

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Métallurgie

Thèse de Magister

Présentée par D. BOUKROUNE, Ingénieur ENP  
Directeur de recherche: N. MESRATI

Intitulé de thèse:

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Etude du comportement en frottement-usure  
des traitements de surface, réalisés par  
chromage dur et par nitruration liquide.

MARS 1998

Soutenue devant le jury composé de:

- Président: M<sup>r</sup> E. SALHI ..... E.N.P
- Rapporteur: M<sup>r</sup> N. MESRATI ..... E.N.P
- Examineurs: M<sup>r</sup> K. NECIB ..... E.M.P  
M<sup>r</sup> M. LARIBI ..... E.N.P  
M<sup>r</sup> M. E. DJEGHLAL ..... E.N.P
- Invité: M<sup>r</sup> A. BOUKLI ..... Algérie Métallisation

## Remerciements

Cette étude a été conduite à l'Ecole Nationale Polytechnique au laboratoire de Génie des Matériaux et à l'Ecole Centrale de Lyon au laboratoire Matériaux Mécanique Physique. Elle a été dirigée par Monsieur N. MEBRAJ.

Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour m'avoir permis d'entreprendre cette recherche au sein de son équipe et avoir dirigé par ces nombreux conseils l'ensemble de mes travaux.

Je remercie très sincèrement monsieur le professeur D. JUREUX directeur de l'UMI CNRS 447, département Matériaux Mécanique Physique de m'avoir accueilli dans son laboratoire.

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur l'ingénieur en aéronautique et chef de département N. DREBB, pour l'intérêt qu'il a porté à mes recherches et pour l'aide apportée lors de la réalisation pratique de cette thèse.

Mes remerciements vont également aux techniciens du laboratoire centrale de l'ENMAéronautique et à ceux du département de métallurgie sans oublier monsieur A. SAADI.

Que tous les professeurs et enseignants du département de métallurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique trouvent ici l'expression de mes sincères gratitude pour les efforts qu'ils m'ont cessé de me prodiguer pour ma bonne formation.

Mes remerciements vont tout particulièrement à Mr M. HAMACHE qui s'est intéressé à mes travaux et qui m'a beaucoup aidé à effectuer mes recherches bibliographiques.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

Aussi, je remercie tous ceux qui ont contribué, de loin ou de près à la réalisation de cette thèse.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

## **CHAPITRE I- PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES TRAITEMENTS DE SURFACE PAR CHROMAGE DUR ET NITRURATION.**

<b>I.1- PHENOMENES D'ELECTROLYSES ET PROPRIETES DES DEPOTS DE CHROME DUR...</b>	<b>2</b>
<b>I.1.1- Théorie de l'électrolyse.....</b>	<b>2</b>
I.1.1.1- Rappel de quelques propriétés chimiques du chrome .....	2
I.1.1.2- Electrolyse d'une solution d'acide chromique .....	2
I.1.1.3- Application des lois de l'électrolyse .....	2
I.1.1.4- Schéma des phénomènes d'électrolyse .....	2
<b>I.1.2- Mécanismes de déposition.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.3- Bain électrolytique.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1.4- Phénomènes électriques .....</b>	<b>5</b>
I.1.4.1- Courbe de polarisation cathodique .....	5
<b>I.1.5- Rendement cathodique .....</b>	<b>6</b>
I.1.5.1- Influence de la densité de courant et de la température .....	6
I.1.5.2- Influence de la concentration en $CrO_3$ .....	7
I.1.5.3- Influence de la teneur en $SO_4$ .....	7
<b>I.1.6- Métal de base .....</b>	<b>8</b>
I.1.6.1- Traitement thermique avant chromage .....	8
I.1.6.2- Influence de l'état de surface du métal de base sur le dépôt .....	8
I.1.6.3- Traitement thermique après chromage .....	9
<b>I.1.7- Caractéristiques et propriétés des dépôts de chrome .....</b>	<b>10</b>
I.1.7.1- Teneurs en hydrogène et oxygène .....	10
I.1.7.2- Tensions internes .....	11
I.1.7.3- Structure et porosités .....	13
I.1.7.4- Propriétés chimiques du chrome.....	13
I.1.7.5- Dureté du dépôt de chrome .....	13
<b>I.2 - NITRURATION .....</b>	<b>16</b>
<b>I.2.1- Définition .....</b>	<b>16</b>

**I.2.2-** *Diagramme Fe-N et la nature des couches formées au cours de la nitruration* ..... 16

**I.2.3-** *Rôle des éléments d'alliage* ..... 17

**I.2.4-** *Autres formes de nitrurations* ..... 17

**I.2.5-** *Nitruration en bain de sel (Ténifer)* ..... 18

**CHAPITRE II- THEORIE GENERALE DU FROTTEMENT ET DE L'USURE**

**II.1-** *INTRODUCTION* ..... 19

**II.2-** *PHENOMENES DE BASE EN MECANIQUE DE SURFACE* ..... 20

**II.2.1-** *Energie de surface* ..... 20

**II.2.2-** *Géométrie de surface* ..... 20

**II.2.3-** *Composition de surface* ..... 21

**II.2.4-** *Contact de deux surfaces* ..... 22

**II.3-** *ASSOCIATION DES ATOMES ET LEURS CONSEQUENCES POUR LE FROTTEMENT* ..... 22

**II.3.1-** *Association chimique des atomes* ..... 22

**II.4-** *APPROCHE GLOBALE DU FROTTEMENT ET D'USURE* ..... 23

**II.4.1-** *Création et piégeage de débris d'usure* ..... 24

**II.4.2-** *Modèle à trois corps* ..... 24

**II.4.3-** *Comportement du troisième corps* ..... 25

**II.4.4-** *Influence des propriétés mécaniques* ..... 25

**II.5-** *COMPORTEMENT A L'USURE ET AU FROTTEMENT DU CHROME DUR* ..... 26

**II.5.1-** *Résistance à l'usure* ..... 26

**II.5.2-** *Relation entre la résistance à l'usure et la dureté* ..... 27

**II.5.3-** *Frottement* ..... 27

        1- *Influence de divers paramètres sur le coefficient de frottement* ..... 28

        2- *Comportement structural du chrome dans l'usure par frottement de glissement à sec* ... 29

**Chapitre III - CONCEPTION ET REALISATION D'UNE CELLULE ELECTROLYTIQUE.**

**III.1-** *MODES DE CHAUFFAGE* ..... 30

III.2- DETERMINATION DE LA CHALEUR NECESSAIRE POUR UN DEPOT ELECTROLYTIQUE. ....	30
III.3- AGITATION DU BAIN. ....	31
III.4- ASPIRATION DES CUVES. ....	31
III.5- MISE EN OEUVRE DE NOTRE CELLULE D'ELECTRODEPOSITION. ....	31
 <b>Chapitre IV- TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET RESULTATS.</b>	
IV.1 - MATERIAUX UTILISES. ....	37
IV.1.2- Préparation des substrats. ....	37
IV.1.3- Traitements thermiques et caractéristiques mécaniques du substrat. ....	38
IV.1.4- Analyses métallographiques. ....	38
IV.2- PROCESSUS OPERATOIRES DE LA PREPARATION DU CHROMAGE. ....	40
IV.2.1- Préparation des surfaces. ....	40
IV.2.1.1- Dégraissage. ....	40
IV.2.1.2- Décapage. ....	40
IV.2.1.3- Polissage électrolytique. ....	41
IV.3- DEPOSITION DU CHROME DUR SUR LE SUBSTRAT. ....	41
IV.4- VARIATION DE L'EPAISSEUR DU DEPOT EN FONCTION DE L'INTENSITE DE COURANT. ....	42
IV.5- VARIATION DU RENDEMENT CATHODIQUE EN FONCTION DE L'INTENSITE DE COURANT ET DE LA DUREE DE DEPOSITION. ....	43
IV.6- CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE DU DEPOT DE CHROME. ....	44
IV.7- ESSAI D'ARRACHEMENT. ....	48
IV.7.1- Influence de l'état de surface sur l'adhérence du dépôt. ....	49
IV.7.2- Influence du traitement thermique sur l'adhérence du dépôt. ....	50
IV.8- INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LA STRUCTURE ET LA DURETE DU DEPOT. ....	53

IV.8.1- <i>Influence sur la structure.</i> .....	53
IV.8.2- <i>Influence sur la dureté.</i> .....	55
<b>IV.9- REALISATION ET CARACTERISATION DE LA COUCHE NITRUREE.</b> .....	56
IV.9.1- <i>Procédé de nitruration à bain de sel.</i> .....	56
IV.9.2- <i>Caractérisation de la couche nitrurée.</i> .....	58
IV.9.2.1- <i>Analyses microstructurales.</i> .....	58
IV.9.2.3- <i>Essais de dureté.</i> .....	60
<b>IV.10- CARACTERISATION TRIBOLOGIQUE.</b> .....	61
V.10.1- <i>Dispositif expérimental (Tribomètre plan-plan).</i> .....	61
V.10.2- <i>Les frottants utilisés.</i> .....	62
V.10.3- <i>Conditions d'essais.</i> .....	63
V.10.4- <i>Moyens d'investigation.</i> .....	64
V.10.5- <i>Evolution générale du coefficient de frottement.</i> .....	64
V.10.5.1- <i>Evolution du coefficient de frottement sur un antagoniste en fonte G.S 38-15....</i>	64
V.10.5.2- <i>Evolution du coefficient de frottement sur un antagoniste en acier 30NCD16. ...</i>	65
V.10.5.3- <i>Evolution du coefficient de frottement sur un antagoniste en acier 30NCD16                   chromé.</i> .....	69
V.10.5.4- <i>Evolution du coefficient de frottement sur un antagoniste en acier 30NCD16                   nitruré dans un bain de cyanure.</i> .....	78
<b><u>Chapitre VI</u> - CONCLUSION GENERALE</b> .....	82
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	84

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Le problème de frottement dans la mesure où il se concentre dans l'épiderme et le derme du métal peut faire appel à des méthodes de traitements de surface où, on va chercher à améliorer la qualité de la peau.

Les transformations des surfaces frottantes par traitements électrolytiques ou électrochimiques, présentent (depuis 1968) un développement considérable. Certains problèmes de frottement sont aujourd'hui, résolus ou en voie de résolution. La lutte contre l'usure a fait aussi des progrès, avec le développement des revêtements métalliques par électrolyse. Les traitements de surface permettent de couvrir le plus grand nombre de problèmes relatifs aux ensembles d'industries, en apportant une diminution notable des pertes par frottement, une diminution substantielle de l'usure par abrasion, ainsi qu'une garantie contre le grippage et contre les accédants de surfaces.

La qualité fondamentale du chrome, déposé par électrolyse est sa grande dureté qui est de l'ordre de 900-1000 Vickers. C'est cette grande dureté qui a conduit dans les divers pays à adopter dans le langage courant, la dénomination générale de « chrome dur ». Par ailleurs, la coutume est d'associer au chiffre de dureté, les qualités remarquables de résistance à l'usure et notamment de résistance à l'abrasion, présentées par les dépôts de chrome; quoique scientifiquement cette correspondance ne puisse être rigoureusement établie. En effet, dans les divers phénomènes d'usure, interviennent la ductilité et la ténacité du métal qui sont étrangères aux diverses mesures de dureté.

Le traitement par nitruration est le plus largement utilisé, il s'effectue en phase ferritique et permet d'obtenir des microstructures superficielles intéressantes, notamment pour augmenter la résistance à l'usure et aux contraintes cycliques.

A travers une synthèse des différents travaux effectués sur le chromage dur et étude théorique sur les mécanismes en frottement - usure et les principes fondamentaux de traitement par nitruration, nous allons suivre une démarche expérimentale sur un grand nombre d'échantillons en acier 30NCD16, afin de déterminer les paramètres critiques agissant sur la qualité de la couche superficielle. Nous montrerons, ainsi, la complexité des phénomènes contrôlant l'évolution des contacts et la diversité des comportements. Nous ferons également, une étude comparative entre les traitements superficiels réalisés.

# CHAPITRE I

## I.1- PHENOMENES D'ELECTROLYSE ET PROPRIETES DES DEPOTS DE CHROME DUR.

### I.1.1- Théorie de l'électrolyse.

#### I.1.1.1- Rappel de quelques propriétés chimiques du chrome.

Le chrome existe à l'état bivalent ( $\text{CrO}$ ) instable, trivalent ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) et hexavalent dans l'anhydride chromique  $\text{CrO}_3$ , l'acide chromique ( $\text{CrO}_3, \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CrO}_4\text{H}_2$ ) ainsi que les chromates.

L'atome de chrome trivalent a en outre la propriété de donner de nombreux ions complexes; avec un ordre de coordination égale à 6. L'existence de ces ions complexes ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  ...) rend particulièrement difficile l'explication des phénomènes électrolytiques du chromage et donne lieu à des hypothèses diverses [1].

#### I.1.1.2- Electrolyse d'une solution d'acide chromique.

La solution d'acide chromique pur n'est pas réduite directement par électrolyse, ni à l'état de chrome trivalent, ni à l'état de chrome métallique. Le dépôt de chrome ne peut se produire qu'en présence d'un anion tel  $\text{SO}_4^{2-}$  ou  $\text{SiF}_6^{--}$ , jouant un rôle catalytique [2].

#### I.1.1.3- Application des lois de l'électrolyse.

D'après la lois de Faraday, 96 490 coulombs rompent une valence gramme. Si on applique cette lois au cas du dépôt de chrome à partir de la solution d'acide chromique où le chrome, de poids atomique 52 est hexavalent, on trouve que 96 490 coulombs provoqueront un dépôt de  $\frac{52}{6} = 8,7$  grammes de chrome, c'est à dire qu'un courant de 1 Ampère déposerait en 1 heure  $\frac{8,7 \times 3600}{96490} = 0,32$  g de chrome.

En réalité, cette quantité de Chrome déposée est beaucoup plus faible, de l'ordre de 0,05g; c'est à dire que le rendement de courant est de l'ordre de 15% [1-2].

#### I.1.1.4- Schéma des phénomènes d'électrolyse.

Les phénomènes d'électrolyse, peuvent être schématisés comme suit (Figure I-1) :

##### A l'anode:

- oxydation du chrome trivalent en chrome hexavalent, c'est à dire régénération de l'acide chromique.

##### A la cathode:

- dégagement d'hydrogène,  
 - dépôt de chrome métallique,  
 - réduction du chrome hexavalent en chrome trivalent

Ces phénomènes se produisent en présence d'anions tels  $\text{SO}_4^{--}$  ou  $\text{SiF}_6^{--}$  qui jouent un rôle de catalyseurs.

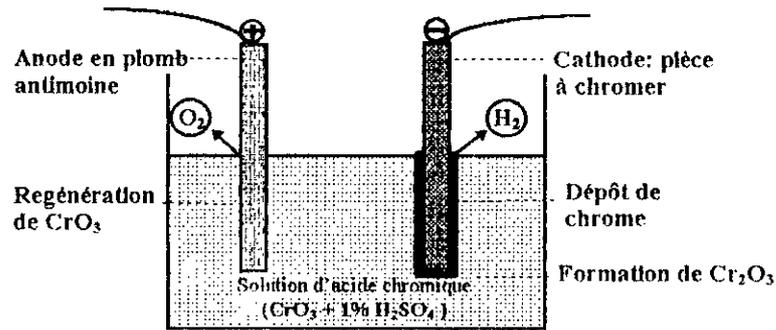


Figure I-1 : Schéma de l'électrolyse.

### I.1.2- Mécanismes de déposition

Des théories diverses ont été émises par plusieurs chercheurs. Elles sont souvent judicieuses et cohérentes[18]. On peut envisager deux groupes de théories, celles qui expliquent la déposition par réduction directe du chrome hexavalent en chrome métallique, et celles qui supposent des réductions successives par divers états de chrome trivalent, divalent,... etc.

#### 1- Dépôt à partir du chrome trivalent.

D'après Sargent [3], le dépôt de chrome métallique directement à partir du chrome hexavalent est impossible. Le dépôt ne peut se faire qu'à partir du chrome trivalent, ce dernier se forme par action de l'acide sulfurique sur l'hydrate chromique produit à la cathode par réduction de l'acide chromique. Ensuite, le chrome trivalent est réduit partiellement à l'état de chrome divalent qui se décharge sur la cathode pour donner du chrome métallique.

#### 2- Formation du film $\text{CrOHCrO}_4$ .

D'après MULLER [4], il y a sur la cathode, formation d'un oxyde basique ou chromate de chrome  $\text{CrOH}$ ,  $\text{CrO}_4$ , formant un film de protection. Ce film ne peut être pénétré par les molécules  $\text{CrO}_3$ . Mais il peut subir une dissolution électrostatique en se laissant traverser par les ions  $\text{H}^+$  à partir d'un certain potentiel. Cette dissolution se produit en présence d'un acide étranger, par exemple  $\text{H}_2\text{SO}_4$  suivant la formule:



Le dépôt de chrome n'est possible que si le chrome du bain peut former un oxyde convenable, donnant le chromate de chrome  $\text{CrOH}$ ,  $\text{CrO}_4$  dont les molécules se disposent de façon orientée sur la cathode, formant ainsi un film monomoléculaire semi-perméable.

Les molécules  $\text{CrO}_3$  sont tenues à distance de la cathode par le film, au travers duquel peuvent passer les ions  $\text{H}^+$ . Le film se forme sans aucune solution de continuité, dès que l'on commence à charger la cathode et il ne peut se dissoudre que lorsque le potentiel a atteint une valeur dite potentiel de pénétration. Il n'y a pas alors destruction totale du film, mais dissolution partielle électrostatique suivant la formule I.1, puis colmatage.

La réduction du chrome hexavalent en chrome trivalent peut ainsi avoir lieu dès que le potentiel de pénétration est atteint. En même temps par l'endommagement du film, le chrome qui était passif, devient actif et la réaction  $\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$  peut surmonter la force contre électromotrice de la réaction  $\text{Cr}^{2+} \rightleftharpoons \text{Cr}$  métallique. Par la suite, si la charge de la cathode atteint le potentiel  $\text{Cr}^{2+} \rightleftharpoons \text{Cr}$  métallique, les deux réactions  $\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}$  métallique ont lieu simultanément. Le chrome trivalent formé dans la première réaction peut donc être réduit jusqu'au chrome métallique dans la seconde.

Le mécanisme de ces divers phénomènes est explicité sur les figures I-2a, I-2b, I-2c et I-2d :

- Formation de  $\text{CrOH}$ ,  $\text{CrO}_4$  (Figure I-2a),
- Formation de la couche cathodique (Figure I-2b),
- Comportement des ions  $\text{H}^+$ , lorsque l'électrode est chargée cathodiquement (Figure I-2c),
- Réalisation de la réaction I.1 (Figure I-2d).

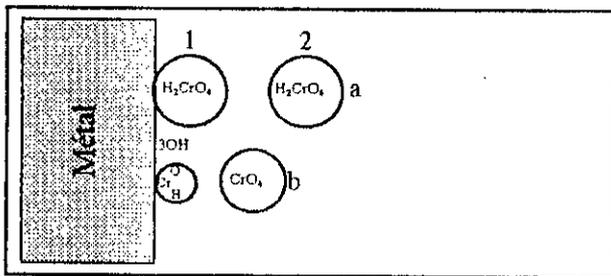


Figure I-2a: Mécanisme de déposition. Formation de  $\text{CrOH}$ ,  $\text{CrO}_4$  [1].

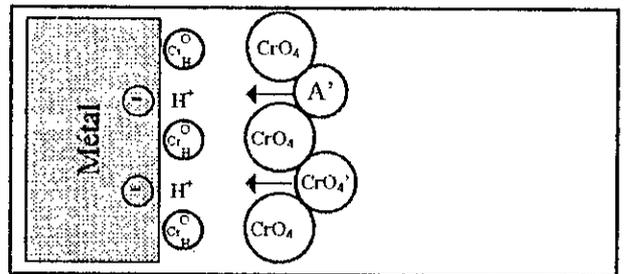


Figure I-2c: Mécanisme de déposition. Comportement des ions  $\text{H}^+$  lorsque l'électrode est chargée cathodiquement [1].

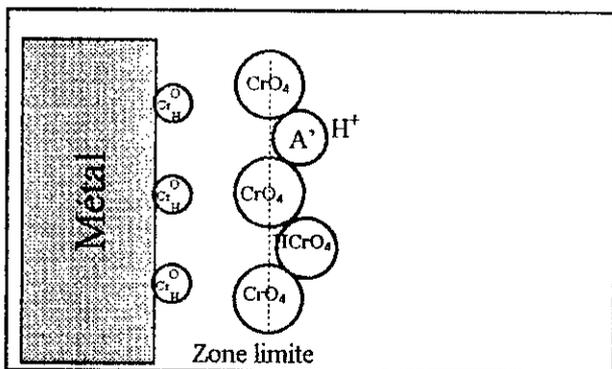


Figure I-2b: Mécanisme de déposition. Formation de la couche cathodique [1].

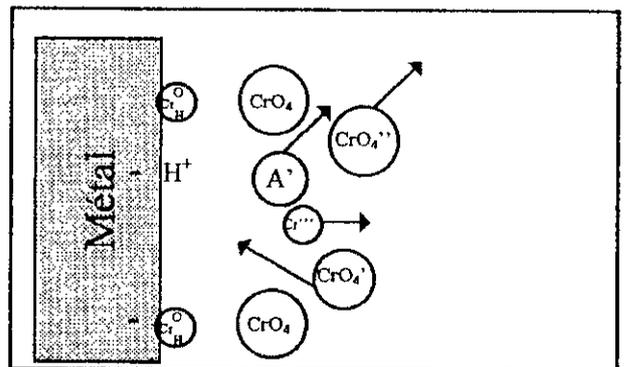


Figure I-2d: Mécanisme de déposition. Réalisation de la réaction:  $\text{CrOH}$ ,  $\text{CrO}_4 + \text{HA} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + \text{A}^- + \text{CrO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$

### 1.3- Bain électrolytique.

Les bains dilués, à faible teneur en acide chromique, ont des rendements supérieurs quant à l'énergie électrique dépensée et à la quantité de métal déposé. Les bains les plus concentrés à forte teneur en acide chromique, ont par contre une meilleure conductibilité, ce qui nécessite un voltage moindre et ils sont moins sensibles aux impuretés introduites par les bacs de lavage et aux changements de composition dus à l'entraînement de liquide à la sortie des pièces du bain. 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; les bains concentrés (400g/l de  $\text{CrO}_3$ ) étant plutôt l'apanage des bains de chromage décoratif. Le bain dilué donne un dépôt un peu plus dur, alors que le bain concentré a une pénétration un peu meilleure.

Suivant la nature du dépôt à rechercher, on peut faire varier la concentration en acide chromique. D'autres facteurs qui influent également sur la qualité du dépôt à savoir la température et le courant, sont à déterminer en fonction de la concentration en acide chromique .

L'action réductrice provoquant la formation de chrome trivalent se produit naturellement au cours du travail du bain. Le bain s'enrichit en chrome trivalent et dans des conditions normales d'exploitation, l'équilibre chrome trivalent - chrome hexavalent s'établit de lui-même. C'est le phénomène qui est connu sous le nom de vieillissement du bain, [1-2,5].

### I.1.4- Phénomènes électriques

Le dépôt de chrome et le dégagement d'hydrogène qui se produisent simultanément n'ont lieu que lorsque la tension d'une part et l'intensité d'autre part ont atteint des valeurs suffisantes [2] .

#### I.1.4.1- Courbe de polarisation cathodique

Si on porte en abscisses les potentiels d'électrodes et en ordonnées les densités de courant, on obtient le graphe de la figure I-3 [6]. Ce graphique a été obtenu avec un bain de composition 250g/l de  $\text{CrO}_3$  et 2,5 g/l de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , la température du bain étant de 45°C. La cathode étant en acier et l'anode en plomb.

Le point origine de la courbe de polarisation anodique correspond au potentiel d'une électrode à oxygène (+ 1,25 Volts). Le point origine de la courbe de polarisation cathodique correspond au potentiel d'une électrode à hydrogène (+ 0,02 Volts).

La courbe de polarisation cathodique présente des points anguleux. De H à A il n'y a ni dégagement gazeux, ni dépôt de chrome. A partir du point A, on observe un dépôt de chrome. Le potentiel de chromage est de 2,4 Volts et la densité de courant critique de 2 Ampères /dm<sup>2</sup>. L'aspect du dépôt varie avec l'augmentation de densité de courant. D'abord d'aspect laiteux, le dépôt devient brillant puis il est brûlé aux fortes densités de courant.

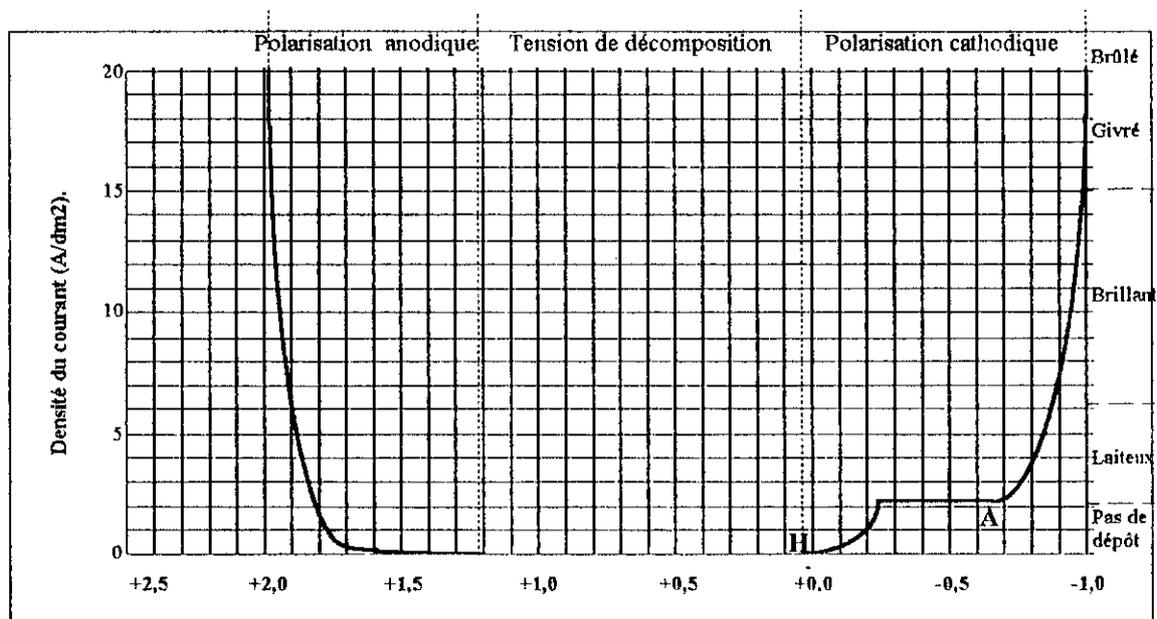


Figure I-3: Courbes de polarisation dans les dépôts électrolytiques de chrome [2].

### I.1.5- Rendement cathodique

On appelle rendement cathodique d'un bain électrolytique, le rapport entre la quantité de métal qui se dépose et celle qui théoriquement, devrait se déposer au passage d'une certaine quantité de courant.

Le rendement cathodique dépend des paramètres suivants:

- densité de courant,
- température,
- concentration en  $\text{CrO}_3$ ,
- teneur en  $\text{SO}_4^{--}$ .

#### I.1.5.1- Influence de la densité de courant et de la température.

Le rendement cathodique R est lié à la densité de courant «D» par la formule:

$$R = a \text{ Log } D + b \quad (I-2)$$

a et b étant des constantes fonction de la température [2].

La figure I-4 montre l'ensemble de ces résultats obtenus sur un bain où:

- la concentration en  $\text{CrO}_3$  est 243 g/l,
- la teneur en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  est 2,43 g/l.

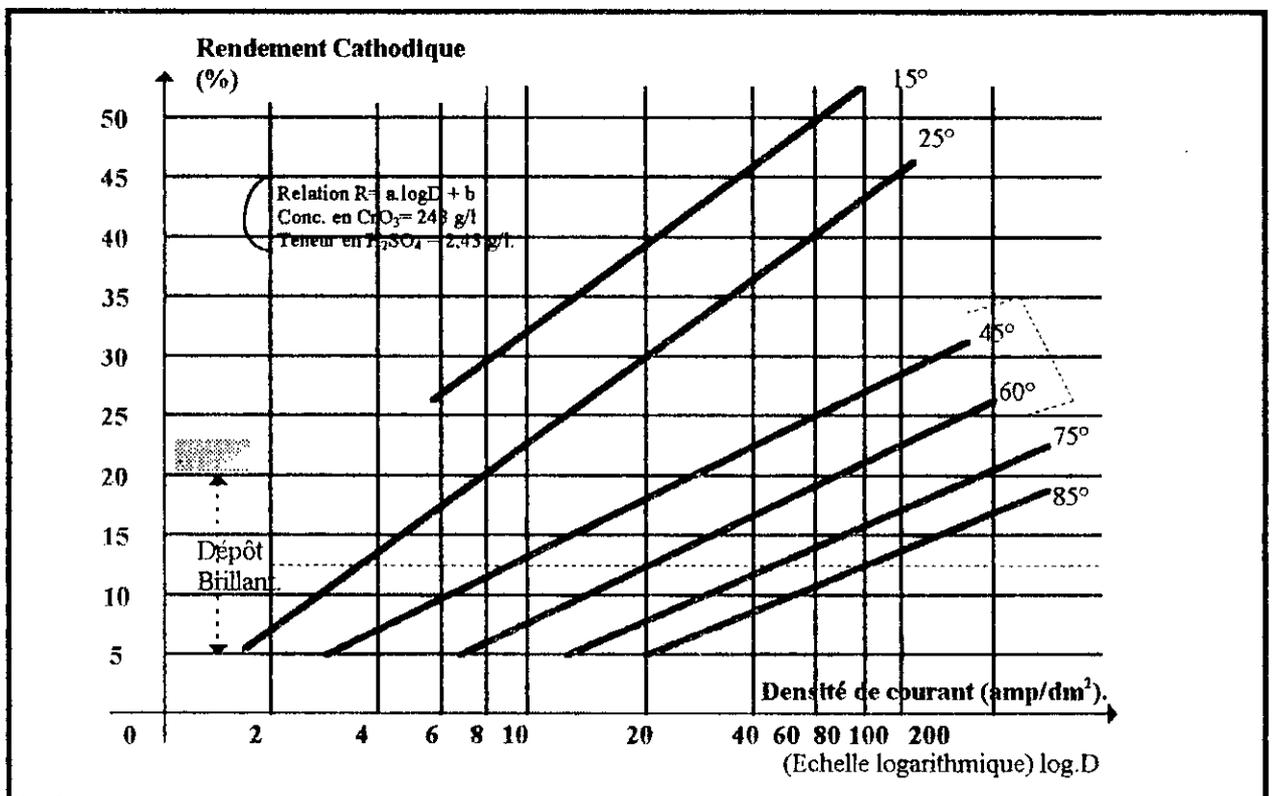


Figure I-4: Rendement cathodique en fonction des densités de courant et la température du bain [2].

Le rendement croit avec la densité de courant, mais diminue quand on élève la température du bain. Le graphique montre qu'aux températures élevées, on doit associer de fortes densités de courant. Si on travaille à températures plus basses, on doit corrélativement diminuer la densité de courant de manière à rester dans la zone de rendement cathodique donnant de bons dépôts.

I.1.5.2- Influence de la concentration en CrO<sub>3</sub>

Pour une température et une densité de courant données, le rendement cathodique est maximal pour les concentrations de 250 g/l à 300g/l de CrO<sub>3</sub> et il diminue quand cette concentration augmente [1].

La figure I-5a donne pour les températures de 25°C à 55°C les variations du rendement cathodique en fonction de la densité de courant et de la concentration en CrO<sub>3</sub>.

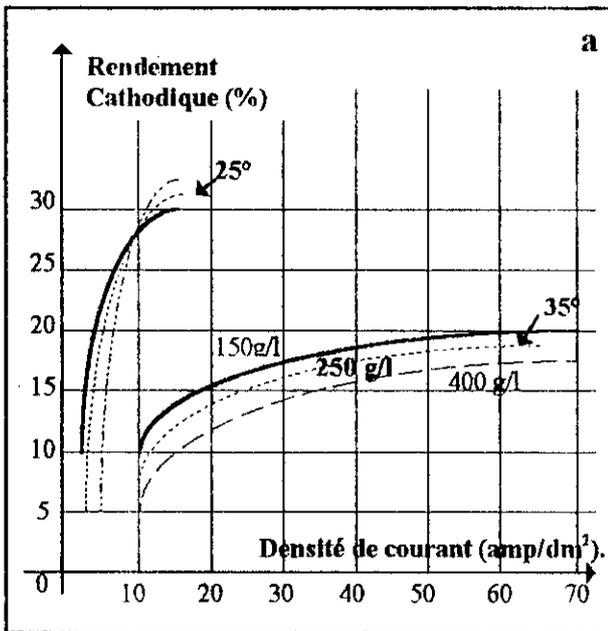


Figure I-5a : Variations générales du rendement cathodique [1].

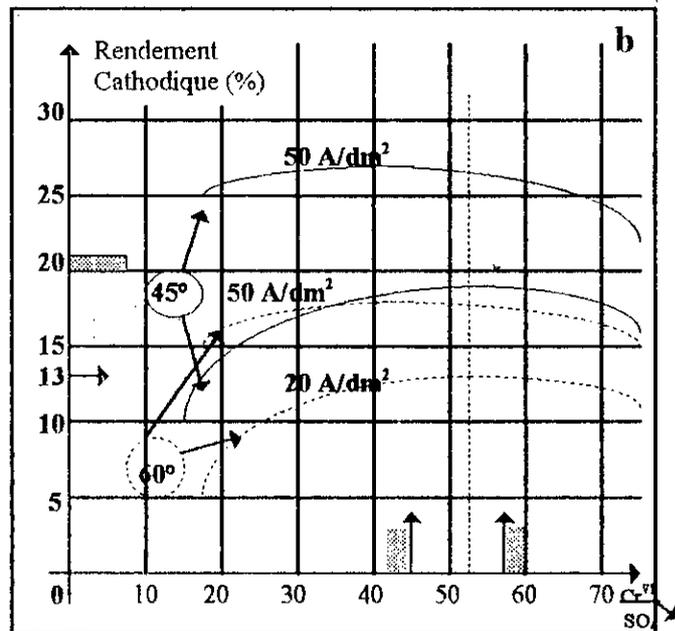


Figure I-5b : Rendement cathodique en fonction de la teneur en SO<sub>4</sub>, suivant les diverses valeurs de la densité de courant et de la température [1].

I.1.5.3- Influence de la teneur en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Pour une température et une densité de courant déterminées, le rendement cathodique est maximal aux environs du rapport :

$$\left[ \frac{(\text{CrO}_3)}{(\text{H}_2\text{SO}_4)} = 50 \right] \dots\dots\dots (I - 3)$$

Les graphiques de la figure I-5b, donnent des variations du rendement cathodique en fonction de la teneur en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> pour les températures de 45°C et 60°C dans une gamme de densité de courant allant de 20 Ampères / dm<sup>2</sup> à 50 Ampères / dm<sup>2</sup> [2].

### I.1.6- Métal de base

Le métal de base doit résister à des contraintes internes, telles que la compression, traction, torsion, ... etc et même à des efforts superficiels : pressions et chocs.

Vis-à-vis des contraintes internes, la couche de chrome n'est en effet d'aucune utilité. Vis-à-vis des efforts superficiels et plus spécialement des forces de frottement, le chrome joue son vrai rôle.

Le principe suivant doit donc régler le choix du métal de base: le chrome n'intervient que pour le frottement, les résistances à l'usure, l'abrasion et à la corrosion. Par contre, le métal de base doit satisfaire aux caractéristiques mécaniques suffisantes ( résistance, dureté, ténacité, ...etc.) pour résister aux autres efforts déterminés par l'emploi de la pièce: compression, traction, flexions, pressions, chocs, ...etc [2] .

#### I.1.6.1- Traitement thermique avant chromage

La trempe des aciers risque de provoquer des tensions dans le métal qui favorisent la formation des fissures dans l'acier même. Cette fissuration corrélative aux dégagements gazeux durant les opérations électrolytiques peut produire une détérioration du dépôt en cours d'usage.

Si la dureté de l'acier support est inférieure à 40 HRC, il n'y a pas d'effet néfaste dû aux contraintes à redouter [7].

On a préconisé pour les aciers à chromer d'utiliser la trempe à l'huile ou à l'air [8] .

Il est recommandé de ne pas chromer sans traitement thermique de revenu des aciers trempés dont les duretés sont supérieures à 57-62 HRC [9] .

#### I.1.6.2- Influence de l'état de surface du métal de base sur le dépôt.

La nature de la rugosité initiale, présente un caractère particulier du fait que le dépôt de chrome tend à accentuer 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 arêtes vives particulièrement aiguës [2,39] .

Il est possible d'obtenir un meilleur dépôt sur une surface plus rugueuse qu'une autre, si au polissage les arêtes du profil ont été arrondies [2,10] .

