

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

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Métallurgie



*Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur  
d'état en Métallurgie*

**Thème:**

*Etude de la fatigue  
thermique d'un revêtement  
de chrome sur l'acier à outil  
de nuance 32CDV13*

*Dirigé par :M.Abadli Kamel  
Réalisé par :M.Cherif Abdellatif*

*Promotion 2008/2009*

*ENP; 10 Avenue Hassen Badi – El Harrach, Alger*

## **REMERCIEMENT**

*Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté de réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier, tous particulièrement mon encadreur **Mr. Abadli Kamel**, pour son dévouement, ses conseils, son soutien moral, ces encouragements durant les moments difficiles et surtout dans la partie expérimentale, et pour toute l'attention qu'il m'a porté.*

*Je remercie **Mr M.E. DJEGHLAL** Maître de conférences ENSP d'avoir accepter de présider le jury de notre thèse.*

*Je remercie **Mr M.LARIBI** et **Mr DELLALI** d'avoir Accepter de juger mon travail.*

*Un merci doit également être adressé à **Abdenour** (ezzahi) le technicien du laboratoire de métallurgie (ENSP) et **Mr Daoud noureddine** pour son aide dans les moments difficiles.*

*Je n'oublie pas de remercier les enseignants de l'école nationale polytechnique, en particulier ceux du département de métallurgie, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation.*

# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :*

*- Mon défunt PAPA que je regrette qu'il n'est pas parmi nous pour me féliciter.*

*- Mon ange: ma très chère mère, qui sans Dieu et elle, je ne serai jamais arrivé à ce stade.*

*- Mes frères: Adem(ezzahi), Moho(El Badji), Younes et yacine(95).*

*- Ma sœur, et M .Benzerga .K.*

*- Tous mes amis et surtout :*

***ALILO/HILAL(19)***

***Bouzid, Islem,***

***Bilel(TC)/Riadh, Samir(indus)/Sofiane(L4)/Latif,Moad(Civil)/***

***Yazid,Alilo,Hamid,Halaka(méca)/Lotfi(Auto)/Fethi(Tchon),***

***Ishak,Hassen)/Zakaria, Mohamed(Akhina).***

***Toute la promo de métallurgie :Ronny, Mokhtar,PDG,***

***Ezzaouach, Saci(Fariha), Gachache, Samado(??), Hania pour***

***son aide,(Othmane ↔ Krimo),Echaoui(impossible),***

***Brahim(MCA),Kaba, Annabia, Hadjer(19), RAI(ta place n'est***

***pas là), Ishak(n'oublie pas 2014).Sans oublier OMAR, RAFIK,***

***Hamza, Khoya ELBDJAOUI(Minier).***

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment, ou` qu'ils soient.*

*A mon beau pays l'Algérie*

***LATIF***

## ملخص

الهدف من هذا العمل معرفة تأثير الإرهاق الحراري على ميكروقساوة ومثانة الغطاء الكرومي الموضوع على عينة حديدية ودراسة التشققات التي تطرأ عليه بدلالة عدد الدورات.

ولهذا نستعمل التجهيزات الآتية :  
المجهر الضوئي ، جهاز قياس ميكروقساوة.

## الكلمات الافتتاحية:

ترسب الكروم إرهاب حراري، دور، الصلب، الترسب الكهروكيميائي

## Abstract

This study shows the effects of thermal cycling on the structure, the variations of tenacity and the cracking of chrom deposits were elaborated on substratums by electroless procedure. For this reason, we have realized an apparatus which can do cycles of heating and cooling.

The techniques of characterization used are: optical microscope, microduromètre for mechanical tests.

**Key words** : electroless plating, chrom, thermal fatigue, cycle

## Résumé

Cette étude montre les effets du cyclage thermique sur la structure, les variations de la microdureté et la fissuration d'un revêtement de chrome qui a été réalisé sur un acier à outil qui travaille à chaud. Pour cela, nous avons conçu un dispositif qui permet de réaliser des cycles de chauffage et de refroidissement. Les techniques de caractérisation utilisées sont: le microscope optique et le microduromètre pour l'essai mécanique.

**Mots clés** : aciers à outils, chrome, dépôt électrolytique, fatigue thermique, cycle.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I – Chromage des aciers à outils</b> .....	<b>3</b>
I.1. Les aciers à outil .....	4
I-1-1. Critères d'emploi des aciers à outil .....	4
I-1-2. Éléments d'alliages .....	5
I-1-3. Diagramme d'équilibre .....	7
I-1-3-1. Diagramme fer - carbone .....	7
I-1-3-2. Influence des éléments d'alliage sur les structures d'équilibre .....	8
I-1-3-2-1. Sur le domaine austénitique .....	8
I-1-3-2-2. Sur la transformation eutectoïde .....	10
I-1-3-3. Influence des éléments d'alliage sur la stabilité des aciers à outils .....	11
I-1-4. Traitement thermique des aciers à outils .....	13
I-1-4-1. Traitement thermique .....	13
I-1-4-2. La fragilité au revenu de la martensite .....	14
I-1-5. Classification des aciers à outils .....	15
I-1-5-1. Les aciers non alliés pour travail à froid .....	15
I-1-5-2. Les aciers alliés pour travail à froid .....	15
I-1-5-3. Les aciers alliés pour travail à chaud .....	16
I-1-5-4. Les aciers rapides .....	17
<b>I-2. Le chromage électrolytique</b> .....	<b>17</b>
I-2-1. Propriétés de chrome .....	17
I-2-2. Théorie de l'électrolyse .....	18
I-2-2-1. Electrolyse d'une solution d'acide chromique .....	18
I-2-2-2. Application des lois d'électrolyse .....	18
I-2-2-3. Bain électrolytique .....	19
I-2-2-4. Schéma de phénomène d'électrolyse .....	19
I-2-3. Type de chromage .....	20
I-2-3-1. Le chromage décoratif .....	20
I-2-3-2. Le chromage dur .....	20
I-2-4. Paramètres et facteurs conditionnant qui influent sur le dépôt .....	21
I-2-4-1. L'état de surface .....	21
I-2-4-2. La densité de courant .....	21
I-2-4-3. Température .....	21
I-2-4-4. Agitation .....	21
I-2-4-5. La tension d'électrolyse .....	22
I-2-4-6. Pouvoir de répartition .....	22
I-2-5. Chromage dur et épais .....	22
I-2-5-1. Objectif .....	22
I-2-5-2. Caractéristiques essentielles .....	22
<b>Chapitre II : La fatigue thermique</b> .....	<b>26</b>
II-1. Fatigue et choc thermique : Définition .....	27.
II-2. Mécanisme de la fatigue thermique .....	28
II-3. Contraintes d'origine thermique .....	30
II-4. Contraintes thermiques résiduelles .....	31
II-5. Amorçage et propagation des fissures .....	31
II-5-1. Amorçage d'une fissure .....	33
II-5-1-1. L'amorçage sous contrainte thermique .....	33
II-5-1-2. L'amorçage par la fragmentation cellulaire de la couche d'oxyde .....	34

II.5.2 Propagation .....	35
II.5.3 Faciès caractéristique de fissuration thermique .....	35
II-6. Facteurs de la fatigue thermique .....	36
II-6-1. Nature de cyclage thermique.....	36
II-6-2.Facteurs thermiques .....	37
II-6-3.Facteurs d'environnement .....	38
II-6-4. Facteurs géométriques .....	38
II-6-5. Facteurs métallurgiques .....	38
II-6-6. Facteurs mécaniques .....	38
<b>Chapitre III : Partie expérimentale .....</b>	<b>39</b>
III-1 Matériau de l'étude .....	40
III-2 Traitement thermique utilisé .....	40
III-2-1 Traitement de trempe .....	40
III-2-2 Traitement de revenu .....	40
III-3 Préparation des échantillons .....	41
III-3-1 Dimensions des l'échantillons .....	41
III-3-2 Enrobage .....	42
III-3-3 polissage mécanique .....	42
III-4 Etude et réalisation de revêtement de chrome .....	43
III-4-1 Préparation de bain de chromage dur .....	43
III-4-2 Le montage expérimental .....	44
III-4-3 Le réglage de l'intensité et la tension .....	46
III-4-4 Les démarches des essais .....	46
III-5. Etude et réalisation de la fatigue thermique .....	47
III-5-1 Historique .....	47
III-5-2 Dispositif des essais de cyclage thermique .....	47
III-5-3. Principe de fonctionnement du dispositif .....	51
III-6. Observation microscopique .....	52
III-7. Essai de microdureté .....	53
<b>Chapitre IV Résultats et interprétations .....</b>	<b>55</b>
IV.1. Résultats .....	56
IV.1-1. Caractérisation du matériau .....	56
IV.1-2. Le revêtement de chrome .....	57
IV.1.2 .1 Détermination de l'épaisseur du revêtement de chrome .....	57
IV.1.2 .2 Structure de revêtement .....	58
IV.1 3. Fissuration de revêtements par fatigue thermique .....	61
IV.1 3.1 Fissuration de revêtement E1 (35A/dm <sup>2</sup> ) .....	62
IV.1 3.2 Fissuration de revêtement E2 (45A/dm <sup>2</sup> ) .....	65
IV.1.4 Evolution de la dureté .....	68
IV-2 Interprétation des résultats .....	68
IV.2-1 Influence de la densité de courant sur l'épaisseur .....	68
IV.2.2- Influence de la densité de courant sur la dureté de revêtement de chrome.....	69
IV.2.3- Influence de la densité de courant sur la fissuration par fatigue thermique ...	69
IV.2.4- Influence de la fissuration sur la dureté de revêtement .....	69
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>70</b>

# INTRODUCTION GENERALE

Lorsqu'un acier à outils subit localement des variations cycliques de température, il devient très sensible à la fissuration et à la dégradation. En effet, le cyclage thermique engendre des contraintes dites thermiques qui sont responsables dans bien des cas de l'endommagement des pièces et de la réduction de leurs durées de vie et peuvent induire le phénomène dit de *fatigue thermique*.

Pour limiter l'endommagement par fatigue thermique et augmenter la sécurité, plusieurs solutions peuvent être adaptées tels que : le choix des matériaux, le choix de la forme des composants, le contrôle des facteurs de fonctionnement et la protection des surfaces.

Parmi les procédés de protection de surface, nous citons les revêtements par voie électrochimique qui nécessite une maîtrise sérieuse des différents facteurs qui ont une grande influence sur la qualité des dépôts électrolytiques (Composition du bain, facteurs électriques, température, agitation...).

En tant que revêtement, le Chrome joue un rôle important dans la lutte contre l'endommagement des composants métalliques. Cet élément est déposé soit par méthode thermique (chromisation, CVD,...etc.) soit par méthode électrolytique.

Dans le cadre de notre étude, on va étudier la tenue en condition de fatigue thermique du revêtement de chrome qui a été élaborés sur des substrats de l'acier à outils de nuance 32CDV13 par voie électrolytique (chromage dur) dans des conditions opératoires.

Le présent mémoire est organisé selon le plan suivant :

## **La première partie**

Nous présentons une étude bibliographique dans laquelle le premier chapitre est consacré au chromage les aciers à outils. Dans le deuxième chapitre, nous traitons la fatigue thermique.

# INTRODUCTION GENERALE

## La deuxième partie

Cette partie comprend l'étude expérimentale. Elle comprend deux chapitres :

- ❖ le chapitre Troie est consacré à la procédure expérimentale dans laquelle est réalisée la présentation du matériau de l'étude, à la préparation des échantillons, à la description de différents méthodes et techniques expérimentales de chromage dur et fatigue thermique et réalisation de dispositif de la fatigue thermique et à la présentation des techniques de caractérisation utilisées.
- ❖ Le deuxième chapitre comprend les résultats obtenus et leur interprétation.

Une conclusion finale récapitulera l'ensemble du travail.



## **LE CHROMAGE DES ACIERS A OUTILS**

## Introduction

Les propriétés remarquables des aciers à outils sont parfois insuffisantes dans certaines conditions d'utilisation. En effet, dans certains environnements sévères de corrosion ou de contraintes mécaniques, les aciers à outils peuvent ne pas résister suffisamment et subir des endommagements par fissuration ou par corrosion. Un des remèdes à ces problèmes est la protection par revêtement des surfaces. Les dépôts épais de chrome ont prouvé leur efficacité et justifient un large emploi à l'échelle industrielle.

### I.1. Les aciers à outils

#### Introduction

Les aciers à outils sont utilisés comme leur nom l'indique, dans les procédés de mise en forme des matériaux au sens le plus large. Il peut s'agir d'opérations d'usinage (tournage, perçage, fraisage...), de mise en forme à froid et à chaud (poinçons, matrices, cylindres de laminoirs), de moulage (alliages légers, alliages de zinc, plastiques renforcés ou non par des fibres), de filage et d'extrusion (alliages légers, plastiques...).

Les aciers à outils sont utilisés dans la fabrication d'outils destinés soit à la mise en forme d'autres matériaux, soit au mesurage d'objets. [1]

#### I-1-1. Critères d'emploi des aciers à outils :

Les propriétés qui sont exigées d'un outil en service dépendent dans une large mesure, de propriétés qui peuvent se caractériser globalement de la manière suivante:

##### 1. La ténacité :

C'est la faculté de résister à des niveaux de contraintes très élevées sans entraîner de rupture brutale, propriété qui doit être accompagnée dans de nombreux cas, par une bonne résistance aux chocs répétés. La ténacité d'un acier à outils traduit l'ensemble de deux propriétés :

- la possibilité de se déformer avant rupture, c'est-à-dire la ductilité.
- la résistance à la déformation plastique

##### 2. la dureté :

Qui exprime la résistance du matériau à l'enfoncement ou à la déformation, propriété qui doit être atteinte soit à la température ambiante, soit le plus souvent à chaud avec des maintiens sous charge souvent prolongés. La dureté est évidemment l'une des propriétés de base des

aciers à outils ; elle exprime la résistance du matériau à l'enfoncement ou à la déformation à la température ambiante ou à chaud, pour des sollicitations mécaniques, de courte durée ou au contraire pour des maintiens prolongés sous charge. Cette propriété peut être atteinte par les critères suivants:

-Le niveau de dureté à la température ambiante, mesurée selon les cas en empreinte Vickers ou en empreinte Rockwell ;

### **3. La résistance à l'usure :**

Qui se caractérise par la faculté pour la surface de l'outil, de conserver son état initial le plus longtemps possible sans endommagements en cours de service.

### **4. La tenue à la corrosion :**

Qui traduit la résistance de la surface aux agressions liées à la chimie du milieu environnant, la dégradation de la surface d'un outillage par corrosion résulte de combinaisons d'effets mécaniques et d'effets chimiques interactifs. [2]

## **I-1-2. Éléments d'alliages**

### **Carbone**

Il favorise la formation de fer  $\gamma$ . C'est l'élément essentiel non métallique de tous les aciers, il élargit fortement le domaine austénitique grâce à sa réaction avec le chrome, le carbone forme des carbures de chrome ce qui est nuisible envers la corrosion. C'est pour cela que sa teneur est dans la plupart des cas maintenue très basse.

L'augmentation progressive de la teneur en carbone conduit à un abaissement de la température du liquidus et du solidus et par voie de conséquence, à une réduction des domaines de température correspondant à la transformation à chaud et au traitement thermique.

### **Chrome**

C'est un élément formateur de fer  $\alpha$ . Cet élément alphasène joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la trempabilité. Cet élément est utilisé dans la plupart des aciers à outils, en quantité allant de 0,5 à 17 %. Bien qu'ayant un pouvoir carburigènes inférieur à celui du Tungstène, et constitue au delà de 10,5 l'élément d'alliage essentiel des aciers inoxydables.

### **Molybdène**

C'est un élément formateur de fer  $\alpha$ . Il améliore la résistance à la corrosion une fois qu'il est en combinaison avec le chrome ; en plus, dans les aciers à outils, cet élément a un comportement analogue à celui du Tungstène; il est très carburigènes et se substitue au Tungstène. La vitesse de diffusion de cet élément dans le fer est quatre fois supérieure à celle du Tungstène, ce qui entrâmes une moins grande sensibilité de cet élément au phénomène de ségrégation. [3]

### **Vanadium**

Il est utilisé essentiellement comme élément générateur de carbures. C'est un élément d'alliage important dans les aciers rapides pour l'obtention d'une bonne dureté à chaud et d'une bonne résistance à l'usure en raison de la présence de particules très dures de carbures de vanadium dont les propriétés tribologiques sont par ailleurs très intéressantes. De petites additions, voisines de 0,2 % en masse, sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain lors du traitement thermique.

### **Tungstène**

Il a été l'un des éléments d'alliage les plus employés dans le domaine des aciers à outils en raison de son pouvoir carburigènes très important.

Le Tungstène ne se met que très peu en solution dans la cémentite, mais donne naissance à des carbures de haute dureté conférant aux aciers une grande résistance à l'usure. Cet élément permet donc aux aciers à outils de résister à l'abrasion. Plus la teneur en Tungstène est élevée, plus la température de fusion de l'alliage est augmentée. Aussi, la température de mise en solution peut- être plus élevée, ce qui laisse une grande liberté dans le choix de la température d'austénitisation.

### **Nickel**

Le Nickel, à l'exception de certains aciers d'outillages à chaud, se trouve simplement comme élément résiduel dans les aciers à outils, à des teneurs inférieures à 0,3 %. En raison de son influence directe sur le taux d'austénite résiduelle après trempe, cet élément engendre des difficultés de traitement thermique au revenu dans les aciers à outils chargés en carbone et éléments carburigènes.

### **Cobalt**

Il est communément ajouté en quantités variables entre 3 et 15 %, notamment dans les aciers rapides qui travaillent dans des conditions sévères.

### I-1-3. Diagramme d'équilibre :

#### I-1-3-1. Diagramme fer - carbone

Le système binaire Fe-C peut subir deux types d'évolution selon que la phase riche en carbone qui se forme est la cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ou le graphite ( $\text{C}_{\text{gr}}$ ). Si la phase riche en carbone formée est  $\text{Fe}_3\text{C}$ , l'évolution du système est décrite dans les conditions d'équilibre par le diagramme métastable ou à cémentite. **La figure (I-1)** montre le diagramme d'équilibre des phases comme fonction de la température et de leurs teneurs en carbone. Un certain nombre de domaines à l'intérieur des-quels sont stables à l'équilibres ; soit une seule phase, soit un mélange de deux phase, l'austénite, la ferrite, et la cémentite .

- L'austénite ( $\gamma$ ) est la phase stable à haute température, elle dérive du fer gamma de structure cubique à faces centrées, par insertion d'atomes de carbone entre les atomes de fer, dans les sites octaédriques du réseau.

- La ferrite ( $\alpha$ ) apparaît au dessous de  $900^\circ \text{C}$ , elle dérive le fer  $\alpha$  de structure cubique centré. La solubilité de carbone est très faible. La ferrite est un constituant de faible dureté (80HB), de faible résistance ; mais très ductile et très résistant au choc.

- La cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$  est un composé de dureté élevé ; elle est l'une de constituants de la perlite (la perlite est un mélange eutectoïde des aciers). La cémentite se trouve sous forme de lamelle alternée avec celle de la ferrite.

La ligne horizontale correspondant au palier eutectoïde est appelée  $A_1$  et la ligne séparent le domaine monophasé est appelé  $A_3$  .Au chauffage d'un acier hypoeutectoïde les point de transformations correspondant aux lignes  $A_1$  et  $A_3$  sont appelés  $A_{C1}$  et  $A_{C3}$  et refroidissement  $A_{r1}$  et  $A_{r3}$ .

