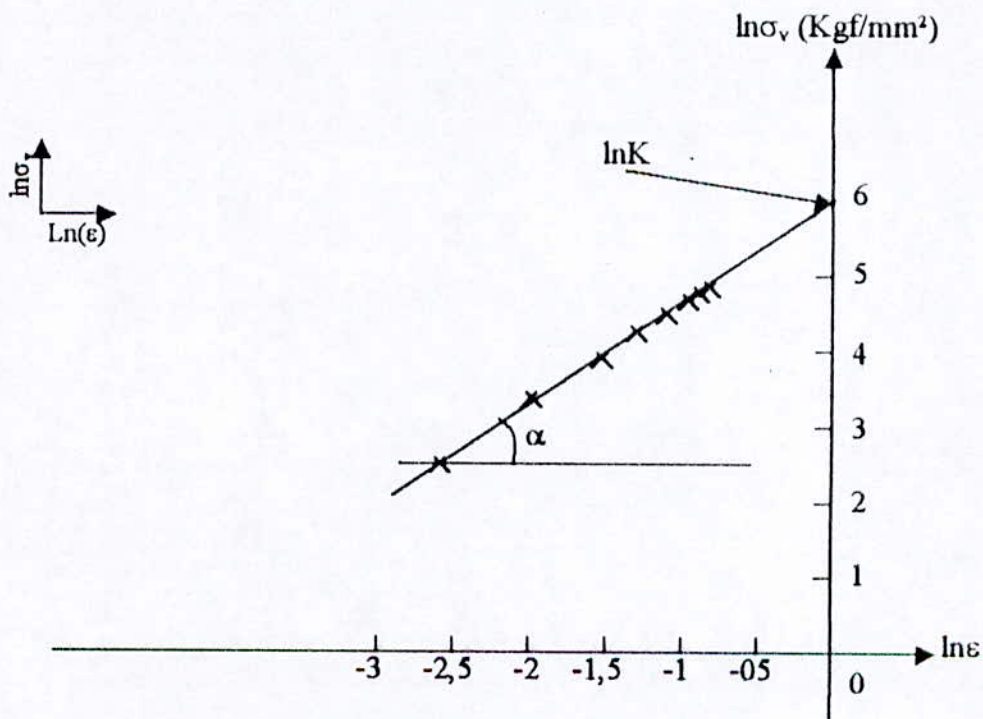


Fig 18. Courbe rationnelle :  $\ln\sigma_v = f(\ln\epsilon)$   
analytique pour le XC68.



Donc  $\ln K \approx 6 \Rightarrow K = e^6 \approx 403,42 \text{ Kgf/mm}^2$

$$K = 403,42 \text{ Kgf/mm}^2$$

Pour déterminer n:

$$n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{4,86 - 2,56}{-0,73 - (-2,59)} \approx 1,23$$

$$n \approx 1,23$$

Nous remarquons bien que ces différentes valeurs calculées de K et n sont proches pour les lames souples et rigides, bien sûr dans le cadre des erreurs comises pendant le tracé des graphes.

## CONCLUSION GENERALE

À travers cette étude nous pouvons conclure que :

1. L'analyse chimique des quatre nuances répond bien aux aciers de constructions de qualité qui couvre une large gamme des caractéristiques et propriétés mécaniques.
2. L'analyse des structures métallographiques des aciers traités en Algérie (rigides et souples) sont un peu différentes des aciers importés (sorbitique pour les importés et bainito-sorbitique pour les traités en Algérie). Cette différence est due aux défauts dans les traitements thermiques des aciers traités en Algérie.
3. En ce qui concerne les résultats de la microdureté, nous trouvons qu'il y a une différence relativement élevée entre l'acier importé et celui traité en Algérie, ça et dû bien sûr aux différences dans les phases qui constitue l'acier et aussi à l'état de surface des échantillons.
4. Enfin pour l'essai de traction qui nous a donné des propriétés et caractéristiques mécaniques très intéressantes nous pouvons dire que l'acier traité en Algérie (rigide et souple) a des paramètres proches de celui importé.

Donc nous pouvons dire, comme résultat final que l'acier traité en Algérie (rigide et souple) peut remplacer l'acier importé (rigide et souple) avec bien sûr des corrections sur les traitements thermiques de l'acier traité en Algérie.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Document O.N.A.A.P.H.
- [2] « Technique de l'ingénieur », M300.
- [3] N. BOUAOUADJA, « Matériaux métalliques », ed. OPU, (1992).
- [4] J. BARRALIS, « Précis de métallurgie », ed. NATHAN, (1983).
- [5] H. DELEIRIS, « Métaux et alliages », T.1, (1972).
- [6] H. CHAUSSIN, « Métallurgie », T.1, ed. DUNOD, (1976).
- [7] I. LAKHTINE, « Métallographie et traitement thermique », ed. MIR, (1978).
- [8] A. ROOS, « Précis de métallurgie appliquée », ed. LAVOISIER, (1982).
- [9] G. DIETER, « Mechanical metallurgy », ed. Mc GRAWHILL, T.3, (1986).