Le degré de polissage de la surface, peut varier de la surface finie au tour à la surface superfinie. Le polissage électrolytique se différencie des procédés de polissage mécanique en ce sens qu'il livre des surfaces propres avec des micro-profil plus adoucis. Il en résulte, une excellente préparation du métal de base pour le chromage [2]:

- il élimine les irrégularités de surfaces, évitant ainsi la formation de nodules ou bourgeons;
- il arrondit les angles vifs, diminuant de ce fait les surépaisseurs aux arêtes;
- il restitue des surfaces chimiquement propres et dénuées d'oxydes, graisses, huiles, en améliorant ainsi, la qualité structurale et l'adhérence des dépôts de chrome dur.

Une étude scientifique comparative [11] de la structure de dépôt de chrome dur sur une surface polie électrolytiquement et sur une surface polie mécaniquement a donné les résultats suivants: le polissage électrolytique conduit à une diminution notable des fissures dans le chrome.

Avec la surfinition électrolytique, chaque fissure qui traverse toute l'épaisseur du chrome est unique. Dans le cas de la finition mécanique, il est au contraire fréquent qu'une fissure d'abord simple, se ramifie en plusieurs branches, certaines d'entre elles s'étendant parallèlement à la base.

### I.1.6.3- Traitement thermique après chromage.

Les opérations électrolytiques de décapage et de chromage, donnent lieu à un violent dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène à la surface cathodique qui provoque une occlusion de gaz dans les dépôts. Un traitement thermique à 150-200°C, après chromage pendant une durée de 1 à 5 heures est éventuellement envisagé en vue d'éliminer la fragilité des pièces chromées. Cette fragilité est imputée à l'hydrogène occlus au cours des opérations de chromage [1-2].

Le traitement thermique à 400 - 500 °C ne modifie pas les caractéristiques mécaniques de l'acier de base mais diminue corrélativement la dureté du dépôt de chrome. Ce traitement thermique, améliore l'endurance à la fatigue de la pièce chromée [2].

Les courbes de la figure I-6 donnent l'amplitude du phénomène. A 200°C, 50% d'hydrogène est évacué, à 400°C, la quasi totalité de l'hydrogène a disparu. Les courbes 1 et 3 ont été obtenues après un chauffage d'une heure. La courbe 2 correspond à des mesures effectuées après trois jours de chauffage.

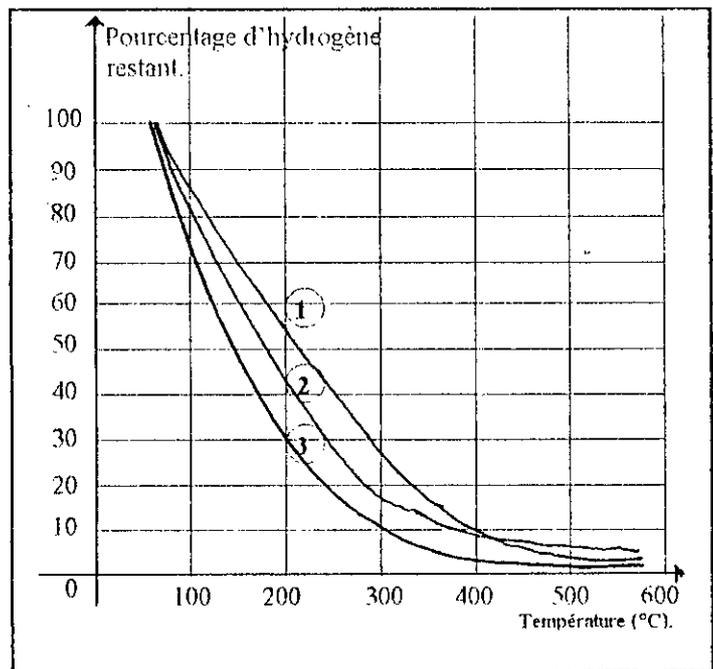


Figure I-6: Dégazage d'hydrogène par traitement thermique [2].

Pour une température de traitement donnée, il y a une durée à partir de laquelle l'hydrogène ne se dégage plus qu'en très faible quantité. Les courbes de la figure I-7 présentent ce phénomène [12].

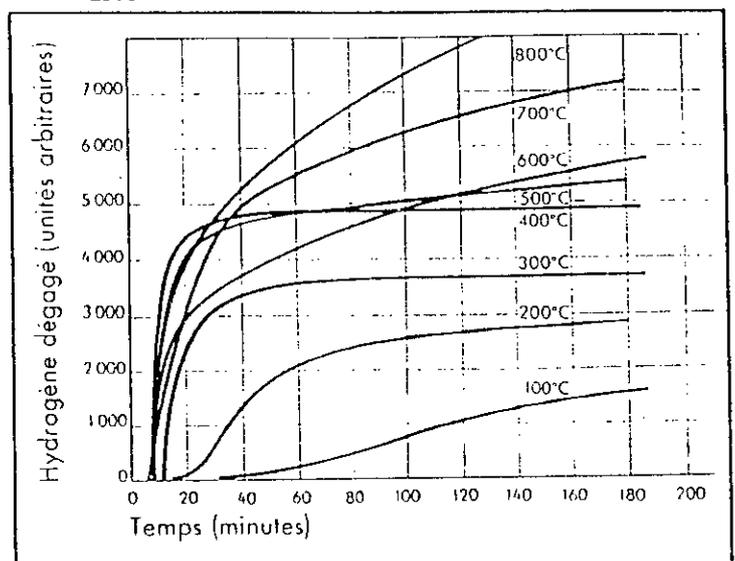


Figure I-7: Dégagement d'hydrogène en fonction du temps pour les diverses températures de traitement thermique [12].

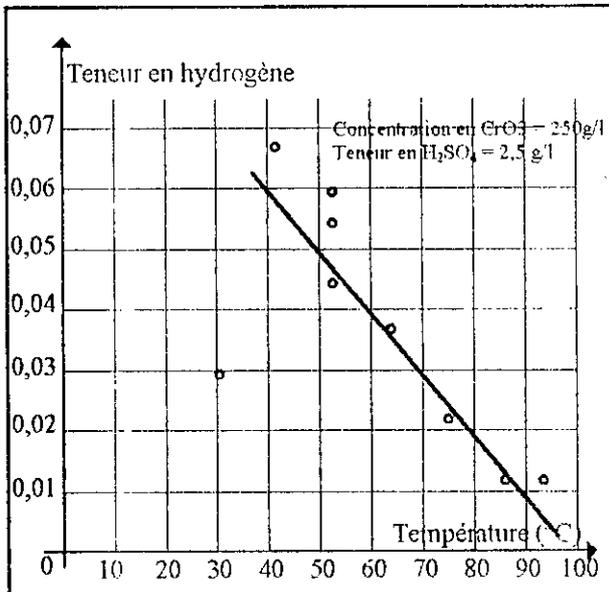
### I.1.7- Caractéristiques et propriétés des dépôts de chrome

#### I.1.7.1- Teneurs en hydrogène et oxygène

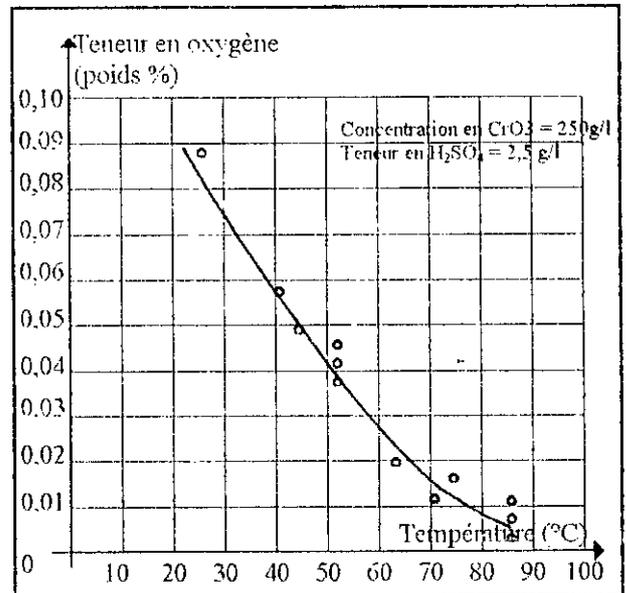
Au cours de l'électrolyse, il y a formation d'une grande quantité d'hydrogène et d'oxygène, l'hydrogène se dégageant à la cathode et l'oxygène étant libéré à l'anode.

Une faible partie d'hydrogène et d'oxygène ainsi dégagée est absorbée par la couche de chrome [13-14].

Les teneurs en hydrogène et oxygène, diminuent nettement quand la température du bain augmente (Figure I-8 et I-9).



**Figure I-8:** Teneur en hydrogène du dépôt en fonction de la température du bain [14].



**Figure I-9:** Teneur en oxygène du dépôt en fonction de la température du bain [14].

Les courbes d'équi-teneur en hydrogène et oxygène en fonction de la densité de courant et de la température (Figure I-10 et I-11), montrent que les plus hautes teneurs en hydrogène et oxygène sont obtenues à basses températures et fortes densités de courant. Tandis que les dépôts les plus pauvres en hydrogène et oxygène occlus, correspondent aux températures élevées et faibles densités de courant.

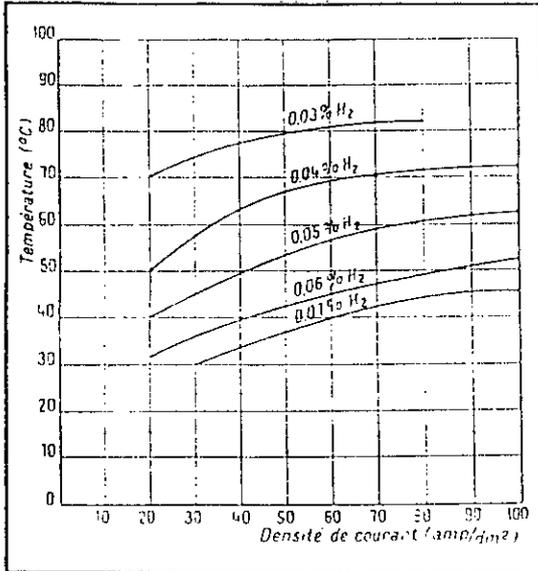


Figure I-10: Courbes d'équi-teneur en hydrogène [2].

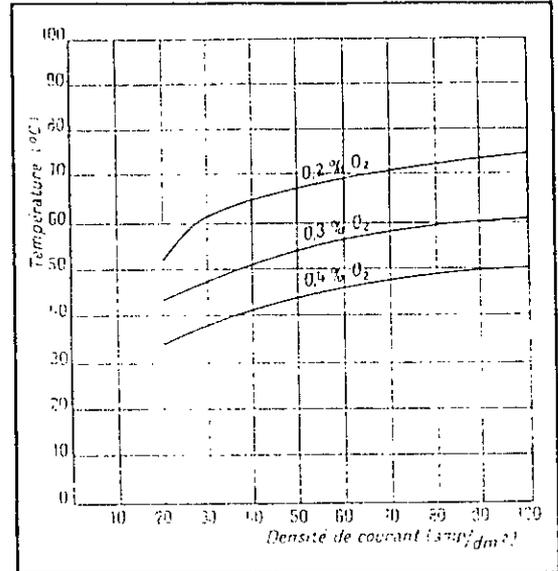


Figure I-11: Courbes d'équi-teneur en oxygène [2].

#### I.1.7.2- Tensions internes

La cause des tensions internes des dépôts électrolytiques est assez controversée [15] et il est difficile d'en justifier une cause unique, telle l'occlusion d'hydrogène. Plusieurs études ont mis en évidence quelques caractéristiques intéressantes des tensions internes des dépôts de chrome.

Les tensions internes de traction, croissent très rapidement dès le début de la déposition du chrome; elles passent par un maximum dans une zone d'épaisseur allant de 1 à 5 microns puis elles décroissent progressivement pour atteindre une valeur constante aux environs de 50 microns d'épaisseur. L'allure générale du phénomène est donnée par la figure I-12, où les courbes ont été obtenues [16] avec un bain de chromage classique "CrO<sub>3</sub>: 250 g/l - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 2,5 g/l" à la température de 55°C, pour les trois densités de courant 16, 32 et 40 A/dm<sup>2</sup>.

Les tensions internes des dépôts sont en relation directe avec leur état plus ou moins fissurés, tandis que les dépôts à faibles tensions sont très fissurés [2].

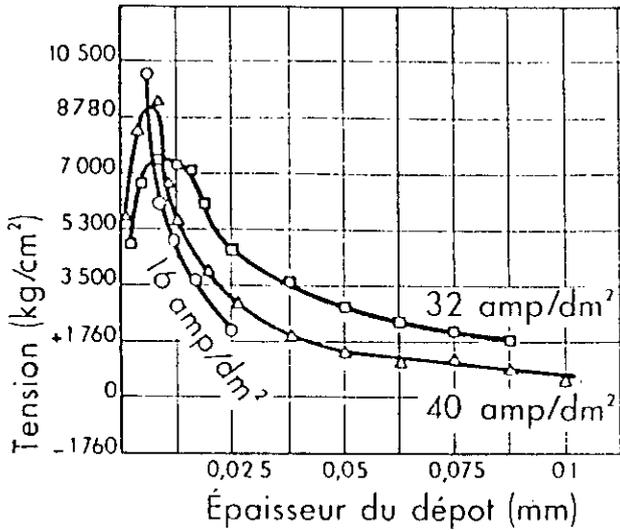


Figure I-12: Tensions internes en fonction de l'épaisseur du dépôt. Méthode du contractomètre à spirale. Bain de chromage classique:  $\text{CrO}_3 = 250\text{g/l}$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 2,5\text{ g/l}$  Température =  $55^\circ\text{C}$  [16].

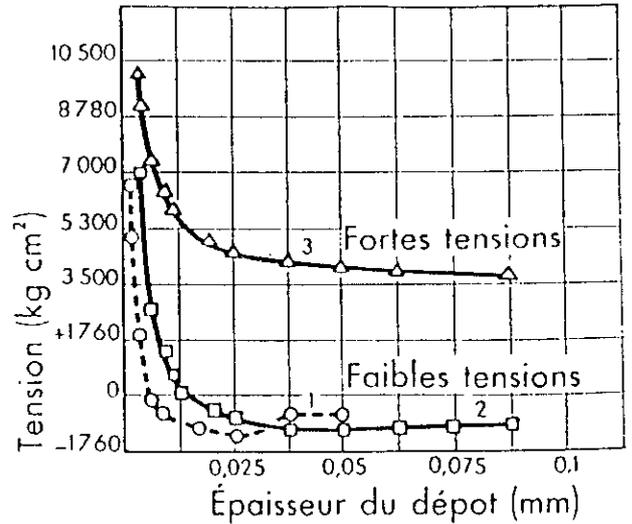


Figure I-13: Tensions internes en fonction de l'épaisseur du dépôt. Méthode du contractomètre à spirale. Bain de chrome à fortes et faibles tensions [16].

Cette corrélation est mise en évidence dans le tableau I-1, résumant une étude [16] effectuée sur des dépôts de chrome de 5 microns d'épaisseur dans une gamme très large de tensions internes grâce à des bains classiques avec, des modes opératoires différents quant aux densités de courant et température. Les tensions internes ont été mesurées au contractomètre à spirale. La fissuration a été caractérisée par le nombre de fissures comptées sur une ligne droite de 25 mm de longueur sur le dépôt.

Bain de chromage	Conditions d'électrolyse		Tensions internes (Kg/cm <sup>2</sup> ) Pour une épaisseur de 50 microns	Nombre de fissures par 25 mm de longueur.
	Température ( °C )	Densité de courant		
Chromage classique 25 g/l de $\text{CrO}_3$ 2,5 g/l de $\text{H}_2\text{SO}_4$	43	16	+ 210	1200
Chromage classique 25 g/l de $\text{CrO}_3$ 2,5 g/l de $\text{H}_2\text{SO}_4$	54	32	+ 2800	400
Chromage classique 25 g/l de $\text{CrO}_3$ 2,5 g/l de $\text{H}_2\text{SO}_4$	66	46	+ 3290	50

Tableau I-1: Corrélation entre les tensions internes et les fissures [2].

### I.1.7.3- Structure et porosités

Le dépôt de chrome présente en micrographie une structure fissurée, ces fissures ont la forme d'un réseau à mailles assez serrées et de fissures indépendantes [2].

L'examen des fissures par polissage électrolytique, montre que les discontinuités dans les dépôts de chrome sont très complexes et difficilement assimilables aux véritables fissures et criques rencontrées dans les produits métallurgiques. Sous leur forme la plus fréquente, ces fissures se présentent comme des canaux fermés, cylindriques ou plus ou moins aplatis [1].

Diverses hypothèses ont été faites quant à la nature des fissures. Elles seraient de simples fissures ne renfermant aucun constituant [17-18], elles contiendraient des inclusions: soit un hydride, soit de l'oxyde  $Cr_2O_3$  [20-21].

### I.1.7.4- Propriétés chimiques du chrome

Le chrome présente peu d'affinité pour les oxydants ou les réducteurs et il résiste à presque tous les agents chimiques: acides, bases ou sels [1-22].

L'oxydation du chrome ne se produit que vers  $800^{\circ}C$ , sous la pression atmosphérique.

### I.1.7.5- Dureté du dépôt de chrome

Le chrome déposé par électrolyse, possède une dureté de l'ordre de 900-1000 HV. Si on compare la dureté des métaux dans l'échelle de Mohs (Figure I-14), on constate la place prépondérante occupée par le chrome électrolytique parmi les métaux réputés durs.

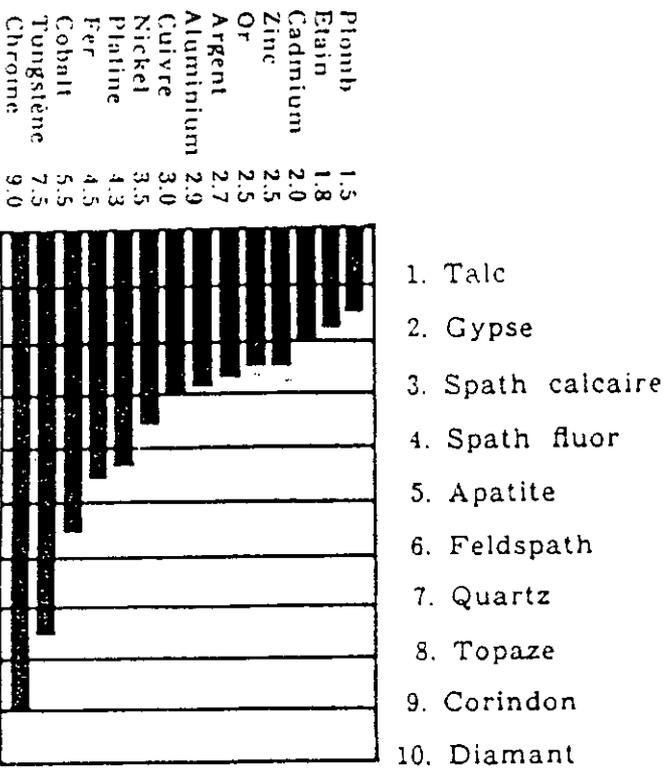


Figure I-14 : Dureté des divers métaux (Echelle de MOHS) [1].

La dureté des dépôts de chrome, dépend essentiellement des conditions de l'électrolyse et notamment de la densité de courant et de la température [2].

**a-** Influence de la densité de courant et de la température.

Les résultats des essais de GEBAUER sont traduits sur la figure I-15. Il a effectué ces mesures avec un appareil Hanemann-Zeiss avec charge de 50 g, les résultats sont exprimés en unités Vickers [2,23].

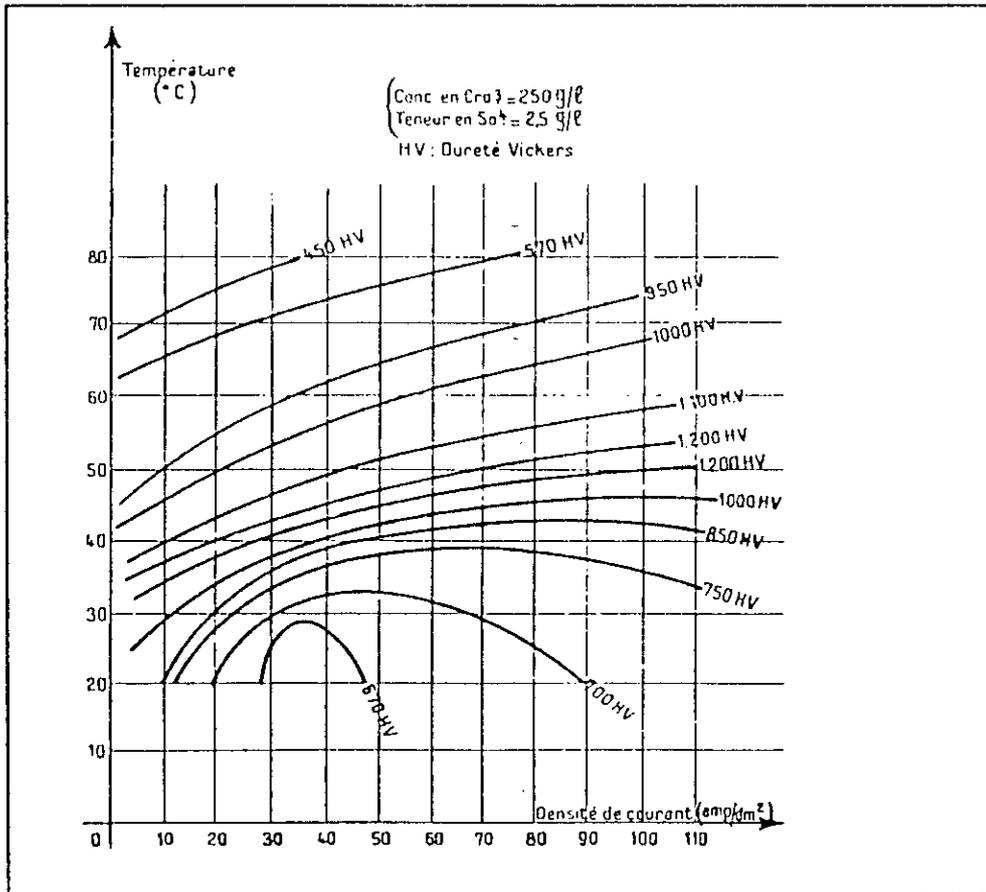


Figure I-15: Dureté en fonction de la température et de la densité de courant, courbe d'équi-dureté [2].

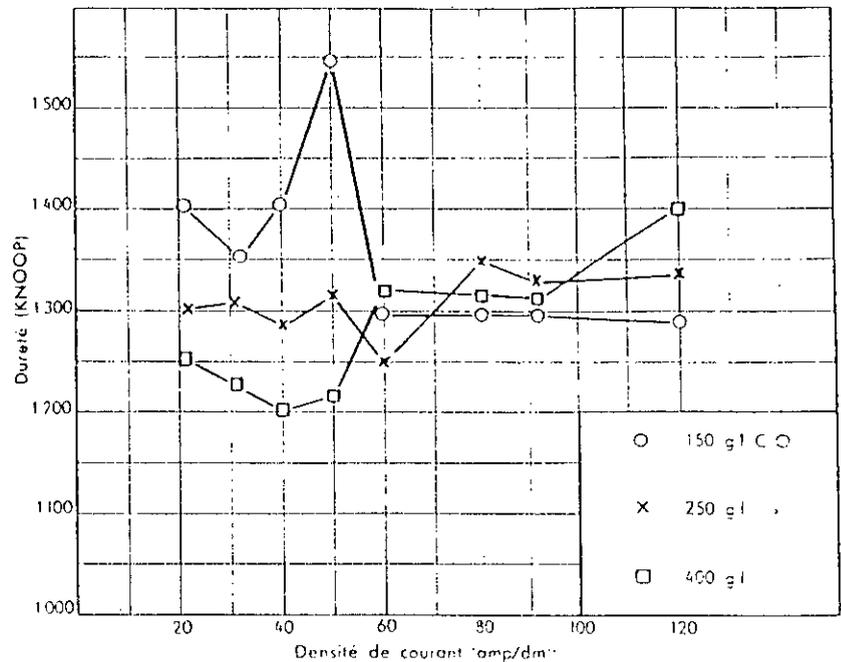
On remarque que pour une densité de courant donnée, il existe deux températures pour lesquelles on peut obtenir un dépôt de même dureté.

**b-** Influence de la concentration  $\text{CrO}_3$

L'influence de la concentration en  $\text{CrO}_3$  sur la dureté des dépôts est assez controversée. Mais une étude systématique [24] effectuée sur des bains à 150, 250 et 400 g/l  $\text{CrO}_3$  avec un rapport  $\text{CrO}_3 / \text{SO}_4 = 100/1$ , donne une allure générale du phénomène (Figure I-16).

L'augmentation de la teneur en  $\text{CrO}_3$ , diminue légèrement la dureté du dépôt, le rapport  $\text{CrO}_3 / \text{SO}_4$  demeurant constant [25].

Figure I-16 : Influence de la concentration en  $\text{CrO}_3$  sur la dureté. [2].



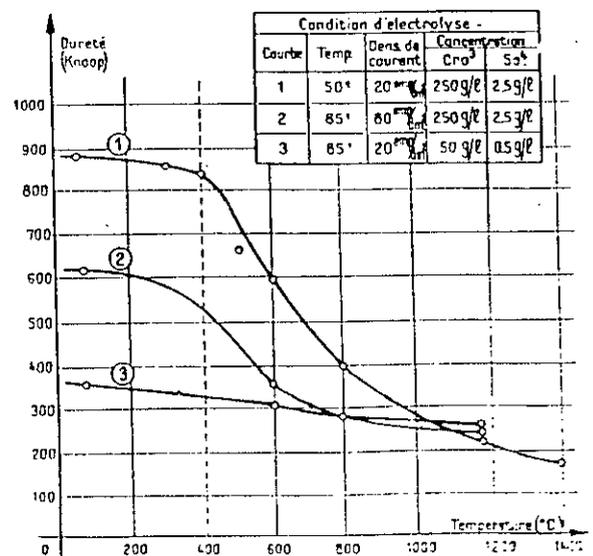
### c- Influence de la teneur en $\text{SO}_4^{2-}$

L'augmentation de la teneur en  $\text{SO}_4^{2-}$ , abaisse la dureté du dépôt [25]. Pour obtenir des dépôts convenables brillants et durs, il est nécessaire d'augmenter la densité de courant quand on augmente la teneur en acide sulfurique du bain [1].

### d- Influence du traitement thermique

La dureté des dépôts de chrome dur, diminue par recuit [1]. En règle générale, la dureté diminue très lentement à partir des températures de traitements de 200 °C jusqu'à environ 400°C. Ensuite, on observe une chute rapide de la dureté quand la température dépasse 400°C (Figure I-17)

Figure I-17: Variation de la dureté en fonction de la température de recuit [1].



## I.2- NITRURATION.

### I.2.1- Définition

La nituration est un traitement thermochimique superficiel de durcissement obtenu par enrichissement en azote des zones superficielles de l'acier ou de certaines fontes alliées [26].

L'introduction de l'azote a lieu à des températures pour lesquelles l'acier est à l'état ferritique, dans le but de faire apparaître des nitrures très dures en surface [27].

L'azote pénètre grâce à son faible diamètre à l'intérieur du réseau  $Fe_{\alpha}$  et donne une solution solide interstitielle. Il peut donner avec le Fe des composés tels que  $Fe_4N$  et  $Fe_2N$  selon les conditions de leurs formations [26]. Il y a distorsion cristalline et les plans de glissements de la structure ferritique se trouvent bloqués; les éléments d'insertion étant finement répartis, ce blocage atteint presque tous les plans de glissement et la structure des couches nitrurées semble être comparable à l'examen microscopique, à celle de la martensite. La vitesse de diffusion est faible et la vitesse de refroidissement n'a pas d'influence sur la dureté finale [41,26-27].

### I.2.2- Diagramme Fe - N et nature des couches formées au cours de la nituration.

On distingue différents domaines sur le diagramme d'équilibre Fe - N (figure I-18):

- $\alpha$ , solution solide interstitielle d'azote dans le fer,
- $\alpha + \gamma'$ , nitrure de fer  $Fe_4N$  (55,6 à 6,1 %), de structure cubique à faces centrées, de dureté élevée (environ 800 Hv),
- $\gamma' + \epsilon$ , nitrure de fer de structure hexagonale compacte de composition allant de  $Fe_3N$  à  $Fe_2N$  ( 6 à 11% )

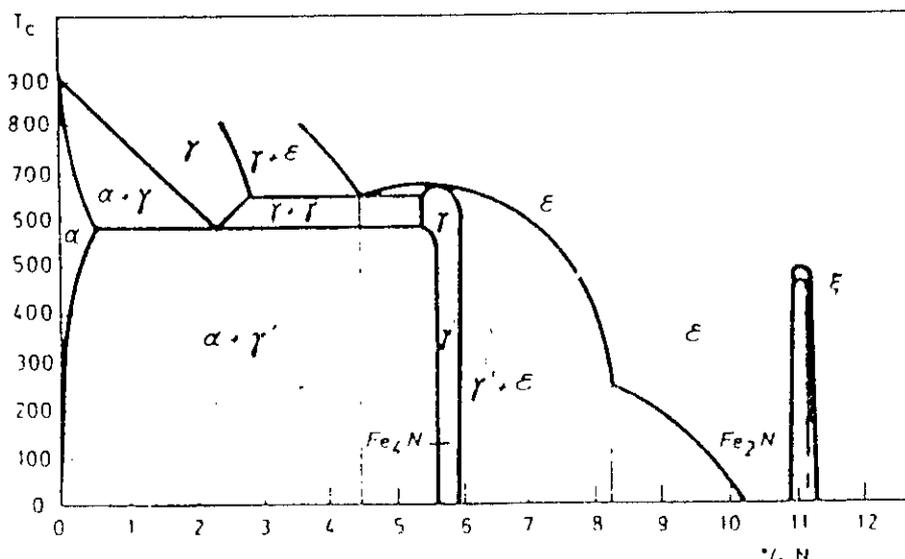


Figure I-18 : Diagramme d'équilibre Fer - Azote [28].

La figure I-19 représente le diagramme d'équilibre Fer - Azote - Carbone à 570°C et montre que le carbone favorise la formation de nitrure  $\epsilon$  [29].

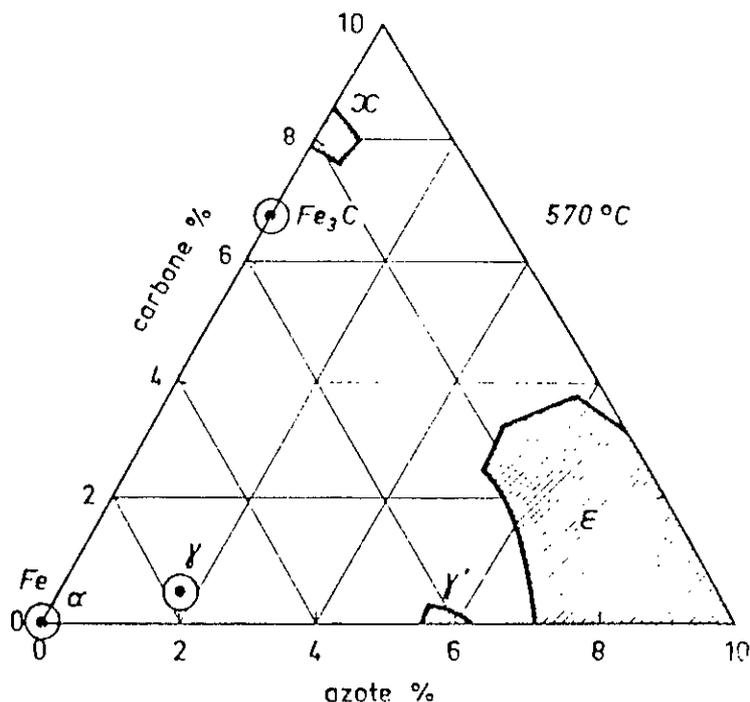


Figure I-19 : Diagramme d'équilibre Fe-N-C à 570°C [28].

### I.2.3- Rôle des éléments d'alliage

Les aciers de nitruration sont à teneur en carbone moyenne (0,3 à 0,4 %C) et contiennent des éléments nitrurigènes tels que Cr, Al, V et Mo [27].

Il peut exister en surface une couche blanche pulvérulente avec successivement: la phase  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2.3}\text{N}$ ), des nitrures  $\text{Fe}_2\text{N}$ ;  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) dont l'épaisseur varie de 10 à 50  $\mu$  suivant le procédé employé et la nuance de l'acier traité, des cristaux mixtes de carbures et de nitrures, et une pellicule décarburée par l'action de l'hydrogène[41].

Il se forme des aiguilles superficielles de  $\text{Fe}_4\text{N}$  libres. Si le Fe n'est pas allié, l'azote pénètre dans sa masse et le rend fragile sans grande augmentation de dureté. Si au contraire le métal contient les éléments Cr, Mo et Al, les processus sont modifiés. Ces éléments donnent des nitrures stables non solubles dans le  $\text{Fe}_\alpha$ , ils se forment avant que la concentration du  $\text{Fe}_\alpha$  en N donne naissance au composé  $\text{Fe}_4\text{N}$ . Les nitrures moléculaires de Cr, Mo et Al déterminent les distorsions du réseau de  $\text{Fe}_\alpha$  qui s'accompagnent d'un accroissement de volume, ce qui fait croître les contraintes internes (compressions en surface et tensions à coeur). Il en résulte un blocage du processus de diffusion [26].

### I.2.4- Autres formes de nitruration

La nitruration est en générale effectuée sur des aciers à l'état trempé et revenu entre 550 et 650°C, domaine de température situé au dessus du domaine de nitruration. Le choix de cet intervalle de température de revenu garantit la stabilité du coeur de la pièce au cours de la nitruration et effectué le plus souvent entre 520 et 560 °C [27].

Il existe d'autres moyens d'incorporer de l'azote dans les couches superficielles des métaux:

a- la nituration gazeuse conventionnelle, obtenue par dissociation d'ammoniac gazeux.

Des pénétrations intéressantes de l'azote sont enregistrées en un temps très bref (d'après F.BARBAS) [41].

b- la nituration liquide en bain de sel, Tuffride ou Ténifer qui profitant de l'azote naissant créé par l'oxydation des cyanures, permet une pénétration de 3/10 en une heure et demie [41].

c- la nituration ionique par dissociation d'azote dans un plasma [27].

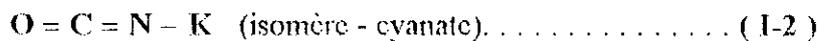
### **I.2.5- Nituration en bain de sel ( Ténifer)**

Le bain maintenu à la température de 565°C, se mène avec deux sels apportant l'un le cyanure de potassium et l'autre le cyanate KCNO. La conduite du bain consiste à maintenir la teneur en cyanure entre 50 et 55%, la teneur en cyanate aux environs de 35% et à insuffler des bulles d'air au fond du creuset.

Grâce à cet apport d'oxygène, le cyanure donne le cyanate:



isomère plus instable et incomparablement plus actif que la forme plus courante:



La décomposition des cyanates formés par oxydation de cyanures:-



La présence simultanée d'azote, de carbone, d'oxygène et éventuellement de soufre dans certains procédés, accélère la cinétique de nituration: une couche de 20µm peut être alors obtenue en 1h30 vers 570°C [29].

## CHAPITRE II

## II- THEORIE GENERALE DU FROTTEMENT ET DE L'USURE.

### II.1- INTRODUCTION.

Le frottement, c'est d'abord le contact de deux surfaces et ensuite le déplacement relatif de ces dernières. Toute étude physico-chimique fera donc intervenir les caractéristiques superficielles sans perdre de vue celles des matériaux sous-jacents.

Le mécanisme de frottement métallique a été tout d'abord expliqué par BOWDEN et TABOR [32] qui ont étudié d'une part, la surface de contact réelle entre deux solides chargés, et d'autre part le rôle du cisaillement et du labourage des jonctions de l'interface quand l'un des solides se déplace par rapport à l'autre.

L'usure est souvent considérée comme une conséquence directe du frottement, elle se traduit par un enlèvement de matière consécutif. Elle est généralement dommageable mais peut aussi être bénéfique, par exemple lors du rodage. L'usure est un phénomène complexe, vu le nombre de paramètres qui interviennent en même temps si bien qu'il est impossible d'isoler un paramètre pour l'étudier à part. C'est en outre, un phénomène qui fait intervenir à la fois la mécanique et les propriétés des matériaux.

De nombreuses classifications d'usure existent depuis longtemps [33-34], les principales sont :

- l'usure adhésive
- l'usure abrasive
- l'usure corrosive
- l'usure par fatigue

Les règles déduites de l'étude scientifique du frottement et de l'usure ne sont pas toujours appliquées [35]. L'accroissement continu des puissances massiques qui se traduit par des augmentations de vitesses, de charges, de contraintes et de températures, oblige à considérer de plus en plus l'aspect tribotechnique du problème posé.