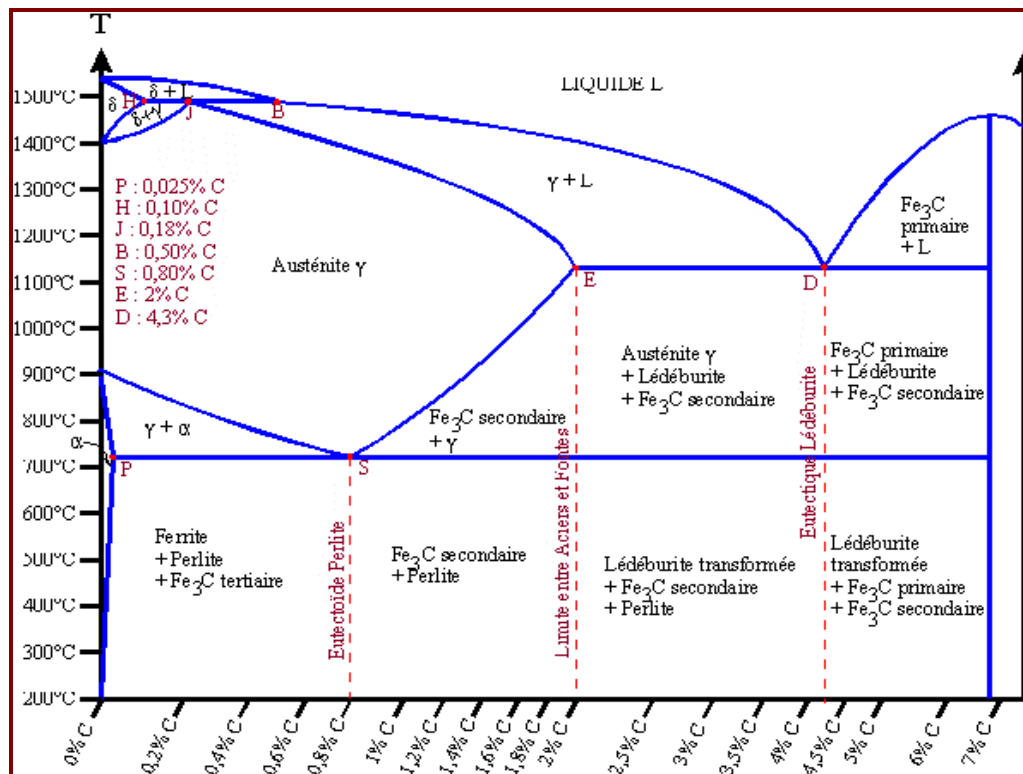


Figure-I-1 Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite. [4]

### I-1-3-2. Influence des éléments d'alliage sur les structures d'équilibre

À des teneurs limitées, les éléments d'alliage changent le tracé du diagramme d'équilibre Fe-C en modifiant tout d'abord les domaines respectifs d'existence des phases  $\alpha$  et  $\gamma$  et les transformations eutectoïde.

#### I-1-3-2-1. Sur le domaine austénitique :

##### A) Les éléments alphagènes

Qui augmentent la surface du domaine dans lequel la phase  $\alpha$  est stable et de ce fait, diminuent la surface du domaine de stabilité de la phase  $\gamma$  comme l'illustre en ce qui concerne le molybdène ; la liste des éléments alphagènes comprend presque tous les éléments habituels tels que Si, Al, Cr, Mo, Ti, W ;...

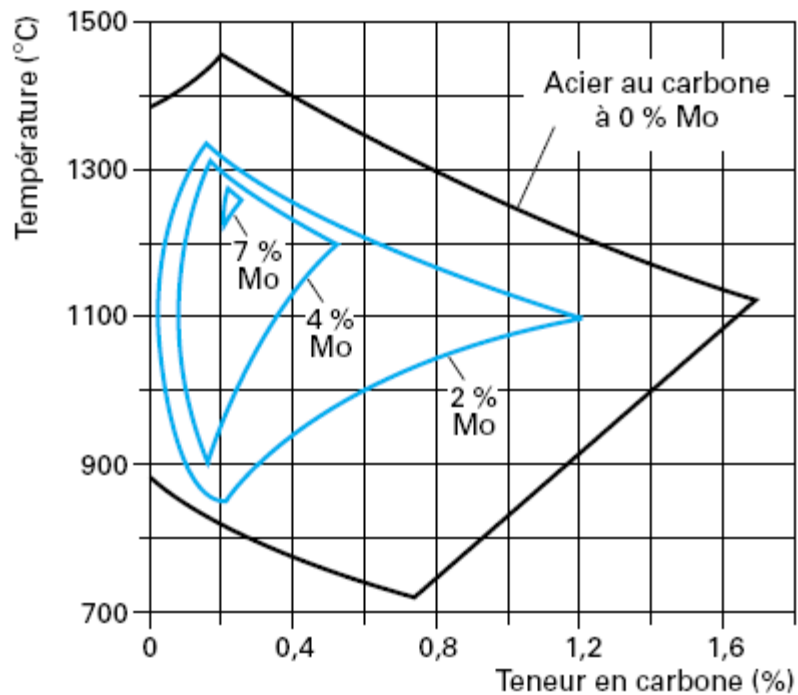


Figure-I-2 : Influence du Mo sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma [5]

### B) les éléments gammagènes :

Qui augmentent la surface du domaine d'existence dans lequel la phase  $\gamma$  est stable.

La liste des éléments gammagènes est relativement courte : Ni, Mn et Cu (dont l'action est assez faible).

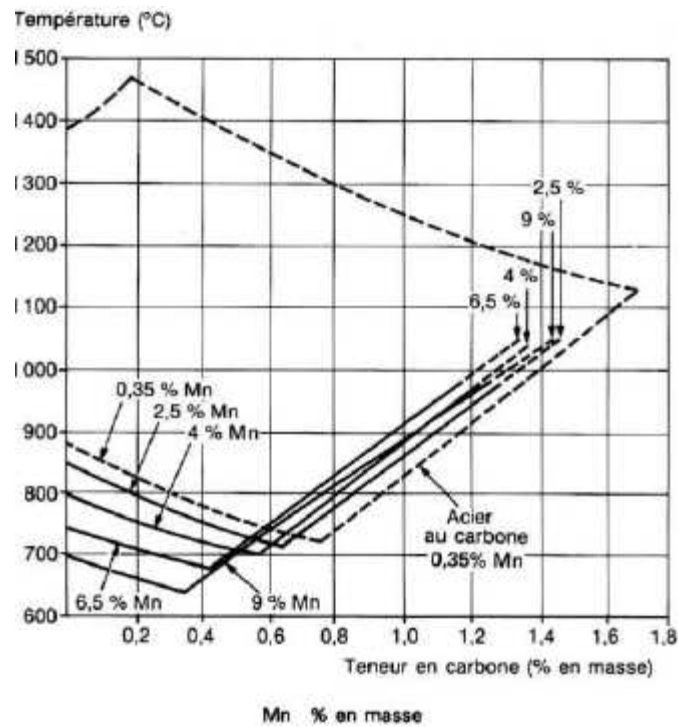


Figure-I-3 : Influence du manganèse sur l'étendue du domaine de stabilité de la phase gamma [5]

**I-1-3-2-2. Sur la transformation eutectoïde**

Les éléments (Cr, Mo, Ni, V.....) abaissent la composition eutectoïde.

La température eutectoïde est relevée par l'action des éléments alphagènes (Cr, Mo, V...) et contrairement les éléments gamagènes abaissent la température eutectoïde.

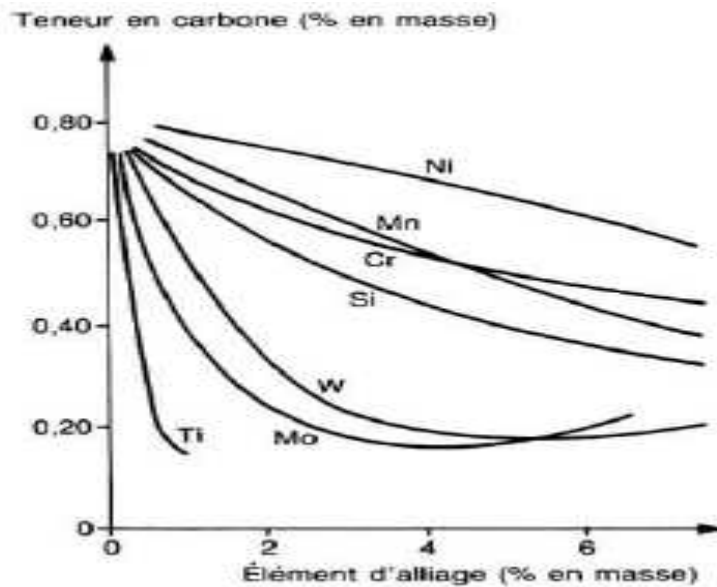


Figure I-4 : Influence des éléments d'alliage sur la teneur en carbone de l'eutectoïde [5]



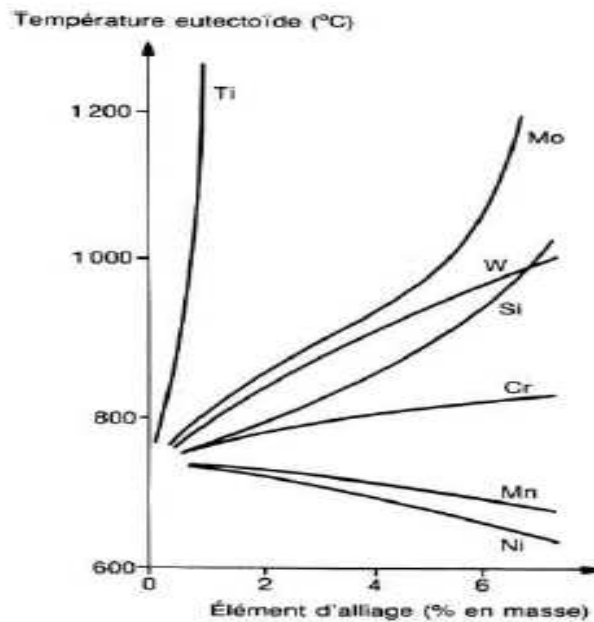


Figure I-5 : Influence des éléments d'alliage sur la température de l'eutectoïde [5]

### I-1-3-2-3. Influence des éléments d'alliage sur la stabilité des aciers à outils

L'addition d'un élément au système Fer-Carbone se traduit par des changements de structure qui peuvent être décrits par l'utilisation des diagrammes ternaires Fe-X-C.

En présence de chrome, quand le pourcentage massique en carbone croît, apparaissent tout d'abord les carbures du type  $(M_3C)$  ou cémentite substituée, puis le carbure du type  $M_7C_3$ , puis le carbure du type  $M_{23}C_6$  dans lequel l'élément métallique M est constitué par l'ensemble (Fe+Cr). Ces carbures contribuent à la résistance à l'abrasion.

Le Molybdène forme les deux types de carbures : à part sa cémentite alliée  $(Fe-Mo)_3C$  :  $(Mo-Fe)_6C$  (1500Hv) et  $M_2C$  (2000).

Le vanadium permet de générer des carbures de très haute dureté (MC 3000Hv), il est très utilisé avec le chrome, le molybdène et le tungstène à cause de mauvaise résistance à l'oxydation au delà de 600°C. Ces carbures sont très stables et très fines sous formes de bâtonnets de couleur noire.

Le silicium, avec une teneur voisine de 0.3%, est utilisé comme un désoxydant dans l'acier liquide au stade finale de l'élaboration, il permet de diminuer la stabilité des carbures  $M_2C$ , ce qui diminue la fragilité de l'acier.

La coupe pseudo binaire (Fe-Cr-C) et (Fe-Mo-C) permettent de définir les carbures stables dans les conditions de composition et de température donnée :

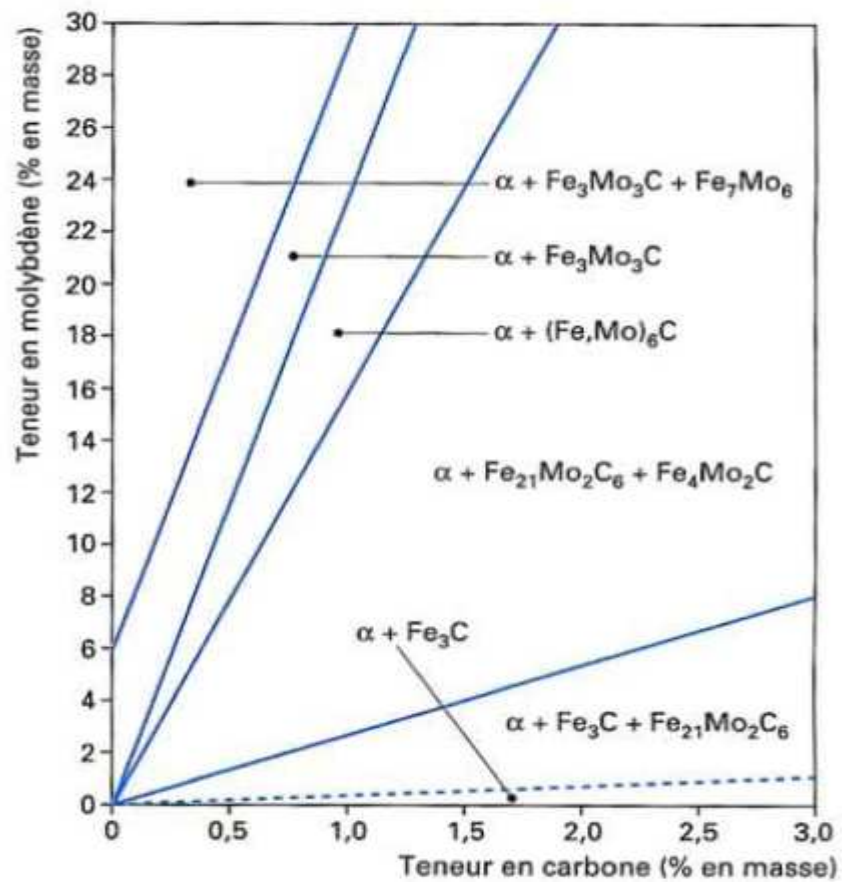


Figure I-6 Coupe isotherme de diagramme Fe-Mo-C

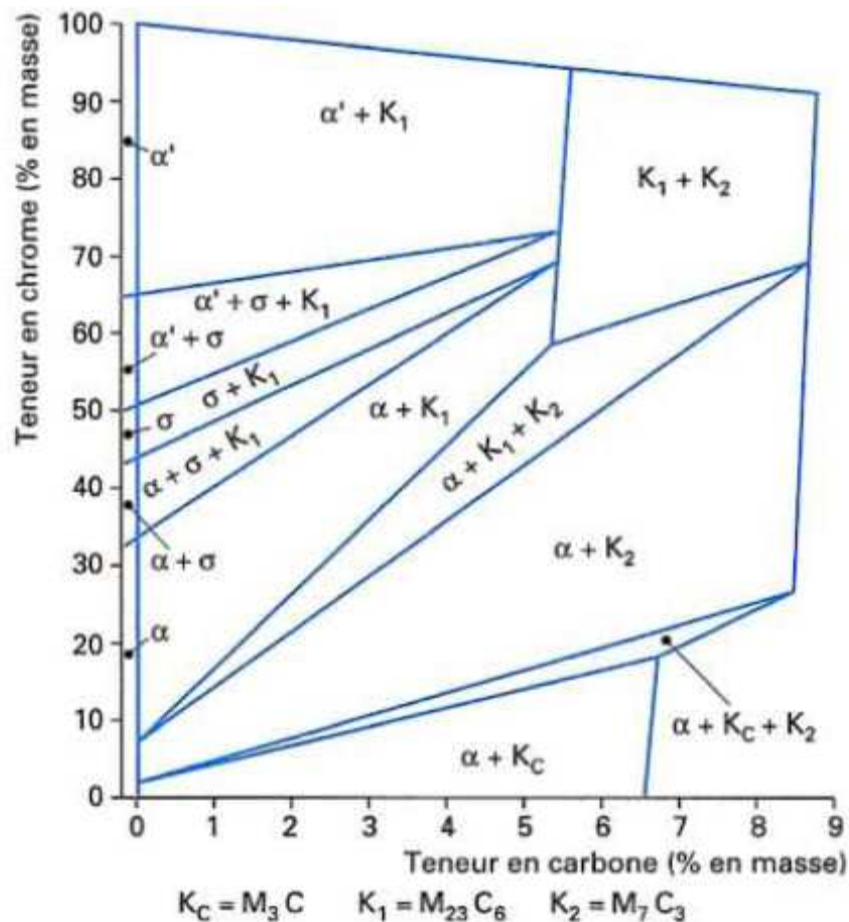


Figure I-7 : Coupe isotherme de diagramme Fe-Cr-C

## I-1-4. Traitement thermique des aciers à outils :

### I-1-4-1. Traitement thermique

On désigne sur le nom de « traitement thermique » une opération au cours de laquelle une pièce de métal est tout d'abord portée de la température ordinaire à une température plus élevée, puis maintenue à cette température pendant un certain temps et enfin ramenée à la température ordinaire.

#### A.L' austénisation

Lors de la montée en température, la structure ferrite – carbures de l'acier à outils se transforme en austénite, avec ou sans carbures selon la composition chimique de l'acier. La formation de l'austénite commence vers 720 °C dans le cas d'un acier à outils non allié, avec ou sans zone intermédiaire Ac1-Ac3 selon la teneur en carbone.

Pour les aciers à outils alliés, la température d'austénitisation est plus élevée car la mise en solution des carbures  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$  et  $MC$  de la structure à l'état recuit est

beaucoup plus difficile. Dans le cadre de traitements thermiques en volume, l'austénitisation comporte deux étapes :

1. un chauffage jusqu'à la température dite température d'austénitisation (et de manière incorrecte température de trempe).
2. un maintien à cette température. [6]

### **B. Trempe**

Tremper un acier, c'est le maintenir à la température ambiante dans un état hors d'équilibre. Ce traitement est destiné à donner à l'acier les qualités, de dureté et de résistance à l'usure.

-Pour réaliser une trempe, donc la transformation austénite ~ martensite la vitesse de refroidissement doit être au moins égale à la vitesse de trempe ( $V_c$ ). Le choix du mode de refroidissement dépend à la fois de la trempabilité de l'acier et de la forme de la pièce. Les modes les plus fréquemment utilisés sont: l'air libre, l'huile, eau ou le vide.

### **C. Revenu**

C'est un traitement thermique qui est effectué sur un produit après durcissement par trempe, ce traitement provoque la formation d'une structure plus proche de l'état d'équilibre physico-chimique celle obtenue lors de la trempe.

Selon sa trempabilité et les conditions de refroidissement utilisées il peut contenir : M (+A<sub>res</sub>), B, F + P, c (carbures non dissous) de fractions massiques très diverses.

Le revenu a pour but : le durcissement, l'adoucissement, d'une phase très fragile et la relaxation des contraintes résiduelles après trempe, sans évolution structurale.

Les paramètres qui définissent les conditions d'exécution d'un revenu sont :

-La température de revenu à laquelle est porté l'acier qui est inférieure à  $AC_1$  pour ne pas amorcer la transformation  $\alpha \longrightarrow \gamma$

-La durée de maintien jusqu'à la température considérée.

-Un refroidissement jusqu'à la température ambiante. [7]

#### **I-1-4-2. La fragilité au revenu de la martensite**

Lors du traitement de revenu après trempe martensitique d'une pièce mécanique, la valeur de la résilience à la température ambiante ne croît pas constamment avec la température de revenu, mais présente une valeur minimale pour une température de revenu se situant généralement entre +200 °C et + 600 °C. Ce phénomène appelé fragilité, au le revenu de la martensite est dû à la précipitation de fines particules de cémentite. La troisième phase de la décomposition de la martensite : la première étant la précipitation du carbure  $\epsilon$  et la

deuxième, la transformation de l'austénite résiduelle ; correspond à la formation de la cémentite. Cette troisième phase débute avant que toute l'austénite résiduelle ne soit transformée. La fragilité au revenu se manifeste avec l'apparition des plaquettes de cémentite qui, précipitant le long des joints de grains, formerait un liseré de ferrite suffisant pour fragiliser le métal. . [6]

### **I-1-5. Classification des aciers à outils [8]**

Le critère déterminant pour l'outil est le maintien de la dureté, de la ténacité et de l'état de surface à la température atteinte dans sa partie active.

-Si cette température est relativement basse, par exemple inférieure ou égale à 150 °C, on aura affaire à des aciers de travail à froid ; en revanche, si elle est supérieure à 300 °C, on aura affaire à des aciers de travail à chaud ou à des aciers rapides.

-Les nuances d'acier à outils sont rangées selon leur mode de travail en quatre classes :

- Les aciers non alliés pour travail à froid (Classe 1)
- Les aciers alliés pour travail à froid (Classe 2)
- Les aciers alliés pour travail à chaud (Classe 3)
- Les aciers rapides (Classe 4)

#### **I-1-5-1. Les aciers non alliés pour travail à froid (Classe 1)**

Ce sont les plus simples puisqu'ils ne contiennent que du fer et du carbone, les autres éléments y étant présents en teneurs résiduelles variables selon les matières premières et le mode d'élaboration utilisée.

Les aciers à outils au carbone sont caractérisés par beaucoup d'insuffisances en raison, soit d'une faible capacité de trempe, soit d'une très grande fragilité qui est due à une grande dureté superficielle qui est donnée par la teneur en carbone, soit encore d'un manque de résistance à l'usure.

#### **I-1-5-2. Les aciers alliés pour travail à froid (classe 2)**

Ils sont caractérisés par des niveaux de dureté élevés à la température ambiante (56 et 63HRC), mais par une résistance à l'adoucissement faible ; ils ont des teneurs massiques en carbone élevées (>0,6), mais des teneurs massiques en éléments fortement carburigènes est assez basses.

Les aciers non alliés se révèlent insuffisants pour beaucoup d'emplois en raison, soit d'une faible capacité de trempe, soit d'une très grande fragilité, soit encore d'un manque de résistance à l'usure.

Les additions d'éléments d'alliage vont avoir pour but de remédier à ces insuffisances.

Cela nous conduit à diviser les aciers de la classe 2 en cinq groupes :

- les aciers résistant à l'usure ;
- les aciers à très haute résistance à l'usure ;
- les aciers résistant à certaines corrosions ;
- les aciers à haute limite d'élasticité.
- les aciers résistant au choc thermique.

### **I-1-5-3. Les aciers à outils alliés pour travail à chaud (classe 3)**

Ils sont caractérisés par des niveaux de dureté moyens à température ambiante, comprises entre 44 et 55 HRC, ils ont des teneurs massiques en carbone comprises entre 0,3 et 0,6%, avec des additions plus ou moins importantes d'élément carburigènes tel que le chrome, le molybdène, le tungstène, et le vanadium et dans certains cas, une addition de cobalt.

En plus, ce sont des aciers qui doivent avoir une résistance à la déformation convenable, donc une dureté et résistance à l'usure élevées. Ces aciers ont une bonne tenue aux différences de températures du choc thermique. Ces aciers doivent avoir également une résistance à la déformation suffisante lors des traitements thermiques,

Les propriétés essentielles que doivent avoir les aciers pour travail à chaud sont de bonnes caractéristiques de traction à chaud compatibles avec une ténacité suffisante, ce qui limite leur teneur en carbone à une valeur inférieure à 0,6 %.

Ces aciers sont répartis d'après la norme NF A 35-590 en cinq groupes :

- les aciers résistant aux chocs mécaniques ;
- les aciers résistant aux chocs thermiques ;
- les aciers résistant à l'usure aux températures élevées ;
- les aciers résistant aux très hautes températures ;
- les aciers résistant à certaines corrosions

#### I-1-5-4. Les aciers rapides (classe 4)

Sont caractérisés par une très grande dureté à la température ambiante, supérieure à 60 HRC, et par une très bonne dureté à chaud.

Les aciers rapides sont des aciers avec des pourcentages importants d'éléments d'alliages, tel que (Cr, W, Va, Co...).

Le W et le Mo forment des carbures durs qui ont des propriétés analogues ; c'est pourquoi on peut substituer le Mo au W. Ces deux éléments constituent les éléments d'alliages essentiels.

Le Cr et le Va contribuent à améliorer la dureté et la résistance à l'usure. Le Cr permet d'obtenir le durcissement de la matrice par la trempe et le Va permet d'affiner le grain ; toutefois, son pourcentage ne doit pas être très élevé.

## I-2. Le chromage électrolytique :

### Introduction

Le chromage est un procédé de revêtement par électrolyse permettant de déposer du chrome métallique sur les surfaces à traiter pour leur conférer les propriétés de ce métal en outre sa dureté et sa résistance aux déformations.

### I-2-1 Propriétés de chrome

#### 1- Propriétés physiques du chrome :

Symbole: Cr.

Isotopes stables: 50 Cr (4,35 % en masse), 52 Cr (83,79 %), 53 Cr (9,50 %), 54 Cr (2,36 %).

Masse atomique: 52,01.

Masse volumique: 7,2 g.cm<sup>-3</sup>.

Température de fusion : -1 830°C.

Coefficient de dilatation: à 20°C  $7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

Conductivité thermique du dépôt brut: 23 Wm<sup>-1</sup>k<sup>-1</sup>.

Résistivité du dépôt brut: (30 à 65)  $\times 10^{-8}$  Q. m.

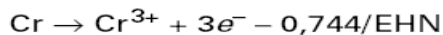
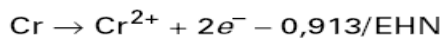
Cristallisation: cubique centré.

Structure électronique: Is<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>2p<sup>6</sup>3s<sup>2</sup>3p<sup>6</sup>3d<sup>5</sup>4s<sup>1</sup>.

#### 2- Propriétés électrochimique de chrome

Le chrome peut se présenter sous plusieurs degrés d'oxydation : +II, +III, +VI (le chrome II, chrome chromeux, est très peu stable).

Le métal est très peu noble (moins que le zinc), et les potentiels normaux sont :



EHN électrode normale à hydrogène

Il y a là, au vu de ces potentiels normaux, une contradiction avec le comportement noble du chrome. [10]

Cependant, le chrome se passive très facilement en milieu oxydant (Par création à la surface d'une couche d'oxydes ou d'hydroxydes Insolubles). Cette faculté explique le comportement du chrome qui est à la fois attaquable en milieu acide et/ou réducteur, et qui résiste bien à la corrosion en milieu neutre, basique et/ou oxydant. [9]

## I-2-2. Théorie de l'électrolyse

Le chrome existe à l'état bivalent (CrO) instable, trivalent (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et hexavalent dans l'anhydride chromique (CrO<sub>3</sub>), l'acide chromique (CrO<sub>3</sub> ,H<sub>2</sub>O → CrO<sub>4</sub> H<sub>2</sub>).

### I-2-2-1. Electrolyse d'une solution d'acide chromique

Le dépôt électrolytique de chrome se fait par réduction des ions chrome à la cathode.

La réduction à l'état métallique du chrome hexavalent par électrolyse ne se réalise qu'en présence d'ions catalyseurs tels que SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, SiF<sub>6</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup> ..., etc. Les solutions pures d'acide chromique soumises à électrolyse ne donnent lieu à la cathode qu'à un dégagement d'hydrogène et à un dépôt brillant. [12]

### I-2-2-2. Application des lois d'électrolyse

D'après la loi de Faraday, 96 490 coulombs rompent une valence, si on applique cette loi au cas de dépôt de chrome à partir de la solution d'acide chromique ou le chrome, le poids atomique 52 est hexavalent, on trouve que 96 940 coulombs provoqueront un dépôt de 52/6=8,7 gramme de chrome, c'est-à-dire qu'un courant de 1 ampère déposerait en 1 heure est égale 0,32 gramme de chrome.

Cette quantité de chrome déposée est beaucoup plus faible, de l'ordre de 0,05, c'est-à-dire que le rendement de courant est de l'ordre de 15%. [12]



### I-2-2-3 Bain électrolytique

Les bains dilués, à faible teneur en acide chromique, ont le rendement supérieure quand à l'énergie électrique dépensée et à la quantité de métal déposée.

Les bains les plus concentrés à forte teneur en acide chromique, ont une meilleur conductibilité, ce qu'il provoque un voltage moindre et ils sont moins sensible aux impuretés introduites par les bacs de lavage et aux chargements de composition dus à l'entraînement de liquide à la sortie des pièces de bains.

Les bains dilués demandent ainsi une surveillance plus attentive et un réglage plus soigné. Les bains dilués (250g/l de  $\text{CrO}_3$ ) sont des bains régulièrement utilisés dans le chromage dur et donne un dépôt un peu plus dur, alors que le bain concentré (400g/l de  $\text{CrO}_3$ ) étant plutôt des bains de chromage décoratif, et donne un dépôt à une pénétration un peu meilleure. [10]

### I-2-2-4.Schéma de phénomène d'électrolyse (mécanisme réactionnels)

Les phénomènes d'électrolyse, peuvent être schématisés comme suit :

- À la cathode : trois réactions principales se produisent:
  - 1- Dégagement d'hydrogène.
  - 2- Réduction de chrome hexavalent en chrome trivalent (qui ne conduit pas un dépôt métallique).
  - 3- Réduction du chrome hexavalent en chrome métallique.
- À l'anode deux réactions ont lieu :
  - 1- Dégagement d'oxygène
  - 2- Oxydation du chrome trivalent formé par la réaction cathodique en chrome hexavalent. [11]

Ces phénomènes sont produisent en présence d'anions tels  $\text{SO}_4^{2-}$  ou  $\text{SiF}_6^{2-}$  qui jouent le rôle de catalyseur.

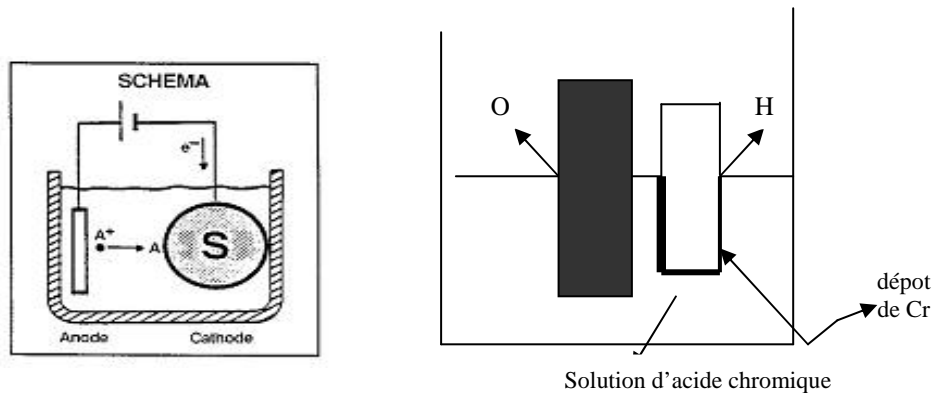


Figure-□-8-Schéma de l'électrolyse

## I-2-3 Type de chromage

### I-2-3-1 Le chromage décoratif

Le chromage décoratif s'effectue sur des surfaces généralement revêtues au préalable d'une couche de nickel (ou éventuellement de couches de cuivre et de nickel) et il a pour but essentiel de donner au revêtement les caractéristiques de brillance du chrome. La résistance de ce métal, associée à sa dureté, fait que cette couche décorative de l'ordre du micromètre permet de donner un aspect brillant qui peut être entretenu pendant de longues années. Les chromes brillants des automobiles d'antan toujours visibles à l'heure actuelle.

### I-2-3-2. Le chromage dur

Le chromage dur se distingue du précédent par le fait que son épaisseur est plus importante (de quelques micromètres à quelques dixièmes de millimètres). Ce revêtement procure au matériau sur lequel il est effectué un bon coefficient de frottement et lui assure de bonnes propriétés de résistance à l'usure et à la corrosion. Il est très visible par exemple sur les vérins des appareillages mécaniques (appareils de levage ou engins de travaux publics...). Ce type de traitement est le revêtement privilégié dans le domaine de la mécanique pour les pièces en rotation ou en translation qui ont à résister à l'usure et à avoir de bonnes qualités de frottement, et pour les domaines où l'adhérence pourrait être un handicap (plasturgie, cylindres de laminoir...) [13]

## **I-2-4. Paramètres et facteurs conditionnant qui influent sur le dépôt 14]**

### **I-2-4-1. L'état de surface**

La nature de la rugosité initiale, présente un caractère particulier du fait que le dépôt de chrome tend à accentuer (former) les irrégularités de la surface au lieu de les atténuer et risque par suite de l'effet de pointe, de former des bourgeons sur les arrêtes vives particulièrement aiguës.

Il est possible d'obtenir un meilleur dépôt sur une surface plus rugueuse qu'une autre, si au polissage, les arrêts du profil ont été arrondis.

### **I-2-4-2 .La densité de courant**

Les contacts électriques doivent être d'une propreté absolue car des salissures pourraient être la cause de problèmes de mauvais passage de courant et donc engendrer une hétérogénéité au niveau de l'épaisseur. Il est importante de souligner que l'épaisseur est gérée par l'intensité ; cette dernière exprimée en A est en relation avec la densité de courant ( $ddc$  en  $A/dm^2$ ) et la surface (en  $dm^2$ ) par l'équation suivante :

$$I (A) = ddc \text{ (en } A/dm^2) \times S \text{ (} dm^2)$$

La densité de courant n'est pas sans effet sur le dépôt lui-même: plus elle est importante, plus la structure est fine. Par ailleurs, elle conditionne la vitesse du dépôt et son aspect.

### **I-2-4-3. Température :**

Il existe une forte interdépendance entre la température et la densité de courant, la première étant à l'origine de la seconde. Son élévation augmente la vitesse des réactions électrochimiques, c'est ainsi qu'un chromage dur qui admet une densité de courant de  $40 A/dm^2$  peut tolérer jusqu'à  $50 A/dm^2$  lorsque la température est de  $65^\circ C$ . De plus, elle est responsable de solutions plus concentrées et peut modifier la vitesse de dépôt.

### **I-2-4-4. Agitation**

L'agitation augmente, elle aussi, la densité de courant. Son action est particulièrement bénéfique dans la mesure où elle favorise le départ des bulles de gaz, et par là, elle évite la formation de piqûres éventuelles et favorise le transport du sein de la solution jusqu'à l'électrode.

#### **I-2-4-5. La tension d'électrolyse**

Lorsqu'on applique aux bornes d'une cellule d'électrolyse une tension croissante, un courant appréciable est observé lorsque la tension est supérieure à une certaine valeur minimale appelée « tension de décomposition de l'électrolyte ». C'est à partir de cette valeur que la décomposition de l'électrolyte devient notable et que la décharge commence sur la cathode.

#### **I-2-4-6. Pouvoir de répartition**

Il faut agir surtout sur:

- a) La conception de la pièce: les angles ne doivent jamais être à arêtes vives, mais Arrondis avec le plus grand rayon de courbure possible.
- b) La disposition des anodes par rapport aux pièces: le fait de raccourcir une anode et de la rendre plus courte que la cathode évite une trop grande concentration de lignes de courant à l'extrémité de la pièce.
- c) La disposition des pièces: elles doivent être disposées de telle sorte que les lignes de courants se répartissent le plus uniformément à leurs surfaces.

### **I-2-5 Chromage dur et épais**

#### **I-2-5-1. Objectif**

Ce procédé de traitement des surfaces a pour objectif d'utiliser les caractéristiques fondamentales des dépôts de chrome, à savoir :

- dureté élevée ;
- résistance à l'usure ;
- faible coefficient de frottement ;
- bonne résistance à la corrosion.

#### **I-2-5-2. Caractéristiques essentielles**

Les dépôts de chrome dur présentent comme caractéristiques importantes, outre bien-sûr leur dureté le fait qu'ils soient microfissurés, et qu'ils soient aussi le siège de contraintes résiduelles de traction qui sont pour les dépôts brillants réalisés à 50°C, de l'ordre de plusieurs centaines de MPa.

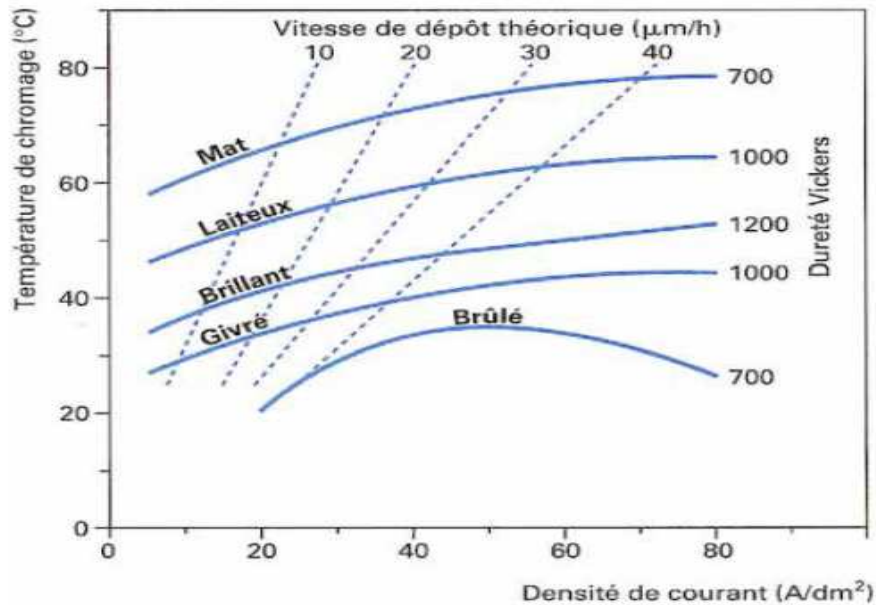


Figure. □-9-Graphe reliant les principaux facteurs du chromage aux propriétés de dépôts [9]

### 1. L'épaisseur

Le revêtement de chrome dur est généralement utilisé avec des épaisseurs pouvant varier de 5 à 500 µm. La couche déposée par électrolyse reproduit l'état de surface en amplifiant les rugosités de la surface de base. S'il est concevable de réaliser des dépôts à la cote pour des épaisseurs faibles (inférieures à 65 µm pour les bains classiques et 60 à 70 µm pour les bains fluorés ou à catalyseurs organiques), il est nécessaire de recourir à une mise en état de la surface (généralement par rectification) quand le dépôt dépasse cette épaisseur.

L'utilisation des dépôts découle des caractéristiques décrites qui permettent de conférer à la surface revêtue une bonne résistance à l'usure, à l'abrasion et des propriétés antiadhérentes. Le chromage peut aussi être utilisé pour le rechargement des surfaces usées ou pour rattraper des erreurs lors de la réalisation de pièces.

### 2. La microdureté

La microdureté est de manière générale, de l'ordre de 900 HV pour les dépôts de chrome dur. Cette microdureté est fonction d'un certain nombre de paramètres. Pour les dépôts obtenus à partir de chrome hexavalent, cette microdureté chute notablement en fonction de la température de traitement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 300 HV à 700°C.

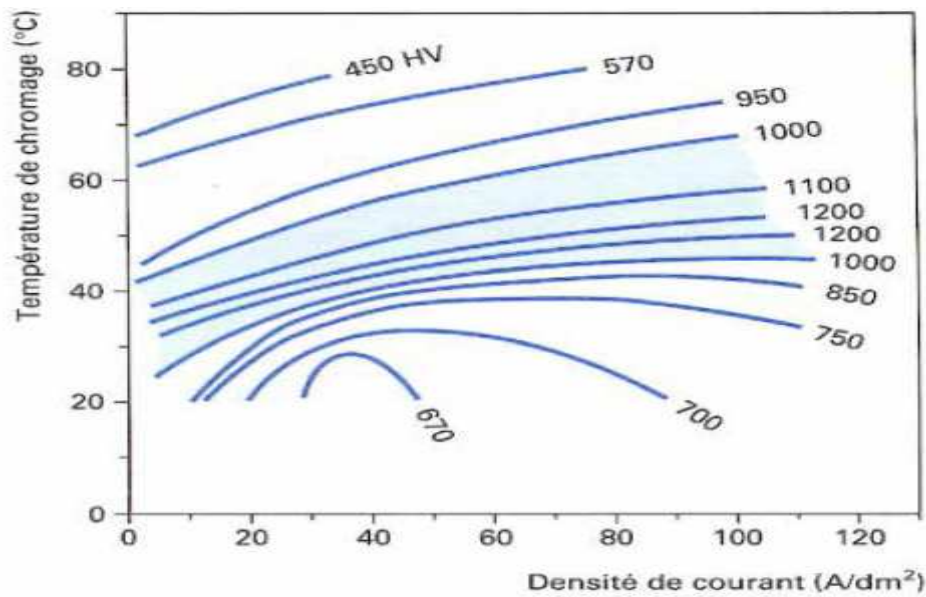


Figure 10. Courbes d'isodureté en fonction des paramètres de chromage [9]

### 3. La fissuration

Le dépôt de chrome dur est dans la majorité des cas microfissuré :

Le nombre et la taille des microfissures dépendent essentiellement de la nature des catalyseurs utilisés, de l'état du substrat, ainsi que de la forme du courant utilisé pour réaliser le dépôt. La figure présente l'aspect du dépôt de chrome (épaisseur 70  $\mu\text{m}$ ) obtenu avec des solutions standards.

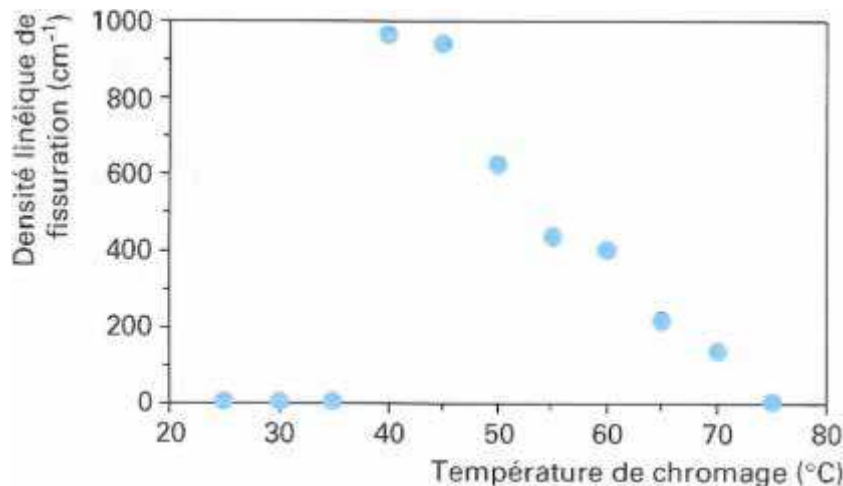


Figure 11-Evolution de la fissuration en fonction de la température de chromage [9]

### 4. Adhérence

Une des premières qualités recherchées lors de l'obtention d'un dépôt est une bonne adhérence, qui nécessite des forces de cohésion suffisantes entre métal déposée et substrat.

Le contrôle de l'adhérence peut se faire par des essais simples et rapides, par exemple :

- ✓ Essai de quadrillage.
- ✓ Essai de la lime.
- ✓ Essai de pliage.