La tribotechnique comprend l'étude du frottement et celle de l'usure, ainsi que la recherche des minima de ces deux facteurs dans le cas des solides soumis à des déformations élastiques. Selon les conditions des contacts et la nature des lubrifiants, il y aura des possibilités de contact entre les aspérités superficielles, affectant ainsi, le coefficient de frottement qui limitera son influence à l'usure simple ou entraînera l'accident de surface.

Bien que les mécanismes d'usure soient imparfaitement connus, on sait que les deux formes principales d'usure sont l'usure par adhésion et l'usure par abrasion.

## II.2- PHENOMENES DE BASE EN MECANIQUE DES SURFACES

### II.2.1- Energie de surface

La surface est le plus important défaut que puisse présenter un cristal parfait. On peut la caractériser par le travail nécessaire pour créer un tel défaut à partir d'un cristal parfait [36]. L'énergie superficielle ainsi définie, rend compte en particulier des liaisons libérées en surface par l'ouverture de celle-ci. On peut écrire:

$$dW = - \delta dA \quad (II-1)$$

$dW$  étant le travail nécessaire à l'accroissement de surface  $dA$ ,  $\delta$  étant la tension superficielle s'opposant à cet accroissement.

L'énergie libre de GIBBS est donnée classiquement par:

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (II - 2)$$

La température, le volume et la pression étant constants, on peut écrire  $dG = \delta dA$  et si  $\delta$  est indépendante de  $A$ , on aura:

$$G = \delta.A \quad (II - 3)$$

L'énergie de surface est alors numériquement égale à la tension superficielle. Cette approximation a cependant été utilisée pour la plupart des mesures d'énergie de surface [36].

On peut résumer ici les propriétés de l'énergie superficielle:

- elle est numériquement proche de la tension superficielle
- elle est indépendante de l'orientation cristalline et du plan cristallin considéré.
- elle est sensible aux impuretés du solide [36].

### II.2.2- Géométrie de surface

Comme chaque surface présente de nombreuses irrégularités, donnant une rugosité moyenne qui peut être importante, même pour un poli spéculaire, et des défauts de forme plus au moins marqués, le contact entre deux solides n'intéresse pas leurs surfaces entières. Celui-ci concerne les éléments discrets de ces surfaces (figure II-1) dont les aires cumulées forment la surface réelle de contact.

L'existence de ces contacts discrets, modifie sensiblement par exemple les champs de contrainte dans la zone de contact.

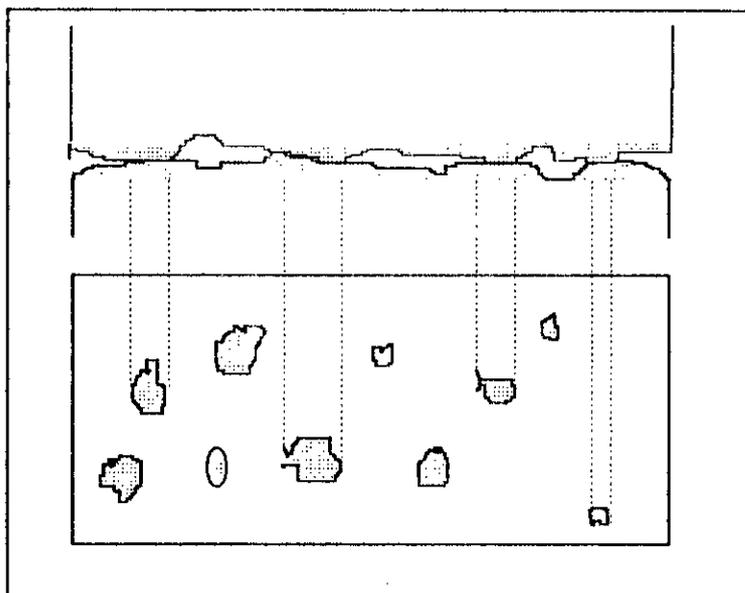


Figure II-1 : Contact réel entre deux surfaces [37].

### II.2.3- Composition de surface

Une surface métallique comprend au moins une couche de métal écroui, une couche d'oxyde et une couche absorbée, formée par exemple de vapeur d'eau ou d'hydrocarbures condensés et adsorbés physiquement sur la surface (figure II-2).

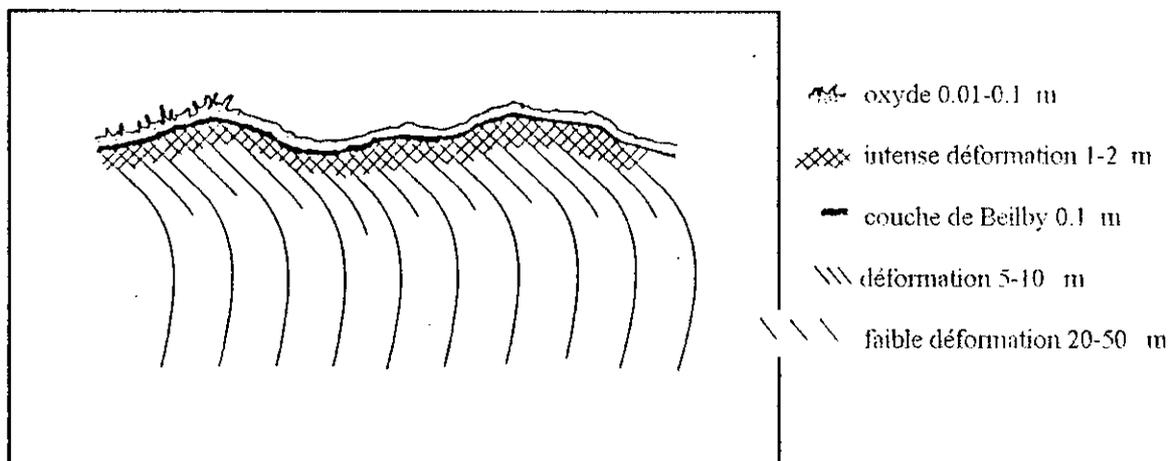


Figure II-2 : Schéma d'une surface métallique polie montrant la topographie et la structure en surface [38].

## II.2.4- Contact de deux surfaces

Le contact de deux surfaces peut se décrire de deux manières différentes, mais complémentaires. La première fait intervenir les énergies superficielles, la seconde des processus mécaniques.

### a - Le contact du point de vue mécanique:

Amener deux surfaces en contact avec une certaine charge, c'est déformer ces deux surfaces. La déformation se propage sur une certaine profondeur et peut atteindre le domaine plastique.

Le contact réel ne se fait qu'au sommet des aspérités qui encaissent donc toute la charge appliquée et atteignent le domaine plastique du matériau. L'aire réelle de contact est bien plus petite que l'aire apparente, même calculée [39].

b - Deux corps pressés l'un contre l'autre ne se séparent que si une force de signe opposé leur est appliquée. En effet, mettre deux corps en contact, c'est aussi créer une interface par l'annihilation de deux surfaces. Chacune de ces entités étant caractérisée par une énergie libre, le travail d'adhésion peut s'écrire [40]:

$$W_{ab} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (II - 4)$$

Ce calcul rend compte des phénomènes d'adhésion mais aussi de la compatibilité. En effet, deux solides très différents auront une interface fortement désordonnée:  $\gamma_{ab}$  sera élevée et  $W_{ab}$  faible.

## II.3- ASSOCIATION DES ATOMES ET LEURS CONSEQUENCES POUR LE FROTTEMENT

Lorsque deux corps de structure différente, vont frotter l'un contre l'autre, les conditions de température et de pression vont amener des atomes superficiels à s'associer ; selon la nature du couple de frottement, nous obtiendrons à l'interface toute la gamme possible qui va des composés chimiques aux mélanges mécaniques.

### II.3.1- Association chimique des atomes.

Deux atomes de corps différents, peuvent s'associer pour former une molécule stable, avec un arrangement atomique qui présente un niveau d'énergie minimale. Les métaux sont généralement électropositifs et peuvent entrer en combinaison pour donner des composés métalliques ou intermétalliques fragiles favorisant la résistance au grippage. Certains corps électronégatifs à six ou sept électrons de valence sont susceptibles de se combiner aux métaux: l'oxygène qui existe sous forme d'un film adsorbé, ou le soufre qui, en se diffusant dans la couche superficielle améliore la tenue de cette couche en frottement.

En réalité, l'interface d'un couple de frottement n'est pas une solution de continuité ou une zone d'équilibre instable clivant un arrangement atomique car les pièces sont couvertes d'un film d'oxygène adsorbé qui fait abaisser le coefficient de frottement [41].

## II.4- APPROCHE GLOBALE DU FROTTEMENT ET D'USURE

Un tribosystème est composé de trois corps [42-46]. Le premier et le second corps sont les antagonistes, formés de leurs volumes et de leurs couches superficielles créés par leur frottement (les couches d'oxydes par exemple). Le troisième est l'interface entre le premier et le deuxième corps: Il est composé de transfert de débris, de lubrifiants, etc. ...

En terme de masse, les échanges dans un tribosystème sont schématisés sur la figure II-3 [42] avec:

- (I) formation des particules
- (II) gain de matière dû au transfert de matière de l'interface vers les corps 1 et 2
- transfert direct entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup>
- (IV) éjection des débris hors du contact:

L'usure d'un corps, peut alors s'écrire sous la forme :

$$W = -W_I + W_{II} + W_{III} \quad \text{--- (II - 5)}$$

Le signe + correspond à un gain de matière

Le signe - correspond à une perte de matière

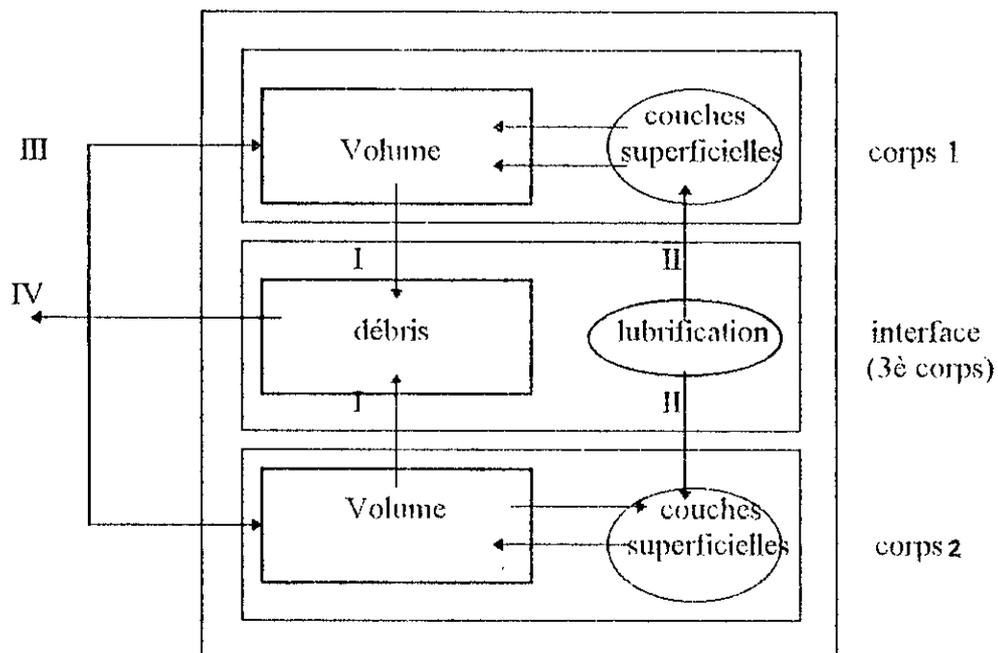


Figure II-3 : Tribosystème

En terme de transfert d'énergie, l'approche est basée sur l'observation suivante: durant un processus tribologique, l'énergie introduite dans le tribosystème est supérieure à celle qui en sort. La différence entre ces deux énergies est l'énergie de frottement qui intervient dans les trois parties du système. Elle peut être divisée en plusieurs termes correspondant à différents modes d'absorption de l'énergie par les matériaux (figure II-4) [32].

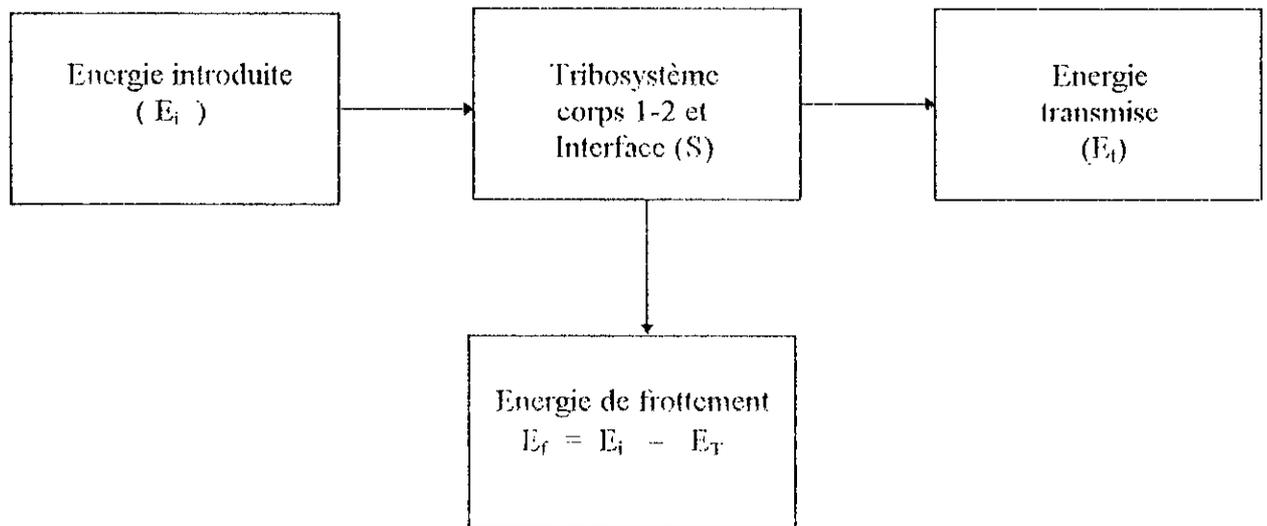


Figure II-4 : Energie dans un tribosystème

#### II.4.1- Création et piégeage de débris d'usure

La création des débris, débute quand le matériau n'accomode plus les déformations. Play [47] a établi un modèle bidimensionnel où la formation des débris d'usure s'effectue par remplissage des creux, formés par la rugosité de la surface qui sont vides au départ et par les débris arrachés aux surfaces ( figure II-5). Les premières particules se détachant des massifs sont piégées dans le contact.

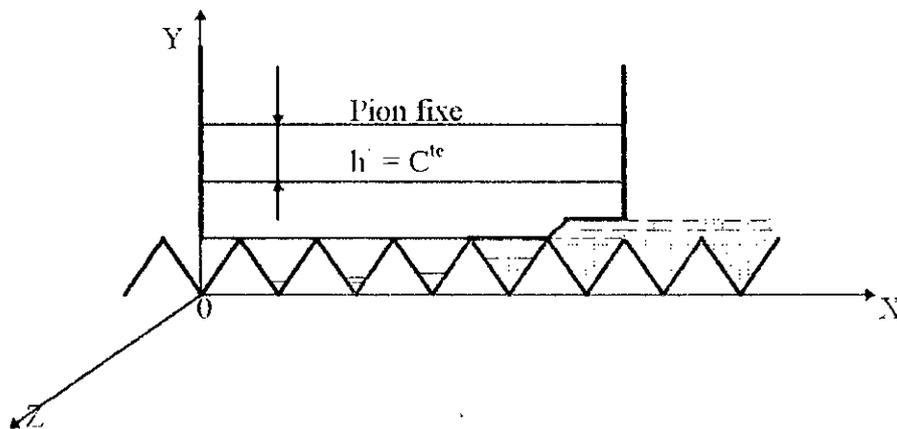


Figure II-5: Formation des troisièmes corps [47].

#### II.4.2- Modèle à trois corps

On admet aujourd'hui que le contact n'est jamais à deux corps et qu'il n'est pas possible de décrire ou de prévoir la réalité en se limitant à un modèle à deux corps.

Le troisième corps peut modifier la distribution des efforts tangentiels et transforme la distribution des efforts normaux (figure II-6).

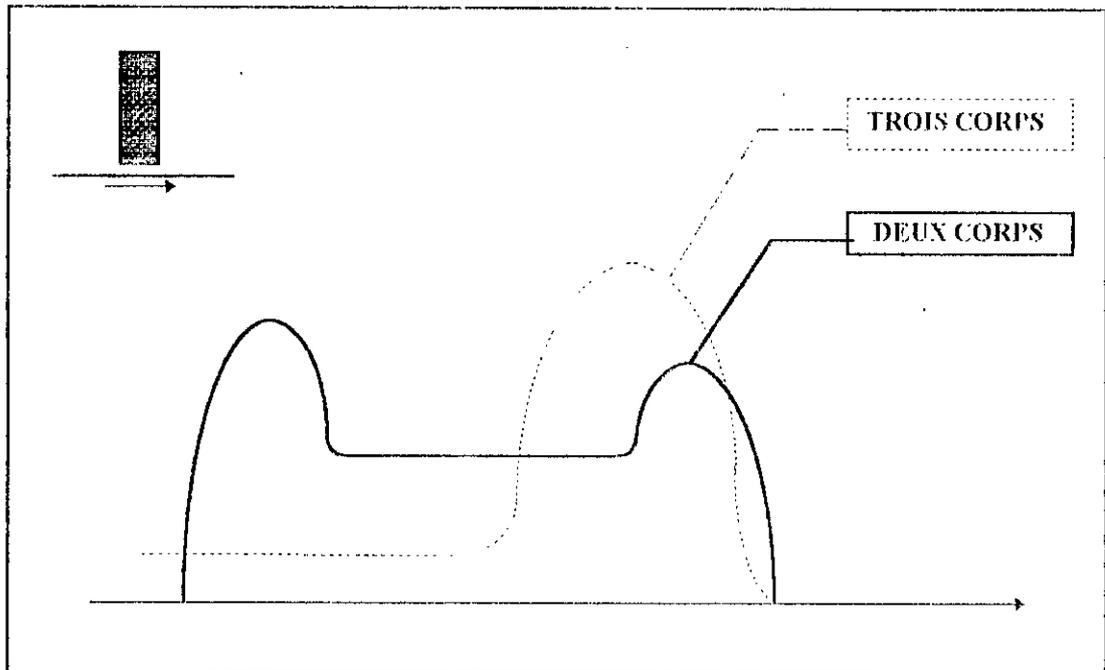


Figure II-6 : Effet du troisième corps (craie) sur la distribution des contraintes normales [48].

Les débris d'usure piégés à l'intérieur du contact, forment un troisième corps qui modifie l'interaction entre premiers corps et dépend du temps pendant lequel les particules sont actives, c'est à dire, piégées dans le contact.

#### II.4.3- Comportement du troisième corps

Le comportement du troisième corps au cours du frottement, dépend de plusieurs paramètres: essentiellement, de sa dureté et de son maintien à la surface (adhérence). Le maintien des débris dans le contact est gouverné d'une part par la géométrie du contact, c'est à dire sa capacité à retenir les débris, et d'autre part leur adhérence; plus les particules adhèrent aux premiers corps et aussi entre elles, moins elles seront chassées du contact [32].

Le comportement dépend aussi de la rhéologie du troisième corps qui est liée plus particulièrement à l'aptitude des débris à s'agglomérer entre eux et à former des couches interfaciales continues suffisamment résistantes pour créer une barrière efficace entre les surfaces.

#### II.4.4- Influence des propriétés mécaniques

L'influence de la dureté et de la ténacité dépend du type de contrainte appliquée à la surface du matériau [32].

Lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface est prédominante (ex: usure adhésive et usure abrasive), la dureté est généralement le facteur le plus important. Dans le cas où la pression normale est plus élevée (érosion à grande vitesse, érosion par cavitation), l'effet de la ténacité est plus important [49].

Pour l'usure adhésive, comme pour l'usure abrasive, la résistance à l'usure des matériaux est en effet gouvernée par la dureté plus que par tout autre paramètre. Dans le modèle d'ARCHAD, la dureté apparaît directement comme un facteur important [50].

$$V = C \frac{P}{H} \quad (I-6)$$

C : Constante d'usure  
P : Charge  
H : Dureté

Cette équation, montre que l'usure est proportionnelle à la charge et inversement proportionnelle à la dureté, sachant que la dureté est liée à l'aire réelle de contact par la relation:

$$A_r = P / H \quad (I-7)$$

## II.5- COMPORTEMENT A L'USURE ET AU FROTTEMENT DU CHROME DUR.

### II.5.1- Résistance à l'usure.

La résistance à l'usure est la qualité pratique fondamentale des dépôts de chrome dur [1].

Divers dispositifs expérimentaux ont été conçus et ont permis de relier le phénomène d'usure d'une part à la dureté du chrome, qui est la qualité repérable du dépôt s'apparentant le plus à la résistance à l'usure, d'autre part aux divers facteurs de l'électrolyse. La figure II-7, représente les courbes d'équi-résistance à l'usure dans le système de coordonnées : densité de courant, température; pour l'essai d'usure par abrasion de WAHL-GEBAUER [1].

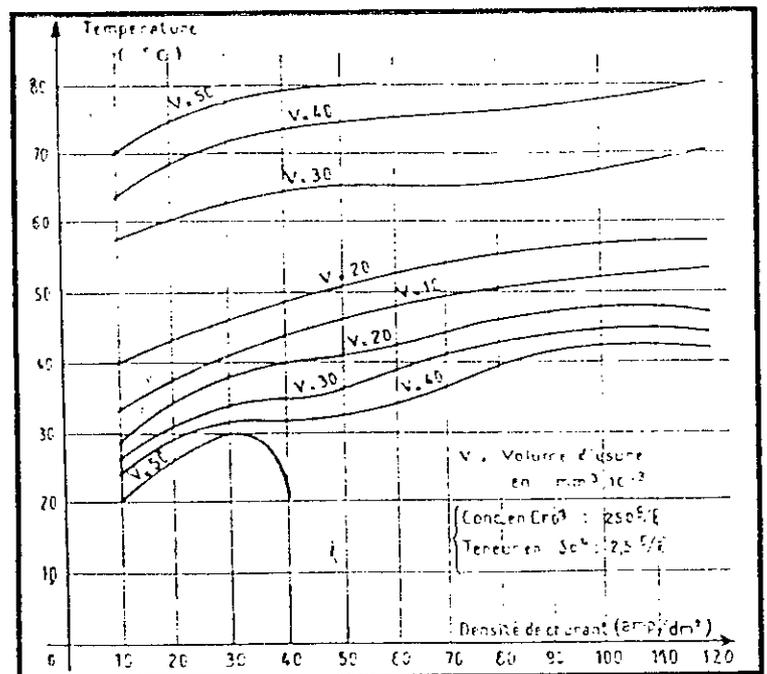


Figure II-7 : Résistance à l'usure en fonction de la densité de courant et de la température. Courbes d'équi-résistance à l'usure [1].

La figure II-8, donne les résultats observés par PIERSON. On y constate qu'à une température donnée du bain de chromage, correspond une densité de courant assurant un dépôt de résistance à l'usure maximale.

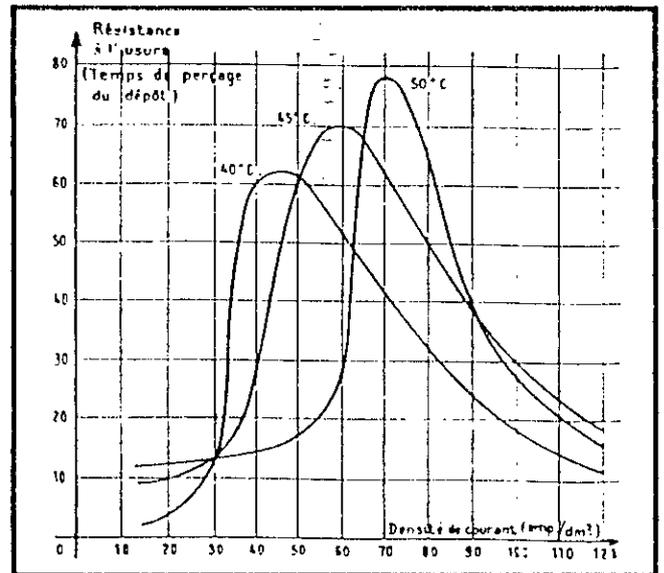


Figure II-8: Influence de la densité de courant sur la résistance à l'usure [2].

### II.5.2- Relation entre la résistance à l'usure et la dureté.

Les essais d'usure ont toujours été réalisés en parallèle avec les essais de dureté. Dans l'essai de résistance à l'abrasion de HOSDOWICH [2], le coefficient d'usure a été comparé aux chiffres de dureté par rayure. Les résultats représentés sur la figure II-9, montrent que pour des dépôts obtenus jusqu'aux densités de courant de 60 A/dm<sup>2</sup>, les variations de la dureté et de la résistance à l'usure sont analogues. A partir de 60 A/dm<sup>2</sup>, la dureté continue à croître tandis que le coefficient de résistance à l'usure diminue.

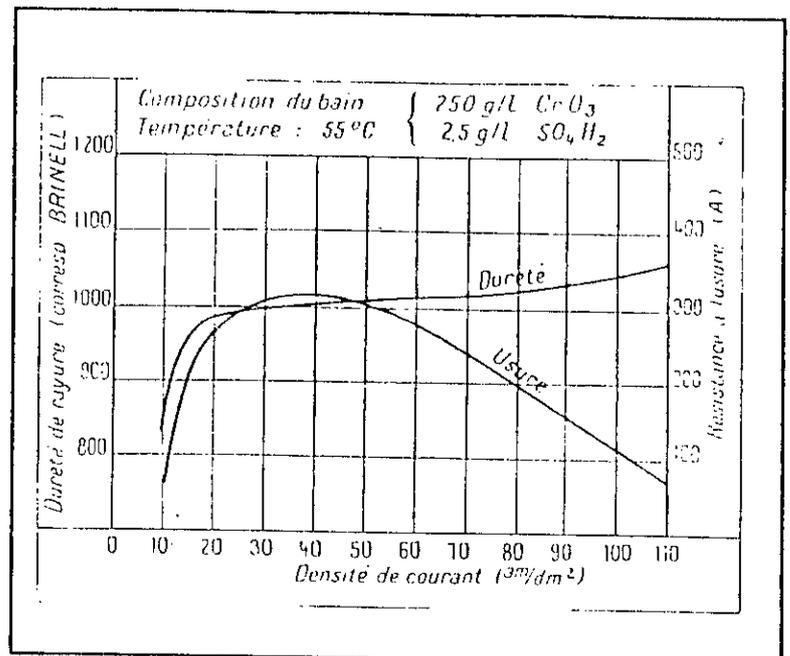


Figure II-9 : Dureté par rayure et résistance à l'usure par abrasion[2].

### II.5.3- Frottement

Le chrome possède un faible coefficient de frottement, qui est en fait un bon métal pour les frottements dans les usages industriels et notamment à sec (calibres). La figure II-10, schématise les divers coefficients de frottement au repos de certains matériaux.

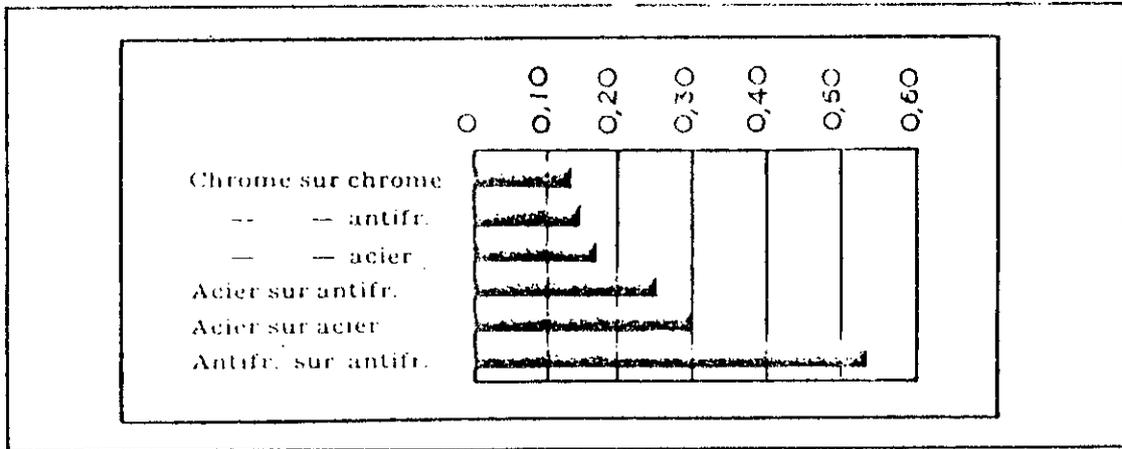


Figure II-10 : Coefficients de frottement ( au repos) de matériaux couramment utilisés [1].

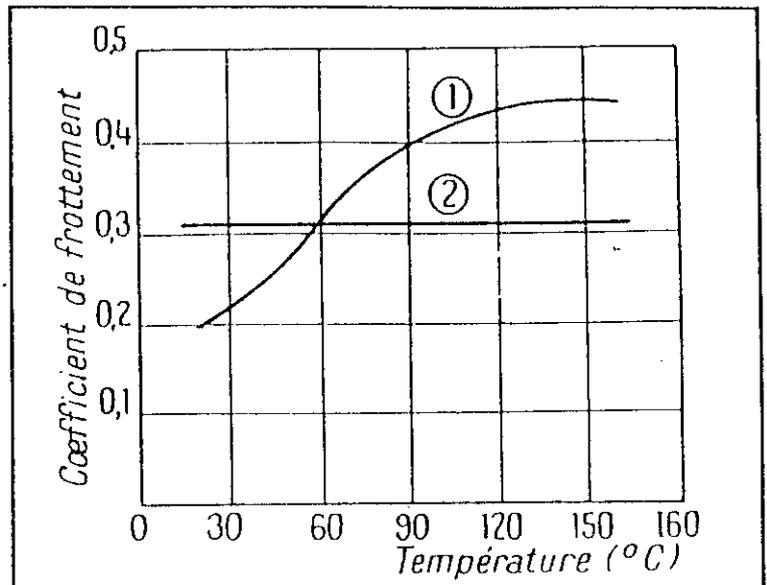
### 1- Influence de divers paramètres sur le coefficient de frottement.

#### 1.a- Influence de la température.

L'élévation de la température augmente les coefficients de frottement du chrome. Les essais de frottement sans lubrification de chrome sur fonte [51] ont donné de résultats représentés sur la figure II-11.

Figure II-11: Influence de la température sur le coefficient de frottement [51].

- 1- Chrome sur fonte
- 2- Acier doux sur fonte

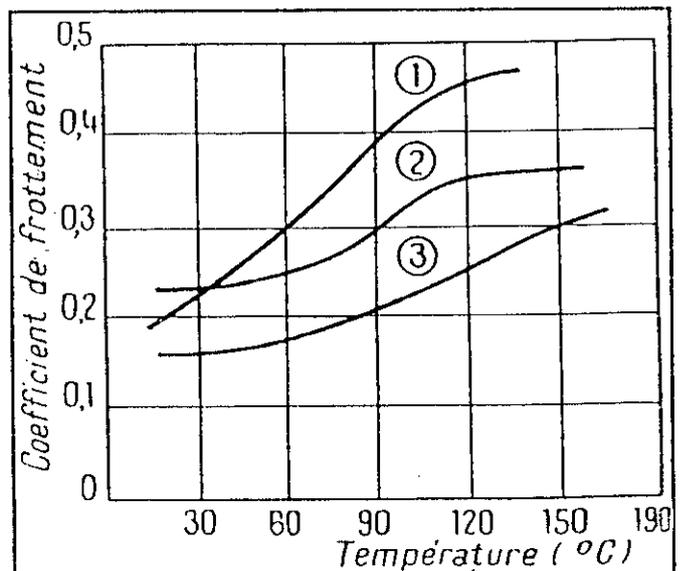


#### 1.b- Influence de l'état de surface

Des essais ont été effectués [51] avec des surfaces chromées de rugosités moyennes respectives de 0,05, 0,6 et 1,3  $\mu\text{m}$  frottant sur une glissière en fonte. On constate (Fig. II-12) que les coefficients de frottement sont différents et que l'influence de la température est moins accentuée avec des surfaces les plus rugueuses.

Figure II-12: Influence de l'état de surface sur le coefficient de frottement [51]. Rugosité moyenne:

- 1- 0,05  $\mu\text{m}$
- 2- 0,60  $\mu\text{m}$
- 3- 1,30  $\mu\text{m}$



## 2- Comportement structural du chrome dans l'usure par frottement de glissement à sec.

Dans le cas le plus sévère des frottements à sec avec un métal de base présentant le maximum de dilatation thermique (alliages d'aluminium), la structure naturelle fissurée du chrome ne se traduit pas par des usures prématurées en surface ou des décollements à l'interface. Au contraire, tout se passe comme si cette structure fissurée, semblable à une mosaïque, donnait au dépôt une certaine souplesse devant les efforts subis au cours du frottement abrasif [52].

# TROISIEME CHAPITRE

*Conception et réalisation  
d'une cellule électrolytique*

## CHAPITRE III

### CONCEPTION ET REALISATION D'UNE CELLULE ELECTROLYTIQUE

L'installation d'électrodéposition du chrome dur est constituée essentiellement des éléments suivants:

- Un redresseur de courant électrique.
- Une cuve.
- Des anodes en alliage de plomb.
- Des accessoires de servitude.

Les cuves utilisées pour l'électrodéposition de chrome dur sont fabriquées en acier doux revêtu d'un matériau résistant à la corrosion (par l'acide chromique) tels que les alliages Pb-Sb, Pb-Sn, les P.V.C et les composites fibres de verre-polyester ou verre-époxyde. Par leurs caractéristiques d'isolant électrique, les réfractaires résistants aux acides ont l'avantage de réduire la perte du courant mais, si la solution contient des fluorures, ce type de revêtement est bon seulement pour une courte durée [5].

#### III.1- MODES DE CHAUFFAGE

Il existe plusieurs façons de chauffer les cuves, les plus rentables sont:

1°/ *Chaudières*: la chaudière fournit ses calories à un véhicule qui peut être l'eau, la vapeur d'eau, ou une huile spéciale (Thermofluide) qui circulera dans les serpentins ou des radioplaques, situés dans les cuves à chauffer.

2°/ *Résistance électrique (Thermoplongeurs)*: elles sont immergées dans le liquide à chauffer. Ces thermoplongeurs sont enveloppés de Tantale, Titane ou alliage de plomb mais les mieux adaptés au chauffage du bain d'acide chromique ce sont les thermoplongeurs enveloppés avec du quartz [5].

Dans tous les cas, une régulation précise peut se faire à l'aide de thermostat immergé dans le bain.

#### III.2- DETERMINATION DE LA CHALEUR NECESSAIRE POUR UN ELECTRODEPOT.

La quantité de chaleur nécessaires  $Q$  pour porter  $V$  litres de bain d'une chaleur spécifique  $C_p$  et de densité  $D$ , de la température  $T_0$  à  $T_1$  avec  $T = T_1 - T_0$  est donnée par la relation suivante:

$$Q_{[K \text{ Cal}]} = V_{[Litre]} \times T_{[C^\circ]} \times D \times C_p \quad \text{--- (III.1)}$$

$V$  : Volume à chauffer (Litre),

$T$  : Différence de température en  $C^\circ$  entre la température de départ  $T_0$  et celle à atteindre  $T_1$ ,

$D$  : Poids spécifique (densité) de la solution,

$C_p$ : Chaleur spécifique de la solution (cas du bain de chromage  $C_p = 1,00$ ).

La quantité horaire sera donc:

$$Q_{[\text{Kcal./heures}]} = (V \times T \times D \times Cp) / \eta_{(\text{heures})} \quad \text{--- (III.2)}$$

### III.3- AGITATION DU BAIN

Le bain de chromage doit être agité périodiquement, surtout pour éviter la stratification de la température au début du chauffage.

Si l'agitation se fait par l'air, ce dernier ne doit pas contenir de l'huile, un serpentín de chlorure polyvinyle rigide et perforé peut être utilisé pour distribuer l'air dans la solution [5].

### III.4- ASPIRATION DES CUVES

Le processus de chromage, produit un brouillard d'acide chromique très toxique, vu la toxicité extrême de ce brouillard, il est obligatoire de prendre des mesures nécessaires pour les éliminer.

Généralement, les fumées sont aspirées de la cuve de chromage au moyen des hottes d'aspiration latérale placées le long des bords de la cuve. Le brouillard se condense dans les conduites d'aspiration et est récupéré sous forme de solution d'acide chromique dans un conteneur spéciale. Les conduites d'aspiration de fumées peuvent être fabriquées en acier au carbone recouvert d'une peinture qui résiste à l'acide. La construction moderne, utilise les «C.P.V.C» Chlorinated Polyvinyl Chloride [5].

### III.5- MISE EN OEUVRE DE NOTRE CELLULE D'ELECTRODEPOSITION

Afin de pouvoir réaliser à l'échelle du laboratoire des dépôts sur nous échantillons, nous avons réussi à fabriquer un redresseur de courant qui peut débiter jusqu'à 2 Ampères avec des tensions de 3, 5, 7, 9, 11 et 13 Volts, et une cuve d'électrolyte d'un litre de capacité avec tous les accessoires nécessaires pour le chromage (figure III-1).

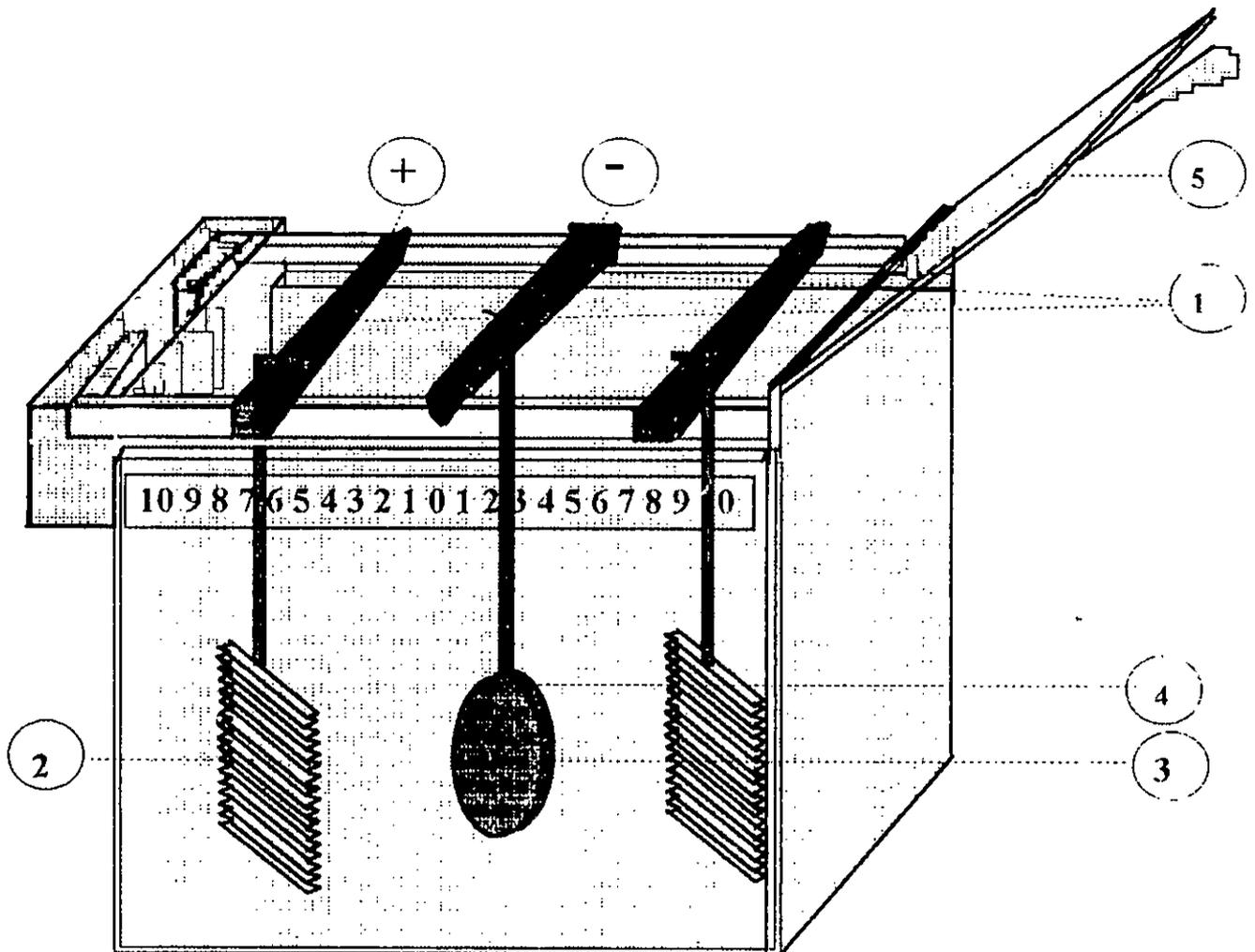


Figure III-1: Cuve électrolytique pour chromage.

- 1- barreaux anodiques et cathodiques.
- 2- anode en Plomb-Antimoine (Pb-Sb).
- 3- pièce nue.
- 4- protection en cire.
- 5- couvercle.



- $f_1, f_2$ : Fusibles de protection,
- $i_1, i_2, i_3, i_4$ : Interrupteurs,
- $L_1, L_2, L_3$ : Lampes témoins,
- T, Transformateur [entrée (primaire) 220Volts; sortie (secondaire) 3,5,7,9,11 et 13 Volts].
- $D_1, D_2, D_3, D_4$ : Diodes, de silicium, constituant un pont redresseur de courant.
- $D_5$ : Diode.
- S : Sélecteur de tensions,
- $R_1$ : Potentiomètre pour réglage grossier,  $0 \div 10\Omega$
- $R_2$ : Potentiomètre pour réglage fin,  $0 \div 1\Omega$ ,
- $r_1$ : Résistance calibrée pour une marche en Ampèremètre du Galvanomètre,
- $r_2$ : Résistance calibrée pour une marche en Voltmètre du Galvanomètre,
- I : Echangeur de polarité,
- $C_1$ : Condensateur chimique; 16 Volts -  $2400\mu F$
- M : Electro- ventilateur,
- $R_g$ : Régulateur de température à bilames,
- $T_h$ : Thermoplongeur,
- G : Galvanomètre,
- B : Bouton poussoir commandant la marche en Voltmètre ou en Ampèremètre du Galvanomètre,

Notre redresseur (figure III-2), possède quatre sorties:

- une sortie pour alimenter l'agitateur du bain pour assurer une meilleure homogénéisation de la température,
- une sortie vers le thermocouple,
- une sortie pour alimenter le thermoplongeur,
- une sortie pour l'alimentation de la cellule électrolytique,

La cellule que nous avons réalisé, comporte également un bain thermostatique (figure III-3), fabriqué en plexiglas. Cette cellule, assure une bonne stabilisation de la température grâce à l'agitateur et le régulateur de température. La figure III-4, montre une vue d'ensemble de l'installation que nous avons réalisé.

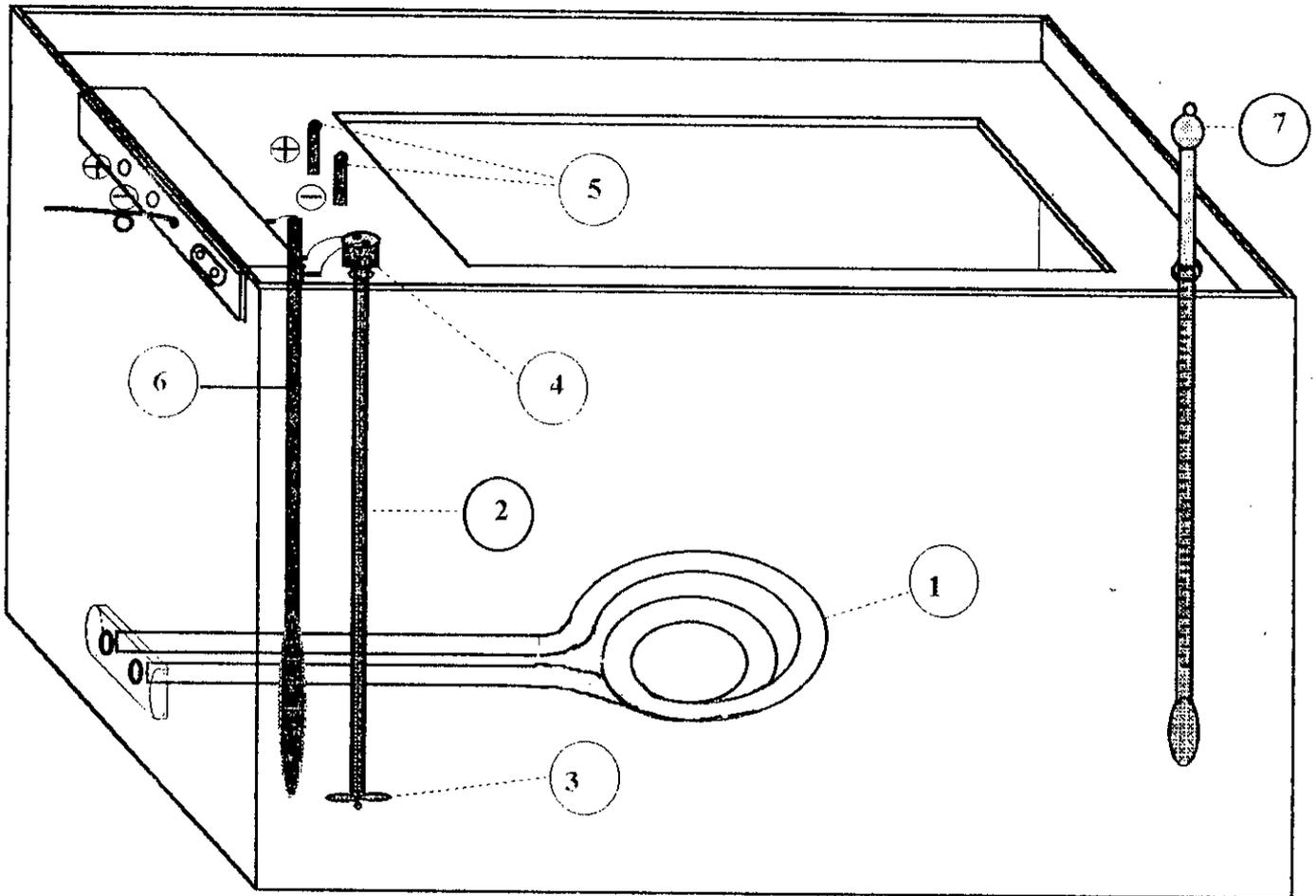


Figure III-3: Bain thermostatique, utilisé pour le chromage du matériau étudié.

- 1- Thermoplaneur.
- 2- Tige en matière plastique.
- 3- Hélice en plexiglas.
- 4- Moteur électrique.
- 5- Prise de courant continu.
- 6- Thermocouple.
- 7- Thermomètre.

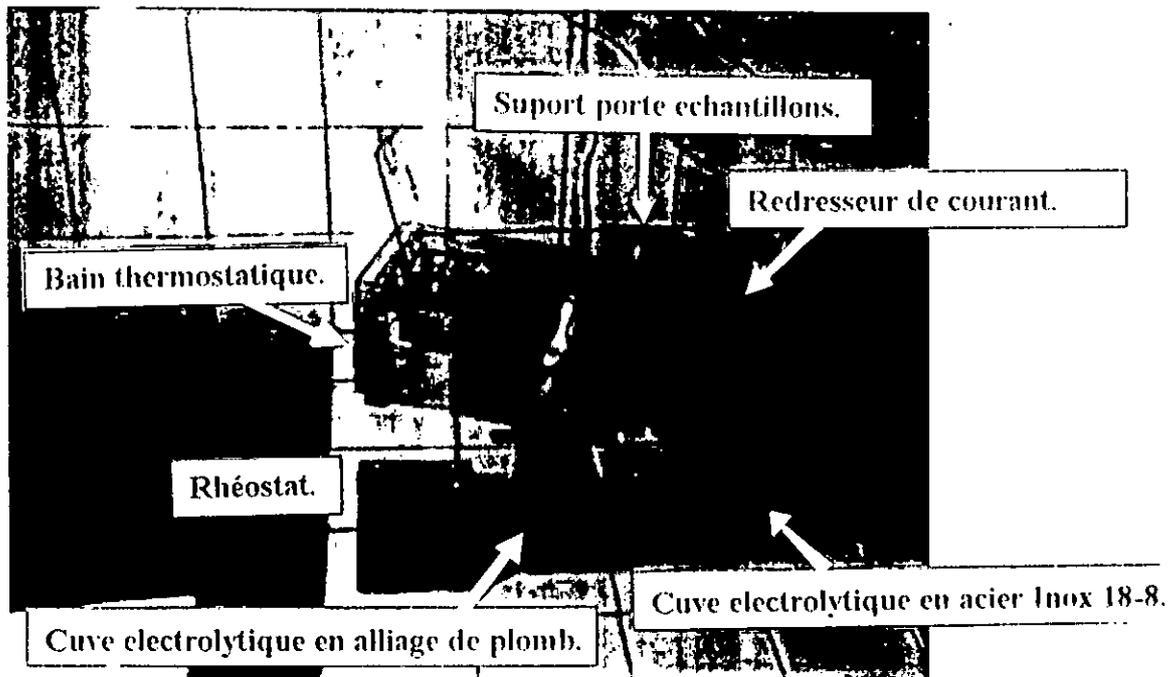


Figure III-4: Vue générale sur l'installation réalisée.

# QUATRIEME CHAPITRE

*Techniques expérimentales*  
*et*  
*Résultats.*

# CHAPITRE IV

## TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET RESULTATS

### IV.1- MATERIAUX UTILISES.

Nous avons utilisé comme substrat, un acier de construction faiblement allié de nuance "30NCD16" largement utilisé dans le domaine de l'aéronautique. Cet acier a une grande intensité de trempe et une excellente résistance à la fatigue et aux chocs répétés [29].

Afin de connaître la concentration des différents éléments contenus dans cet alliage, un échantillon de 20 mm<sup>2</sup> de section est analysé au laboratoire centrale de l'E.R.M. Aéronautique.

L'analyse chimique de l'échantillon a révélé la composition suivante:

Eléments chimiques	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
Concentration en % Poids.	0,28	0,42	0,5	3,81	1,22	0,43

Tableau IV-1: Composition chimique du substrat.

### IV.1.2- Préparation des substrats

Les substrats se présentent sous deux formes:

a/ Pastilles cylindriques de 20 mm<sup>2</sup> de diamètre et de 5 mm d'épaisseur. La face préparée pour recevoir le dépôt est une face plane. La surface latérale cylindrique non préparée est cependant protégée par une couche de cire lors du chromage. Cette forme d'échantillons satisfait aux conditions géométriques rencontrées lors des essais d'abrasion et au teste d'adhérence.

b/ Parallélépipède 15 X 20 X 5 mm<sup>3</sup>, ces échantillons à l'origine étaient en forme de pastilles cylindriques de 5 mm d'épaisseur puis, par meulage, on leur a donné la forme de parallélépipède de 15 X 20 X 5 mm<sup>3</sup> une fois qu'ils aient subi des traitements. Cette forme d'échantillons, permet de satisfaire avec fidélité les conditions géométriques exigées par le tribomètre plan-plan.

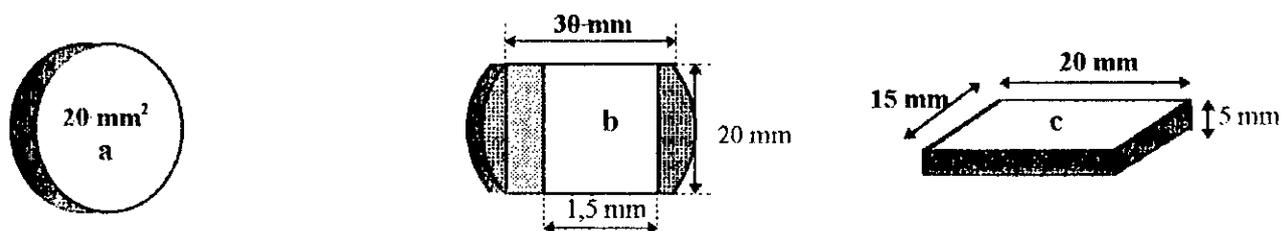


Figure IV-1: Formes des échantillons .

#### IV.1.3- Traitements thermiques et caractéristiques mécaniques du substrat.

Après polissage, grossier et fin, tous les échantillons ont subi un traitement de trempe à l'huile effectué à partir de 850 °C et un revenu à 550 °C pendant 45 mn. Le test de dureté sur quatre de ces derniers a révélé une valeur moyenne de dureté  $H_{RC} = 36,4$ .

Les caractéristiques mécaniques d'un acier AUBERT et DUVAL type 30NCD 16, ayant subi une trempe et revenu à 550°C sont portées sur le tableau suivant:

Trempe à l'huile à 825°C / 850°C et Revenu à 550 °C	Résistance à la rupture Kg/mm <sup>2</sup>	Limite élastique Kg/mm <sup>2</sup>	Allongement (5d) %	Résistance UF Kg/Cm <sup>2</sup>
	120	107	16	9

Tableau IV-2 : Caractéristiques mécaniques d'un acier AUBERT & DUVAL type 30NCD16.

#### IV.1.4- Analyse métallographique

Le polissage mécanique est effectué successivement:

- sur papiers abrasifs au carbure de silicium de granulométrie 120, 320, 400, 600, 800, puis 1000.
- sur draps durs imprégnés de pâtes diamantées 6 $\mu$  et 3 $\mu$ .

L'échantillon ainsi préparé est examiné, après attaque chimique au Nital de composition:

- 2 à 5 ml d'acide Nitrique  $\rho = 1,33\text{g/ml}$ .
- 100 ml d'éthanol pur.

La durée d'attaque est de 15 à 40 secondes à la température ambiante. La microstructure du substrat est illustrée sur la figure IV-2.

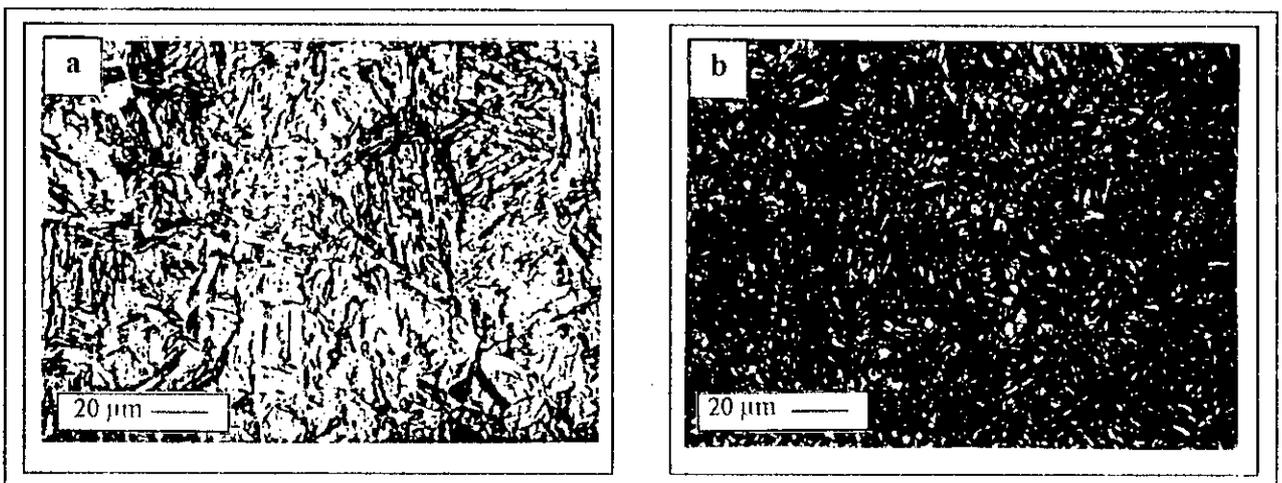


Figure IV-2 : Microstructure du substrat après traitement thermique.

a- Trempe à l'huile à partir de 850°C.

b- Trempe à l'huile à 850°C et revenu à 550°C.

Nous remarquons que la structure après trempe (a) est martensitique et celle après trempe et revenu (b) est sorbitique (perlite fine). L'ancienne martensite se reconnaît au caractère aciculaire de la structure.

- L'analyse en diffraction des rayons X du substrat à l'état trempé et revenu à 550°C, a révélé l'apparition des spectres de fer  $\alpha$  (majoritaire) et de cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$  (Figure IV-3).

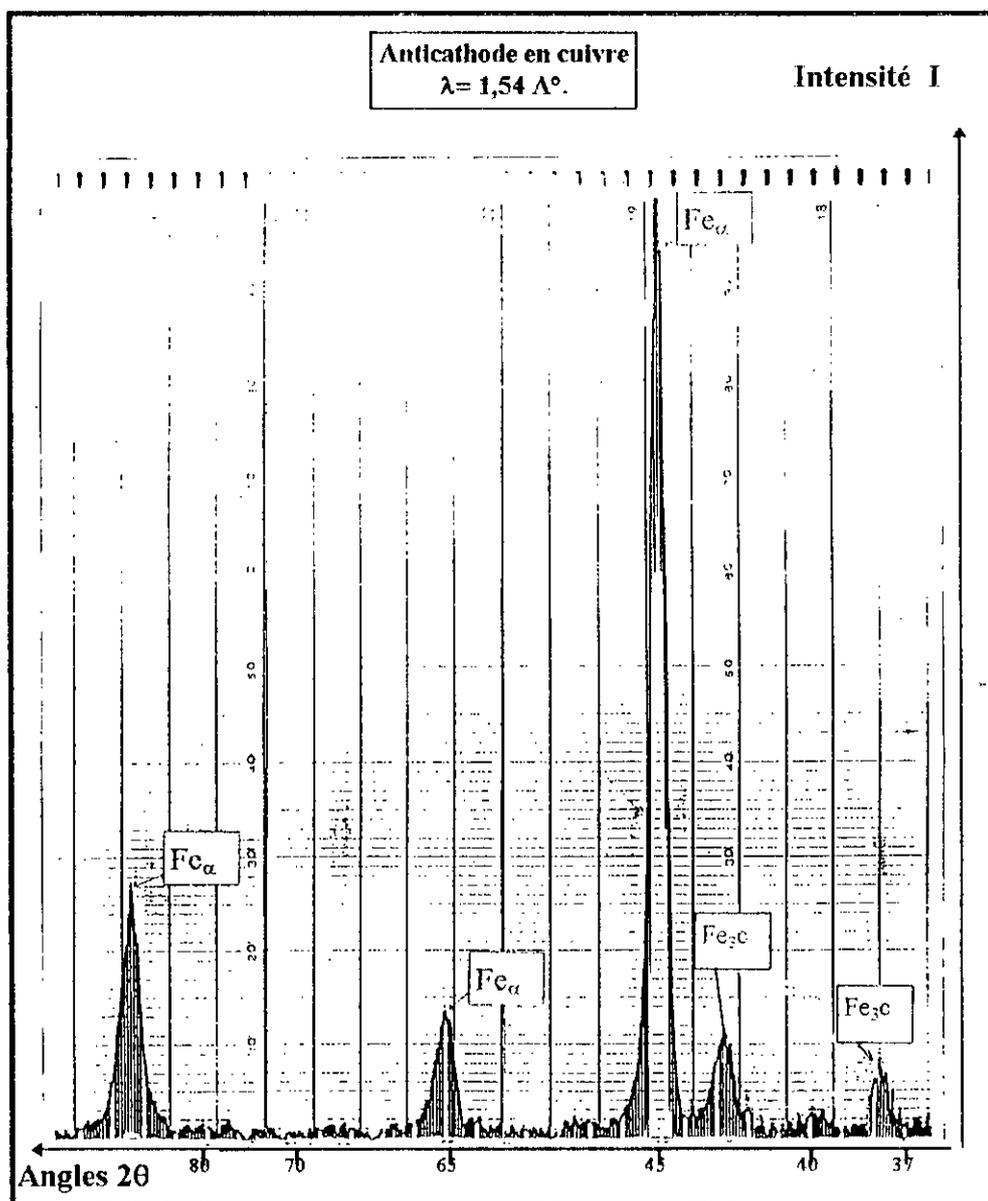


Figure IV-3: Analyse par diffraction des rayons X du substrat à l'état trempé et revenu à 550°C.

## **IV.2- PROCESSUS OPERATOIRES DE LA PREPARATION DU CHROMAGE**

Les salissures et les films passifs (oxydes), doivent être éliminés de la surface avant de procéder au dépôt, en plus de dégraissage, un décapage est souvent nécessaire.

### **IV.2.1- Préparation des surfaces.**

Avant tout traitement de surface, il est indispensable de procéder à une préparation qui a pour but d'éliminer toute présence physique ou chimique sur la surface à traiter.

Les méthodes de préparation des surfaces sont nombreuses, elles varient en fonction:

- 1°/ du métal de base.
- 2°/ des salissures le couvrant: graisse, oxydes, scories, ...

La préparation des surfaces s'effectue de deux manières:

- 1°/ dégraissage qui éliminera les matières grasses en surface.
- 2°/ décapage qui dissoudra les produits de transformations des surfaces.

#### **IV.2.1.1- Dégraissage**

Selon son degré de perfection, il existe une graduation dans le dégraissage que l'on divise en deux grands types:

- 1°/ Les prédégraissages qui ont pour objet d'ôter des surfaces métalliques la partie essentielle des graisses sans aller jusqu'à leur élimination totale.
- 2°/ Les dégraissages terminaux qui élimineront toute trace de graisse.

Ces méthodes de dégraissage peuvent être soit:

- a- chimique: dans des solutions généralement chaudes.
- b- électrochimiques ou électrolytiques: ces méthodes offrent plus de sécurité. Le dégraissage électrolytique, suivi de rinçage ou décapage, précède immédiatement l'électrodéposition. Il détermine indépendamment des facteurs liés aux conditions opératoires des électrodépôts, leur adhérence.

#### **IV.2.1.2- Décapage**

Le but de décapage est de dissoudre ou d'user les oxydes dérivés de son ou ses constituants.

L'action décapante peut se faire soit par:

- sablage sec ou humide;
- tonnelage: rotation, vibration ou barillage;
- décapage chimique;
- décapage électrochimique où les pièces à décaper seront anodiques, ou alternativement anodiques-cathodiques.

Le décapage des aciers avant l'électrodéposition, assure une bonne adhérence du chrome. Le procédé par émergence dans l'acide est utilisé pour une grande finition de la surface, mais avec une possibilité de sacrifier l'adhérence maximale.

Le décapage anodique est le plus convenable mais, l'acier décapé anodiquement, dans le bain de chromage à la température de travail avec une inversion de courant, peut contaminer le bain par le fer et le cuivre des conducteurs. Pour palier à ce problème, il est préférable de procéder à la séparation du bain d'acide chromique sans action de sulfates ( 120 ÷ 450 g/l d'acide chromique) à température ambiante ou haute température pour permettre une grande densité du courant. La solution d'acide sulfurique peut être fixée à 30°C, le temps de traitement varie de 30 à 60 secondes et le courant de 15 à 45 A/dm<sup>2</sup>. La tension est de 4 à 6 Volts.

#### IV.2.1.3 Polissage électrolytique

Le polissage électrolytique implique une dissolution anodique du métal, dissolution qui présente la particularité d'être sélective; les aspérités de la surface étant attaquées plus rapidement que les régions en creux [53].

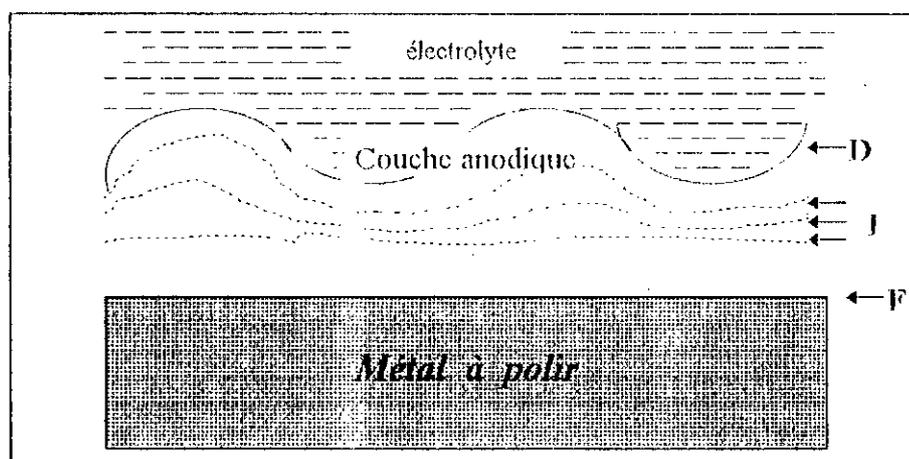


Figure IV-4: Mécanisme du polissage électrolytique.

D- Profil de départ; I - Profils intermédiaires. F- Profil final.

### IV.3- DEPOSITION DU CHROME DUR SUR LE SUBSTRAT.

Après trempage, polissage mécanique et revenu à 550°C, les échantillons ont subi successivement les opérations suivantes:

- a- lavage au détergent.
- b- immersion dans l'essence trichloréthylène.
- c- dégraissage chimique dans la solution basique suivante:

- Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> .....	30÷70 g/l.
- Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	20÷25 g/l.
- NaOH .....	5÷15 g/l.

sous une température de 60°C pendant 1 mn.

d- lavage à l'eau chaude.

e- nous avons isolé, avec une cire, les parties non concernées par le chromage.

f- dégraissage électrochimique sous les conditions portées sur le tableau IV-3:

Composition chimique			Temps de traitement en mn.	Température °C	Conditions électrolytiques du travail	
Cyanure de sodium (g/l).	Soude caustique NaOH (g/l)	Carbonate de soude Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (g/l)			Tension en Volts (V).	Densité cathodique A/dm <sup>2</sup> .
40	55	20	10	≤15	7	10

**Tableau IV-3:** Composition chimique et conditions opératoires du dégraissage électrolytique utilisé pour nos échantillons.

g- lavage à l'eau.

h- décapage électrochimique dans une solution d'acide sulfurique:

- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ..... 50 %,
- Densité de courant ..... i= 7 A/dm<sup>2</sup>,

j- chromage dans un bain d'acide chromique de composition suivante:

- CrO<sub>3</sub> ..... 250 g/l,
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ..... 2,5 g/l,

L'opération est effectuée, pour tous les échantillons à 50°C.

k- rinçage à l'eau courante.

l - élimination de la cire.

#### IV.4- VARIATION DE L'ÉPAISSEUR DU DÉPÔT EN FONCTION DE L'INTENSITÉ DU COURANT.

Selon la loi de FARADAY, la masse de la substance recueillie par électrolyse est proportionnelle à la quantité d'électricité (courant X temps) qui a traversé l'électrolyte [54].

m : Masse déposée.

K : Constante universelle.

M: Masse molaire.

Z: Valence.

Q: Charge

$$m = \frac{K \times M}{Z} \times Q \quad \text{---(IV-1)}$$

La figure IV-5, montre qu'en faisant augmenter l'intensité du courant, l'épaisseur moyenne du dépôt de chrome croît.

Nous avons également constaté:

- un dégagement gazeux de plus en plus intense quand l'intensité augmente.
- la répartition du dépôt n'est pas uniforme, ceci provoque la formation de surépaisseur aux bords des substrats. Ce phénomène devient de plus en plus accentué lorsque nous augmentons l'intensité de courant (35 A/dm<sup>2</sup> et 45 A/dm<sup>2</sup>).

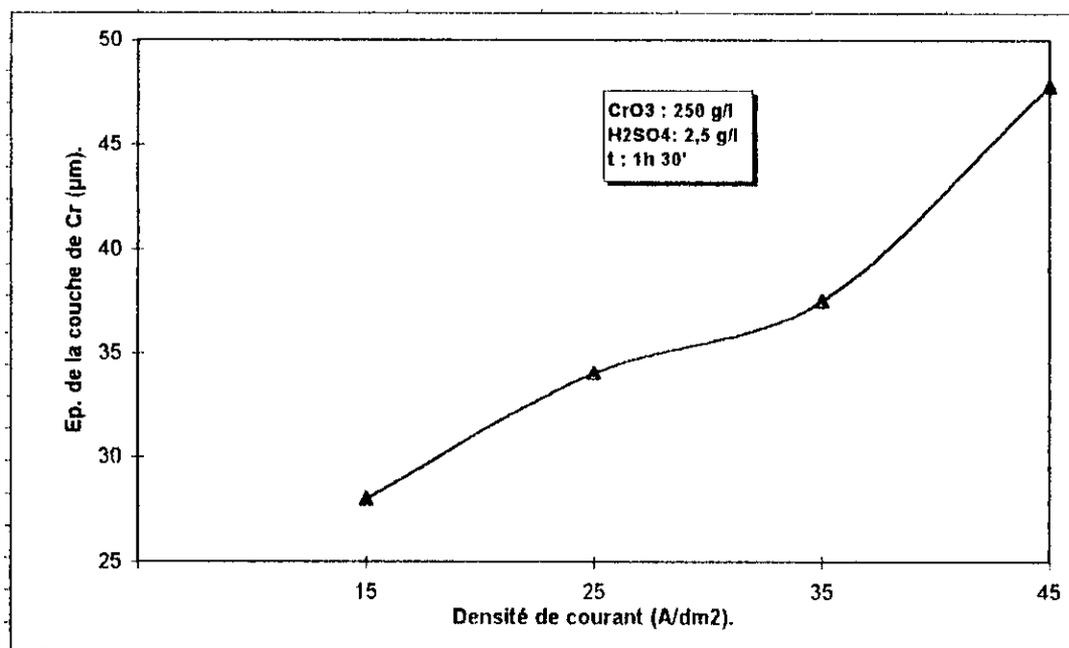


Figure IV-5: Variation de l'épaisseur du chrome en fonction du courant.

#### IV.5- VARIATION DU RENDEMENT CATHODIQUE EN FONCTION DE L'INTENSITE DE COURANT ET DE LA DUREE DE DEPOSITION.

Nous avons suivi l'évolution du rendement cathodique en fonction du temps d'un bain électrolytique, contenant 250 g/l d' $\text{CrO}_3$  et 2,5 g/l de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , fixé à une température de  $50^\circ\text{C}$ . Le graphe de la Figure IV-6, montre la variation du rendement pour deux intensités de courant 35 A/dm<sup>2</sup> et 45 A/dm<sup>2</sup>.

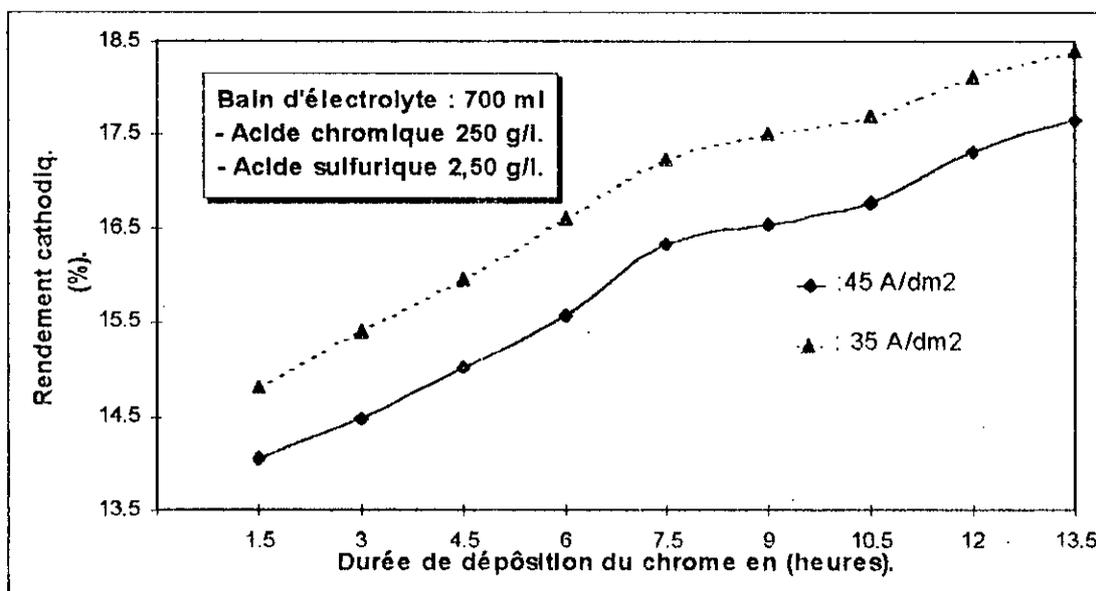


Figure IV-6: Rendement en fonction de la durée de déposition du chrome dur.

L'allure des deux courbes est croissante, au début. La vitesse de croissance diminue à partir de six (06) heures de déposition pour qu'elle devienne presque constante après 10 heures de déposition de chrome. Nous remarquons également, la faible valeur du rendement pour les deux intensités. Néanmoins, le rendement obtenu avec une intensité de  $45 \text{ A/dm}^2$ , demeure plus élevée que celui obtenu avec  $35 \text{ A/dm}^2$ .

#### IV.6- CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE DU DEPOT DE CHROME.

Pour les besoins de l'étude tribologique, il était indispensable de bien déterminer les caractéristiques mécaniques et microstructurales des dépôts de chrome obtenues sous différentes conditions.

Les dépôts électrolytiques de chrome sont pratiquement toujours découpés par un faïencage de fissures, le nombre et la longueur de ces fissures dépendent surtout de l'intensité de courant électrique.