### **5. Porosité**

En vue d'une bonne tenue à la corrosion, la couche déposée doit présenter une bonne continuité et porosité minimale.

# **La fatigue thermique**



## Introduction

Lorsqu'un matériau subit localement des variations cycliques de température (chauffage + refroidissement brutal) des gradients de contrainte se forment par contraction ou compression. Ces variations de température engendrent des variations cycliques de Contrainte. Des contraintes résiduelles se forment dans l'acier. [15]

(Ou les métaux) et conduisent à la fissuration et à la rupture du composant. Ce phénomène est appelé fatigue thermique.

Comme phénomène, la fatigue thermique se produit fréquemment dans les structures qui supportent des variations de température et de contrainte, par exemple, les tuyauterie d'industrie de puissance, les chambres de combustion des moteurs, les outils de mise en forme des matériaux (cylindres de laminoir, poinçons,...), les lingotières et certains circuits des réacteurs à eau, et en général toute installation travaillant normalement à chaud et subissant des arrêts de fonctionnement. [16]

### II-1. Fatigue et choc thermique : Définition

La fatigue est définie comme tant la dégradation ou la rupture d'un matériau provoquée par chargement cyclique.

La fatigue thermique peut être définie comme le phénomène résultant de variations cycliques de température sur un composant ou une partie du composant. L'endommagement qui en résultent se caractérise en général par de la fissuration multiple souvent arrangée en réseau dit de « faïençage ».

Plusieurs définitions ont été proposées pour d'écrire le phénomène de la fatigue thermique et le choc thermique :

Selon SPERA [25] : « **la fatigue thermique** désigne la détérioration progressive, et éventuellement la fissuration des matériaux par l'alternance de l'échauffement et du refroidissement avec une dilatation thermique entièrement ou partiellement empêchée ».

MIANNAY [17] considère que « Lorsque la fissuration apparaît au cours de premier cycle de la fatigue thermique celle-ci est alors appelée « **choc thermique** »«

Selon MANSON [8] « la différence entre la fatigue et le choc thermique, est due au fait que lors du choc thermique, toute la pièce est portée à une température uniforme (non-

existence de gradient thermique entre les différents points de la pièce) puis elle est immergée brutalement dans un milieu à plus basse température. Lors de la fatigue thermique, il existe toujours un gradient de température entre la surface et les autres couches internes de la pièce, cela est dû au temps de maintien à haute température relativement courts».

## II-2.Mécanisme de la fatigue thermique

Si on se baserait sur les alternances de l'échauffement et du refroidissement, et sur les gradients thermiques due à la déformation partiellement empêchée, alors le mécanisme de fatigue thermique est mis en évidence à l'aide du diagramme de North Cott et Baron.

Le point (O) correspond à l'état de contrainte nulle. Lorsque la surface d'une pièce métallique est soumise à un échauffement, la température de la surface augmente localement. Cette différence de température est associée à une différence de dilatation thermique entre les couches successives de la pièce. Celles-ci provoquant un gradient de contrainte thermique de compression (branche OAB).. Les contraintes thermiques peuvent être élastiques (branche OA) pour un échauffement faible, puis plastique pour un échauffement plus sévère (branche AB).

A la fin de la phase d'échauffement, où la température de la pièce est plus ou moins homogène, le refroidissement provoque une contraction locale de la couche superficielle. Dans ce cas, une contrainte thermique de traction (branche BCD) se développe rapidement. Celle-ci peut être élastique pour un refroidissement léger (branche BC), puis plastique pour un refroidissement plus sévère (branche CD).

Quand la déformation plastique se produit, des contraintes thermiques résiduelles de traction apparaissent au cours du refroidissement tandis que des contraintes thermiques résiduelles de compression apparaissent au cours de l'échauffement.

-Durant le cyclage thermique, ces contraintes se développent et deviennent très importantes. Notons que les fissures par fatigue thermique apparaissent durant l'étape de refroidissement à cause des contraintes thermiques résiduelles de traction qui y sont très importantes. En effet, la vitesse de refroidissement est très rapide que celle de l'échauffement, cela va engendrer des gradients thermiques beaucoup plus importants au refroidissement, et par conséquent les contraintes résiduelles de traction se développent plus rapidement. [18]

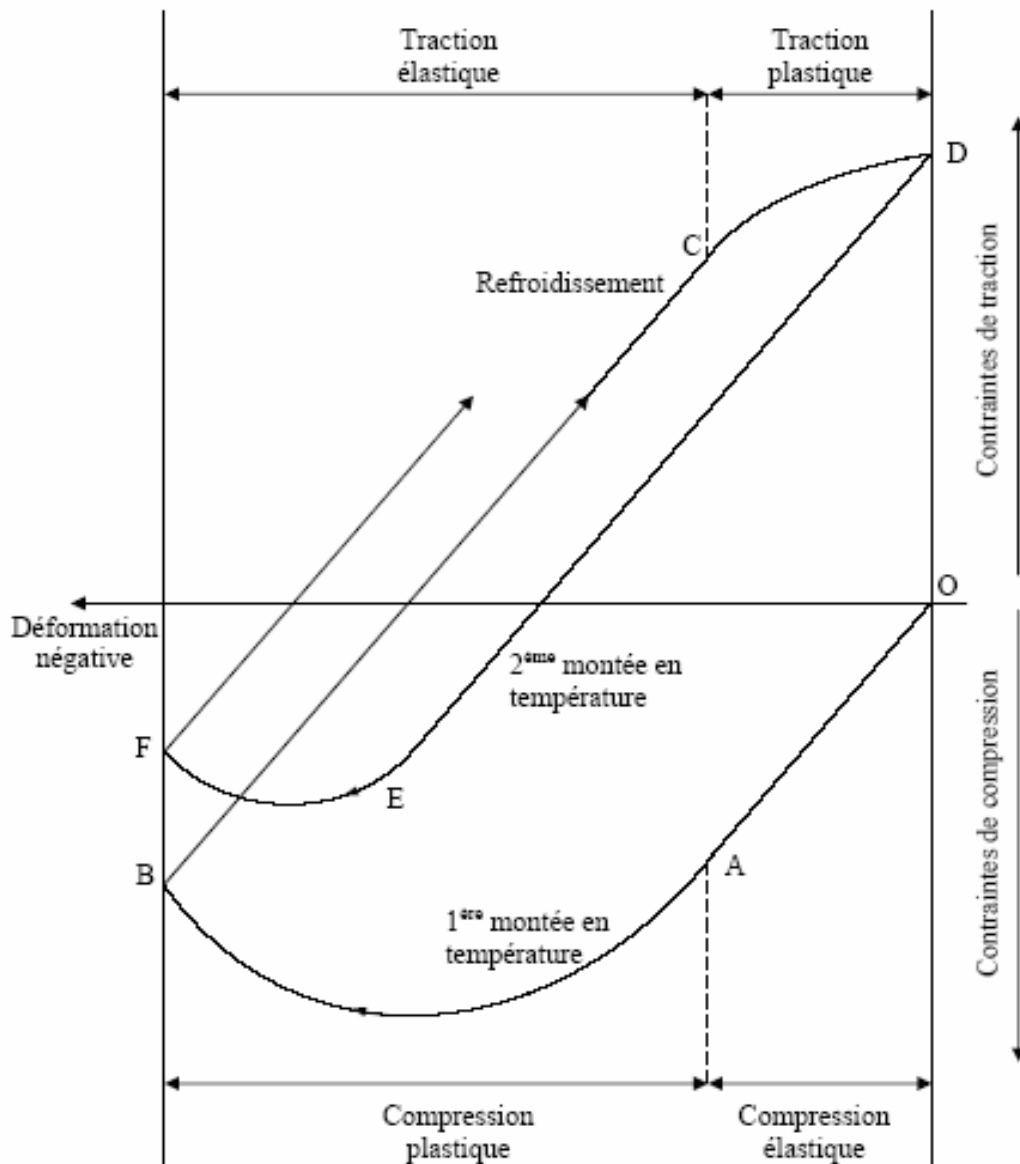


Figure II.1 : Mécanisme de la fatigue thermique (diagramme de North Cott et Baron) [18]

### II-3. Contraintes d'origine thermique

De nombreuses pièces des structures utilisées à hautes températures sont soumises à des variations de température rapides en cours du fonctionnement. Le gradient thermique ainsi créé dans la pièce génère des contraintes thermiques. En effet, la dilatation libre d'un élément de volume donné est limitée par la dilatation différentielle des éléments voisins qui se trouvent à des températures différentes. L'amplitude de ces contraintes d'origine thermique

est en fonction du gradient thermique, la géométrie de la pièce, des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau et la conductivité thermique. [19]

La théorie élémentaire des contraintes thermiques est bien établie, et plusieurs textes ont été écrit en ce sujet. Des solutions analytiques pour des problèmes de contraintes thermiques élastiques, dans une variété de géométrie ont été présentées dans la littérature. Par exemple :

- Les contraintes thermiques dans un cylindre élastique ou tube avec une distribution de température radiale sont données par :

$$\sigma_r(r) = \frac{\alpha E}{(1-\nu)r^2} \left[ \frac{r^2 - r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T r dr - \int_{r_i}^r T r dr \right] \quad \text{III-1}$$

$$\sigma_t(r) = \frac{\alpha E}{(1-\nu)r^2} \left[ \frac{r^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T r dr + \int_{r_i}^r T r dr - T r^2 \right], \quad \text{III-2}$$

$\sigma_r$  : est la contrainte radiale (MPa) ;

$\sigma_t$  : est la contrainte tangentielle (MPa) ;

$\alpha$  : est le coefficient de dilatation linéaire (K-1) ;

E: est le module de Young (GPa) ;

$\nu$  : est le coefficient de Poisson ;

T(r) est la température en (K),

r: est le rayon (mm) ;

$r_i$  : est le rayon interne du tube (mm) et

$r_o$  : est le rayon externe du tube (mm).

-Ces contraintes thermiques peuvent également se produire lors d'un changement brutal de la température; on a alors affaire à ce que l'on appelle un « choc thermique ». Ces contraintes sont souvent plus importantes que celles dues à une élévation ou à un abaissement lent de température.

Donc, lorsqu'une pièce est soumise à des variations de températures, sa dilatation ou sa contraction est empêchée Ce qui engendre le développement des contraintes d'ordre thermique. Les contraintes sont d'autant plus élevées que le gradient ou la vitesse de variation de température sont élevées. [20]

## II-4. Contraintes thermiques résiduelles :

En plus, des charges extérieures, des contraintes résiduelles thermiques ou mécaniques souvent existent dans un composant. Ces contraintes sont difficiles à mesurer ou à modéliser, et elles forment souvent un facteur inconnu dans la fatigue. Il est bien connu que les contraintes thermiques résiduelles jouent un rôle crucial dans le comportement de croissance des fissures de fatigue. Ces contraintes peuvent être introduites par plusieurs processus de fabrication comme le laminage, le forgeage et le soudage. L'introduction de contraintes thermiques résiduelles compressives à la couche de surface résulte dans le prolongement considérable dans la durée de vie des composants industriels. Par contre, la présence de contraintes résiduelles de traction peut réduire la durée de vie des composants. Les contraintes thermiques résiduelles de traction accélèrent la vitesse de croissance des fissures de fatigue par l'augmentation de l'ouverture de la fissure. [21]

Les contraintes résiduelles sont difficiles à modéliser, elles sont souvent un paramètre inconnu dans les phénomènes de fatigue et elles tendent à disparaître pendant le chargement (Almer et al, 2000). Les contraintes résiduelles stabilisées sont en corrélation avec l'initiation (amorçage) des fissures en fatigue et la durée de vie du matériau. [22]

## **II-5. Amorçage et propagation des fissures**

Les phénomènes de fissuration multiples et de faïençage sont présents tant dans notre environnement de tous les jours que dans le milieu industriel (outils de mise en forme à chaud, disques de freins...). Même si les phénomènes à l'origine de cet endommagement sont variés, ils sont associés à la fatigue thermique.

On appelle réseau de fissures ou faïençage tout ensemble de fissure aux minimums bidirectionnels dans les plans d'observations (en deux dimensions), formant des cellules plus ou moins fermées.

Par contre la fissuration multiple, est un ensemble de fissures, globalement parallèles les unes aux autres, et ne formant des cellules.

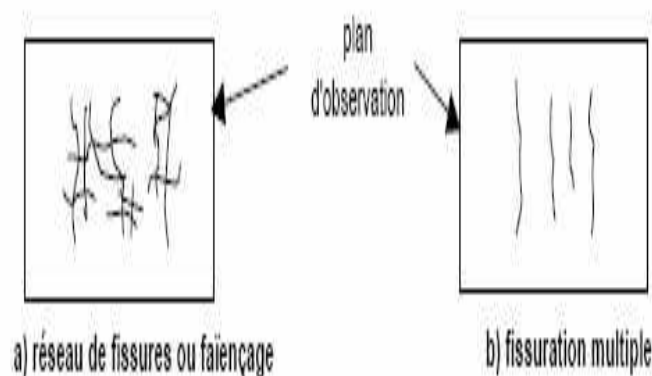


Figure II.2 : Représentation schématique du faïençage et de fissures multiples [23]

La rupture par fatigue est caractérisée par trois différents stades :

~> Initiation des fissures où une fissure de petite taille se forme dans les points de concentration des contraintes élevées ;

~> Propagation des fissures, étape durant laquelle les fissures avancent avec chaque cycle de contrainte ;

~> Rupture finale, qui survient très rapidement une fois la fissure qui avance atteint une taille critique.

La contribution de l'étape finale de rupture à la durée de vie est négligeable du fait qu'elle se produit rapidement. Les proportions relatives de  $N_i$  et  $N_p$  dépendent de la nature du matériau et des conditions d'essai. Pour des niveaux de basses contraintes (high-cycle fatigue), la majeure partie de la durée de vie est passée dans la phase d'initiation des fissures. Le niveau de contrainte augmente,  $N_i$  diminue et les fissures se forment plus rapidement. Par suite, pour des niveaux de contraintes élevées (low-cycle fatigue), l'étape de propagation de fissures prédomine ( $N_p > N_i$ ). [24]

### II-5-1 Amorçage d'une fissure

Pendant la période d'amorçage (initiation), une fissure ou des fissures visibles se forment. Les fissures initiées se développent alors et à un certain point les fissures croissantes ont tellement affaibli la structure que la charge maximale est excédée et la rupture finale se

produit. Aux amplitudes de charge très basses, près du seuil de fatigue, la majeure partie de la durée de vie du matériau est consommée dans la phase d'initiation de la fissure. [25]

Lorsque les amplitudes de chargement augmentent, la proportion de la durée de vie consommée dans la phase de propagation augmente rapidement. La distinction entre l'étape d'initiation et l'étape de propagation est un peu ambiguë. Avec l'élaboration de meilleures méthodes pour détecter les fissures, de plus petites fissures sont devenues discernables et la période d'initiation a diminué.

Il existe deux mécanismes d'amorçage de fissure en fatigue thermique :

- L'amorçage sous contrainte thermique
- L'amorçage par la fragmentation cellulaire de la couche d'oxyde. [26]

#### II-5-1-1 L'amorçage sous contrainte thermique

Quand une surface est soumise à des sollicitations par des échauffements et des refroidissements, des contraintes thermiques changent de signe pour chaque cycle et de même pour leurs composantes tangentielles. Ces composantes tangentielles exercées sur les plans proches de la surface vont engendrer des déformations d'expansion et de contraction alternées de ces plans [23]

Après un certain nombre de cycle, des bandes de glissement se manifestent comme des irrégularités (intrusions et extrusions) sur la surface sollicitée. Le mécanisme principal de formation des irrégularités superficielles est représenté dans **la Figure II.3**.

La déformation plastique due au cyclage thermique commence par s'accommoder au sein des bandes de glissement, ce qui conduit, par irréversibilité partiel du glissement, à la formation d'intrusions et d'extrusions. Ces intrusions deviennent de plus en plus profondes au cours du cyclage thermique, créant ainsi des zones de concentration de contrainte, sites privilégiés d'amorçage des microfissures.

Les microfissures qui en résultent se propagent ensuite en surface et suivant l'orientation des bandes de glissement.

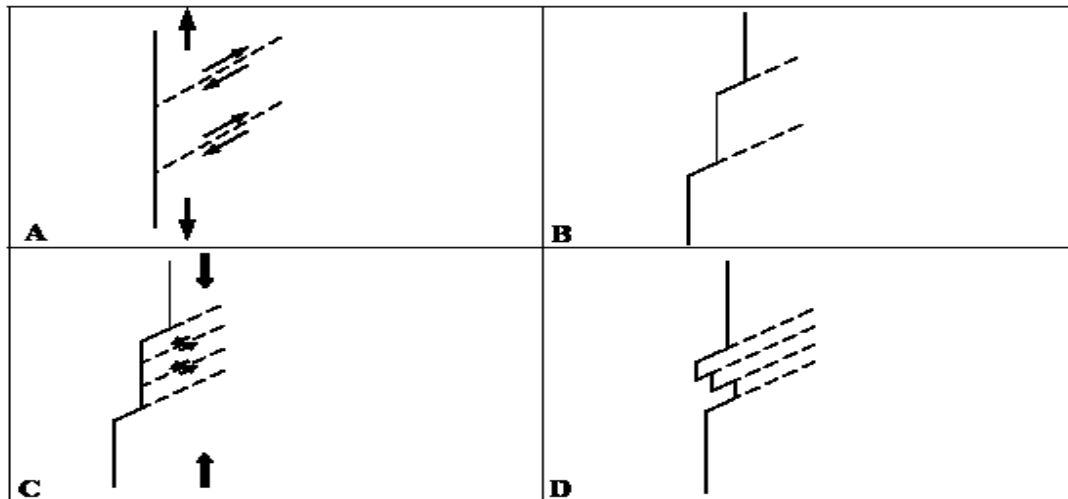


Figure II.3 Mécanisme d'amorçage des fissures sous contrainte thermique cyclique [26]

### II-5-1-2.L'amorçage par la fragmentation cellulaire de la couche d'oxyde

Ce mécanisme est essentiellement basé sur la différence entre les propriétés physiques de la couche d'oxyde et le matériau sous-jacent, notamment le coefficient de dilatation thermique. La couche d'oxyde se fissure alors sous l'effet des contraintes thermiques et favorise par corrosion locale l'initiation de la fissure de fatigue thermique dans le métal lui-même. Généralement, l'oxydation tendra à se localiser préférentiellement aux joints de grains, aux joints de macles et dans les bandes de glissement. Les résultats expérimentaux ont montré que les fissures se sont initiées rapidement à causes des formations d'oxydes et parce que la plupart des fissures de fatigue sont remplies d'oxydes. [27]

## II.5.2 Propagation

Les premières fissures apparues commencent à se propager, tandis que de nouvelles apparaissent ; puis, le réseau commence à se former par coalescence des fissures existantes. Il y a alors formation de cellules à l'intérieur desquelles l'apparition de nouvelles fissures n'est plus possible. Enfin, dans une dernière phase, le réseau ne semble plus évoluer de façon significative en surface, il est complètement constitué, et les fissures périphériques se propagent plus en surface. [25]

Le réseau constitué continue cependant à se propager, mais uniquement en profondeur, et non plus en surface. Cette propagation en profondeur se traduit par l'ouverture de plus en plus



grande des fissures principales du réseau, signe d'un état biaxial de contraintes de traction. .

[28]

### II.5.3 Faciès caractéristique de fissuration thermique

Le réseau de faïençage en surface est le faciès caractéristique de l'endommagement par fatigue thermique des composants sollicités (**figure II.4**). La densité des fissures dépend de la nature du matériau et du cyclage thermique

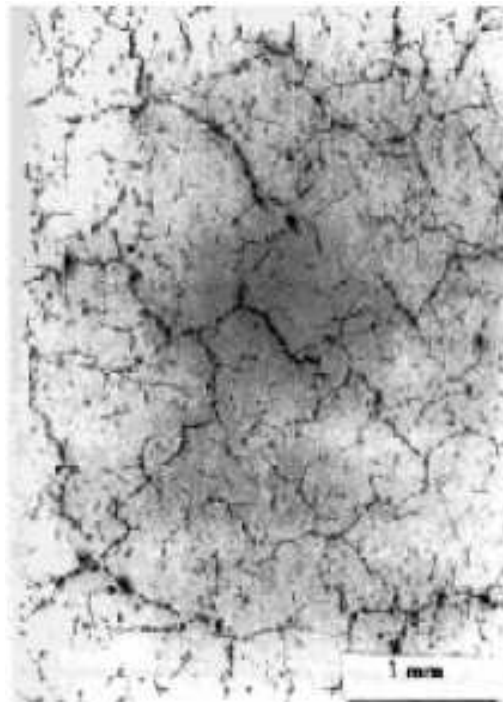


Figure II.4 : Réseau de faïençage thermique [29]

$T_{\max} = 550^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = 250^{\circ}\text{C}$ ,  $N = 10^5$  cycles

## II-6. Facteurs de la fatigue thermique

On peut classer les facteurs de la fatigue thermique en deux types. Le premier type comprend les conditions de travail des pièces (nature du cyclage thermique et l'environnement). Le deuxième type comprend les facteurs propres au matériau tels que les caractéristiques physiques, métallurgiques, mécaniques et géométriques.

## II-6-1. Nature de cyclage thermique

Plusieurs facteurs peuvent conditionner le cyclage thermique, les plus importants sont les températures et le temps de maintien :

### II-6-1-1 Influence de température sur le cyclage thermique :

Lorsqu'on parle de température de cyclage, on désigne les paramètres suivantes :

- La température maximale :  $T_{\max}$
- La température minimale :  $T_{\min}$
- La température moyenne :  $T_{\text{moy}} = (T_{\max} + T_{\min})/2$
- Le différentiel thermique :  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$
- Le temps de maintien

Les paramètres  $\Delta T$  et  $T_{\text{moy}}$  sont les facteurs principaux à prendre en considération dans les études de fatigue thermique. Le premier indique la sévérité du cyclage et le second indique le niveau auquel le cyclage est stationnaire.

L'augmentation du différentiel thermique va engendrer une augmentation des contraintes thermiques et l'augmentation de la température moyenne aura pour conséquence directe l'abaissement des caractéristiques mécaniques du matériau. Ceci provoque un endommagement rapide du matériau et réduit sa durée de vie.

Pour des variations de température élevées, les gradients thermiques résultant sont importants et de même pour les contraintes. Cela va accélérer la dégradation du matériau [29]

### II-6-1-2 Influence de temps de maintien

La vitesse de variation de la température et le séjour de l'éprouvette à haute température peuvent modifier sensiblement le nombre de cycle responsable de la rupture si le temps de maintien à cette température est grand, les effets du fluage et d'autres effets métallurgiques comme les transformations de phases peuvent avoir lieu si le matériau est maintenu longtemps à température élevée.

••COFFIN: fit plusieurs expériences sur l'acier inoxydable, 347 au cours desquelles variait le temps de maintien à température élevée. Il conclut que si le temps de maintien augmente, le nombre de cycle à la rupture diminue.

••S. KAWAMOTOS, MONSOM et GLENNY : ont confirmé l'effet négatif du temps de maintien à chaud sur la durée de vie des pièces. Cet effet est dû probablement au phénomène de relaxation des contraintes thermiques associées aux transformations métalliques. [28]

## **II-6-2.Facteurs thermiques**

Les grandeurs thermiques sont d'une grande importance pour le choix des matériaux confrontés aux problèmes de la fatigue thermique, parmi ces grandeurs, on peut citer [26] :

### **La conductivité thermique K :**

A un accroissement de la conductivité thermique, correspond alors une diminution des gradients thermiques générés et donc des contraintes induites aussi.

### **Le coefficient de dilatation thermique $\alpha$ :**

Ce paramètre est important puisque les contraintes thermiques lui sont proportionnelles. Un coefficient de dilatation élevé, engendre la réduction de la durée de vie du matériau, car plus la dilatation est importante et plus la résistance est réduite. [23]

## **II-6-3. Facteur d'environnement :**

La croissance des fissures par fatigue tend à accélérer dans les environnements agressifs. Aux tests de fatigue conduit dans l'air, on a constaté des vitesses élevées de croissance des fissures que les tests dans le vide. Selon le milieu on peut avoir de la fatigue-corrosion ou bien de la fatigue corrosion sous contrainte. [20] :

## **II-6-4. Facteurs géométriques**

Les grandes dimensions d'une pièce provoquent des localisations thermiques considérables et des gradients thermiques importants entre la couche superficielle et les couches plus profondes, et la présence d'entailles, d'angles vifs ou de fissure engendrent la concentration de contraintes thermiques. Comme conséquence on aura une diminution de l'endurance du matériau.

### **II-6-5. Facteurs métallurgiques**

La structure métallurgique est d'une grande importance pour la tenue à la fatigue, car elle présente des sites préférentiels pour l'amorçage et la croissance des fissures. L'existence de ces sites est due à la grande fragilité des particules de seconde phase et à la création localement des niveaux de contraintes élevés [28]. Ces sites dépendent de la nature des phases, de leurs proportions et de leurs distributions.

L'influence des joints de grains comme sites préférentiels d'oxydations n'est pas négligeable aussi. Ceci a pour conséquence, la création d'entailles d'oxydes conduisant à des concentrations de contraintes qui favorisent par la suite l'amorçage des fissures.

### **II-6-6. Facteurs mécaniques :**

La résistance à la fatigue thermique augmente si on arrive à réduire l'amplitude de la déformation plastique induite au cours du cyclage thermique. Ceci s'obtient par un choix d'un matériau ayant une limite d'écoulement élevée à toutes températures du cyclage thermique. Pour les grandes valeurs de déformations thermiques, le comportement d'un matériau est dominé par la ductilité à la température de service, tandis que pour les faibles déformations, la résistance mécanique se montre plus importante. Ainsi, la résistance à la fatigue thermique est améliorée si la ductilité peut être augmentée sans diminuer la résistance. [26]

# **Procédure expérimentale**

Pour améliorer la durée de vie, on doit faire un traitement de surface approprié (chromage dur) afin de limiter l'endommagement par abrasion, et qui apporte une augmentation de la dureté en surface.

### III-1 Matériau de l'étude

L'acier utilisé est un acier à outil faiblement allié de nuance 32CDV13. Cet acier a été sélectionné parmi les nuances les plus utilisées industriellement dans la fabrication des pièces mécaniques fortement sollicitées en fatigue, comme les engrenages de transmission sur les rotors d'hélicoptères et qui peut être classé parmi les aciers à outils qui travaille à chaud, et qui résistent au choc thermique du fait de la présence du chrome, du molybdène et du vanadium.

La composition chimique de l'acier 32CDV13 est donnée dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : composition chimique de l'acier 32CDV13

Élément	C	Cr	Mo	V	Mn	Si	Fe
X32CrMoV13	0.33	3.25	0.81	0.28	0.67	0.33	92.92

### III-2 Traitement thermique utilisé

Le traitement thermique des échantillons s'est effectué dans un four à résistance électrique qui peut atteindre une température maximale de 1100°C, au sein de laboratoire de département Génie Mécanique (école nationale polytechnique).

#### III-2-1 Traitement de trempe

Un chauffage des échantillons à 950°C durant un temps de maintien de 30 minutes, suivi par un refroidissement à l'huile.

#### III-2-2 Traitement de revenu

Les échantillons trempés à l'huile, ont subi un chauffage à 600°C pendant 90 minutes, suivi d'un refroidissement à l'ambiante. Le tableau III.2 résume les traitements thermiques effectués sur les échantillons avant le chromage.

Tableau III.2 : traitement thermique effectué sur l'acier 32CrMoV13 avant chromage

Acier	T <sub>a</sub> (°C)	t <sub>a</sub> (min)	Trempe	T <sub>r</sub> (°C)	t <sub>r</sub> (min)
32CDV13	950	30	Huile	600	90

### III-3 Préparation des échantillons

#### III-3-1 Dimensions de l'échantillon

Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une tronçonneuse, pour former des pièces rectangulaire de 20mm de longueur et largeur de l'ordre de 10 mm et 5mm d'épaisseur. Les dimensions des échantillons sont définies dans la figure III.3

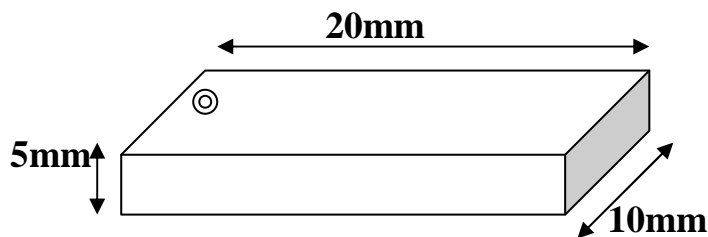


Figure III.3 Dimensions des échantillons utilisés

On relie l'échantillon à des fils électriques en cuivre dans les trous avec une soudure d'étain puis on mesure une surface de 1cm<sup>2</sup> sur l'échantillon qui constitue la cathode (Figure III.4).

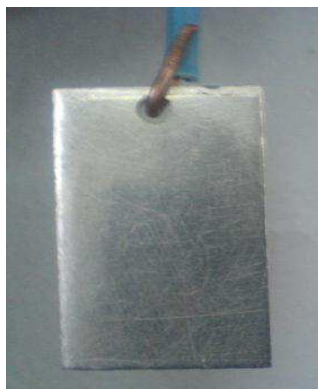


Figure III.4 Schéma des échantillons utilisés

### III-3-2 Enrobage

Les échantillons en acier 32CDV13 ont été limités en surfaces d'environ  $1 \text{ cm}^2$ , ensuite enrobés dans une résine thermodurcissable constituée d'un mélange d'un durcisseur (1/6 en volume) et d'une base (5/6 en volume). Le mélange subit une réaction de polymérisation. L'enrobage est réalisé dans des moules en plastique, ensuite laissés durcir à l'air ambiant pendant 30 minutes. Les figures III.5 et III.6 montrent les échantillons enrobés prêts à l'emploi sous forme de cathodes.

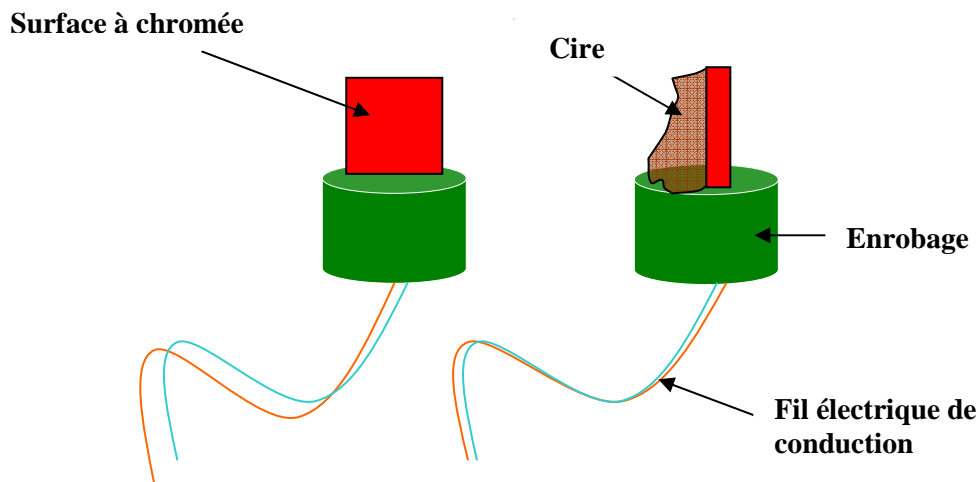


Figure III-5 : schéma détaillé des cathodes

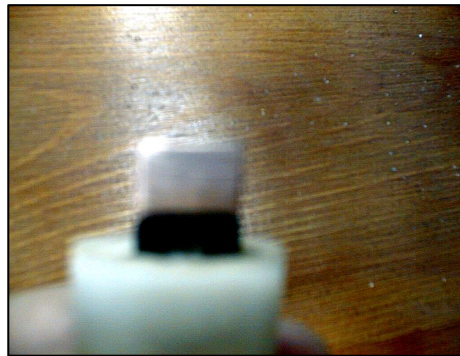


Figure III.6 : cathode prête à l'emploi

### III-3-3 polissage mécanique :

La manipulation des échantillons prélevés a nécessité leur enrobage à froid dans des résines époxydes, durcissantes à froid (durcissement à l'air dans des moules plastiques). Cet enrobage permet de faciliter le polissage manuel de petits échantillons. Les échantillons enrobés à froid ont été polis aux différents papiers abrasifs de granulométrie croissante (180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 et 1200).



Un polissage de finition à la pâte diamantée de 6 et 3 microns est effectué en dernier sur un feutre sous une lubrification appropriée. Les échantillons étaient nettoyés à l'eau distillée et séchés à l'air avant d'être attaqués. L'échantillon subit une rotation à 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes de polissage. La durée de polissage est d'environ 2 minutes par granulométrie.

### III-3-3. Attaque chimique

Dans notre travail on utilise les réactifs chimiques pour révéler la structure. A cet effet, le nital c'est le réactif utilisé, qui est une solution alcoolique d'acide nitrique, 2, 3, 5 %. L'attaque chimique est généralement suivie d'un rinçage et d'un séchage.

### III-4 Etude et réalisation de revêtement de chrome

Le chromage dur a été réalisé dans le laboratoire de Métallurgie de l'école nationale polytechnique sur les échantillons qui avaient subi les traitements thermiques et les préparations métallographiques.

#### III-4-1 Préparation de bain de chromage dur

Le bain de chromage dur est constitué comme nous avons mentionné précédemment de :

- anhydride chromique :  $\text{CrO}_3$  (250 gr/l)
- Acide sulfurique:  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2,5 gr/l)

L'anhydride chromique est solide, donc il est pesé directement à la balance numérique qui est un appareil électronique à affichage digital. Sa capacité de pesée maximale est de 60 grammes. Sa précision est de  $\pm 0,001$  grammes.



Figure III.7. Photographie réelle de la balance JA 303N

L'acide sulfurique est liquide de densité de  $1.87\text{gr}/\text{cm}^3$  (équivalent de  $1.87\text{gr}/\text{ml}$ ). Donc on converti la masse en un volume de la manière suivante :

$$\begin{array}{l}
 1.87 \text{ gr} \rightarrow 1 \text{ ml} \\
 2.50 \text{ gr} \rightarrow x \text{ ml}
 \end{array}
 \quad \Rightarrow \quad
 \boxed{X = 1.337 \text{ ml}}$$

Et alors, on ajoute 1.337ml de l'acide sulfurique à un litre d'eau distillée.

#### III-4-2 Le montage expérimental

Le montage expérimental pour l'électrodéposition est constitué des éléments suivants :

1- le circuit électrique qui comprend un générateur de courant continu, d'une résistance variable et des appareils de mesures électriques (ampèremètre et voltmètre).

Le générateur est alimenté par une tension de **220V**, il donne des tensions contrôlées à courant alternatif comprises entre **0** et **38A**. Le générateur est aussi un redresseur de courant ce qui nous permet d'obtenir des intensités de courant continu qui dépendront de la tension appliquée qui sera réglée à la valeur voulue.

Pour obtenir la densité de courant nécessaire, nous utilisons une résistance variable, voltmètre et un ampèremètre.

**2- Une cuve** d'électrolyse sous forme d'un bécher de capacité de 500ml.

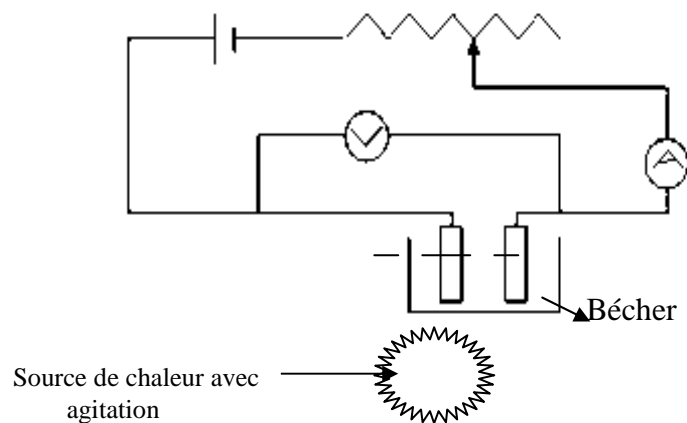
**3- Les électrodes :** Les échantillons à chromer constituent la cathode, Les anodes choisies sont en plomb contenant 6% d'antimoine et 2% d'étain façonnées d'une manière

qu'elles soient semblables aux cathodes. Le choix de placement des ces deux électrodes est fait pour avoir une meilleure répartition des lignes de courant sur la surface voulue.

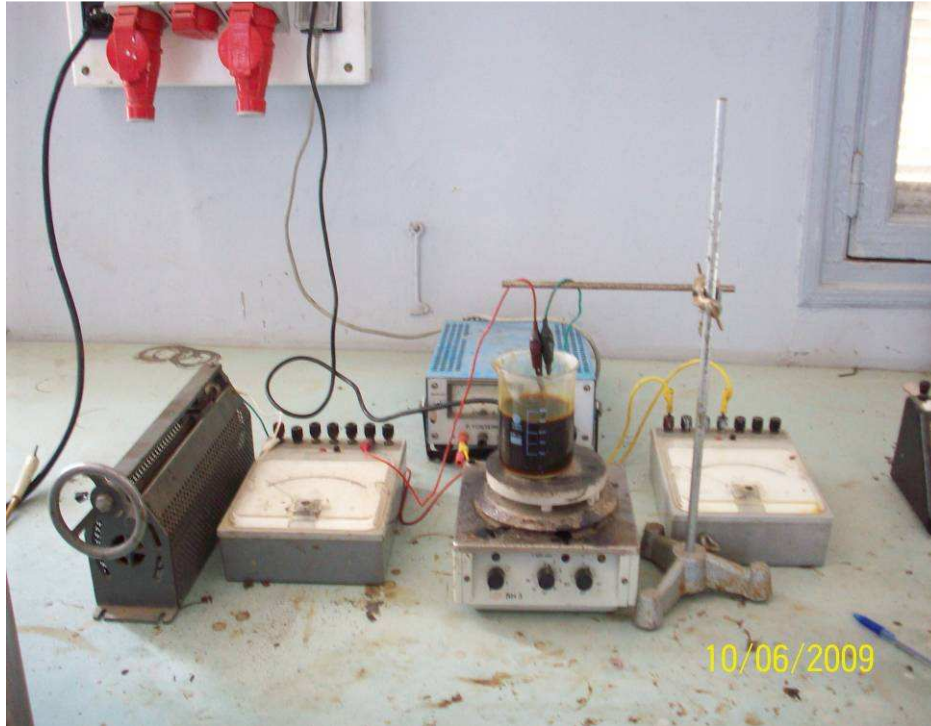
**4- L'agitateur :** Les réactions du bain sont exothermiques, elles provoquent des élévations locales une bonne homogénéité de la concentration en acide et de la température. L'agitateur magnétique utilisé dans notre travail est de forme d'un barreau magnétique, sous forme d'une tige plongée dans la cuve et tourne à la vitesse de 350 tours par minute.

**5- Plaque chauffante :** Elle assure le chauffage du bain et le maintien de la température peut arriver jusqu'à 300°C.

Le schéma du montage de l'électrodéposition est présenté dans les figures III.8 et Figure III.9



III.8 Schéma d'un montage expérimental



#### III-4-3 Le réglage de l'intensité et la tension :

Pour fixer convenablement les conditions de l'électrodéposition du chrome nous fixons la tension par réglage de la tension de sortie du générateur. Par contre, la densité de courant qui dépend de la surface des échantillons, est fixée par le réglage de la résistance.

#### III-4-4 Les démarches des essais :

Après la préparation de bain et le réglage des paramètres électriques (tension et voltage)

- \* On prend le Becher et on le remplit par le bain de chromage .
- \* On le pose sur la plaque chauffante qui joue un double rôle (chauffer et agiter) pendant quelques instants pour homogénéiser la température de bain qui est déjà réglée à l'aide du bouton tournant de la plaque.
- \* On place les électrodes (cathode et l'anode) dans le bain de façon que la répartition des lignes de courant soit uniformes sur la surface voulue.
- \* On met la source en marche et on contrôle le temps de dépôt à l'aide d'un Chronomètre.

## III-5. Etude et réalisation de la fatigue thermique

### III-5-1 Historique

Les premiers essais de fatigue sur banc ont été introduits par Glenny et al (1958-1959). Ils utilisaient des disques ou des éprouvettes prismatiques avec un bord mince. L'éprouvette est cyclée rapidement en température à l'aide de lits fluidisés. Plus tard, d'autres auteurs (Rezaï-Aria, 1986) ont recouru à un dispositif expérimental utilisant un banc à flammes afin de se rapprocher encore des conditions réelles de sollicitations des composants. Des travaux plus récents (Fissolo 2001) se sont intéressés à l'amorçage et à la propagation des fissures de fatigue thermique sur des structures en aciers inoxydables austénitiques.

### III-5-2 Dispositif des essais de cyclage thermique :

Les essais de cyclage thermique ont été réalisés au laboratoire de département métallurgie, (Ecole Nationale supérieure Polytechnique).

Le dispositif de fatigue thermique utilisé a été conçu pour simuler des cyclages thermiques des échantillons qui ont revêtu par une couche de chrome.

Cette machine répond aux objectifs suivants :

- Elle permet d'obtenir les conditions de cyclage voulues (température maximale et minimale, temps de maintien à ces températures).
  
- Elle donne la possibilité d'étudier l'évolution structurale du matériau soumis à l'endommagement au cours de cyclage thermique.