La figure IV-7, montre l'aspect de la structure du dépôt de chrome obtenu à  $50^\circ\text{C}$  sous une densité de courant de  $35 \text{ A/dm}^2$ . Les fissures ont la forme d'un réseau à mailles serrées et à motif fin et ramifié.

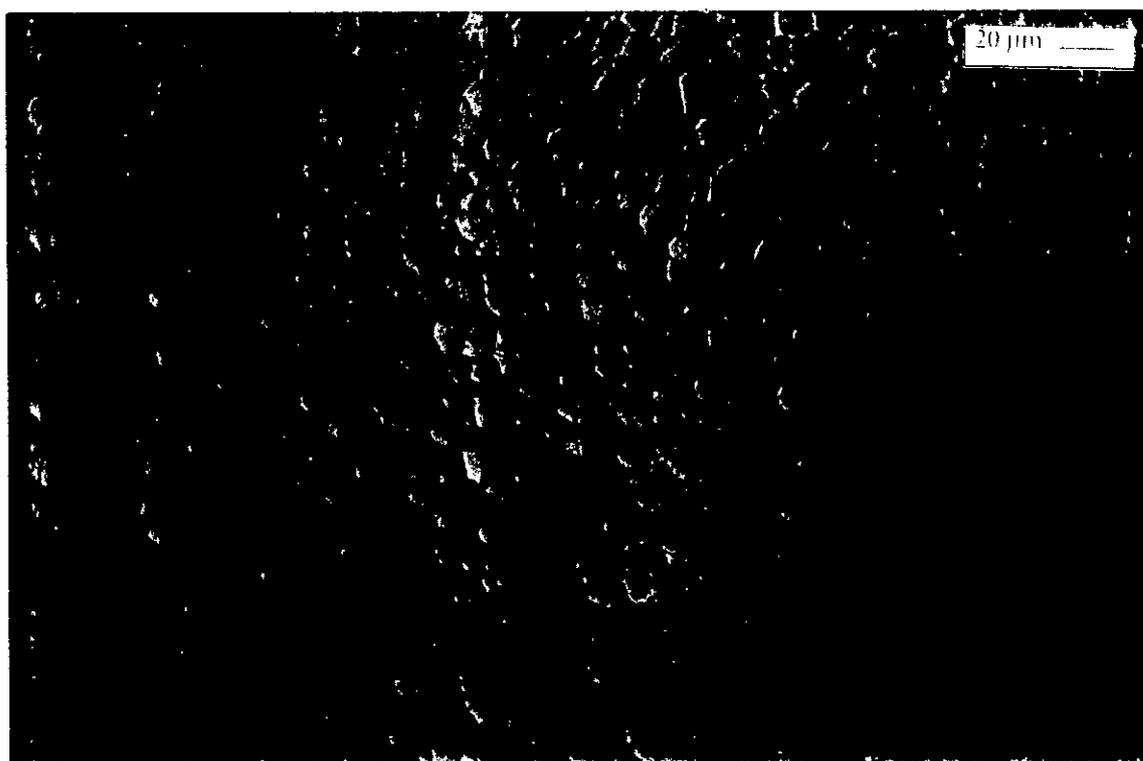


Figure IV-7: Surface de dépôt de chrome obtenue à  $50^\circ\text{C}$  sous une densité de courant de  $35 \text{ A/dm}^2$ .

La figure IV-8, montre la structure du dépôt de chrome obtenue à  $50^\circ\text{C}$  sous  $45 \text{ A/dm}^2$ . Les fissures sont longues moins nombreuses et peu ramifiées par rapport à celles obtenues sous  $35 \text{ A/dm}^2$ .

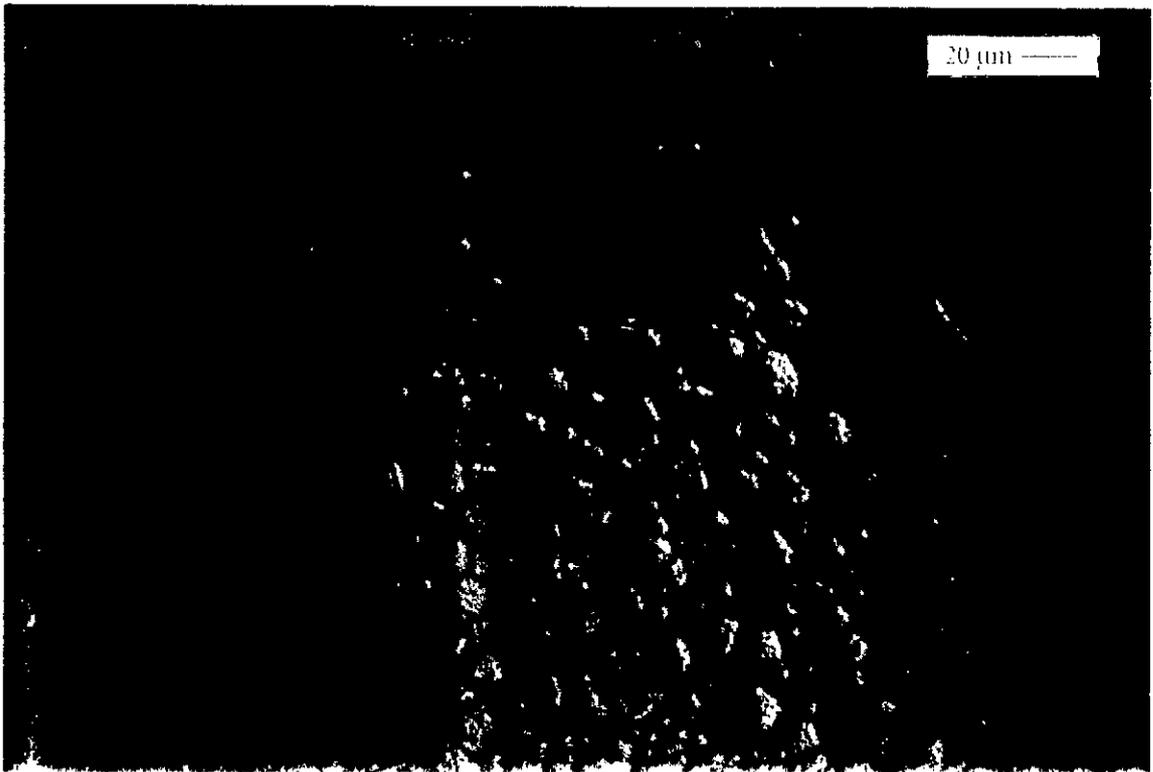


Figure IV-8: Surface du dépôt de chrome obtenue à 50 °C sous 45 A/dm<sup>2</sup>

Si nous considérons les coupes parallèles respectives de ces deux dépôts, figure IV-7 et figure IV-8, nous remarquons la présence de nombreux micro-nodules ou bourgeons qui peuvent être traversés par une fissure.

Les figures IV-9 et IV-10 sont obtenues en inversant le courant pendant respectivement 25 et 60 secondes. Nous remarquons que les fissures deviennent de plus en plus larges et nombreuses, l'apparition d'autres fissures plus fines et ramifiées et la disparition des bourgeons.

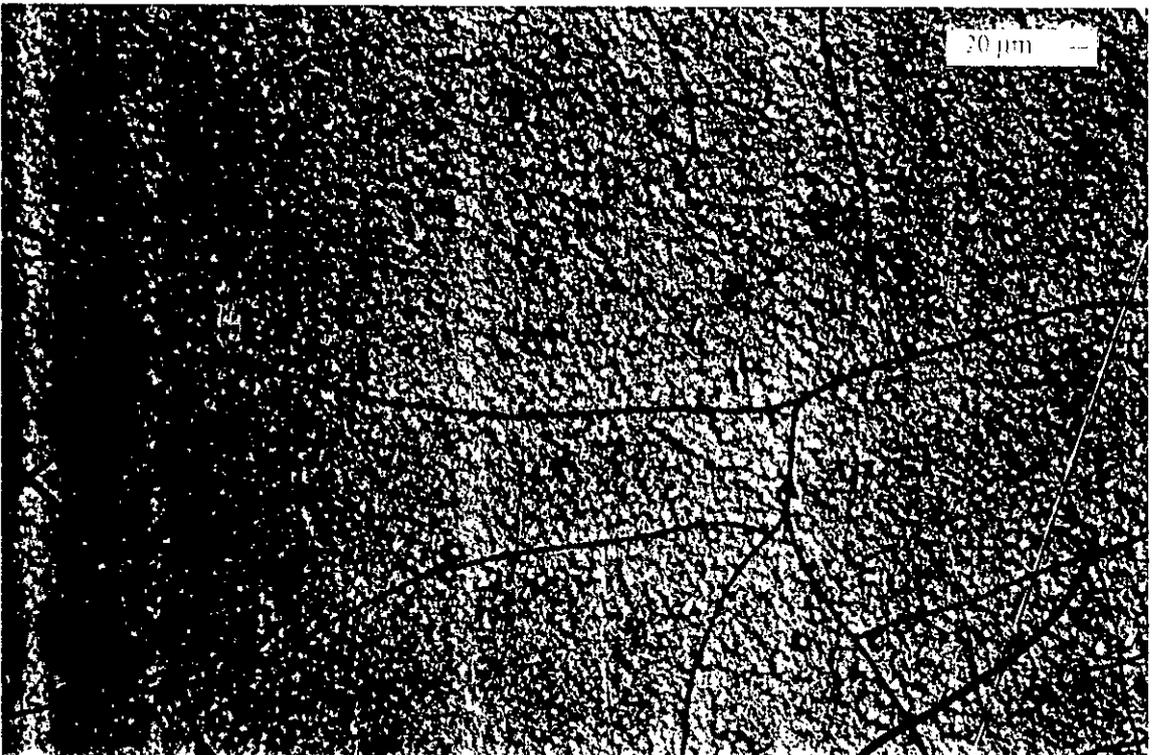


Figure IV-9: Surface du dépôt de chrome obtenue à 50 °C sous une densité de courant 37 A/dm<sup>2</sup>, après une inversion de courant d'une durée de 25 secondes



Figure IV-10: Surface du dépôt de chrome obtenue à 50 °C sous une densité de courant 35 A/dm<sup>2</sup>, après une inversion de courant d'une durée de 60 secondes

Les fissures des dépôts, si elles se présentent en réseau façencé sur coupe parallèle à la surface du substrat, se montrent au contraire discontinues sur coupe orthogonale avec des orientations quelque peu variables autour de la normale au substrat. Les fissures et les canaux ne pénètrent que partiellement dans l'épaisseur du chrome dur.

Les figures IV-11 et IV-12, mettent en évidence la différence d'aspect du dépôt de chrome, en coupe orthogonale, obtenues respectivement sous 35 A/dm<sup>2</sup> et 45 A/dm<sup>2</sup>. La figure IV-11 représente au grossissement 400, l'épaisseur obtenue après un chromage de 52,8 µm sous 35 A/dm<sup>2</sup> et 50 °C.

Nous observons en outre, la grande dureté du chrome, les fissures n'aboutissent pas jusqu'à la surface du substrat. Cet aspect laisse présumer que ces fissures ne sont que des canaux, plus en moins longs dont un certain nombre peut déboucher en surface en formant un réseau de fissures.

Si on considère les coupes respectives de ces deux dépôts, on constate que le nombre de fissures qui aboutissent en surface est nettement plus important avec 35 A/dm<sup>2</sup>. Avec une densité de courant 45 A/dm<sup>2</sup>, les fissures apparaissent plus longues et éloignées les unes des autres.

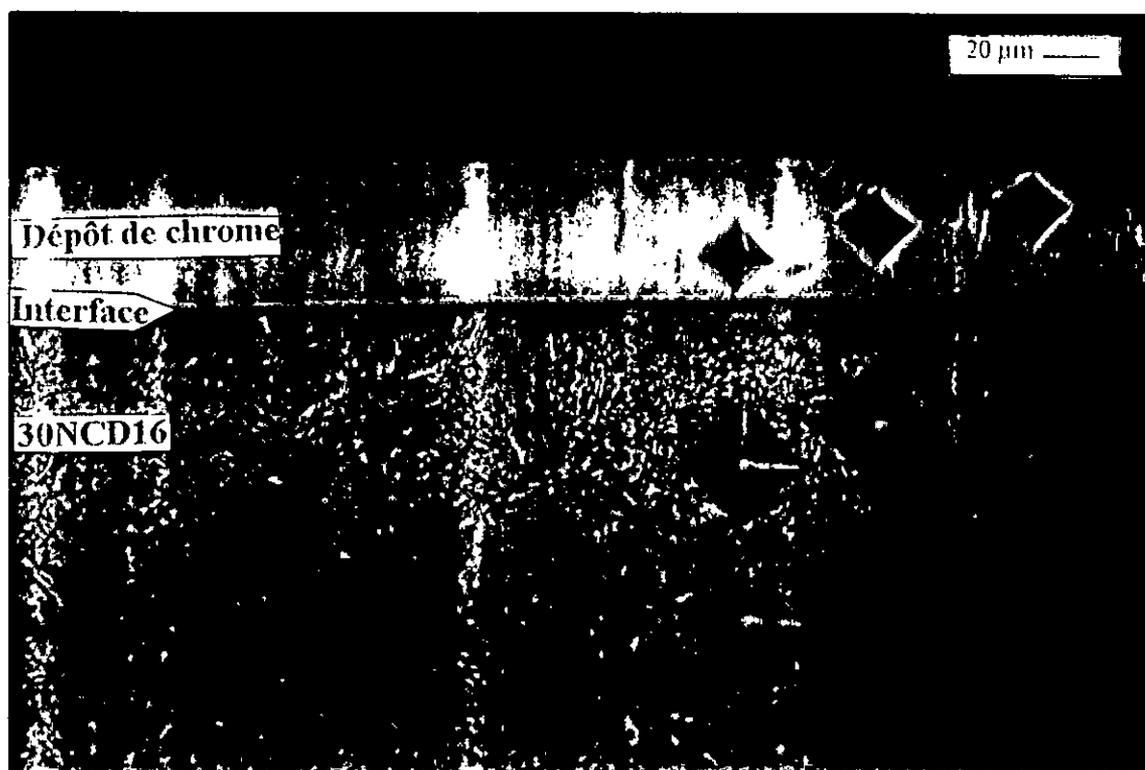


Figure IV-11: Coupe orthogonale du dépôt de chrome obtenue avec 35 A/dm<sup>2</sup>

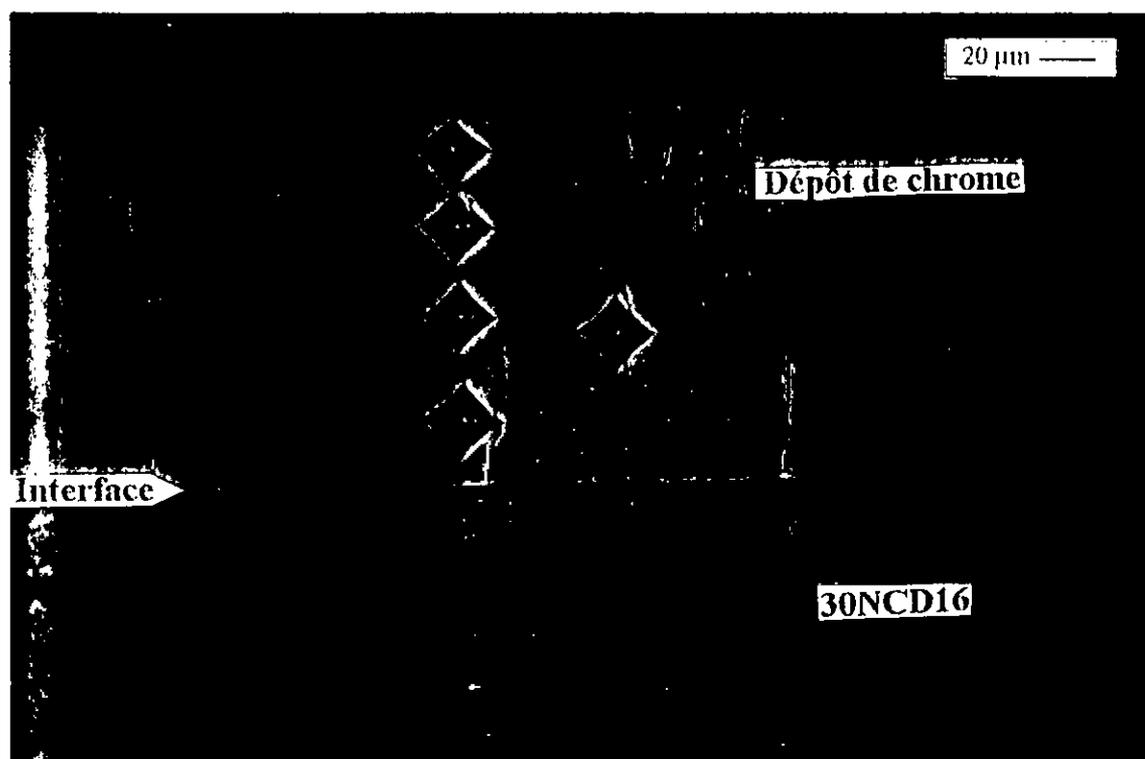


Figure IV-12: Coupe orthogonale du dépôt de chrome obtenue avec 45 A/dm<sup>2</sup>

#### IV.7- ESSAI D'ARRACHEMENT.

Il n'existe pas d'essai universellement satisfaisant pour vérifier l'adhérence des revêtements de chrome sur le métal de base [55].

Mais pour évaluer le degré d'adhérence de nos dépôts après les traitements de diffusion, nous avons effectué des essais d'arrachement (collage, soudage) normalisés selon ISO 2819.

Cet essai, vise à effectuer une séparation revêtement-métal de base par arrachement du dépôt perpendiculairement au substrat (figure IV-13). La technique utilisée est le collage par une résine synthétique à prise rapide de type treebond, l'équipement est un appareil de traction. L'observation de la localisation de la rupture (à l'interface revêtement-métal de base, dans le revêtement ou dans le métal de base) fournit une indication sur le degré d'adhérence du dépôt sur son substrat.

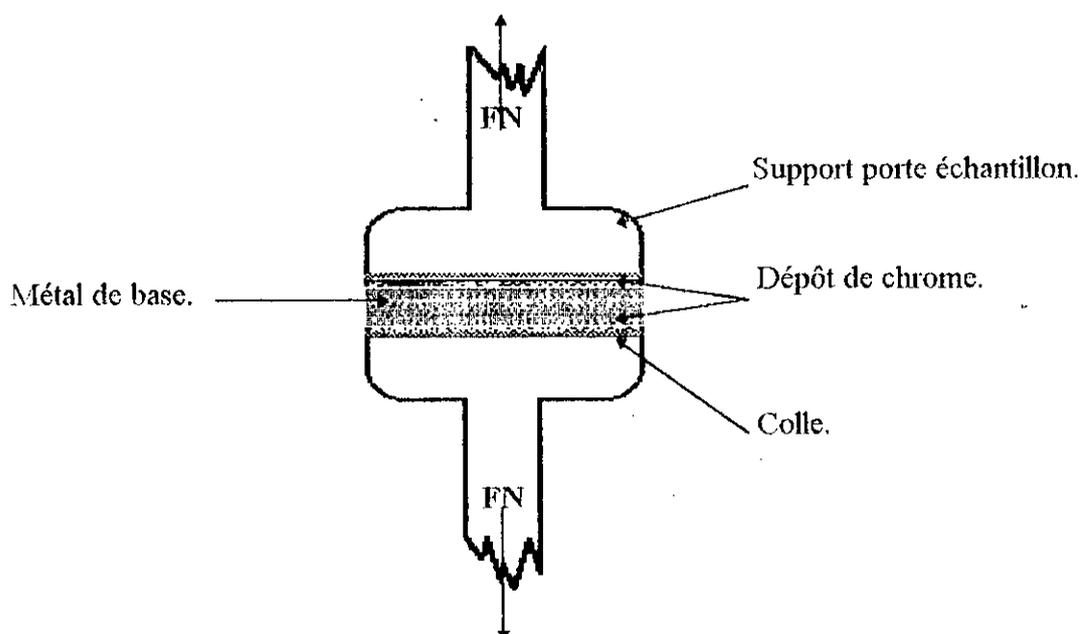


Figure IV-13: Représentation schématique de l'essai d'arrachement.

Il est généralement possible de mesurer la force nécessaire pour produire l'arrachement. Cette méthode donne alors une échelle des valeurs de l'adhérence dans le cas où la rupture se produit à l'interface métal de base/revêtement.

Avant l'application de la colle, les échantillons ont subi successivement les opérations suivantes:

- un nettoyage à l'alcool.
- immersion pendant 20 minutes, dans un vibreur à ultrason contenant de l'acétone.
- rinçage à l'eau courante.
- séchage à l'air comprimé.

Plusieurs échantillons ont subi ce test. Notamment sur quatre (04) échantillons ayant, avant chromage, subi toutes les opérations de préparation de la surface, présentent après chromage à 35 A/dm<sup>2</sup> une résistance au décollement supérieure à celle de la colle. Tandis que sur cinq (05) échantillons obtenus sous les mêmes conditions mais avec une densité de courant de 45 A/dm<sup>2</sup>, nous avons observé un décollement du dépôt sur quatre (04) échantillons par une force normale moyenne égale à 24 Kg.f/mm<sup>2</sup>. La figure IV-14, montre l'état de la surface après décollement.

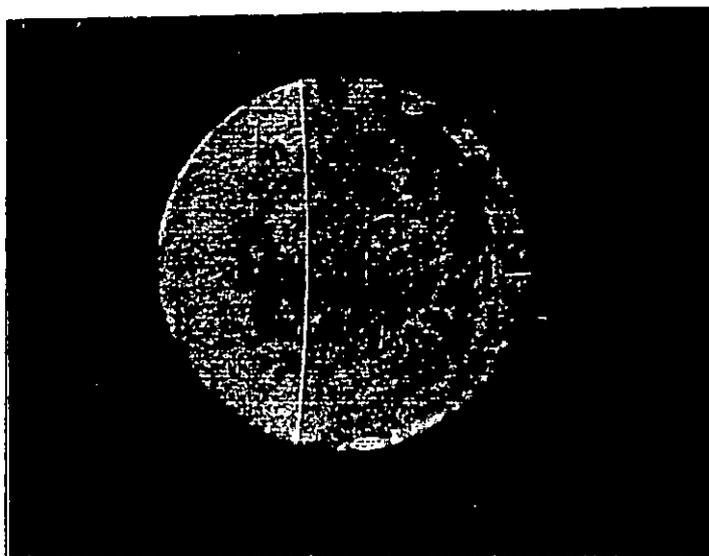


Figure IV-14: Surface d'un substrat 30NCD16 chromé à 45 A/dm<sup>2</sup> après décollement par l'essai d'arrachement

#### IV.7.1- Influence de l'état de surface sur l'adhérence du dépôt.

Pour pouvoir justifier l'influence de l'état de surface, nous avons testé trois (03) échantillons, n'ayant pas été décapé électrolytiquement avant chromage sous 35 A/dm<sup>2</sup>. Nous avons observé un décollement du dépôt à partir d'une force normale moyenne appliquée égale à 19,5 Kg.f/mm<sup>2</sup>, la figure IV-15, montre l'aspect de la surface après rupture.

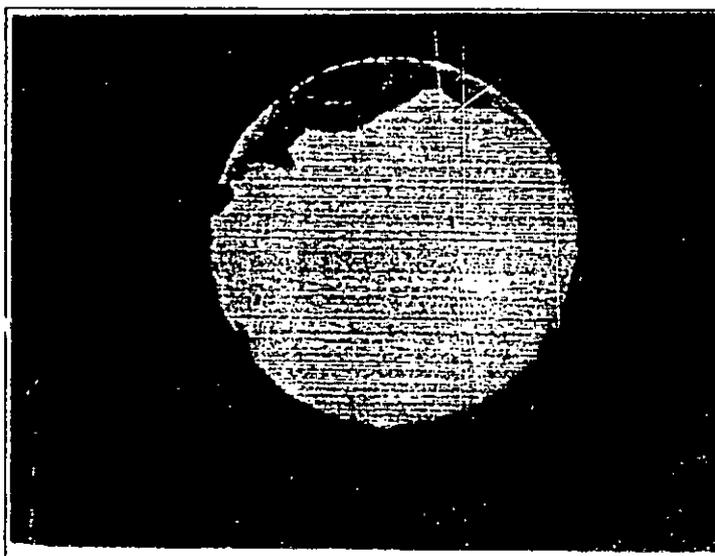


Figure IV-15: Surface d'un substrat 30NCD16 chromé, sans décapage électrolytique à 35 A/dm<sup>2</sup>, après décollement par l'essai d'arrachement

#### IV.7.2- Influence du traitement thermique sur l'adhérence du dépôt.

Le traitement thermique semble améliorer la tenue du dépôt de chrome. Sur les échantillons sans traitement thermique (Tableau IV-4), le dépôt de chrome se détache nettement, alors que sur les échantillons ayant subi des traitements thermiques, nous avons observé une adhérence plus soutenue. Ces observations ont été faites d'une part sur des dépôts de chrome obtenus sous  $45 \text{ A/dm}^2$  après traitement thermique à  $430 \text{ }^\circ\text{C}$ , pendant 3 heures, d'autre part sur des dépôts de chrome obtenus sous  $35 \text{ A/dm}^2$  (sans décapage électrolytique), après traitement thermique à  $320 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant 3 heures.

La comparaison des valeurs trouvées de l'adhérence du tableau IV-4, montre qu'il est possible d'obtenir une bonne adhérence si la surface a été bien soignée avant l'électrodéposition. Cette adhérence peut être renforcée par un traitement thermique après chromage.

Résistance au décollement (Kg. f/ mm <sup>2</sup> )	Etat		Dépôt obtenu sous 35 A/dm <sup>2</sup>	Dépôt obtenu sous 45 A/dm <sup>2</sup>
		Sans traitement thermique		≥ 28,7
	Sans décapage électrolytique avant chromage.		≤ 20	-
	Traitement thermique après chromage.	430 °C 3 heures	-	>29
		320 °C 3 heures	> 29,1	-

**Tableau IV-4:** Valeurs des résistances aux décollements, obtenues lors de l'essai d'arrachement sur différents échantillons.

Les résultats obtenus par imagerie X de l'interface avant et après traitement thermique sont illustrés sur les figures IV-16, IV-17 et IV-18.

Nous remarquons que le dépôt de chrome, obtenu par voie électrolytique, reste accroché à la surface sans diffusion d'élément chrome de cette couche dans le substrat (figure IV-16).

le chrome ne commence à diffuser que lorsqu'on procède à un traitement thermique adéquat (figure IV-17). Aussi la diffusion du chrome est proportionnelle à la durée et la température du traitement thermique (figure IV-18).

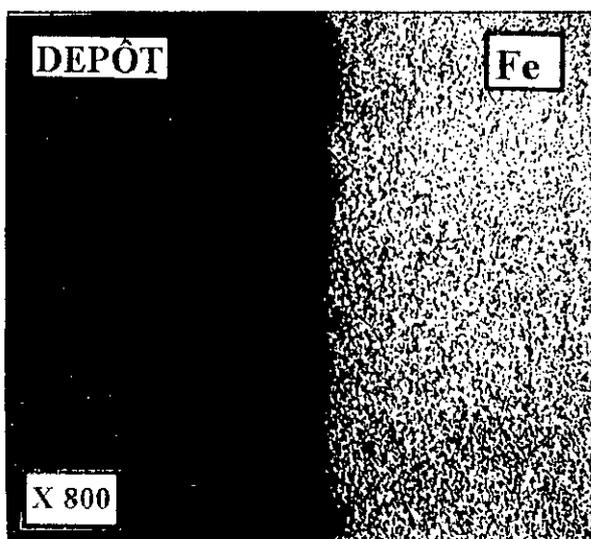
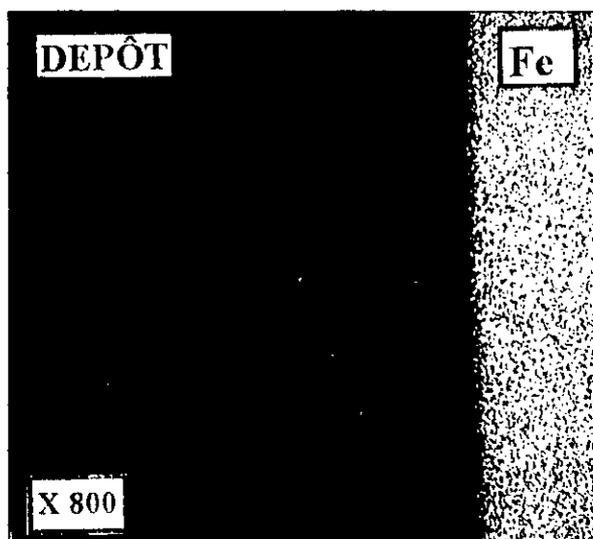
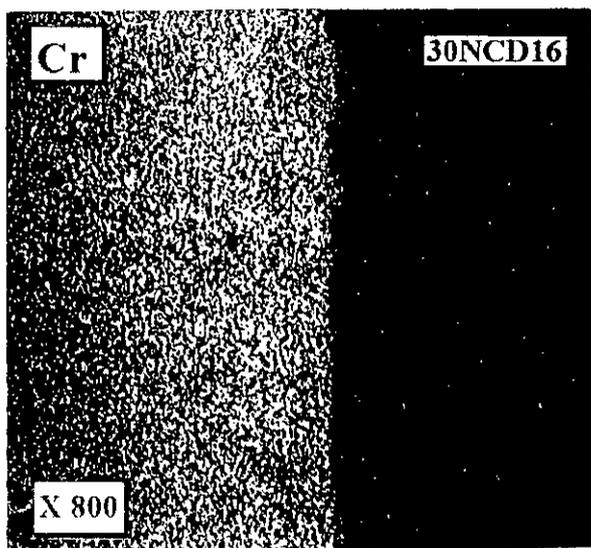
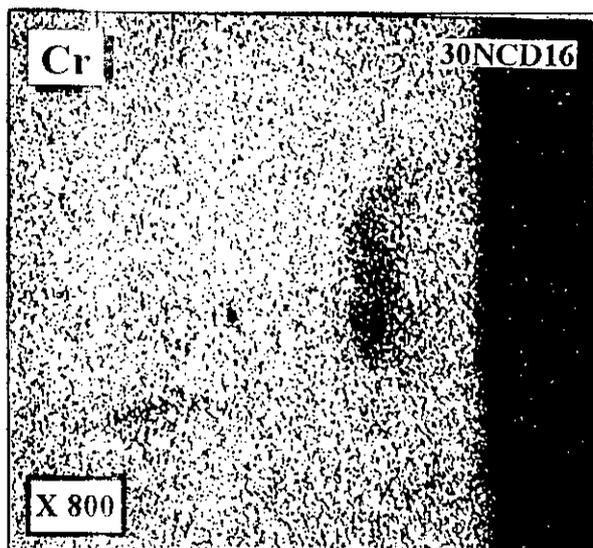
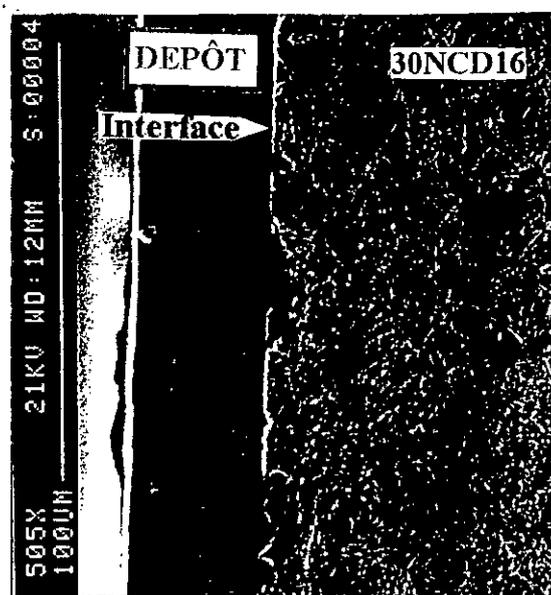
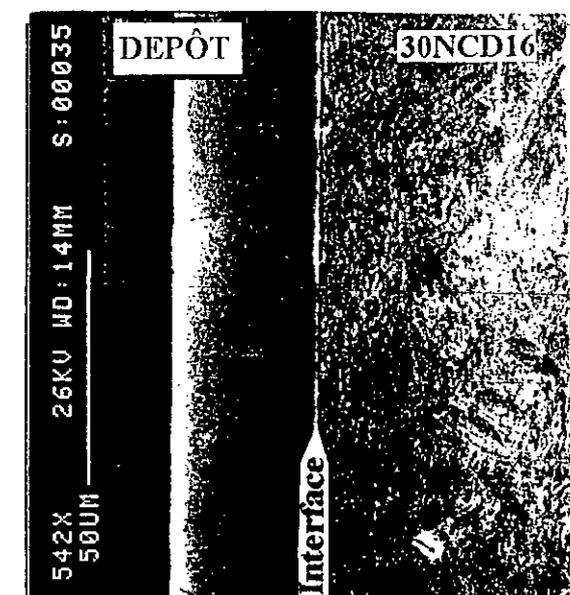


Figure IV-16: Analyse par imagerie X, de l'interface dépôt de chrome / substrat, sans traitement thermique.

Figure IV-17: Analyse par imagerie X de l'interface dépôt de chrome / substrat, après un traitement thermique à 320 °C, pendant 3 heures

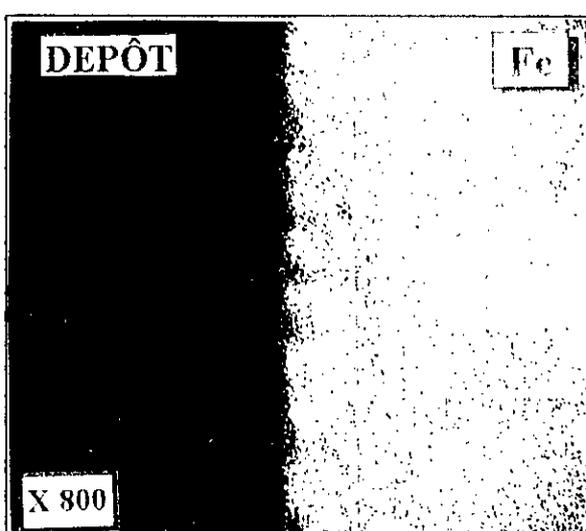
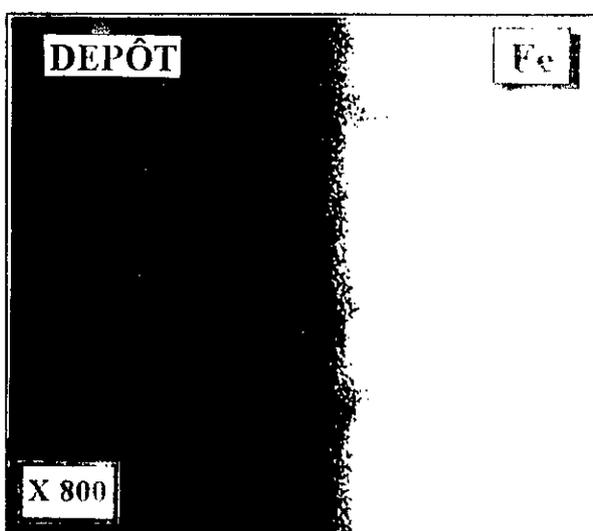
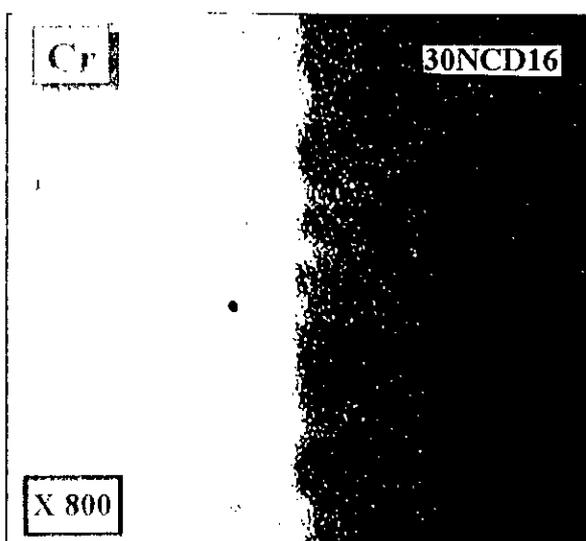
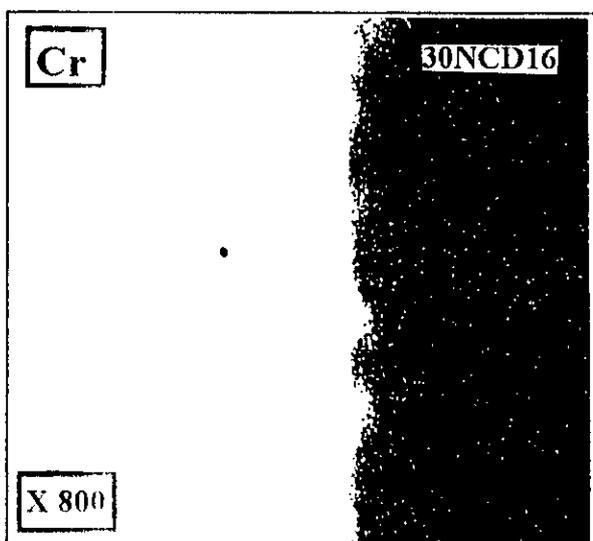
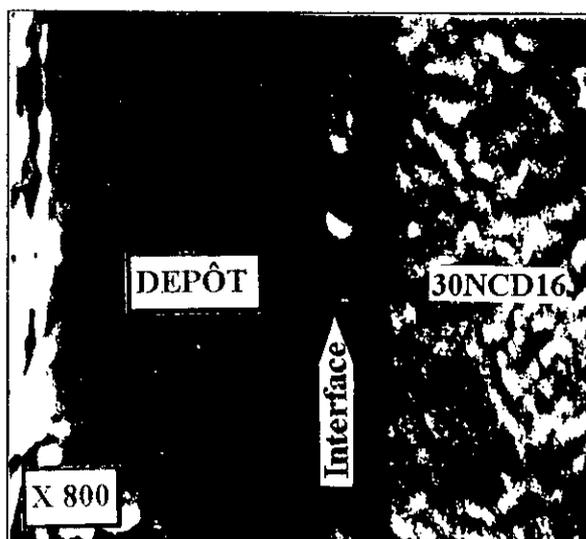
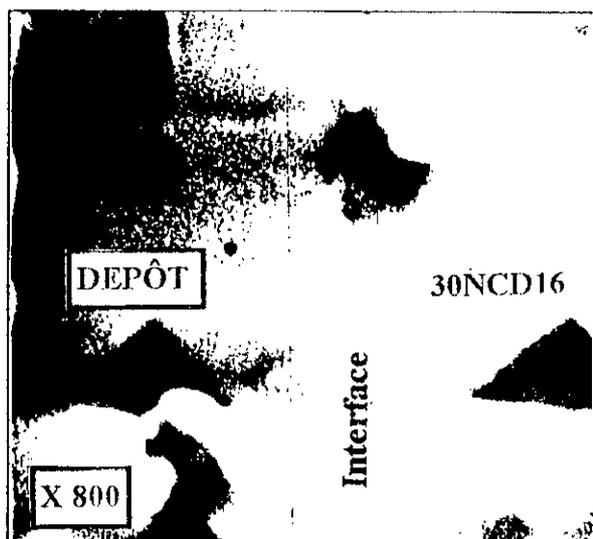


Figure IV-18: Analyse par imagerie X de l'interface dépôt de chrome / substrat, après un traitement thermique de 3 heures à 430 °C.