>>> Les composants constituant le dispositif sont cités ci-dessous :

- (1) Un moteur à courant continu, permettant d'obtenir un mouvement oscillatoire.
- (2) Manivelle.
- (3) Bielle.
- (4) Une fin de course.
- (5) Guides.
- (6) Un bâti, auquel sont fixés solidement les autres composants tels que le four, le moteur et les guides.

- (7) Un four tubulaire de marque ADAMEL, qui peut chauffer jusqu'à 1050°C.
- (8) Une tige filetée, fixée par sa partie supérieure au système oscillatoire est introduite dans le four et sa partie inférieure au porte échantillon.
- (9) Éprouvette plus porte éprouvette.
- (10) Un bac de trempe en plexiglas, rempli d'eau et d'une capacité de 40 litres. Ce bac est situé en dessous du four.
- (11) Thermocouples chromel-alumel.
- (12) Un temporisateur pour commander le moteur.
- (13) Régulateur de température.
- (14) Un indicateur de température digital, pour donner la température des échantillons.
- (15) Bloc de puissance pour alimenter et contrôler la marche du four.
- (16) Une armoire de régulation.
- (17) Un redresseur pour alimenter le moteur et fixer sa vitesse.
- (18) Une table potentiométrique pour tracer l'allure du cycle thermique de Fatigue, c'est-à-dire la courbe de température en fonction du temps= $f(t)$ .

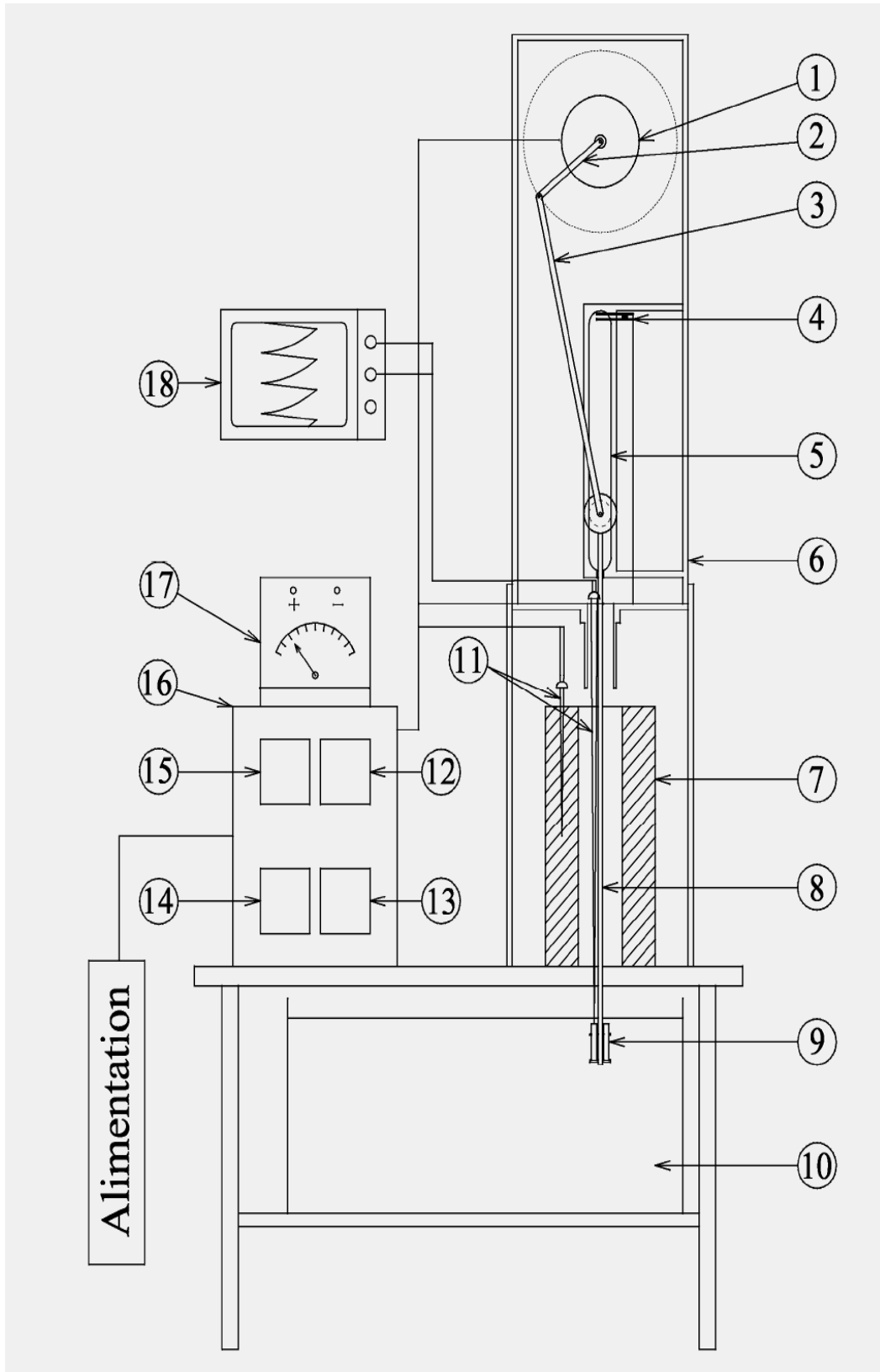


Figure III.10 : Schéma du dispositif de fatigue thermique.



Figure III.11 Photographie de la fatigue thermique



### III-5-3. Principe de fonctionnement du dispositif :

Les échantillons sont placés dans la porte échantillon fixé à la partie inférieure de la tige, puis introduits dans le four probablement chauffé.

Les échantillons sont maintenus pendant un temps  $t_1$  à la température maximale (dans le four), puis trempés dans le bain d'eau (température minimale) pendant un temps  $t_2$  selon la courbe suivante (Figure. III.12) :

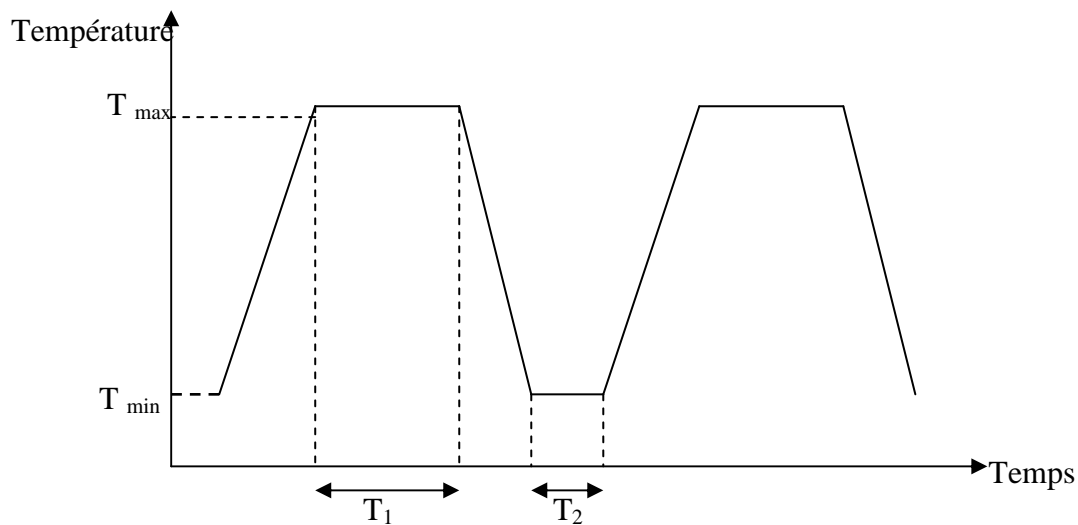


Figure. III.12. Cycle théorique de chauffage et refroidissement

Lors de la trempe à l'eau, la température de l'échantillon diminue et atteint sa valeur minimale, la durée de maintien dans le bac (temps de refroidissement dans l'eau) est réglé à la fois par le temporisateur et la vitesse du moteur. L'entraînement mécanique de l'échantillon conduit au chauffage de celui-ci jusqu'à la température maximale, et la durée de maintien dans le four est fixé à l'aide d'un temporisateur électronique.

Ce temporisateur fonctionne à deux temps : le temps repos « off » et le temps marche « on ». Les durées de ceux-ci sont indépendantes et peuvent être fixées entre 1 seconde et 30 minutes. Lorsque le temporisateur est à l'arrêt (mode off), le moteur est aussi à l'arrêt et les échantillons sont maintenus au milieu du four, cette période correspond à la période de chauffage  $t_1$  où les éprouvettes sont chauffées jusqu'à la température maximale voulue. Une fois le temporisateur est en marche (mode on), les éprouvettes se déplacent avec un mouvement de descente et de montée pour subir une trempe (un refroidissement) dans le bac d'eau pendant  $t_2$ . Cette trempe va diminuer la température des échantillons jusqu'à la température minimale et quand la tige atteint sa fin de parcours le cycle se répète.

Une table potentiométrique liée à l'échantillon par un thermocouple de type Alumel-Chromel permet d'enregistrer la variation de température de l'échantillon en fonction de temps. Les paramètres de cyclage thermique (temps et température maximale et minimale) ont été mesurés avant le déroulement de cyclage thermique grâce à deux thermocouples de type Alumel-Chromel, l'un est relié avec l'échantillon, de ce fait ils effectuent le même mouvement oscillatoire que l'échantillon, et l'autre relié au four à résistance dont la température est contrôlée par un régulateur de température.

### III-6. Observation microscopique :

Un microscope optique de type OLYMPUS permet l'observation des échantillons, avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000x. Ce microscope s'accompagne d'une caméra, reliée à l'écran d'un ordinateur permettant la capture de photos de la structure observée après avoir choisi la surface à photographier. L'avantage de la microscopie optique, autre sa grande facilité d'utilisation, est permet l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée (Figure. III-13).



Figure. III-13. Photographie du microscope optique utilisée

### III-7. Essai de microdureté :

Les mesures de microdureté ont été effectuées avec un microduromètre de marque BUEHLER. Nous avons pris la dureté de revêtement de chrome pour les deux conditions avant et après l'essai de la fatigue thermique pour chaque nombre de cycles et dans le métal de base. Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de  $136^\circ$ . Sous une charge  $F$ , la pyramide est imprimée dans l'échantillon. On mesure les diagonales "d" de l'empreinte et on calcule la valeur de la dureté Vickers à partir de la formule:

$$H_v = 0.1892 (F/d^2)$$

Où  $F$  est le niveau de la charge appliquée,  $d$  est le diamètre de l'empreinte et  $d_m$  est la moyenne des deux diagonales de l'empreinte ;  $d_m = (d_1 + d_2) / 2$

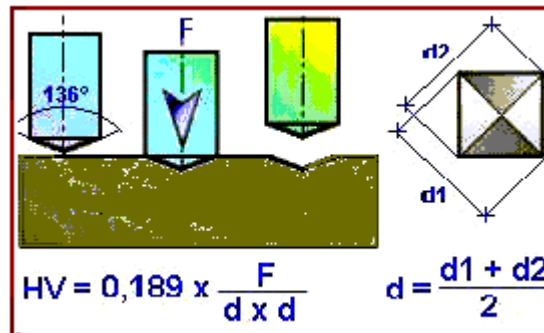


Figure.III-14 Principe de l'essai de dureté Vickers

Dans notre étude, nous avons effectué un balayage le long de l'échantillon, en prenant pour chaque échantillon trois (3) valeurs, et après sa on calcule la moyenne en HV, et pour cela, on a appliqué une charge de 100gf sur Le revêtement pendant 5 à10 secondes, sans choc ou vibration. L'appareil utilisé est présenté dans la Figure. III.15



Figure. III.15 Microduromètre SHIMATZU HMV-M3.

## **Résultats et interprétations**

L'objectif de notre travail est d'étudier le comportement de dépôt de chrome sur un acier à outil 32CDV13 en conditions de fatigue thermique. Pour cela, nous avons fait varier la densité de courant et étudier les effets du cyclage thermique sur la structure et la dureté et la fissuration de revêtement de chrome.

## IV. 1.Résultats

### IV. 1.1. Caractérisation du matériau substrat

La structure après traitement thermique de trempe-revenu est constitué de ferrite et de cémentite et de carbures, ces carbures sont trop fins pour observer par microscopie optique. Cette structure confère à l'acier une grande dureté et une bonne ténacité à froid et à chaud (Figure IV.1)

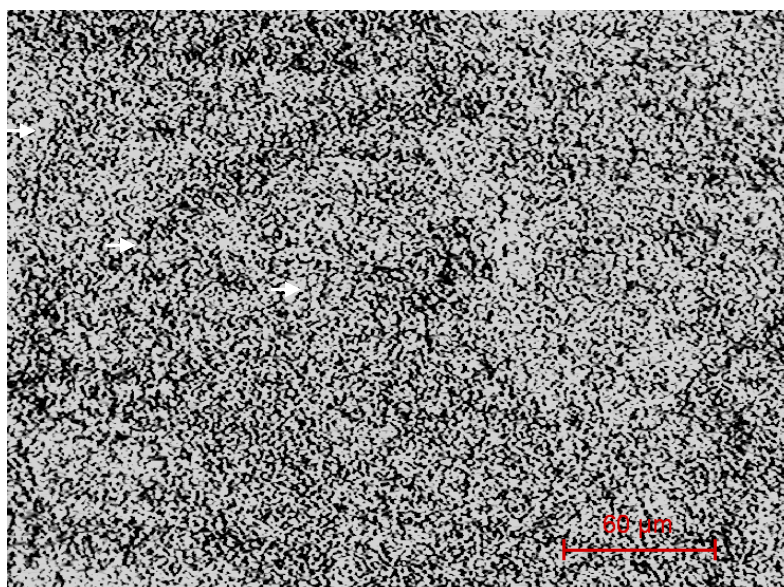


Figure IV.1 –Structure du l'acier 32CDV13.

L'acier 32CDV13 présente des caractéristiques mécaniques intéressantes après trempe et revenu à haute température en particulier une ténacité élevée. Cet acier il peut sensible au vieillissement et les caractéristiques –mécaniques demeurent stables à haute température, et Les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau IV.1

Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques de l'acier

Austénisation	revenu	Dureté HV50	Rm (MPa)	Re0,2 (MPa)	A (%)	Kcv (J/cm <sup>2</sup> )
950°C-30mn	620°C-90mn	408	1312	1144	17,6	122

## IV.1.2 Le revêtement de chrome

### IV. 1.2 .1 Détermination de l'épaisseur du revêtement de chrome

Avant de procéder aux essais de fatigue thermique, nous avons réalisé une étude pour déterminer les épaisseurs de travail. Le paramètre d'étude choisie est la densité de courant. Ensuite, nous avons caractérisé les dépôts de chrome obtenus par la microscopie optique pour mesurer de l'épaisseur.

Les résultats des variations de l'épaisseur de revêtement sont présentés dans le tableau IV.2 et dans la figure IV.2

Tableau IV.2 : Variation de l'épaisseur du dépôt de chrome en fonction de densité de Courant

<b>i (A/dm<sup>2</sup>)</b>	25	30	35	40	45	50
<b>E (µm)</b>	17	26	34	48	62	69

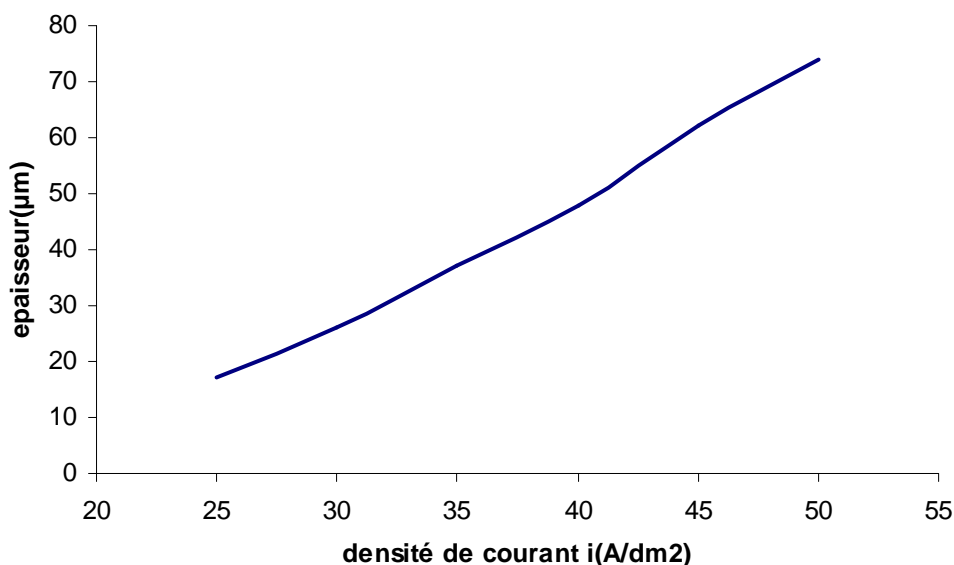


Figure IV.2 : Effets de la densité de courant sur l'épaisseur du dépôt

La figure IV.2 montre que l'épaisseur de revêtement de chrome augmente de manière quasi-linéaire avec la densité de courant.

Les travaux d'ADAMS [30] montrent que le rendement cathodique est élevé et atteint 20% pour une température 55°C et une densité de courant variée entre 30 A/dm<sup>2</sup> et 50 A/dm<sup>2</sup>. L'influence de la densité de courant (l'épaisseur) sur la dureté de revêtement est déterminée par la figure IV.3 et les résultats sont présentés le tableau IV.3.

La dureté de revêtement croît avec la densité de courant, donc la dureté augmente avec l'épaisseur de revêtement.

Tableau IV.3 : Variation de l'épaisseur du dépôt de chrome en fonction de

<b>i (A/dm<sup>2</sup>)</b>	25	30	35	40	45	50
<b>Dureté Hv</b>	629	656	714	765	810	848

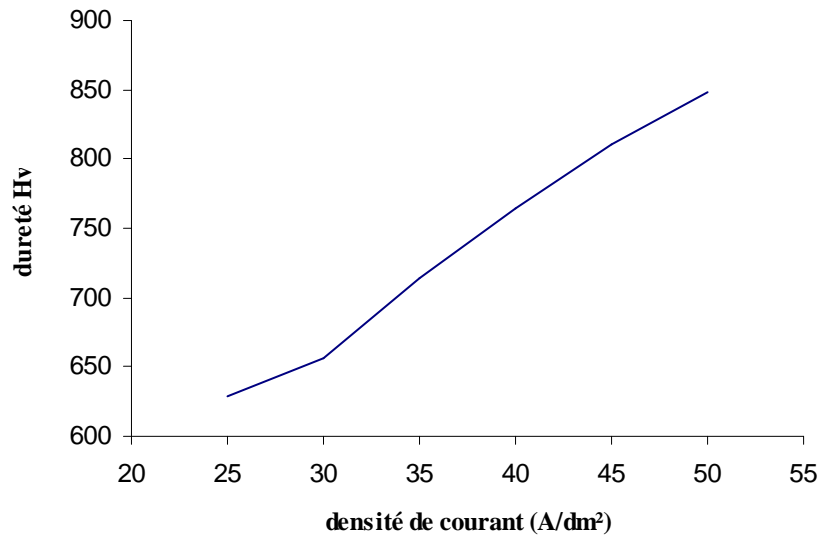


Figure IV.3 Effets de la densité de courant sur l'épaisseur de la couche

A partir de ces résultats nous avons fixées deux épaisseurs de travail :

- Epaisseur E1 : 34μm de dureté 714Hv obtenue pour une densité de 35A/dm<sup>2</sup>.
- Epaisseur E2 : 62μm de dureté 810Hv obtenue pour une densité de 45A/dm<sup>2</sup>.

#### IV.1.2 .2 Structure de revêtement

La structure de revêtement de chrome est fissuré et les fissures ont la formes d'en réseau à maille.

L'aspect de la structure de dépôt montre que le nombre et la longueur des fissures dépend de la densité de courant.



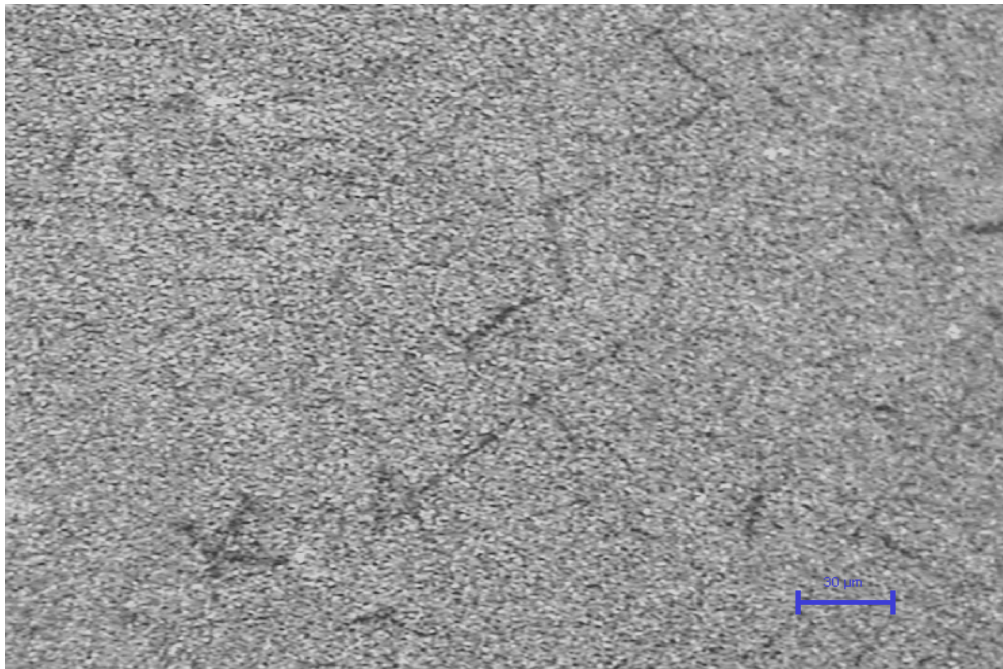


Figure IV.4. Surface de dépôt de chrome à 35A/dm<sup>2</sup>.