Figure IV-19: Analyse par imagerie X de l'interface dépôt de chrome substrat, après un traitement thermique de 3 heures à 830 °C.

## IV.8- INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LA STRUCTURE ET LA DURETE DU DEPOT.

### IV.8.1 Influence sur la structure.

Le dépôt de chrome déposé par électrolyse, présente en surface un réseau de fissures qui s'élargissent au fur et à mesure que la température du traitement augmente (figures IV-20a, IV-20b, IV-21, IV-22a et IV-22b).

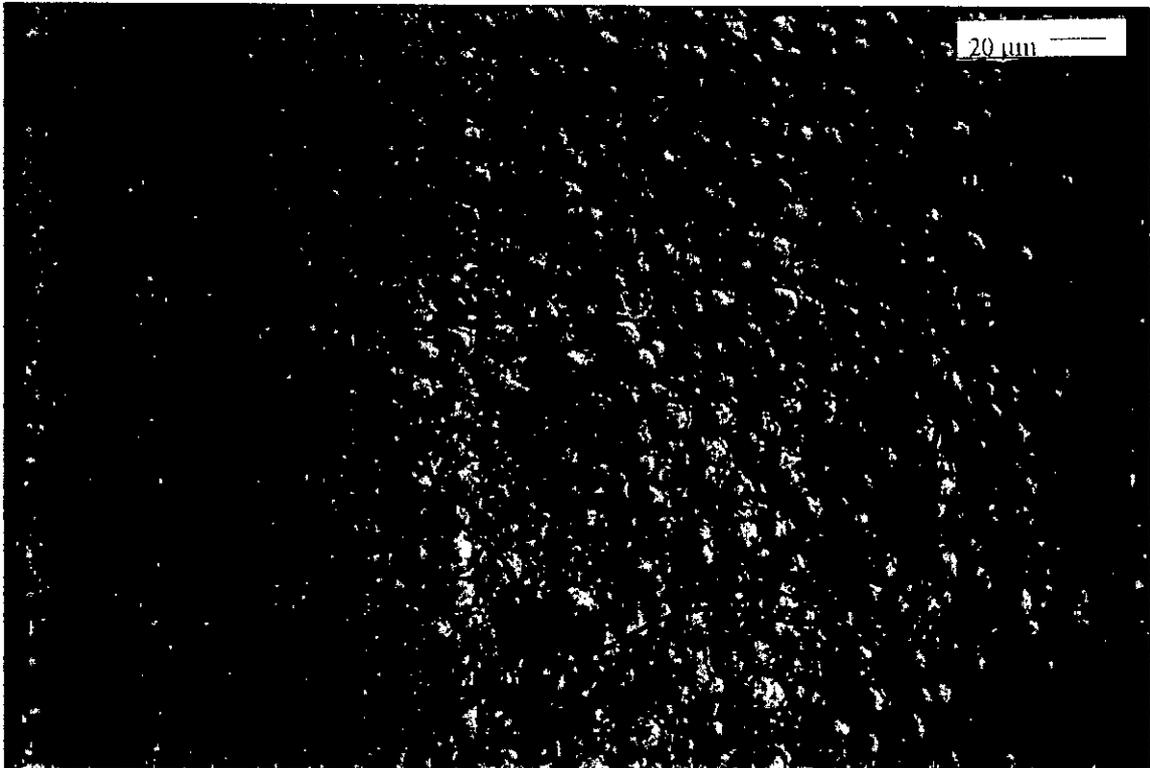


Figure IV-20a : Surface du dépôt de chrome après un revenu de 2 heures à 320 °C.

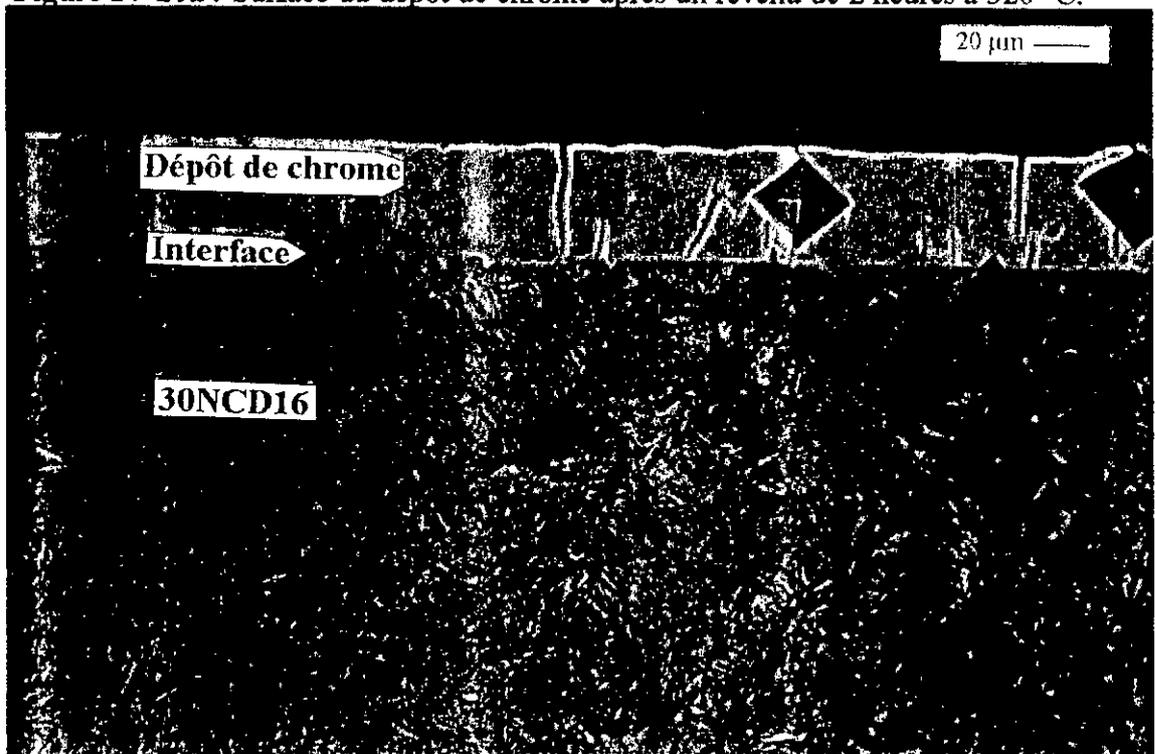


Figure IV-20b: Coupe orthogonale du dépôt de chrome après un revenu de 2 heures à 320 °C.

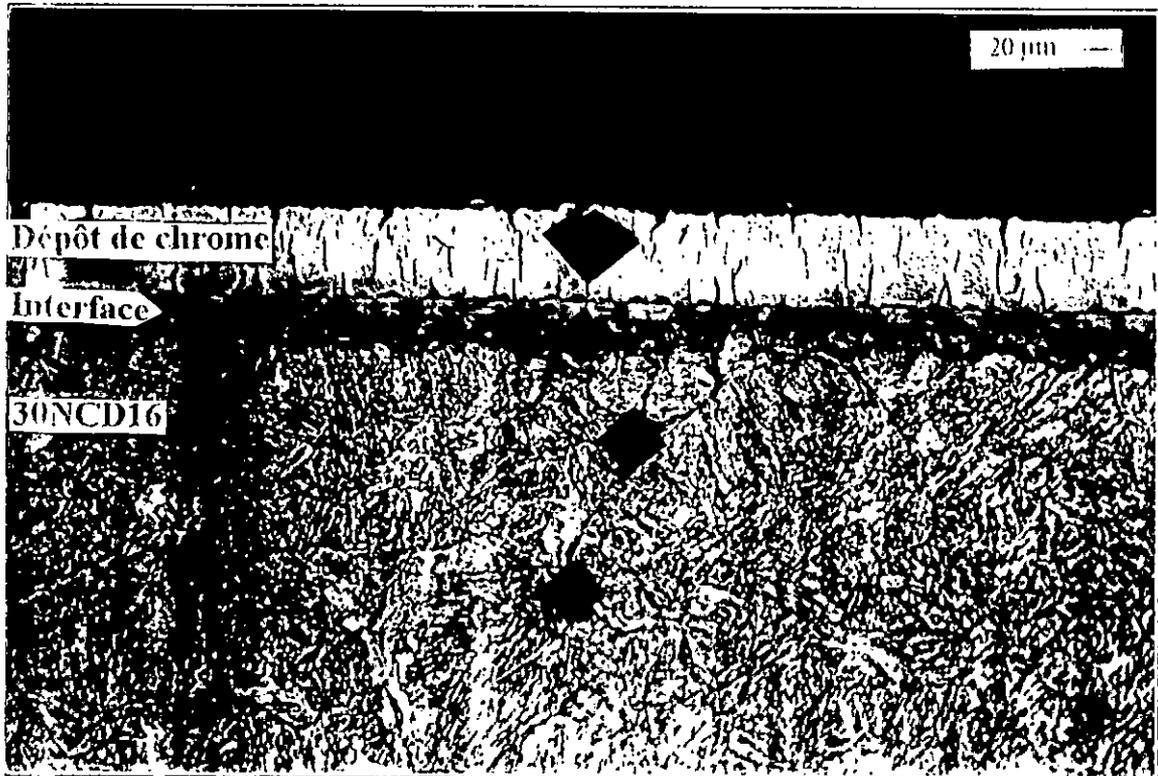


Figure IV-21 : Coupe orthogonale du dépôt de chrome après un revenu de 24 heures à 830 °C.

Si le dépôt est mince, certaines fissures peuvent se propager vers l'intérieur jusqu'à atteindre la surface du substrat (figure IV-22a et IV-22b).

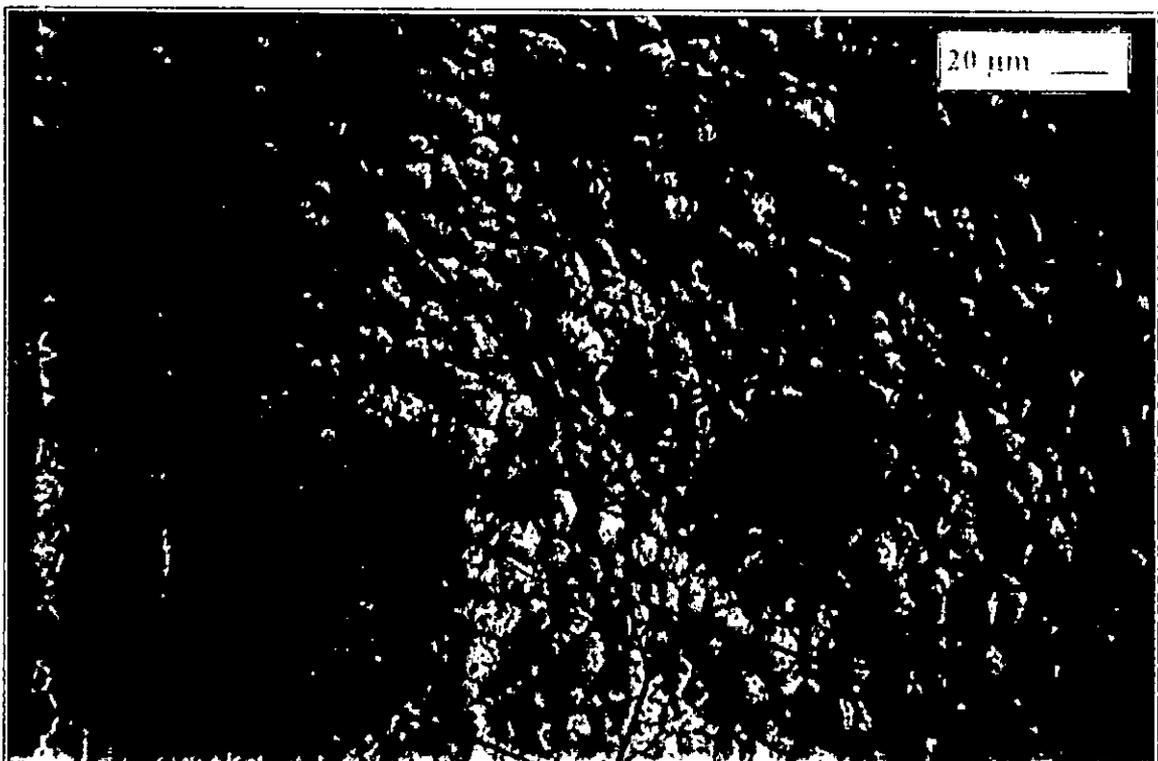


Figure IV-22a : Surface du dépôt de chrome après un revenu de 2 heures à 430 °C

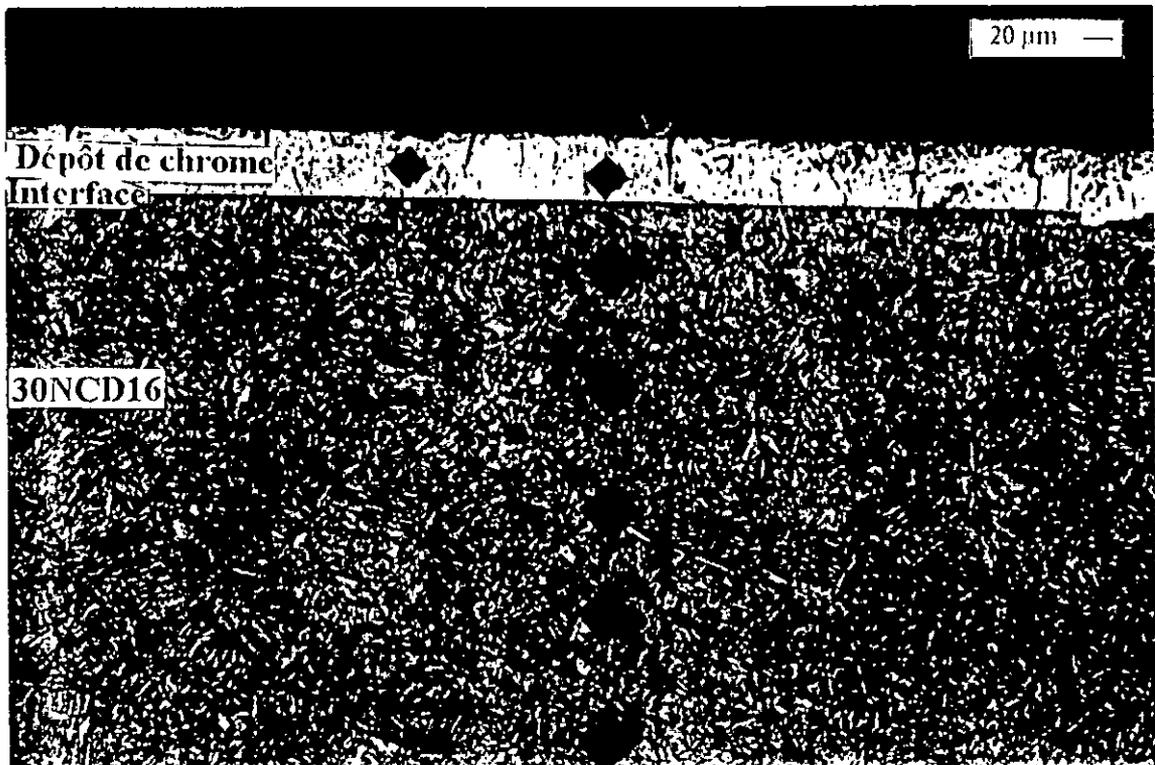


Figure IV-22b : Coupe orthogonale du dépôt de chrome après un revenu de 2 heures à 320 °C

Ce phénomène est (probablement) dû à la contraction du chrome, par suite d'une expulsion d'hydrogène occlus et à la relaxation des contraintes internes.

#### IV.8.2- Influence sur la dureté.

Les traitements thermiques pratiqués industriellement concernent en général des températures de 100 à 250 °C, la durée du traitement étant de l'ordre de 1 à 2 heures [41].

Des mesures de duretés effectuées sur des échantillons chromés à 50 °C dans un bain contenant 250 g/l d'acide chromique et 2.5 g/l d'acide sulfurique, sont représentées sous forme de graphe dans la figure IV-23.

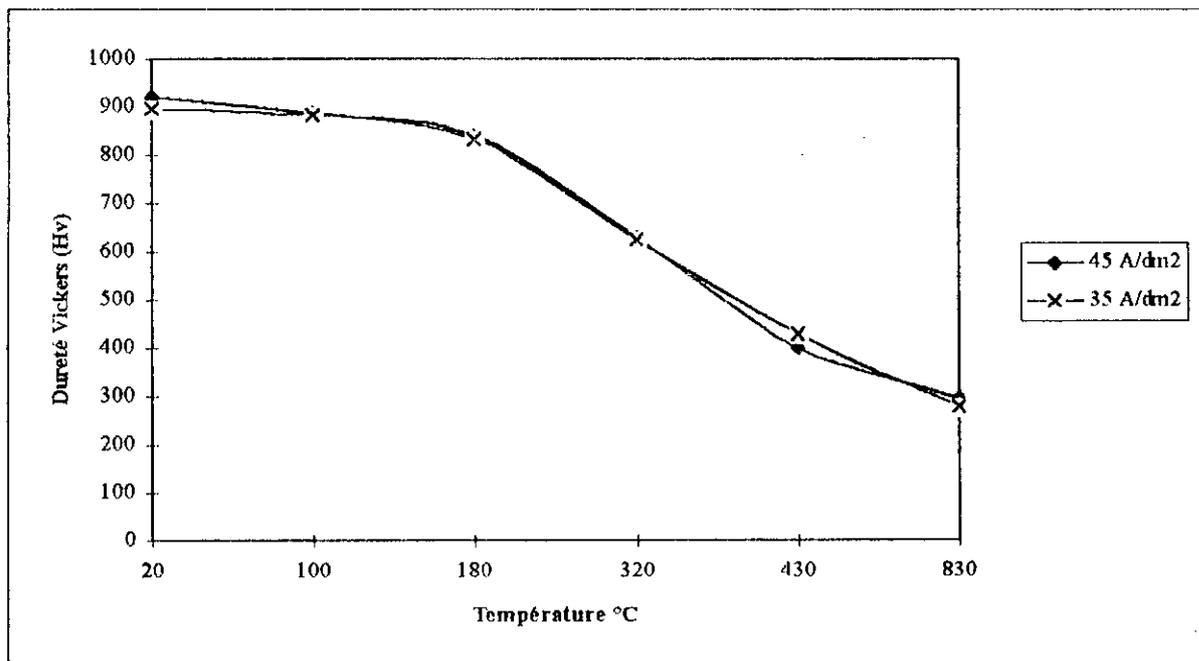


Figure IV-23 : Variation de la dureté de la couche de chrome obtenue à 50 °C dans un bain de 250 g/l acide chromique et 2,5 g/l d'acide sulfurique en fonction de la température de revenu et de la densité de courant.

Nous remarquons qu'à la température ambiante, la valeur de la dureté du dépôt est proportionnelle à l'intensité du courant et diminue avec l'élévation de la température de revenu. L'élévation de la température par revenu, ramène cette dureté vers 290 Hv à la température de 830°C alors qu'à l'ambiante, une dureté moyenne de 900 Hv est pratiquement stable.

Les duretés que nous avons envisagées précédemment quant à l'influence du traitement thermique sont des duretés mesurées à température ordinaire après que le dépôt de chrome ait subi les divers traitements thermiques (à 100°C, 180 °C, 320 °C, et 430 °C pendant 2 heures et à 830 °C pendant 20 heures).

#### IV.9- REALISATION ET CARACTERISATION DE LA COUCHE NITRUREE.

Pour pouvoir faire une étude comparative sur le comportement des surfaces traitées, nous avons procédé à la nitruration liquide (tiniffer) des surfaces non chromées.

##### IV.9.1- Procédé de nitruration à bain de sel

Les échantillons ont subi au préalable un traitement de trempage à l'huile à partir de 850°C et un revenu à 600°C. Ensuite, nous les avons immergés dans un bain de sel de cyanures dont la composition chimique est la suivante:

- Carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ..... 15%
- 85% de Cyanure contenant: 40% KCN et 60% NaCN

Sous les conditions de travail suivantes:

- Disposition des échantillons: accrochés verticalement.
- Température de traitement ..... 570°C
- Barbotage avec de l'air sec comprimé.

La figure IV-24, représente le four à bain de sel que nous avons utilisé.

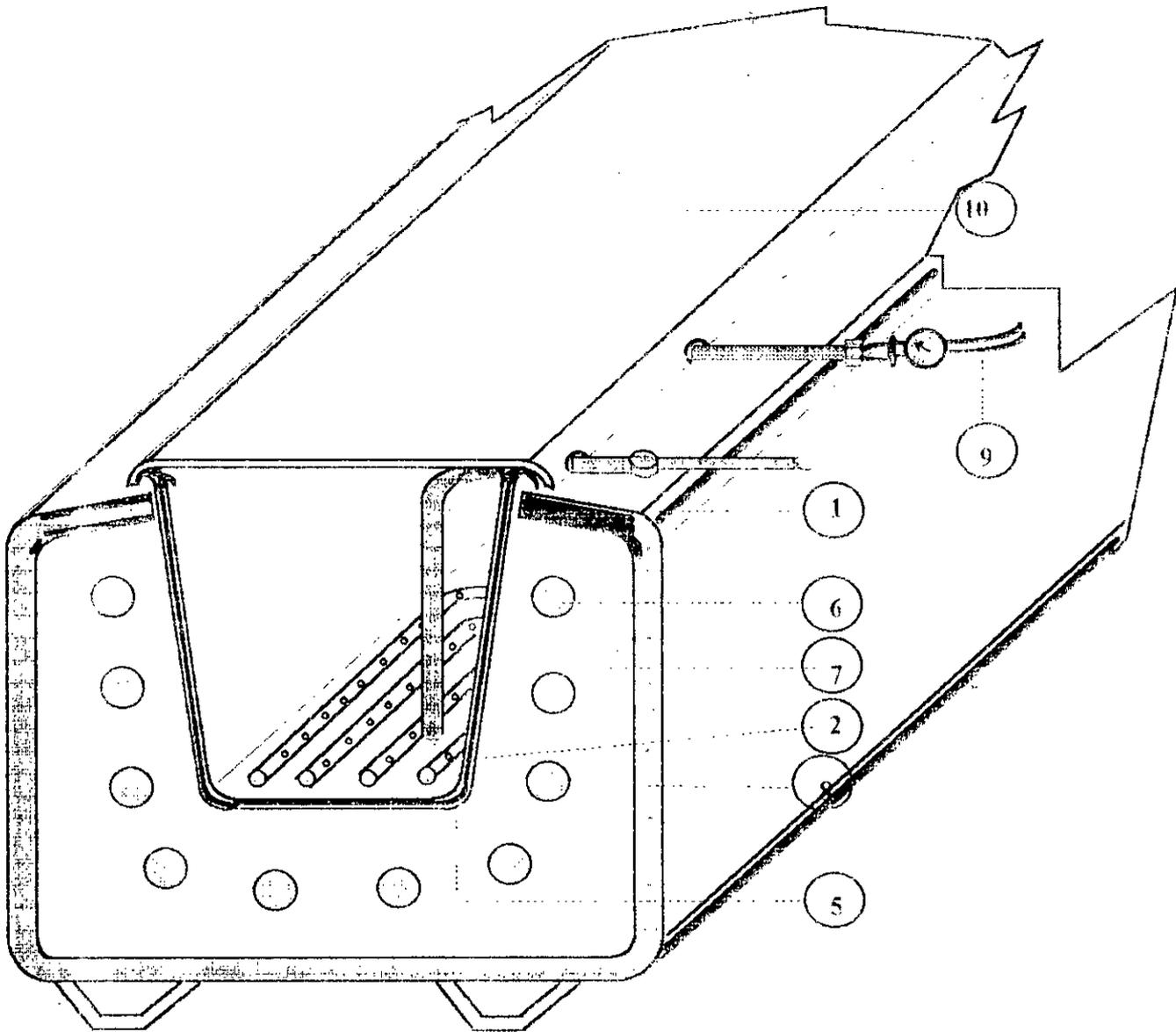


Figure IV-24: Four à bain de sel.

- |                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| 1- Thermocouple              | 6- Résistance électrique |
| 2- Tube en acier inoxydable  | 7- Réfractaire           |
| 3- Sortie d'air sec comprimé | 8- Enveloppe du four     |
| 4- Bain de cyanures          | 9- arrivé d'air comprimé |
| 5- Creuset                   | 10- Couvercle            |

## IV.9.2- Caractérisation de la couche nitrurée.

### IV.9.2.1- Analyse microstructurale.

Avec le traitement à bain de sel utilisé, nous avons pu obtenir sur l'acier 30NCD16 les principales configurations suivantes (figure IV-25 et figure IV-26).

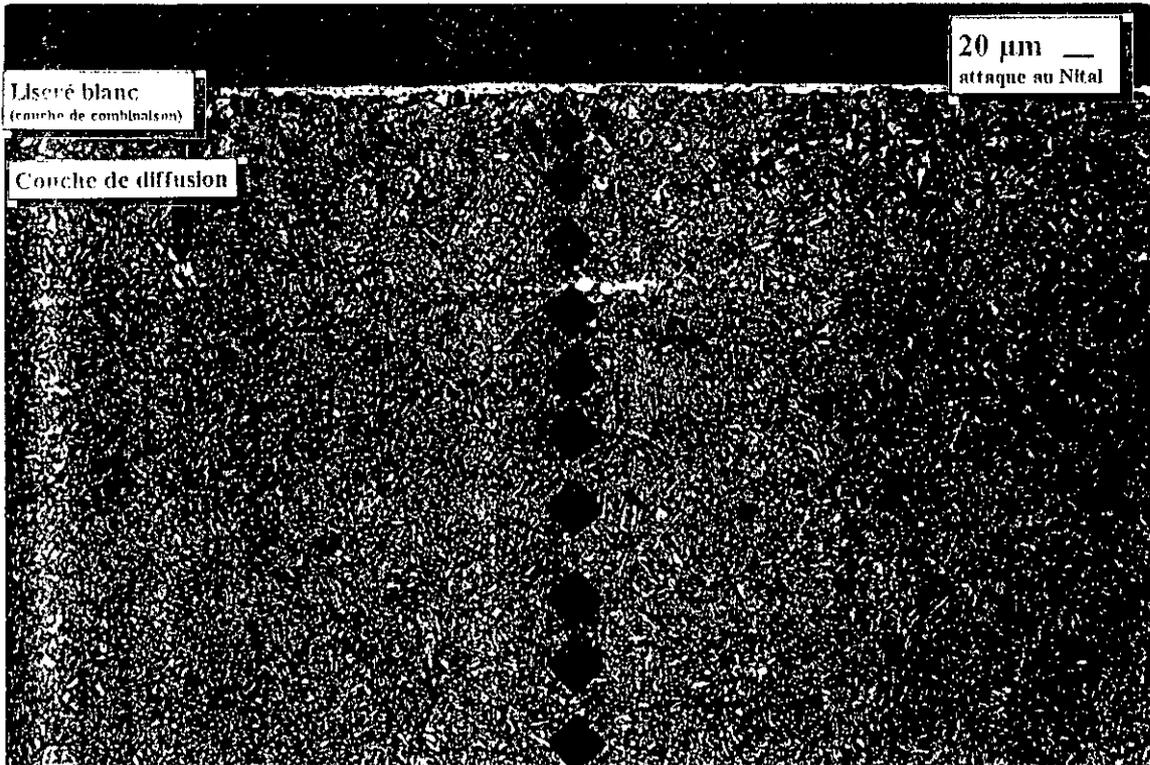


Figure IV-25: Coupe micrographique de la couche nitrurée obtenue sur l'acier 30NCD16, après 1 heure de traitement dans le bain de cyanure.

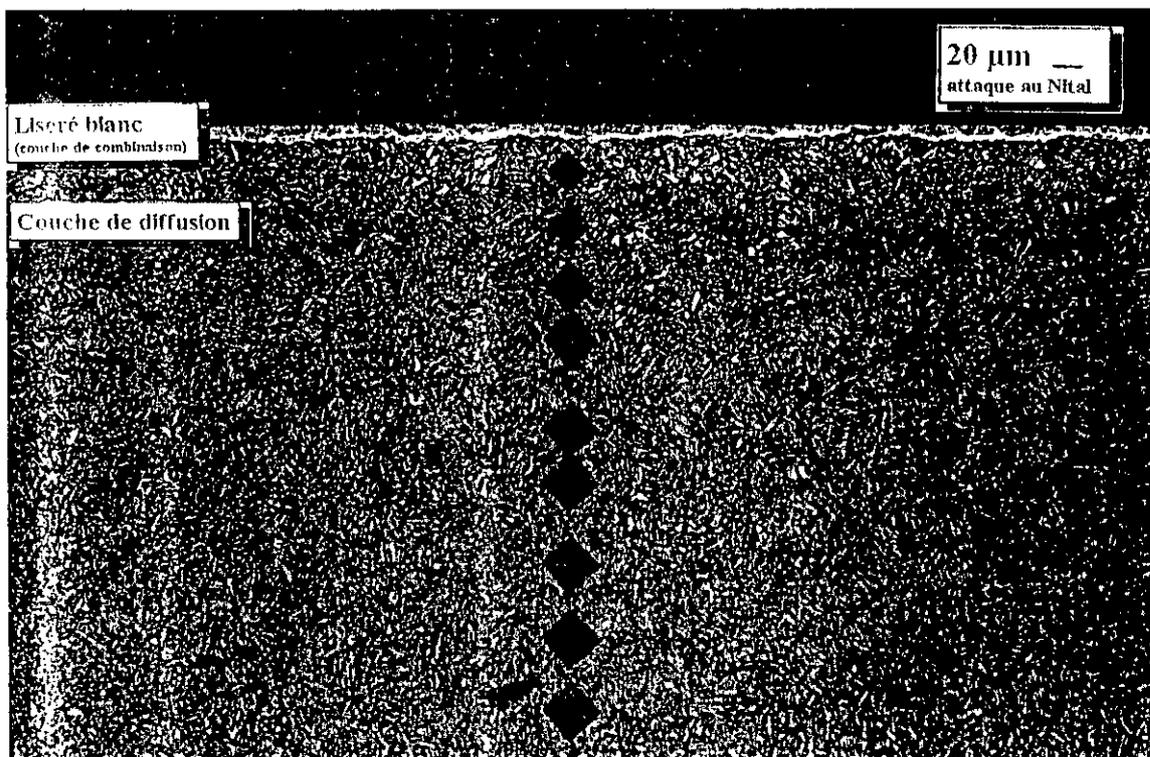


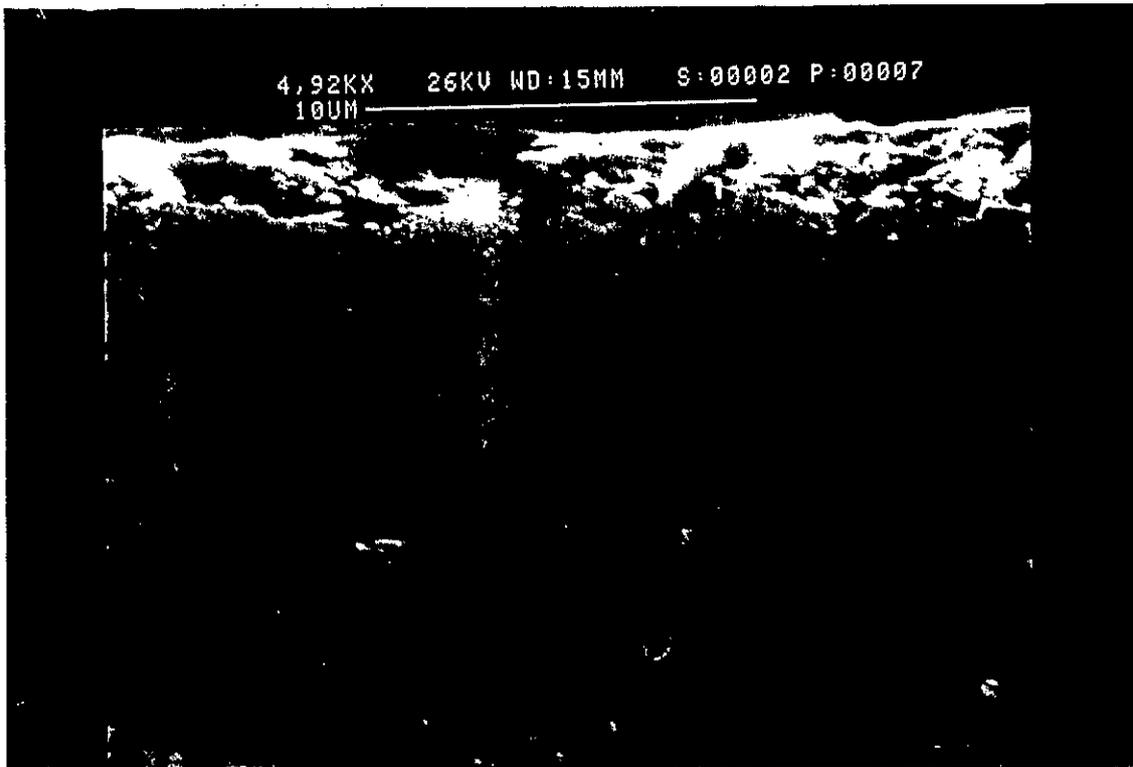
Figure IV-26 : Coupe micrographique de la couche nitrurée obtenue sur l'acier 30NCD16, après 3 heures de traitement dans le bain de cyanure.

Nous constatons:

- un liseré blanc: selon certains ouvrages, c'est une couche de combinaison  $\epsilon$ ,  $\gamma'$  ou mixte  $\epsilon/\gamma$ .
- une couche de diffusion, atteignant quelques dixièmes de millimètres de profondeur.

Nous remarquons également que la structure de la matrice après ce traitement, reste toujours sorbitique (perlite fine).

La figure IV-27, montre les porosités formées en surface au cours du traitement de nitruration liquide.



**Figure IV-27** : Pores formés sur l'acier 30NCD16 au cours du traitement de nitruration, après 3 heures de traitement dans un bain de cyanure.

L'analyse en diffraction des rayons X du substrat nitruré dans un bain de cyanure pendant 2 heures à 570C°, a révélé en plus des spectres de fer $\alpha$  et de cémentite, l'apparition d'autres spectres appartenant aux nitrures de fer (figure IV-28).



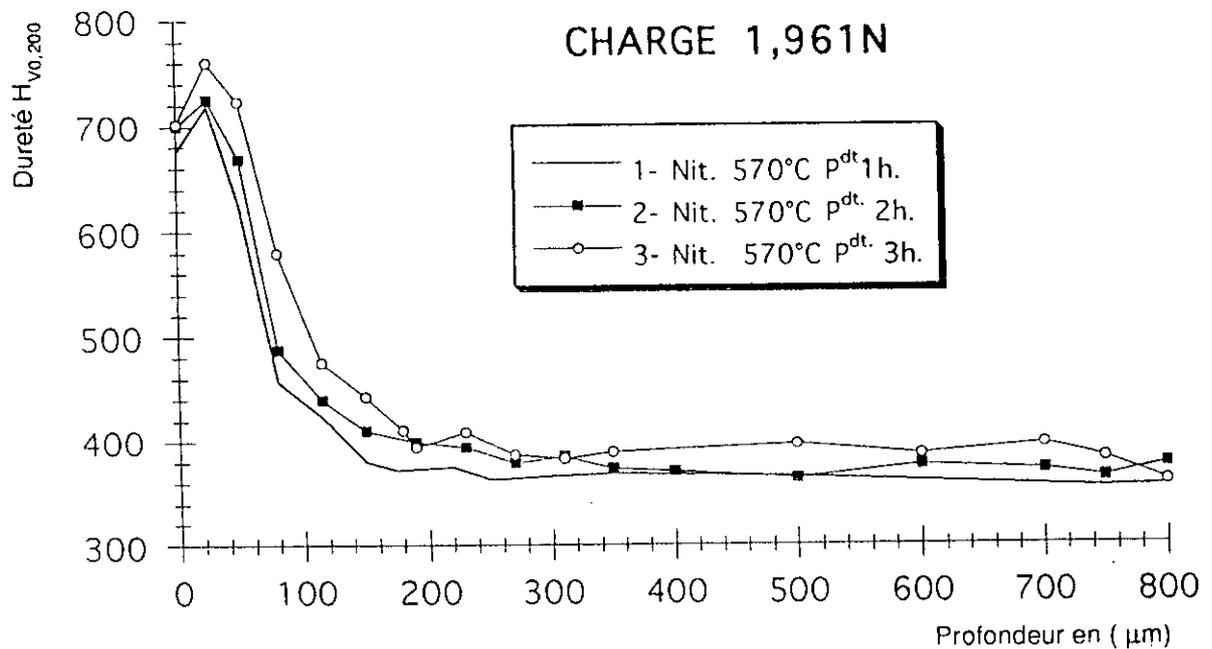


Figure IV-29 : Evolution de la dureté  $H_{v0.200}$  en fonction du traitement de nitruration dans un bain de cyanure et de la profondeur de la couche nitrurée.

Nous remarquons que la profondeur durcie est de quelques dixièmes de millimètre.

## IV.10- CARACTERISATION TRIBOLOGIQUE.

### IV. 10.1- Dispositif expérimental (Tribomètre plan-plan).

Le tribomètre permet de réaliser des essais de frottement d'un plan contre un autre (figure IV-30). Dans notre étude, le frottant est une bille en acier 100C6 ou un parallélépipède en fonte G.S.38-15, animé d'un mouvement de translation sur le substrat en acier 30 NCD 16 chromé ou nitrurée maintenu fixe.

La charge normale appliquée (2 DaN) sur les éprouvettes est assurée par un vérin à ressort. Le mouvement est transmis directement de l'arbre moteur à la broche porte-éprouvette.

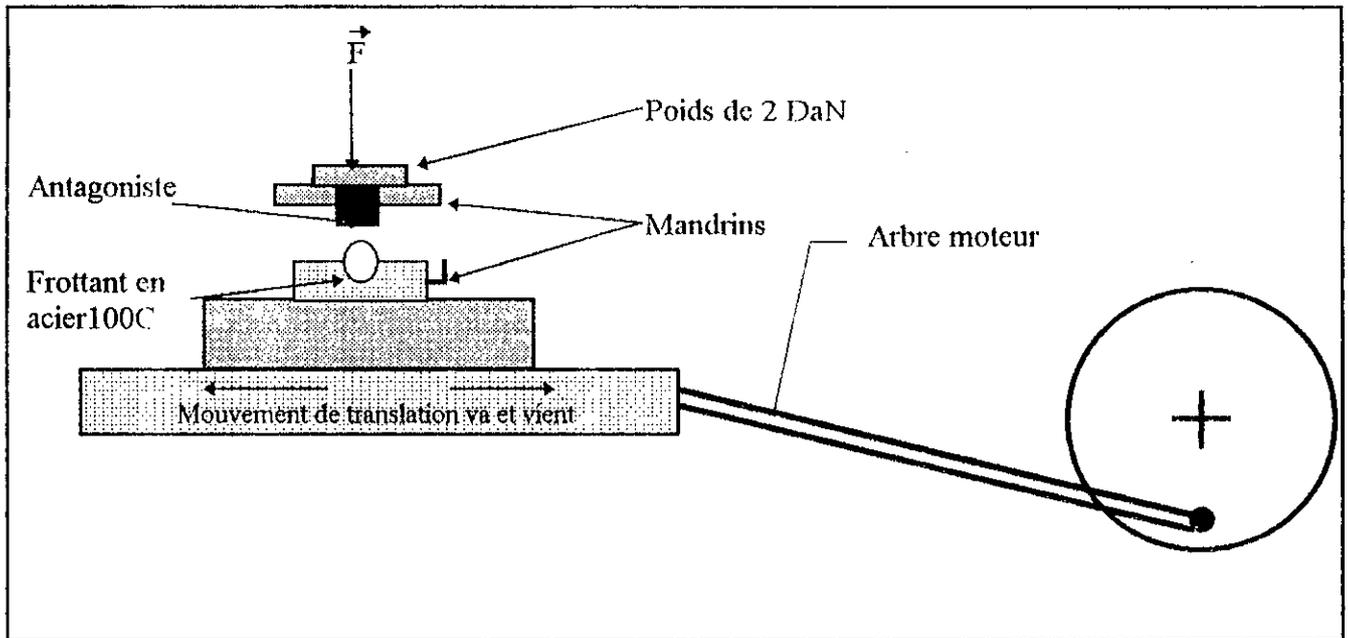


Figure IV-30: Représentation schématique du tribomètre plan-plan utilisé.

La force tangentielle ainsi que la charge appliquée sont enregistrées en continu par l'intermédiaire de capteurs de force. Ceci, permet de suivre les variations du coefficient de frottement  $\mu$ , tout au long de l'essai.

#### IV.10.2- Les frottants utilisés.

a- le frottant en acier à roulement 100C6 est une bille de diamètre 10 mm..

b- le frottant que nous avons préparé est un parallélépipède de  $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$  en fonte G.S.38-15. Selon l'analyse au spectromètre à étincelle d'une médaille (prélevée pendant la coulée), la composition chimique de la fonte G.S.38-15 est la suivante (Tableau V-6).

C %	Si %	Mn %	S %	P %	Mg %	Ni %	Cr %	Mo %	Al %	Ce %
3.60	2.53	0.275	0.007	0.028	0.059	0.066	0.072	0.024	0.016	0.89

Tableau IV-6: Composition chimique du frottant en fonte G.S.38-15.

La structure microscopique de cette fonte après attaque au nital est représentée dans la figure IV-31.



**Figure IV-31:** Microstructure du frottant en fonte G.S.38-15.

La figure présente une structure à graphite sphéroïdale dispersé uniformément dans une matrice ferritique.

#### IV.10.3 Conditions d'essais.

Tout au long de cette étude, la charge et la vitesse de glissement sont maintenues constantes (2 DaN; 20Trs/ mn). La durée de glissement est de 43 minutes.

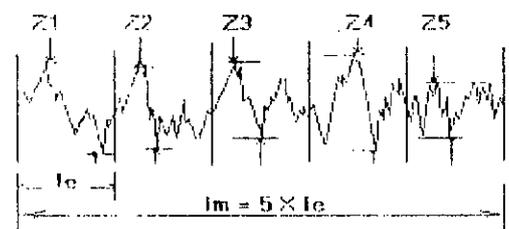
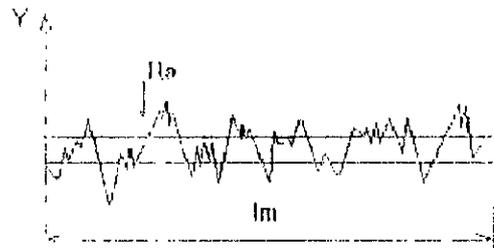
Avant l'opération de frottement, nous avons mesuré la rugosité de toutes les éprouvettes grâce à un rugosimètre mécanique à palpeur type perthen C5D.

- la rugosité moyenne  $R_a$  est la moyenne arithmétique de tous les écarts du profil de rugosité  $P$  par rapport à la ligne moyenne.

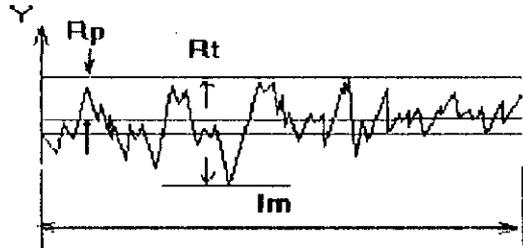
$$\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y| dx.$$

- la rugosité maximale  $R_{max}$ : c'est la plus forte des rugosités  $Z$  détectées sur les 5 longueurs partielles d'évaluation  $l_e$  de la longueur totale  $l_m$ .

$$R_{max} = Z_4$$



- la capacité d'aplanissement  $R_p(M)$  : c'est l'écart vertical entre le point le plus haut et la ligne moyenne du profil de rugosité R sur la longueur totale d'évaluation.



En outre, les courbes que nous donnons sont la moyenne de plusieurs essais, dans une condition donnée. La dispersion des mesures est faible, c'est pourquoi nous n'indiquerons pas de zones d'erreurs sur les courbes que nous donnons ultérieurement.

#### IV.10.4- Moyens d'investigation.

Pour suivre l'évolution de l'endommagement des éprouvettes, nous avons procédé aux observations des surfaces usées à l'aide d'un microscope optique et électronique à balayage (M.E.B).

#### IV.10.5- Evolution générale du coefficient de frottement.

L'évolution des coefficients de frottement enregistrés en cours d'essais ont tous une période courte de transition qui correspond à l'accommodation des surfaces, suivi par une période caractérisée par des instabilités transitoires qui correspondent à la création et à l'élimination du 3<sup>ème</sup> corps crée à l'interface.

##### IV.10.5.1- Evolution du coefficient de frottement sur un antagoniste en fonte G.S.38-15.

La rugosité de la surface de l'antagoniste est représentée sous forme de graphe sur la figure IV-32.

*a- couple acier 100C6 - fonte G.S.38-15.*

La courbe donnant la variation du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle est représentée sur la figure IV-33a. L'allure de la courbe est perturbée pendant les premiers cycles, mais devient constante après 400 cycles, le coefficient de frottement reste inférieur à 0,6 pendant toute la durée de l'essai.

*b- couple fonte G.S.38-15 - fonte G.S.38-15.*

La figure IV-33b représente l'allure croissante du coefficient de frottement avant 600 cycles puis, elle devient constante en atteignant la valeur  $\mu = 0,4$ .

Nous remarquons également le meilleur comportement enregistré en cas d'utilisation de la fonte comme frottant.

#### IV.10.5.2- Evolution du coefficient de frottement sur un antagoniste en acier 30 NCD 16.

*a/ couple acier 100C6 - acier 30 NCD 16 trempé à 850 C° dans l'huile et revenu à 600C°*

La figure IV-35a, donne la courbe du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles. La valeur initiale de  $\mu = 0,78$ , croit avec l'augmentation du nombre de cycles. Aux environs de 1000 cycles, la courbe atteint la valeur  $\mu = 0,84$ .

L'empreinte de frottement de la bille contre l'antagoniste est représentée sur la figure IV-36a.

*b/ couple fonte GS 38-15 - acier 30NCD16 trempé à 850C° dans l'huile et revenu à 600C°*

La figure IV-35b, représente graphiquement la variation du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles. Nous observons le meilleur comportement au frottement de la fonte G.S.38-15 par rapport à la bille en acier 100C6. Le coefficient de frottement reste inférieur à 0,4 pendant toute la durée de l'essai de frottement. Nous remarquons également la faible perturbation au début de l'essai jusqu'à 600 cycles.

La figure IV-36b, représente l'empreinte de frottement et les débris qui restent piégés dans l'interface adhérent au substrat et le protègent d'une dégradation plus sévère. Ces débris se présentent sous formes de plaquettes striées parallèlement au sens de frottement à la suite de glissement du parallélépipède en fonte G.S.38-15.

Nous remarquons également que la surface de l'antagoniste en acier 30 NCD 16, présente des stries parallèles au sens du glissement, provoquées par le frottant en fonte G.S.38-15, leur profondeur est plus petite que l'empreinte laissée par le frottant en acier 100C6.

**Etat de l'antagoniste .**

- Fonte : « G.S.38-15 »

Echelle verticale : 0,5  $\mu$ m  
 Longueur parcourue: 4,8 mm  
 10 mm papier correspond à 500  $\mu$ m  
 Longueur d'onde «  $\lambda$  » = 0,8  
 rugosité moyenne « Ra » = 0,105  
 rugosité maximale « Rmax » = 0,868  
 Capacité d'aplanissement Rp = 0,546

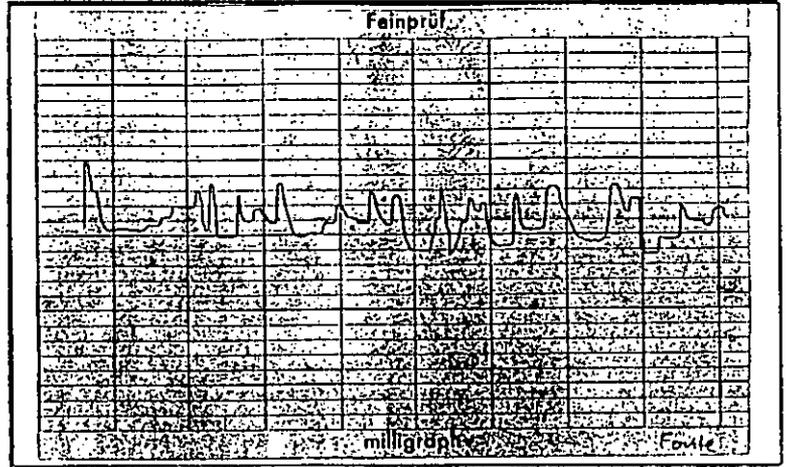
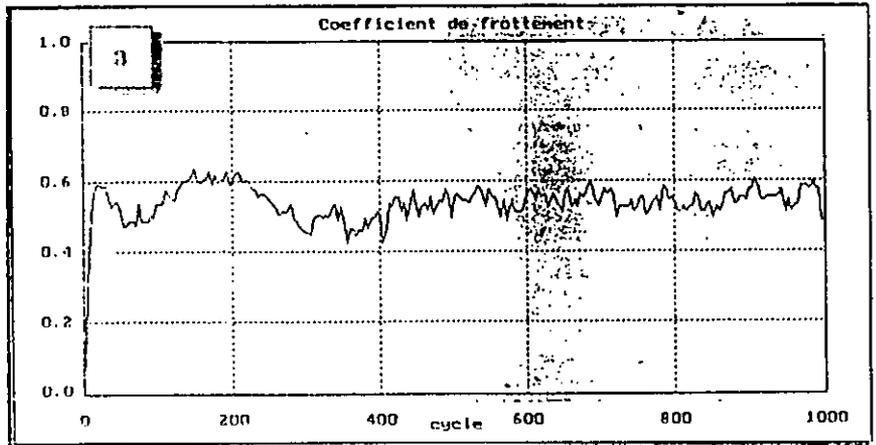


Figure IV-32: Rugosité de la surface avant frottement

**Essai de frottement**

Ech. Mobile: Fonte GS.38-15  
 Ech. fixe: Bille en acier 100C6

Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence ( t/mn ) : 20.00  
 Nombre de cycle : 1000



**Essai de frottement**

Ech. Mobile: Fonte G.S38-15  
 Ech. fixe: Fonte G.S38-15

Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence ( t/mn ) : 20.00  
 Nombre de cycle : 1000

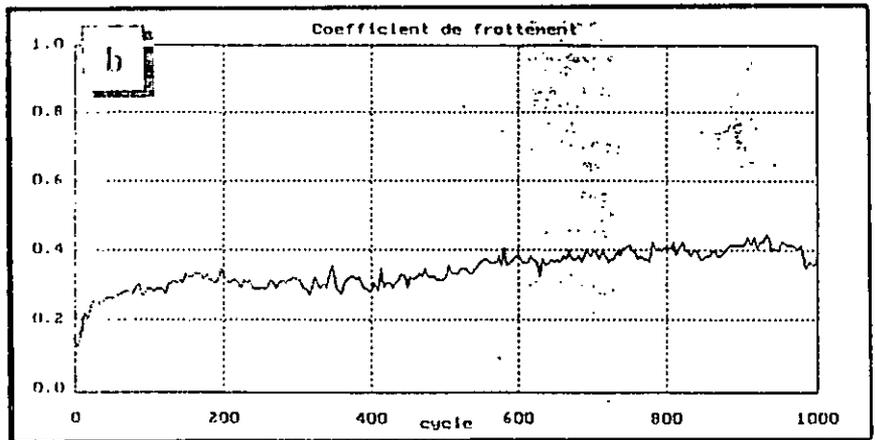


Figure IV-33: Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle.  
 a/ couple fonte G.S.38-15 - bille en acier 100C6.  
 b/ couple fonte G.S.38-15 - fonte G.S.38-15.

### Etat de l'antagoniste .

- ACIER : « 30NCD 16 »

- Traitements:

1 - Trempe à l'huile 850°C.

2 - Revenu à 600°C.

Echelle verticale : 0,25  $\mu\text{m}$   
 Longueur parcourue: 4,8 mm  
 10 mm papier correspond à 500  $\mu\text{m}$   
 Longueur d'onde «  $\lambda$  » = 0,8  
 rugosité moyenne «  $R_a$  » = 0,019  
 rugosité maximale «  $R_{\text{max}}$  » = 0,215  
 Capacité d'aplanissement  $R_p$  = 0,149

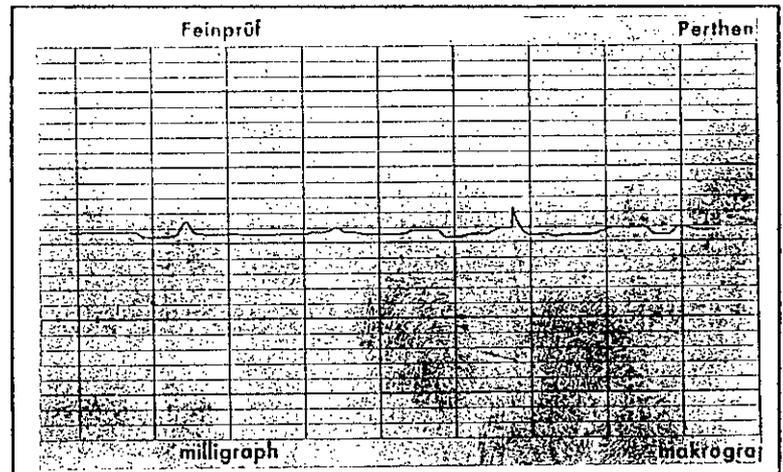
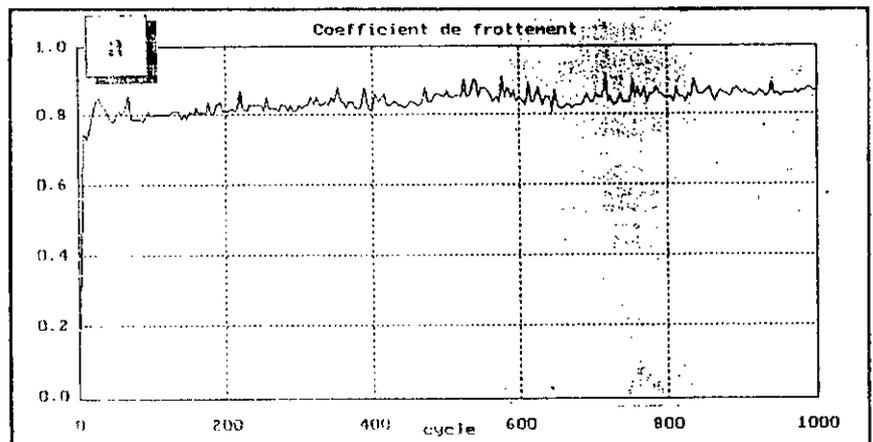


Figure IV-34: Rugosité de la surface avant frottement

#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16  
 Ech. fixe: Bille (acier 100C6)

Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence ( t/mn ) : 20.00  
 Nombre de cycle : 1000



#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30 NCD 16  
 Ech. fixe: Fonte G.S.38-15

Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence ( t/mn ) : 20.00  
 Nombre de cycle : 1000

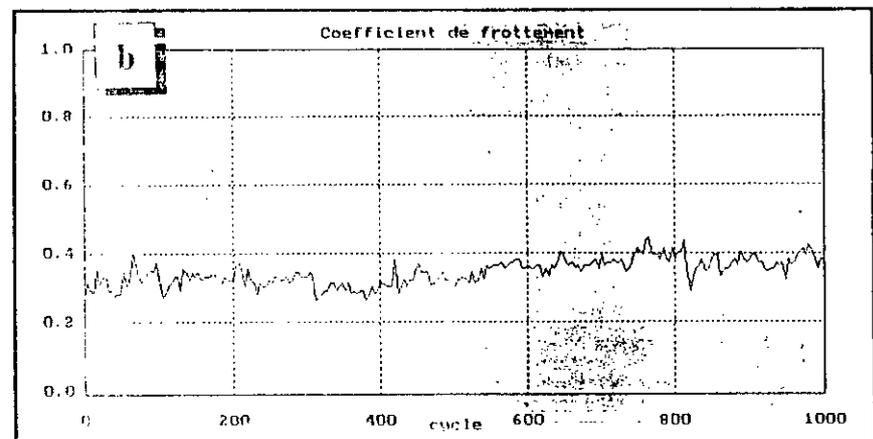
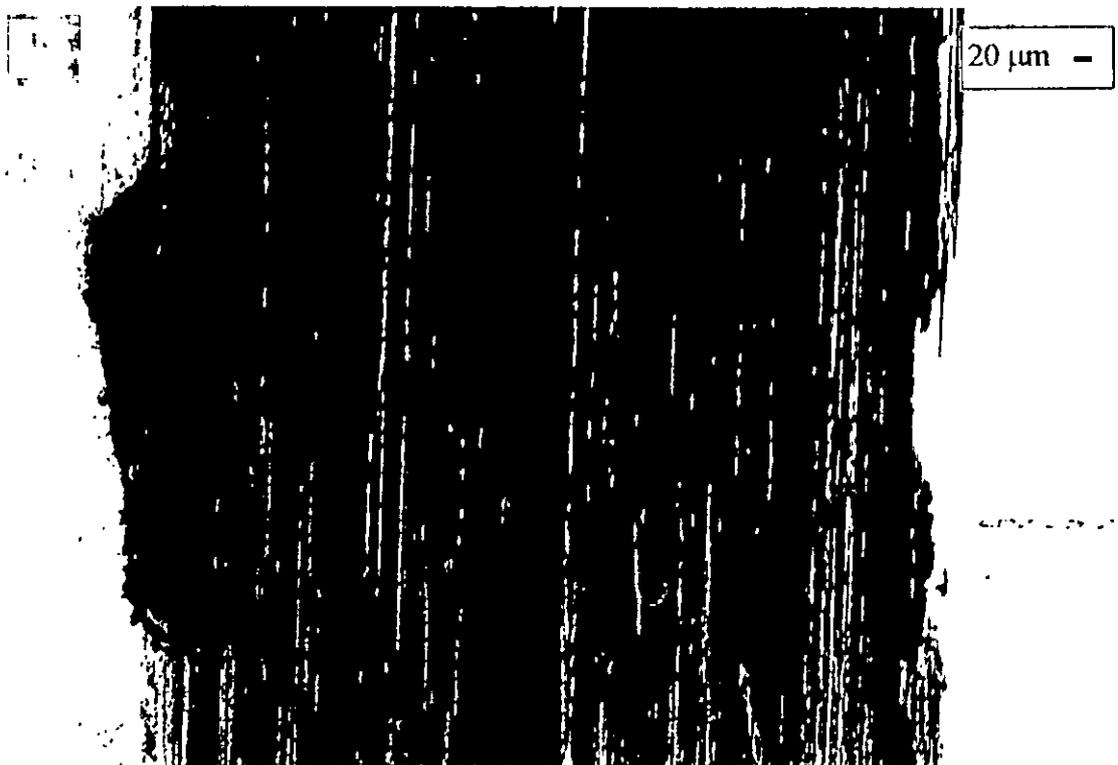
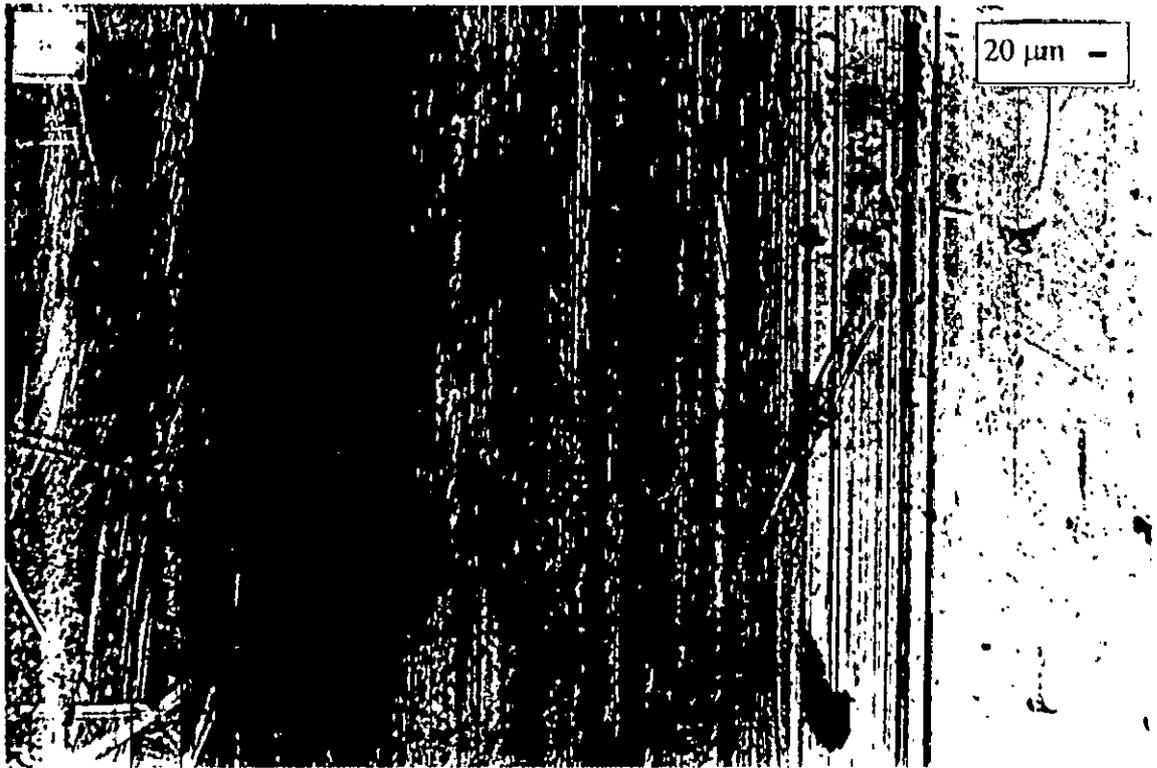


Figure IV-35: Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle.

a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}\text{C}}$ ,  $R_V 600^{\circ}\text{C}$ ) - bille en acier 100C6.

b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}\text{C}}$ ,  $R_V 600^{\circ}\text{C}$ ) - fonte G.S.38-15.



**Figure IV-36:** Traces d'usure et formation des débris après frottement à sec.

*a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}$ ,  $R_V 500^{\circ}C$ ) - bille en acier 100C6.*

*b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}$ ,  $R_V 500^{\circ}C$ ) - fonte G.S. 38-15.*

#### IV.10.5.3- Evolution du coefficient de frottement sur un antagoniste en acier 30 NCD 16 chromé.

La figure V-37, représente la rugosité avant frottement de la surface chromée de l'antagoniste, avec une densité de courant  $i_d = 35A/dm^2$ .

Nous remarquons que la rugosité moyenne  $R_a = 0,061$  du dépôt de chrome est plus élevée que celle du substrat nu  $R_a = 0,019$  (figure IV-34). Cette différence de rugosité est due à la qualité de la surface du dépôt de chrome qui présente des bourgeons (nodules) formées d'une façon successive lors de la déposition électrolytique du chrome. Le nombre et la hauteur de ces bourgeons s'avèrent dépendre de la densité de courant. L'utilisation d'un courant  $i_d = 45A/dm^2$ , augmente le volume et la hauteur des nodules d'où la rugosité moyenne sera  $R_a = 0,112$  (figure V-40).

*a/ couple bille en acier 100C6 - acier 30 NCD 16 chromé avec une densité de courant  $i_d = 35A/dm^2$*

L'empreinte de frottement de la bille en acier 100C6 sur l'antagoniste présente une surface quasiment dénudée de transfert et striée parallèlement au sens du frottement. Les bourgeons ont tendance à disparaître sous l'effet d'usure (figure IV-39a).

L'évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle est illustrée sous forme de graphe dans la figure IV-38a. L'allure de la courbe est croissante, elle commence avec un coefficient de frottement  $\mu = 0,43$  et augmente d'une façon monotone avec le nombre de cycle jusqu'à  $\mu = 0,58$  correspondant à 1200 cycles. Entre 1200 cycles et 1600 cycles, la courbe connaît une perturbation plus marquée qu'auparavant et elle atteint la valeur  $\mu = 0,6$  correspondant à 1600 cycles, puis redevient croissante et monotone.

*b/ couple fonte G.S.38-15 - acier 30 NCD 16 chromé avec une densité de courant  $i_d = 35A/dm^2$ .*

La figure IV-38b, représente l'évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle  $n$ . Nous observons une nette augmentation du coefficient de frottement qui passe de 0,18 à 0,4 environ. Au début, cette augmentation était rapide, elle atteint son maximum  $\mu = 0,4$  après 450 cycles. Nous constatons également que le coefficient de frottement de la fonte G.S.38-15 sur le chrome est environ la moitié du coefficient de frottement de l'acier 100C6 sur le chrome.

L'évolution de la structure du dépôt de chrome avec l'usure par frottement de glissement à sec, met en évidence des débris de fonte G.S.38-15. Il s'agit éventuellement d'un mélange de graphite et d'oxydes arrachés de la fonte. Les nodules du dépôt de chrome ne sont pas fortement atteints par l'usure (figure IV-39b).

### Etat de l'antagoniste .

- ACIER : « 30NCD 16 »

- Traitements:

1 - Trempe à l'huile 850°C.

2 - Revenu à 600°C.

3- Chromage (35 A/dm<sup>2</sup>, durant 1 h 30').

Echelle verticale : 0,5 μm  
 Longueur parcourue: 4,8 mm  
 10 mm papier correspond à 500 μm  
 Longueur d'onde « λ » = 0,8  
 rugosité moyenne « Ra » = 0,061  
 rugosité maximale « Rmax » = 0,756  
 Capacité d'aplanissement Rp = 0,399

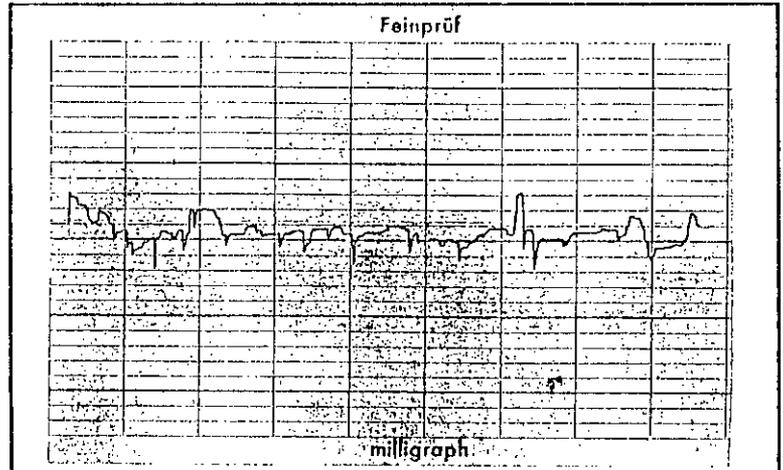


Figure IV-37: Rugosité de la surface avant frottement

#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16 Ch. 35A/dm<sup>2</sup>

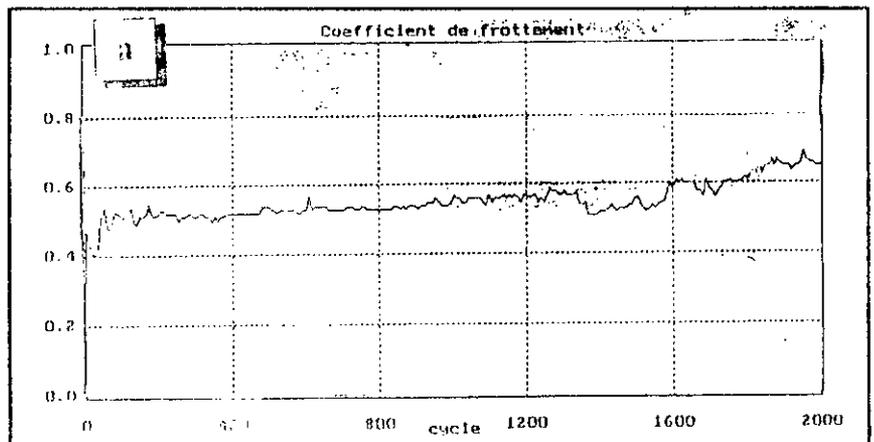
Ech. fixe: Bille (100C6)

Force normale (DaN): 2

Déplacement (mm) : 2

Fréquence ( t/mn ) : 20.00

Nombre de cycle : 1000



#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16

Ech. fixe: Fonte G.S.38-15

Force normale (DaN): 2

Déplacement (mm) : 2

Fréquence ( t/mn ) : 20.00

Nombre de cycle : 1000

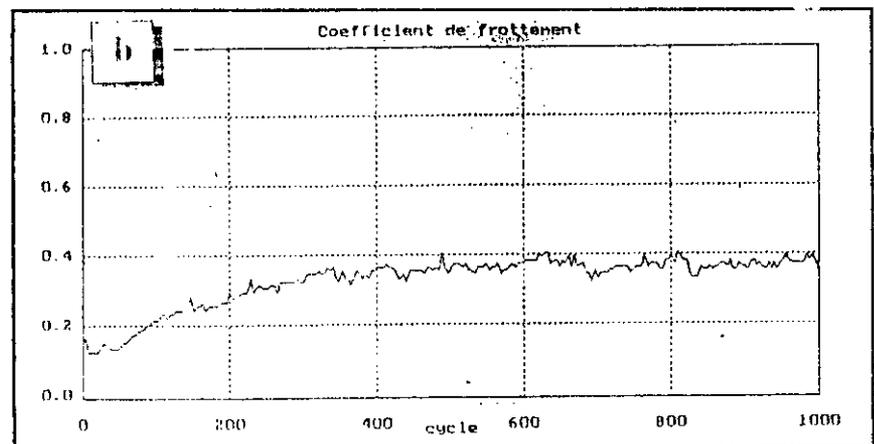
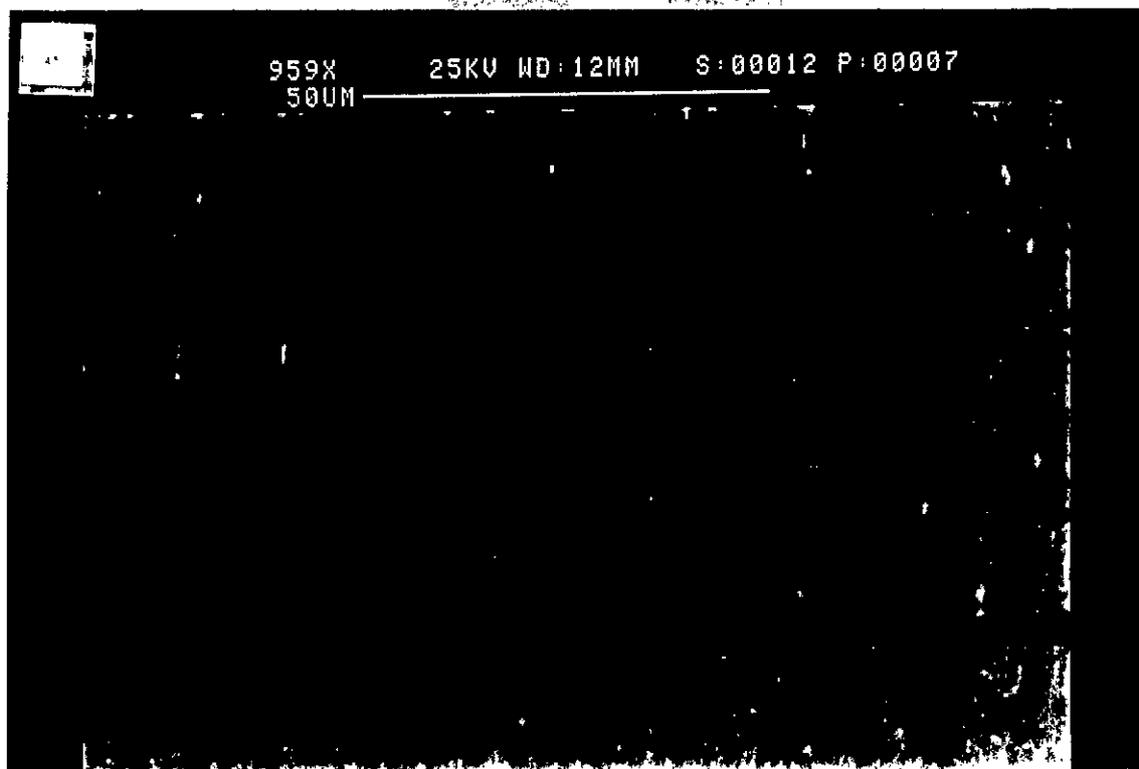


Figure IV-38: Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle.

a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}$ ,  $R_V 600^{\circ}C$ ) chromé ( $i_d = 35 A/dm^2$ ) - bille en acier 100C6.

b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}$ ,  $R_V 600^{\circ}C$ ) chromé ( $i_d = 35 A/dm^2$ ) - fonte G.S.38-15.