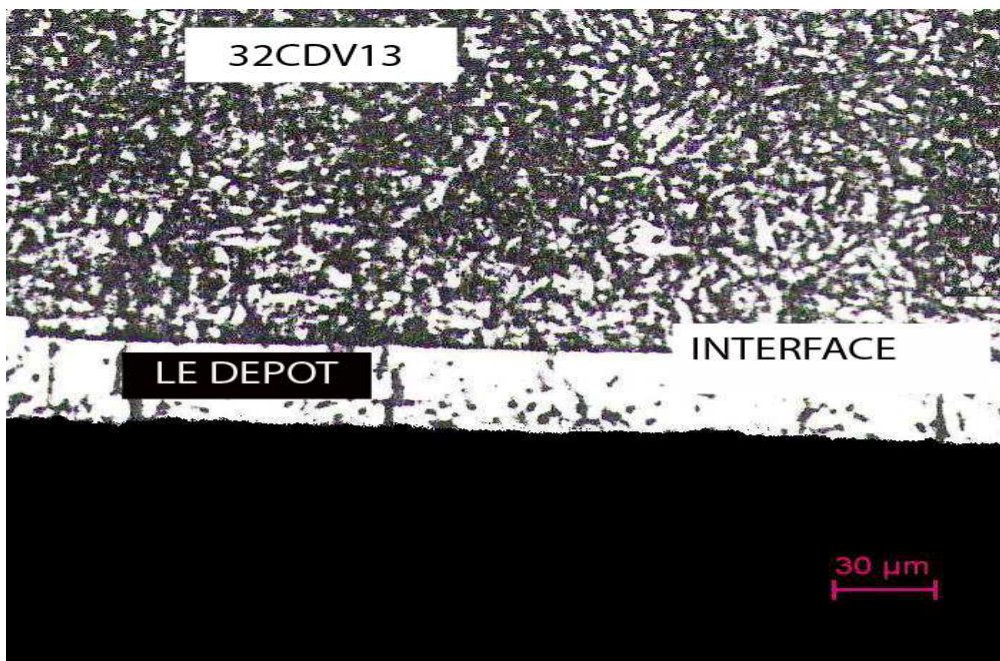


Figure IV.5 Coupe orthogonale de dépôt de chrome obtenue à 35A/dm<sup>2</sup>

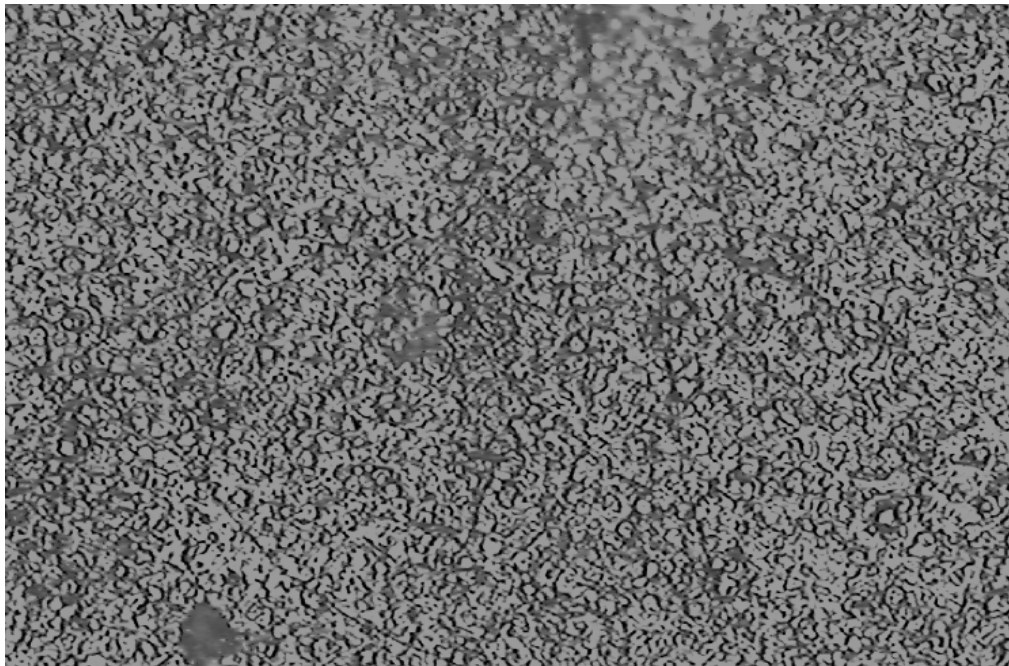


Figure IV.6. Surface de dépôt de chrome à  $45\text{A}/\text{dm}^2$ . **G500**

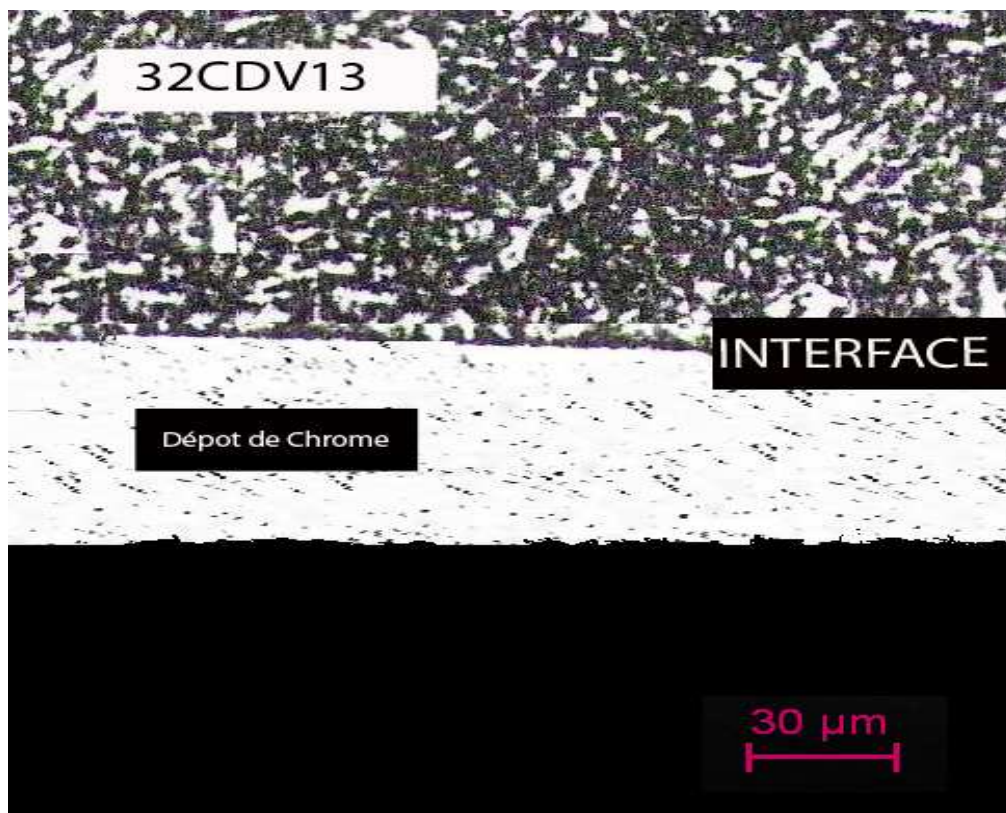


Figure IV.7 Coupe orthogonale de dépôt de chrome obtenue à  $45\text{A}/\text{dm}^2$

La figure IV.4 et IV.6 montre que les fissures obtenue à  $45\text{A}/\text{dm}^2$  sont longues moins nombreuses et peut ramifiées par rapport à celles obtenues sous  $35\text{A}/\text{dm}^2$ .

### IV.1 3. Fissuration du revêtement par fatigue thermique

Les conditions d'essai de fatigue thermique que nous avons utilisés sont :

- Température minimale  $\theta_{\min}=50^\circ\text{C}$
- Température maximale ( $\theta_{\max}$ ) :  $350^\circ\text{C}$ .
- Durée de maintient à haute température (dans le four) : 180 seconde.
- Durée de maintient à basse température (dans l'eau) : 3 seconde.
- Durée de chaque cycle 183 secondes.

Les conditions de cyclage thermique sont présentées dans le tableau IV.4 et puis illustrés dans la figure IV.6

Tableau IV.4: Conditions des essais de fatigue thermique

$\theta_{\max}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\theta_{\min}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\Delta\theta$ ( $^\circ\text{C}$ )	$t_{\text{chaud}}$ (s)	$t_{\text{froid}}$ (s)
350	50	300	180	3

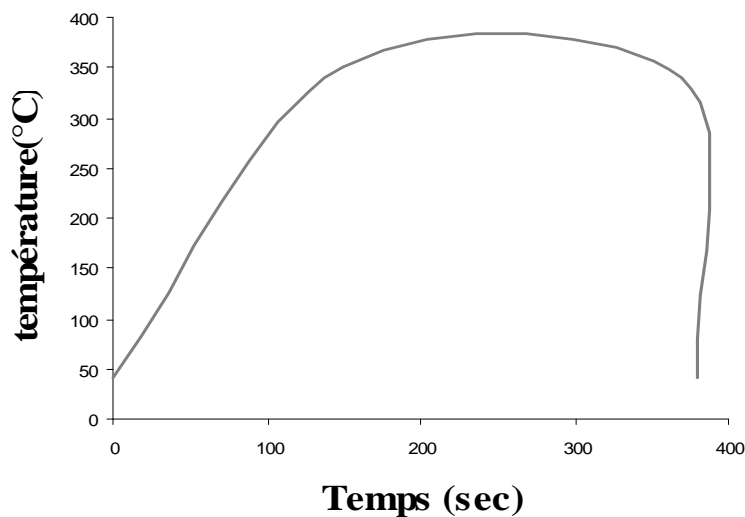


Figure IV8. Le cycle thermique appliqué

### IV.1 3.1 Fissuration de revêtement $E_1$ ( $35A/dm^2$ )

Au cours de cyclage thermique aux 250 cycles, les revêtements subissent les phénomènes suivant :

1-Formation d'une fissuration par fatigue thermique très fine qui a la forme d'un faïençage Thermique et la densité des fissures augmente avec les nombres de cycles.

2-Oxydation de fissures formées par le chromage et cette oxydation augmente avec le nombre de cycles.

3 -Elargissement des bores des fissures formées lors du chromage et après 250 cycles. Et les résultats suivant représentent la surface de dépôts de chrome pour chaque nombre de cycles.

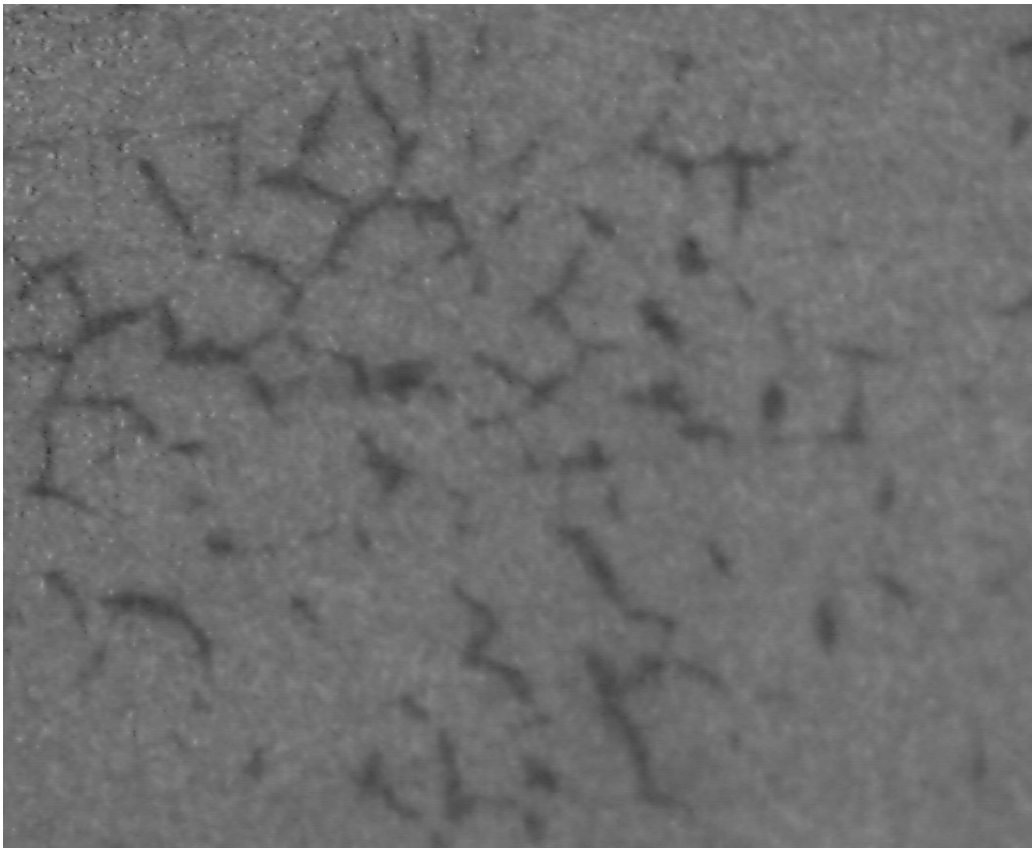


Figure IV.9. Surface de dépôt de chrome après 50 cycles.

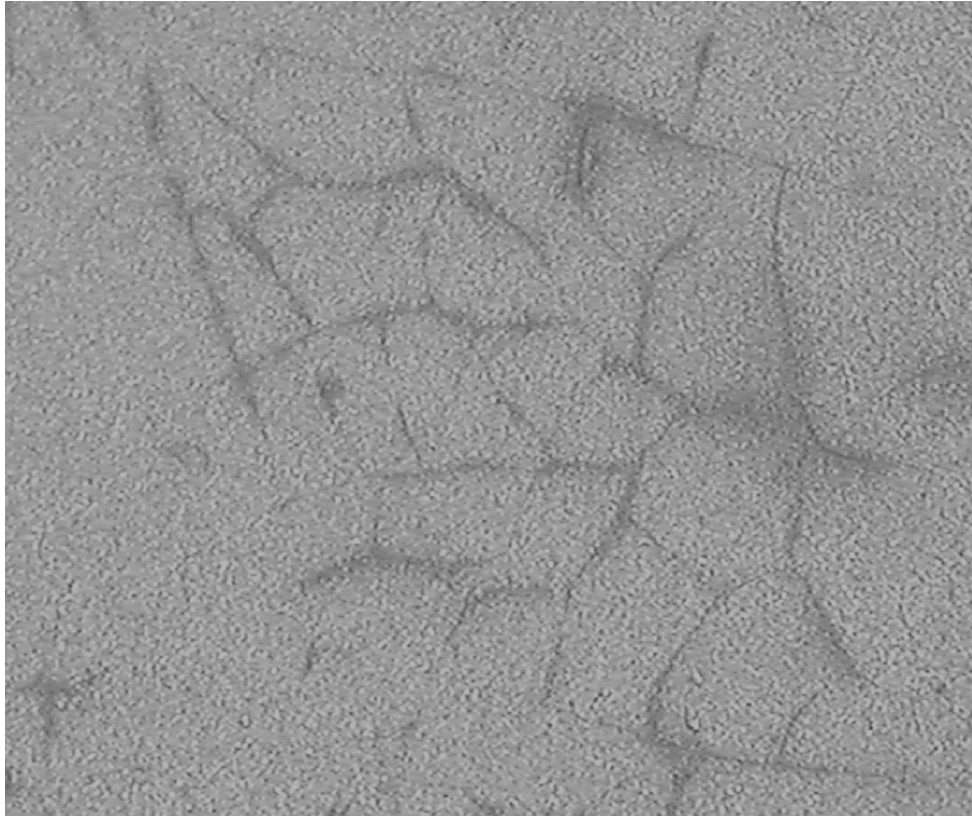


Figure IV.10. Surface de dépôt de chrome après 100 cycles.

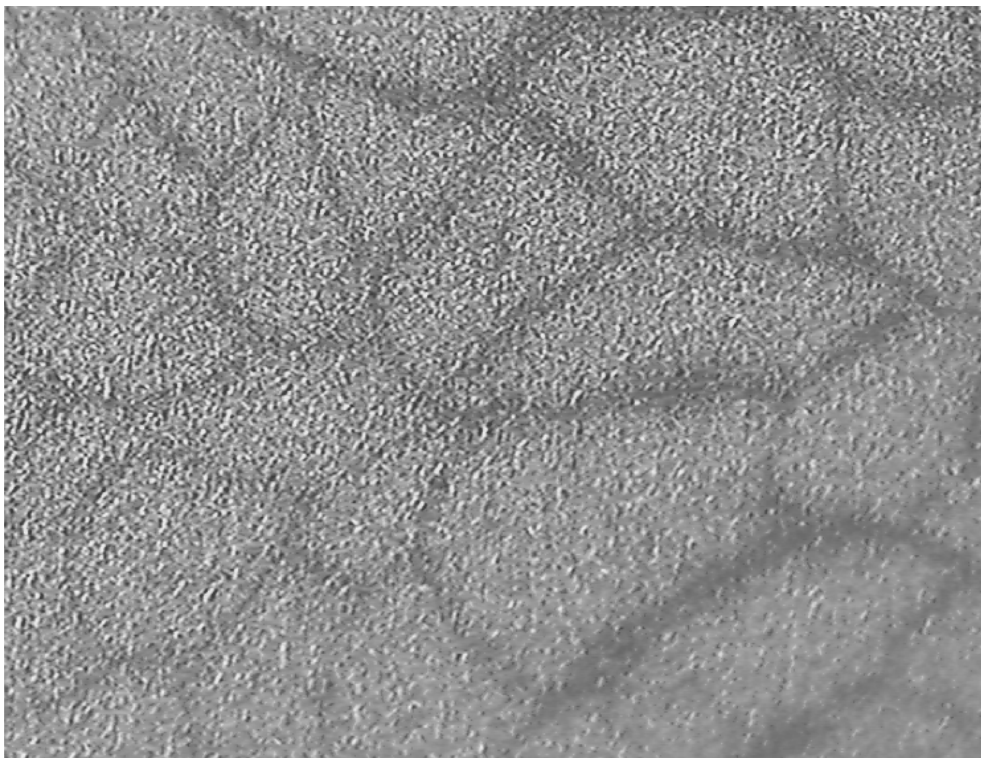


Figure IV.11 Surface de dépôt de chrome après 150 cycles.

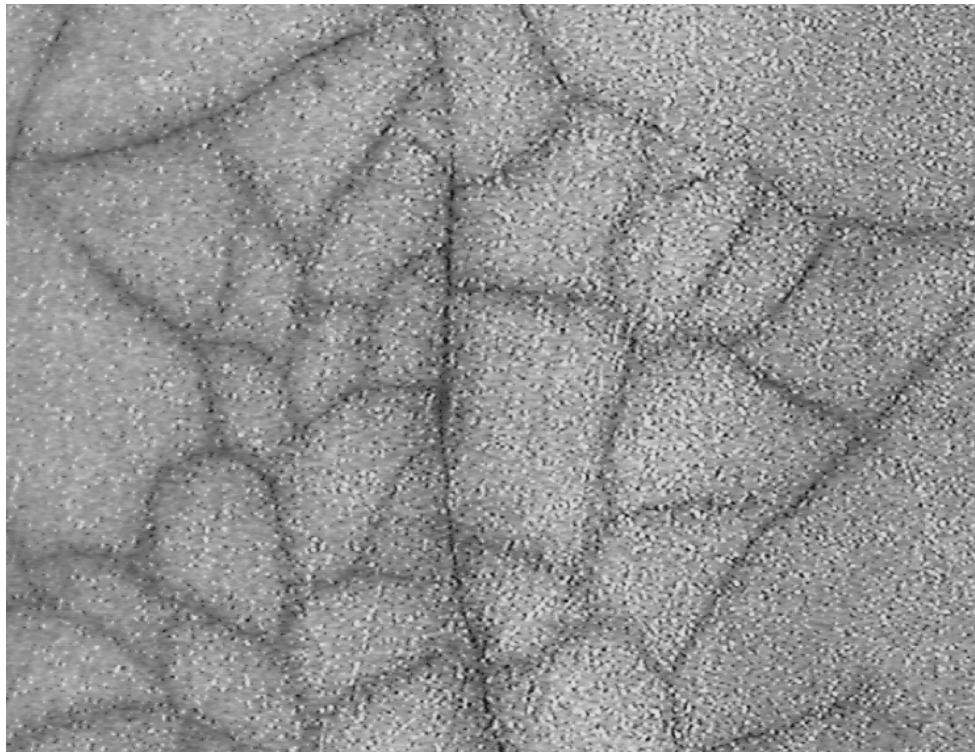


Figure IV.12. Surface de dépôt de chrome après 200 cycles.

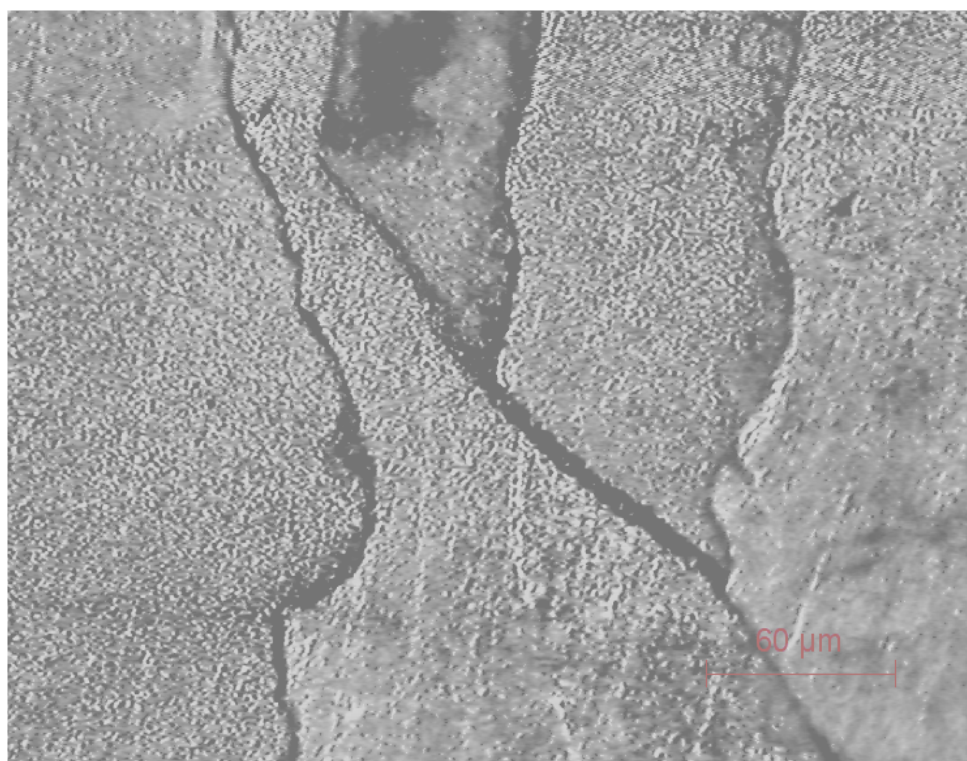


Figure IV.13. Surface de dépôt de chrome après 250 cycles.

**IV.1 3.2 Fissuration de revêtement  $E_2$  ( $45A/dm^2$ )**

Dans le cas de l'épaisseur  $E_2$ , on constate que la résistance à la fatigue thermique, à la fissuration et à l'oxydation est meilleur car la densité de fissures est plus faible et l'oxydation est moins importante pour le même nombre de cycles.

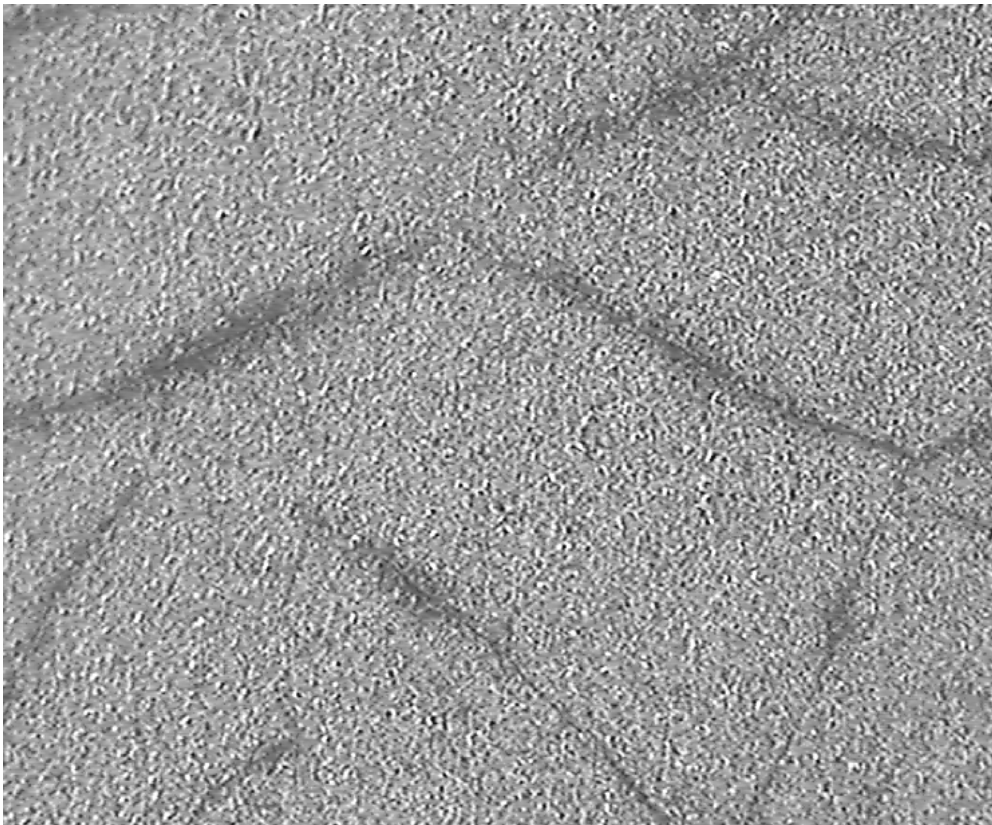


Figure IV.14. Surface de dépôt de chrome après 50 cycles.



Figure IV.15. Surface de dépôt de chrome après 100 cycles.



Figure IV.16. Surface de dépôt de chrome après 150 cycles.



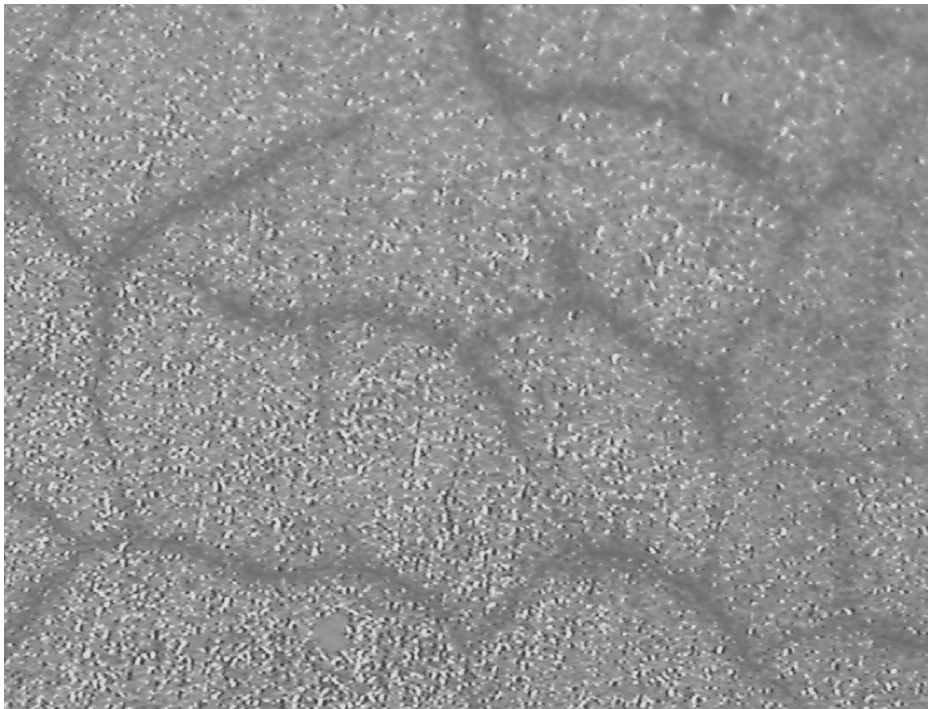


Figure IV.17. Surface de dépôt de chrome après 200 cycles.

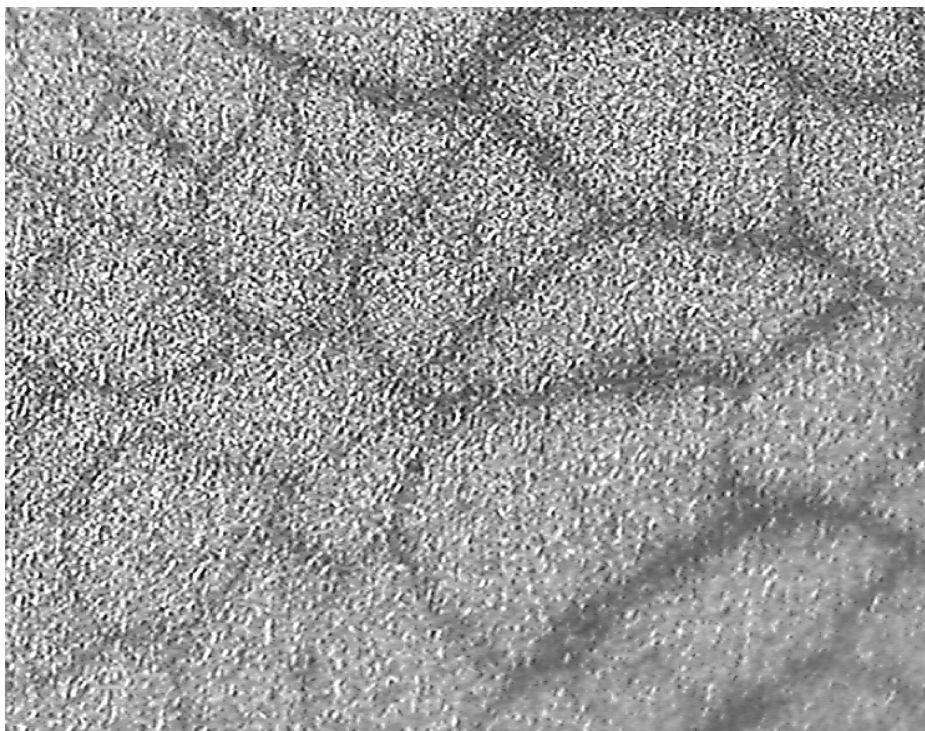


Figure IV.18. Surface de dépôt de chrome après 250 cycles

#### IV.1.4 Evolution de la dureté

Au cours de cyclage thermique, la dureté augmente avec le nombre de cycles : les revêtements de chrome subissent un durcissement par cyclage de la température.

Les résultats de la dureté sont présentés dans le tableau IV.5

Tableau 5. Résultats de la dureté en fonction de nombres de cycles

N	0	50	100	150	200	250
<b>Hv (35A/dm<sup>2</sup>)</b>	714	738	785	836	872	930
<b>Hv (45A/dm<sup>2</sup>)</b>	810	816	842	866	895	939

et ces résultats sont illustrés dans la figure IV.17.

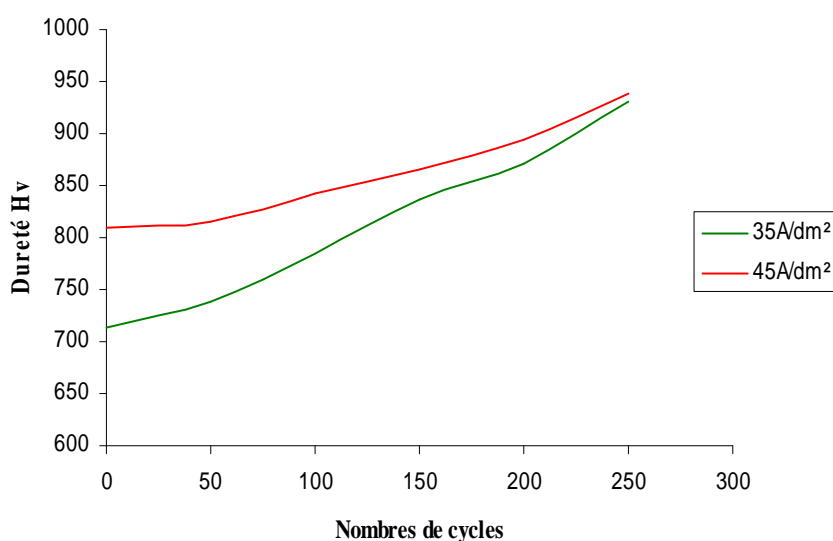


Figure IV.19.Effets de nombres de cycles sur la dureté

D'après la figure IV.17, le durcissement est plus important de l'épaisseur  $E_1$  (35A/dm<sup>2</sup>) que pour l'épaisseur  $E_2$  (45A/dm<sup>2</sup>)

## IV-2 Interprétation des résultats

### IV.2-1Influence de la densité de courant sur l'épaisseur

L'épaisseur de revêtement augmente avec la densité de courant pour une température constante. et comme le chromage est un procédé électrochimique, pour lequel il se produit par la réaction cathodique.

La densité de chromage contrôle la cinétique de cette réaction donc la quantité de chrome déposée dépend de la densité de courant.

Ce résultat est conforme avec la loi de Faraday qui dit que si on augmente la densité de courant, le nombre des ions transportés dans une solution augmente.

$$M = \frac{M}{n \cdot F} I t$$

#### IV.2.2-Influence de la densité de courant sur la dureté de revêtement de chrome

La dureté de revêtement de chrome est très élevée (elle peut atteindre 1000Hv), ce grand durcissement est provoquée par deux causes :

1. La nature très fines des granulés de revêtement, cette granulométrie dépend de la densité de courant tel que plus la densité de courant est grand plus la structure est fines et donc la dureté son élevée. [31]

2. Les tensions internes

Ces tensions sont Provoquées par dégagement et l'occlusion de l' Hydrogène dans le revêtement .Donc, plus la densité de courant est grand plus le dégagement de l'hydrogène est important, ce qui implique que les tensions interne sont plus important ce qui provoque un durcissement de revêtement important. [32]

#### IV.2.3-Influence de la densité de courant sur la fissuration par fatigue thermique

Pour le même nombre de cycles thermiques ; la densité de fissuration est d'autant plus faible que l'épaisseur est élevée, car la fissuration dépend de rapport contrainte thermique sur le volume de revêtement .Donc pour une surface données :

La fissuration dépend de rapport contrainte thermique résiduelle sur l'épaisseur. [33]

#### IV.2.4-Influence de la fissuration sur la dureté de revêtement

- Au cours de cyclage thermique, la dureté augmente avec le nombre de cycles car la densité de fissures (les contraintes thermiques résiduelles) augmente.

- La densité de fissuration est plus importante quand l'épaisseur est faible ce qui implique que le durcissement pour les faibles épaisseurs est plus important pour le même nombre de cycles.

## **CONCLUSION GENERALE**

Les dépôts de chrome sur aciers à outils sont réalisés pour améliorer la tenue de ces derniers conditions de fonctionnement mécaniques et de conditions sévères. Dans ce travail, nous intéressons au comportement des revêtements de chrome sur les acier sà outils dans des conditions de fatigue thermique.

Le problème se pose lorsque la température de fonctionnement est variables car la résistance de revêtement à des limites.

Les travaux que nous avons menue montre que cette résistance dépend de l'épaisseur et donc de la densité de courant.

Ce travail peut être approfondi pour déterminer la résistance à la fatigue thermique par une étude quantitative de la fissuration en fonction de la densité de courant.

Etude devra être menue avec des moyens expérimentaux plus adéquats tels que la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et diffraction de rayon X

# Références bibliographiques

**[1] Robert Léveque**

Technique de l'ingénieur - aciers à outils. M332

**[2] Shimizu, Aoki**

Enhanced cold rolling work roll with self generating optimal roughness characteristics. . ISIJ International 1992

**[3] C.Bain et H.W Paxton**

Les éléments d'additions dans l'acier» (paris1968)

**[4] M.F.Ashby, D.R.Jones**

An Introduction to Microstructures, Processing and Design ». Butterworth Heinemann edition, 1999.

**[5]. Guy Murry**

Technique de l'ingénieur\_ Influence des élément d'adition. M300

**[6] G.Beranger,**

Le livre de l'acier, Lavoisier, 1994

**[7] Lakhtine**

Métallographie et traitements thermiques des métaux, 1978.

**[8] K.Ourari.**

Evolution microstructurale et mécanique d'un acier allié au chrome-molybdène-vanadium (Z160CDV12) en conditions de fatigue thermique, Thèse de magister, ENP, 28 Juin 2001.

**[9] -Patrick Benaben**

Chromage électrolytique, techniques de l'ingénieur, M.1610, (2003)

**[10]-Paul Morisset**

Chromage dur et décoratif. Publication CETIM. 1993

**[11]-Paul Morisset**

Emploi et contrôle des revêtements métallique ; Techniques de l'ingénieur, 1967. (M 1560).

**[12] Bouchekroune.A**

Propriétés physicochimiques des traitements de surface par chromage dur et nitruration. Mémoire de Magistère 1998.

**[13]- M.Metaoui**

Etude du chromage sur différentes nuances d'acier pour coins monétaires. Thèse d'ingénieur. 2000.

**[14]- Alain Queruel**

Traitement de surface des aciers.2007

**[15] V. Maillo**

Amorçage et propagation de réseaux de fissures de fatigue dans un acier inoxydable austénitique type 304L, Thèse de doctorat, Ecole central de LILLE, 2003.

**[16] Stéphane Bugat.**

Thèse de Doctorat: Comportement et endommagement des aciers austéno-ferritiques vieillis : une approche micromécanique. l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, décembre 2000

**[17] C. Déprés.**

Thèse de Docteur de L'INPG Spécialité :: Modélisation Physique des Stades Précurseurs de l'Endommagement en Fatigue dans l'acier inoxydable austénitique 316L. École Doctorale, décembre 2004.

**[18] M.E.Djeghlal.**

Contribution à l'étude du comportement en fatigue et en choc thermique d'une fonte à graphite sphéroïdale en fonction de la structure de la matrice et des éléments d'alliages, Thèse de magister, USTHB, 1990.

**[19] S. S. M. Tavares, V. F. Terra**

Influence of the microstructure on the toughness of a duplex stainless steel UNS S31803, Journal of Materials Science, 2005.

**[20] T. A. Palmer, J.W. Elmer, and JoeWong**

In situ observations of ferrite-austenite transformations in duplex stainless steel weldments using synchrotron radiation, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 7 N° 3 2002.

**[21] P.J.Cunat**

Aciers inoxydables: Fabrication, Techniques de l'ingénieur, M4543, Décembre 2000.

**[22] I. Virkkunen**

Thermal fatigue of austenitic and duplex stainless steel, These of doctor of science, Helsinki University of Technology, 2001

**[23] D.LAVEISSIERE.**

Thèse de Docteur, Modélisation de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routiers par endommagement et microfissuration de l'expérimentation à l'outil de dimensionnement pour l'estimation de la durée de vie. L'Université de Limoges Faculté des Sciences, Ecole Doctorale STS, 2002.

**[24] V.Maillot, A.Fissolo, S.Dagallaix, G.Degallaix**

Obtentions et observations de réseaux de faïençage par fatigue thermique, XVème Congrès Français de Mécanique, Nancy, 3-7 Septembre 2001.

**[25] R.Kacar**

Effect of solidification mode and morphology of microstructure on the hydrogen content of duplex stainless steel weld metal, *Materials & Design*, 2004.

**[26] C.Bathias, J.P.Bailon**

La fatigue des matériaux et des structures, Maloine S.A éditeur Paris, 1980.

**[27] A. Bataille, T. Magnine.**

Surface damage accumulation in low-cycle fatigue; University de Lille, laboratoire de métallurgie physique, URA CNRS 234, 1993.

**[28] S.S.Manson**

Les contraintes d'origine thermique, edition Dunod, Paris, 1967.

**[29] I. Petronius, M. Bamberger**

Microstructure and properties following welding of duplex stainless steel using coated electrodes, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 6 No. 2 79, 2001.

**[30] D. Adams**

Chromage dans l'industrie lithographique, MAI 1950. P32.

**[31] A. Wood**

Transformation FARADAY societies. 1935. P 1248.

**[32] S.Gold**

Structure de depot de chrome dans l'acier. OCTOBRE 1948.

**[33] L.Mehr**

Limite de la fatigue de l'acier chrome . DECEMBRE 1947.