**Figure IV-39:** Traces d'usure et formation des débris après frottement à sec.

*a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}, R_V 600^{\circ}C$ ) chromé ( $i_d = 35A/dm^2$ ) - bille en acier 100C6.*  
*b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}, R_V 600^{\circ}C$ ) chromé ( $i_d = 35A/dm^2$ ) - fonte G.S.38-15.*

*c/ couple bille en acier 100C6 - acier 30 NCD 16 chromé à 45 A/dm<sup>2</sup>.*

La courbe du coefficient de frottement passe par une période transitoire au début de l'essai, puis par une période de perturbation entre 200 et 600 cycles pour se stabiliser enfin aux environs de  $\mu = 0,6$  sans toutefois dépasser cette valeur (figure IV-41a).

La surface du dépôt de chrome a subit une usure qui a laissé des stries sur les nodules. Les débris semblent détachés et expulsés hors du contact, cependant nous observons quelques particules ou débris d'usure entre les nodules (figure IV-42a).

*d/ couple fonte G.S.38-15 - acier 30 NCD 16 chromé à 45 A/dm<sup>2</sup>.*

La figure IV-41b, présente l'évolution du coefficient de frottement  $\mu$  en fonction du nombre de cycles. L'allure de la courbe est progressivement croissante, cette augmentation de  $\mu$ , passe de 0,17 à 0,38 après un essai de 1000 cycles. La vitesse de croissance de  $\mu$  est moins rapide que celle obtenue avec un dépôt de 35 A/dm<sup>2</sup>. Cependant, notons la différence des valeurs de coefficient de frottement à chaque cycle par rapport à celle obtenue avec un dépôt de 35 A/dm<sup>2</sup>.

Les débris et les traces d'usure laissés par le frottant en fonte G.S.38-15 sur la surface du dépôt de chrome après l'essai de frottement sont illustrés sur la figure IV-42b.

### Etat de l'antagoniste .

- ACIER : « 30NCD 16 »
- Traitements:
  - 1 - Trempe à l'huile 850°C.
  - 2 - Revenu à 600°C.
  - 3 - Chromage (45 A/dm<sup>2</sup>, durant 1 h 30').

Echelle verticale : 0,5 μm  
 Longueur parcourue: 4,8 mm  
 10 mm papier correspond à 500 μm  
 Longueur d'onde « λ » = 0,8  
 rugosité moyenne « Ra » = 0,112  
 rugosité maximale « Rmax » = 0,982  
 Capacité d'aplanissement Rp = 0,340

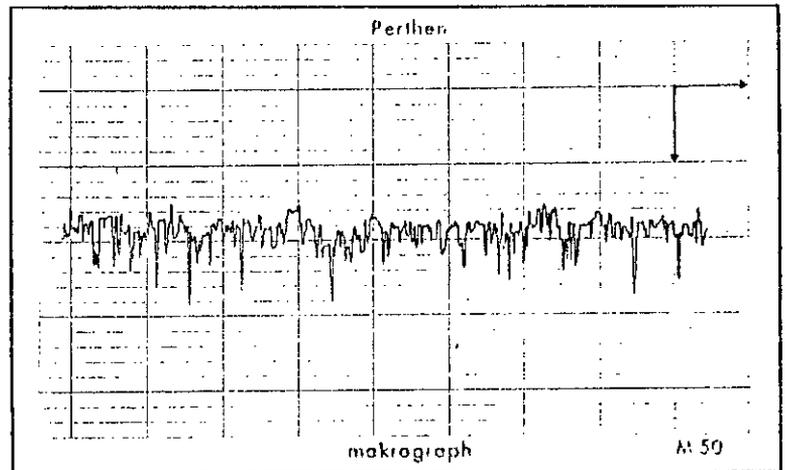
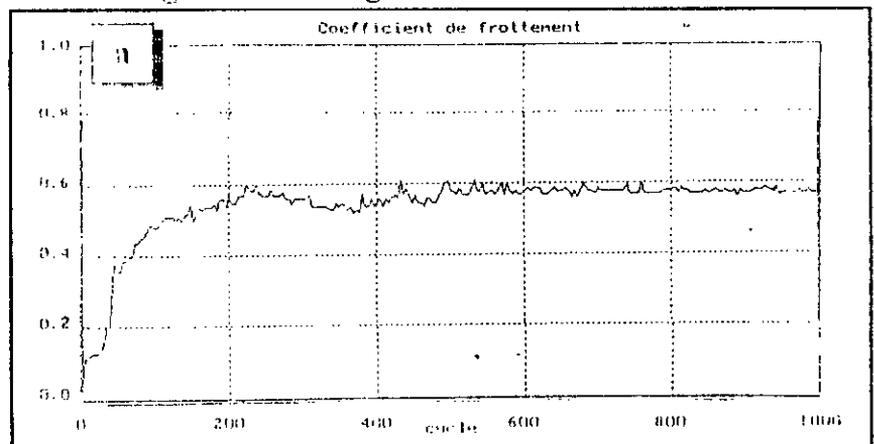


Figure IV-40: Rugosité de la surface avant frottement

#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16 Ch. 45A/dm<sup>2</sup>  
 Ech. fixe: Bille (100C6)

Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence (1/mn) : 20,00  
 Nombre de cycle : 1000



#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16 Ch. 45A/dm<sup>2</sup>  
 Ech. fixe: Fonte G.S.38-15

Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence (1/mn) : 20,00  
 Nombre de cycle : 1000

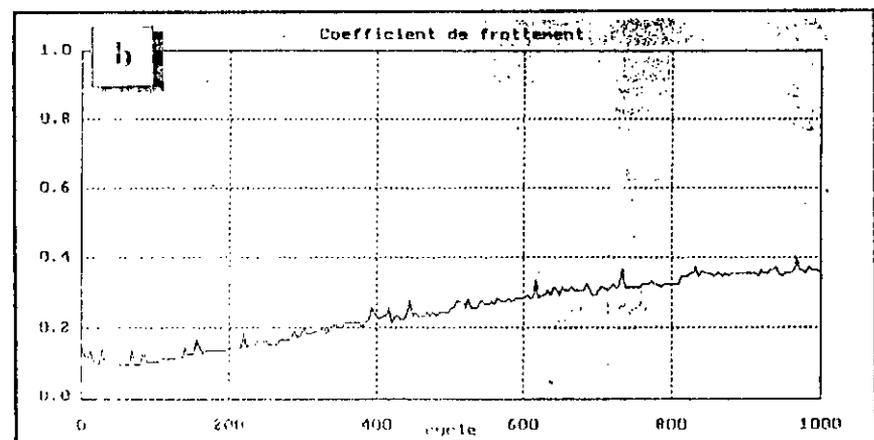
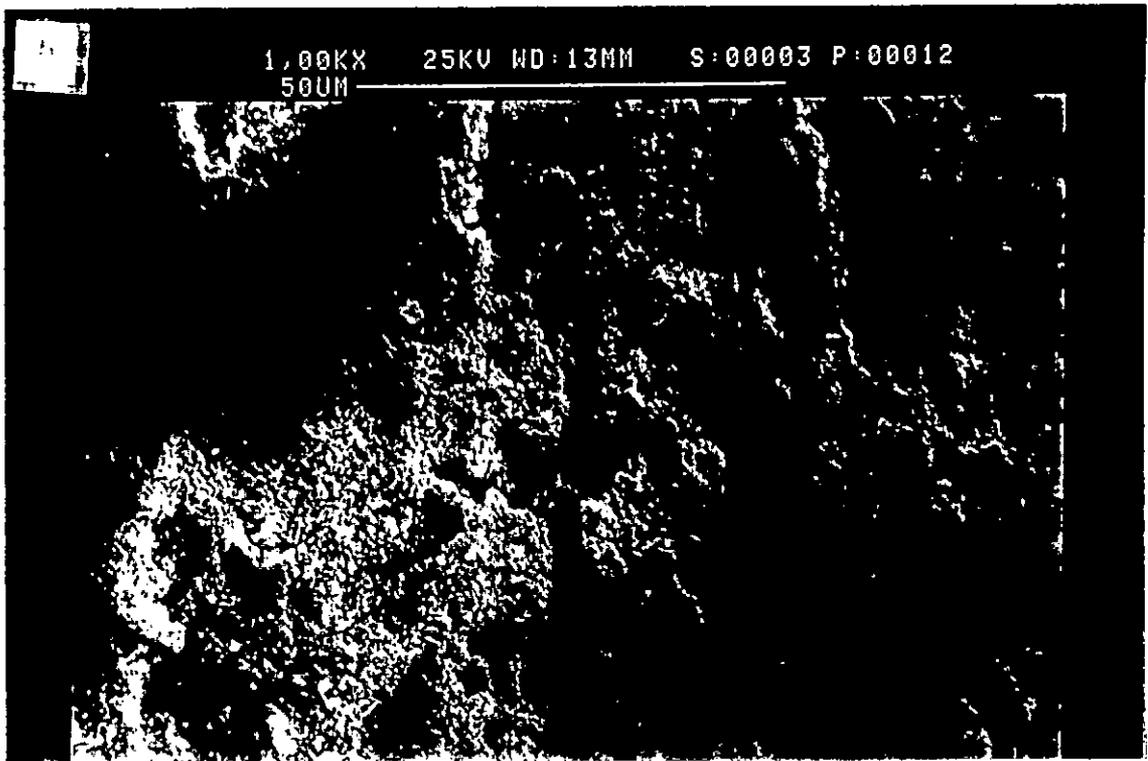
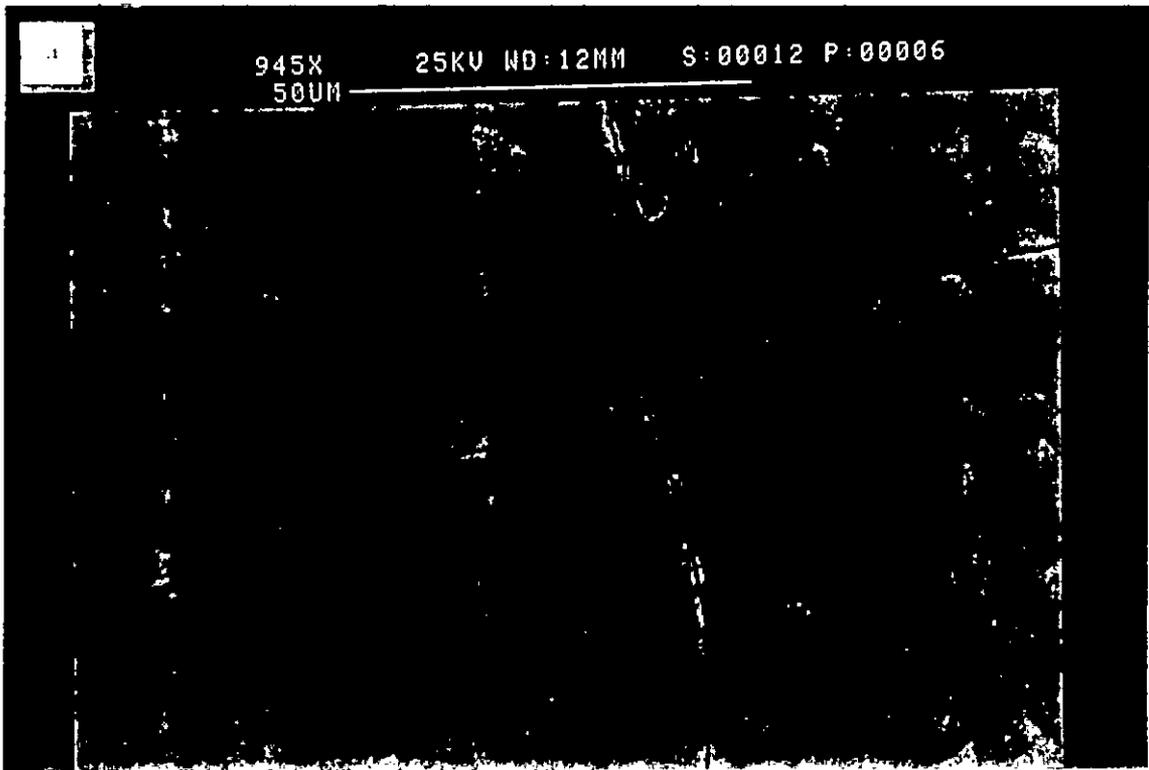


Figure IV-41: Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle.

a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}$ ,  $R_V 600^{\circ}C$ ) chromé ( $i_d = 45 A/dm^2$ ) - bille en acier 100C6.  
 b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}$ ,  $R_V 600^{\circ}C$ ) chromé ( $i_d = 45 A/dm^2$ ) - fonte G.S.38-15.



**Figure IV-42:** Traces d'usure et formation des débris après frottement à sec.

*a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}$ ,  $R_V 600^{\circ}C$ ) chromé ( $i_A = 45 A/dm^2$ ) - bille en acier 100C6.*  
*b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}C}$ ,  $R_V 600^{\circ}C$ ) chromé ( $i_A = 45 A/dm^2$ ) - fonte G.S.38-15.*

*el couple bille en acier 100C6 - acier 30 NCD 16 chromé à 35 A/dm<sup>2</sup> et revenu à 320C° pendant 2 heures.*

La rugosité de la surface de l'antagoniste avant frottement est représentée sur la figure IV-43. Nous remarquons que la rugosité moyenne  $R_a = 0,118$  est plus élevée que celle de la surface du dépôt de chrome obtenu avec la même densité de courant mais sans traitement thermique préalable. L'allure de la courbe du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle, marque une période de transition au début de l'essai pendant les premiers 200 cycles, puis reste quasiment constante aux environs de  $\mu = 0,77$  (figure IV-44a). Notons également que les valeurs du coefficient de frottement sont plus élevées que celles obtenues sur le même dépôt sans traitement thermique préalable.

L'examen microscopique, montre que l'essai de frottement met en évidence la structure classique fissurée du dépôt (figure IV-45a). Il y a indépendance entre les sillons d'usure et la fissuration naturelle du dépôt de chrome, car les sillons traversent ces fissures sans aucune destruction à leur intersection.

*el couple fonte G.S.38-15 - acier 30 NCD 16 chromé à 35 A/dm<sup>2</sup> et revenu à 320 C° pendant 2 heures.*

La courbe du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles, présente une allure croissante depuis  $\mu = 0,4$  (figure IV-44b). Nous remarquons que les coefficients de frottement sont les mêmes que ceux obtenus avec le même dépôt mais sans traitement thermique préalable.

La figure IV-45b, montre une agglomération des débris sous forme de couche épaisses, stratifiées. La formation des couches de débris tout au long du test de frottement, traduit la continuité de destruction de frottant en fonte G.S.38-15. Nous remarquons également la grande ouverture de la fissure due à la température de revenu.

### Etat de l'antagoniste.

- ACTIER : « 30NCD 16 »
- Traitements:
  - 1 - Trempe à l'huile 850°C.
  - 2 - Revenu à 600°C.
  - 3- Chromage (45 A/dm<sup>2</sup>, durant 1 h 30').
  - 4- Revenu à 320°C pendant 2 heures.

Echelle verticale : 0,25 µm  
 Longueur parcourue: 4,8 mm  
 10 mm papier correspond à 500 µm  
 Longueur d'onde « λ » = 0,8  
 rugosité moyenne « Ra » = 0,118  
 rugosité maximale « Rmax » = 1,172  
 Capacité d'aplanissement Rp = 0,739

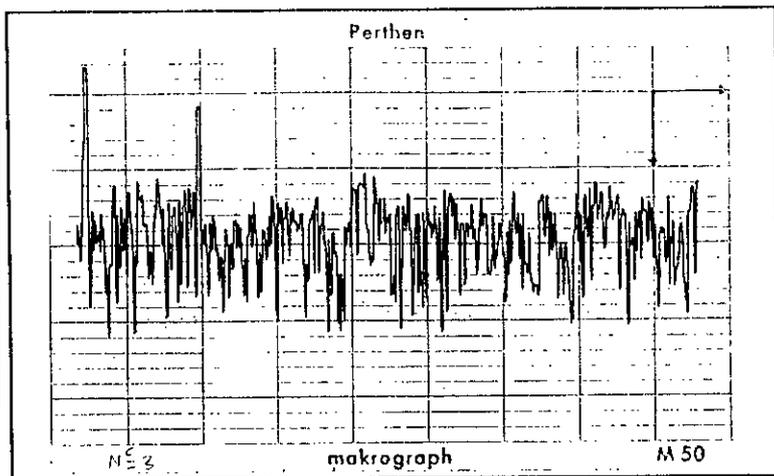
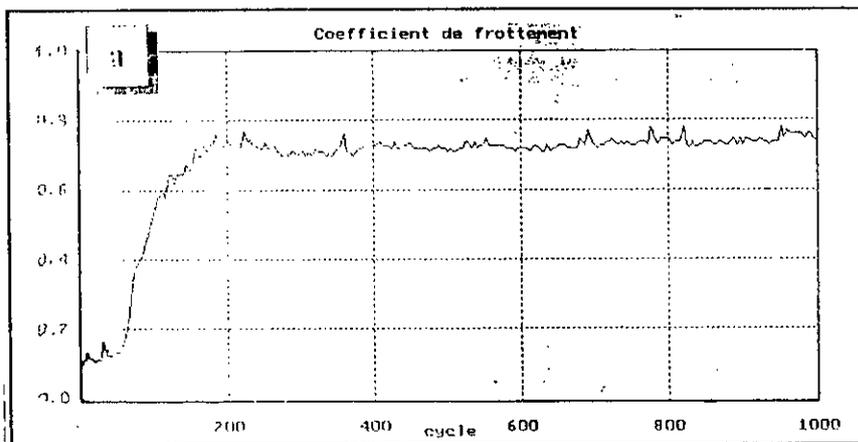


Figure IV-43: Rugosité de la surface avant frottement

#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16 Ch. 35A/dm<sup>2</sup>  
 R<sub>V320°C</sub>  
 Ech. fixe: Bille (100C6)  
 Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence (1/mn) : 20.00  
 Nombre de cycle : 1000



#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16 Ch. 35A/dm<sup>2</sup>  
 R<sub>V320°C</sub>  
 Ech. fixe: Fonte G.S 38-15  
 Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence (1/mn) : 20.00  
 Nombre de cycle : 1000

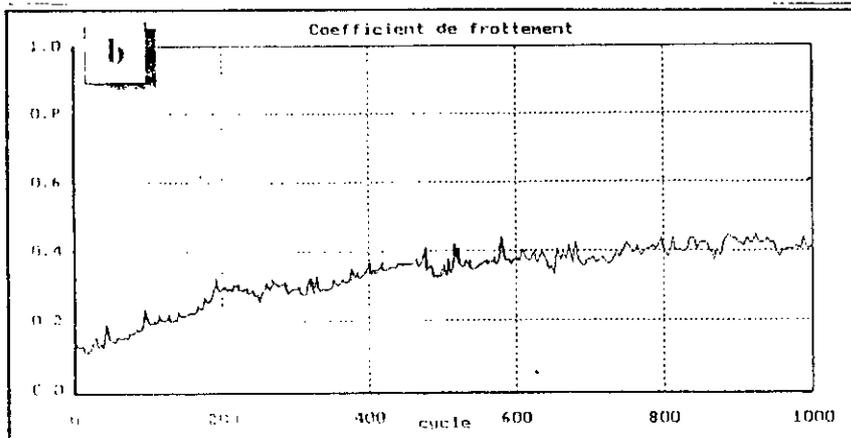


Figure IV-44: Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle.

*a/ couple acier 30 NCD 16 (T<sub>HSS0°C</sub>, R<sub>V 600°C</sub>) chromé (i<sub>A</sub>= 35A/dm<sup>2</sup>, R<sub>V320°C</sub>)-bille en acier 100C6.  
 b/ couple acier 30 NCD 16 (T<sub>HSS0°C</sub>, R<sub>V 600°C</sub>) chromé (i<sub>A</sub>= 35A/dm<sup>2</sup>, R<sub>V320°C</sub>)- fonte G.S.38-15.*

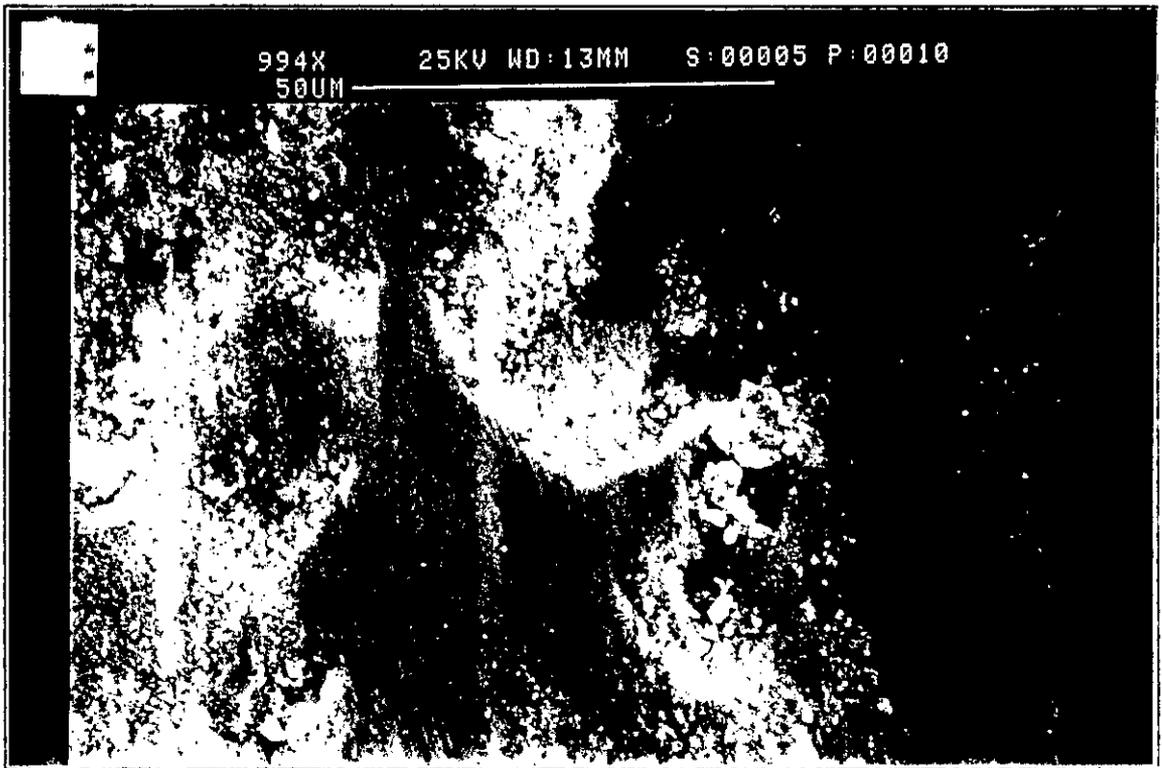
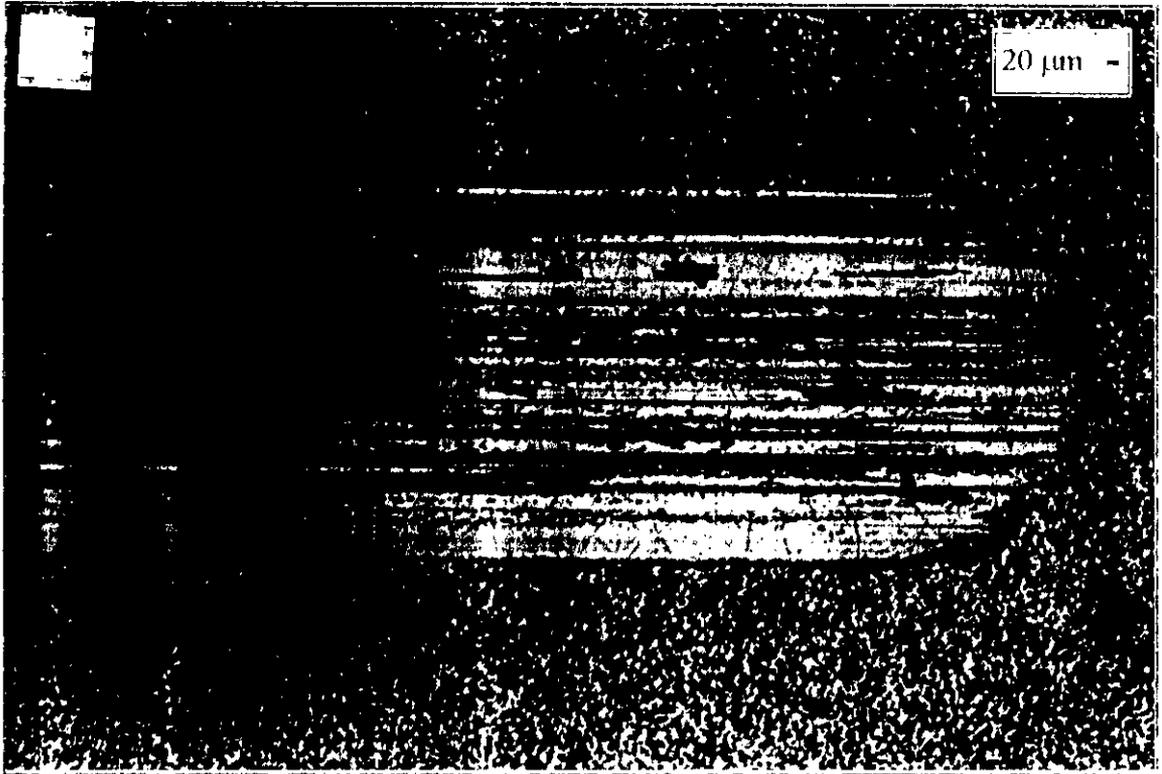


Figure IV-46. Traces d'usure et formation des débris après frottement à sec.

- a) *avant frottement* (avant le frottement) *avant le frottement* (avant le frottement)
- b) *après frottement* (après le frottement) *après le frottement* (après le frottement)

IV.10.5.4- Evolution du coefficient de frottement sur un antagoniste en acier 30 NCD 16 nitruré dans un bain de cyanure.

En examinant les graphes relatifs à la rugosité des deux surfaces de l'acier après nitruration de 1<sup>h</sup> et 3<sup>h</sup> (figures IV-46 et IV-48), nous n'excluons pas l'influence de l'opération de nitruration sur la rugosité de surface.

Nous avons supposé que tous les échantillons, avant nitruration, possédaient une même rugosité que celle présentée sur le graphique de la figure V-34. Les résultats du test de rugosité après nitruration, montre que l'échantillon qui a subi une nitruration de 3<sup>h</sup> a acquis une surface plus rugueuse que celle de l'échantillon ayant subi une nitruration de 1<sup>h</sup> (figure V-48).

a/ couple bille en acier 100C6 - acier 30 NCD 16 nitruré.

Le coefficient de frottement de ce couple apparaît constant et égale à  $\mu = 0,68$ . Nous remarquons une légère augmentation de  $\mu$  à partir de 600 cycles lorsque l'acier est nitruré pendant 1<sup>h</sup> (figure IV-47a). Cependant, le coefficient de frottement de l'acier nitruré pendant 3<sup>h</sup>, reste constant durant toute la durée de l'essai (figure IV-49a).

La figure IV-50a, permet de distinguer les débris et les traces d'usure laissés par la bille en acier 100C6 de la surface poreuse du substrat. Nous constatons que les débris d'usure qui ont la même orientation que les sillons sont fins et expulsés sur les côtés.

b/ couple fonte G.S 38-15 - acier 30 NCD 16 nitruré.

Le coefficient de frottement a une allure croissante au début de l'essai (figures IV-47b et IV-49b). Nous constatons que la courbe qui correspond au couple fonte G.S 38-15 - acier 30 NCD 16 nitruré pendant 1<sup>h</sup>, dépasse la valeur  $\mu = 0,4$ , tandis que celle qui correspond au couple fonte G.S 38-15 - acier nitruré pendant 3<sup>h</sup>, reste inférieur à 0,4 durant toute la durée de l'essai.

L'observation au microscope à balayage électronique de l'empreinte après frottement (figure IV-50b), a révélé la présence de débris rassemblés en amas. Par contre, les autres débris (fins), laissés par le frottant en bille d'acier 100C6 sont déchiquetés sur les côtés. Ceci est probablement dû à la facilité d'arrachement de grains de fonte et la présence du graphite qui joue le rôle de lubrifiant.

### Etat de l'antagoniste .

- ACIER : « 30NCD 16 »

- Traitements:

1 - Trempe à l'huile 850°C.

3- Nitruration liquide à 570 °C' durant 1 h

2 - Revenu à 600°C.

Echelle verticale : 0,5  $\mu\text{m}$   
 Longueur parcourue: 4,8 mm  
 10 mm papier correspond à 500  $\mu\text{m}$   
 Longueur d'onde «  $\lambda$  » = 0,8  
 rugosité moyenne « Ra » = 0,087  
 rugosité maximale « Rmax » = 0,791  
 Capacité d'aplanissement Rp = 0,326

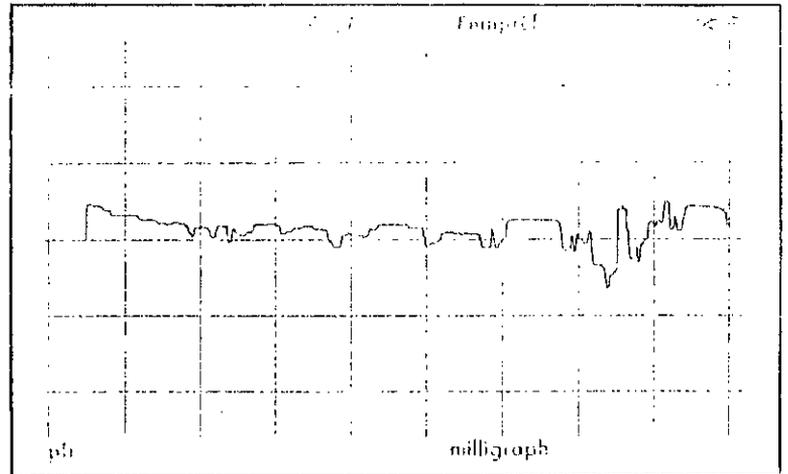


Figure IV-46: Rugosité de la surface avant frottement

#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16 Nit. 1 heure

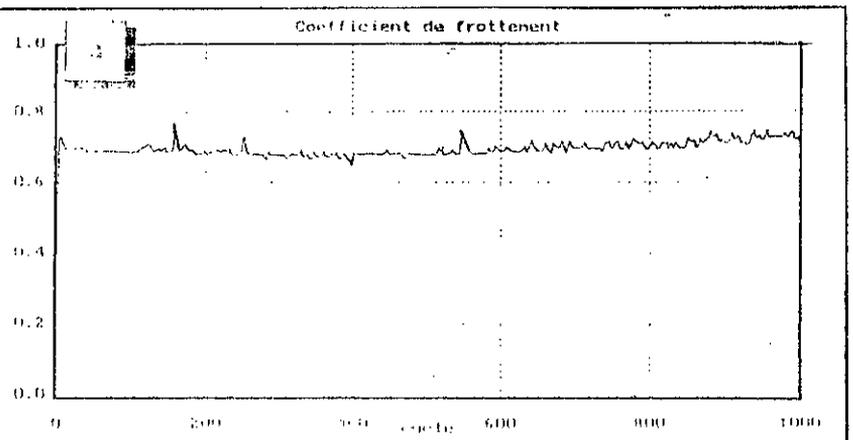
Ech. fixe: Bille ( 100C6 )

Force normale (DaN): 2

Déplacement (mm) : 2

Fréquence ( t/mn ) : 20.00

Nombre de cycle : 1000



#### Essai de frottement

Ech. Mobile: 30NCD16 Nit. 1 heure

Ech. fixe: Fonte G.S 38-15

Force normale (DaN): 2

Déplacement (mm) : 2

Fréquence ( t/mn ) : 20.00

Nombre de cycle : 1000

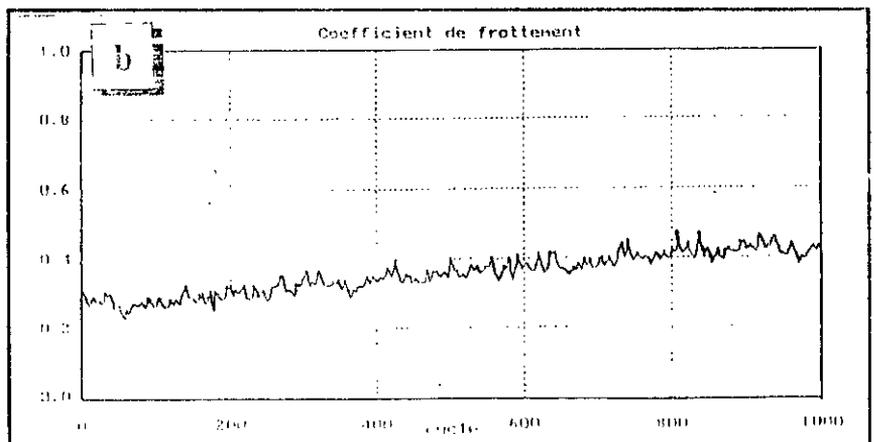


Figure IV-47: Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle.

a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{850^{\circ}\text{C}}$   $R_V 600^{\circ}\text{C}$  + Nitruration à 570°C pendant 1 heure)- acier 100C6

b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{850^{\circ}\text{C}}$   $R_V 600^{\circ}\text{C}$  + Nitruration à 570°C pendant 1 heure) - fonte G.S.38-15.

### Etat de l'antagoniste .

- ACIER : « 30NCD 16 »
- Traitements:
  - 1 - Trempe à l'huile 850°C.
  - 2 - Revenu à 600°C.
  - 3- Nituration liquide à 570 °C' durant 3 h

**Echelle verticale :** 0,5  $\mu\text{m}$   
**Longueur parcourue:** 4,8 mm  
 10 mm papier correspond à 500  $\mu\text{m}$   
 Longueur d'onde «  $\lambda$  » = 0,8  
 rugosité moyenne « Ra » = 0,150  
 rugosité maximale « Rmax » = 1,307  
 Capacité d'aplanissement Rp = 0,557

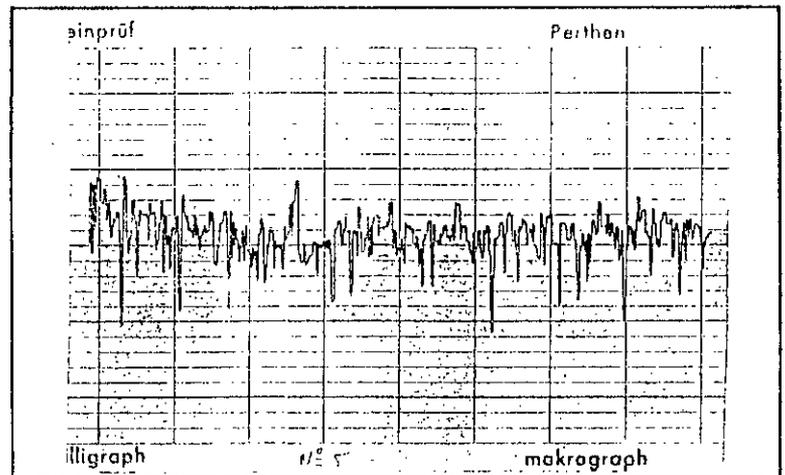
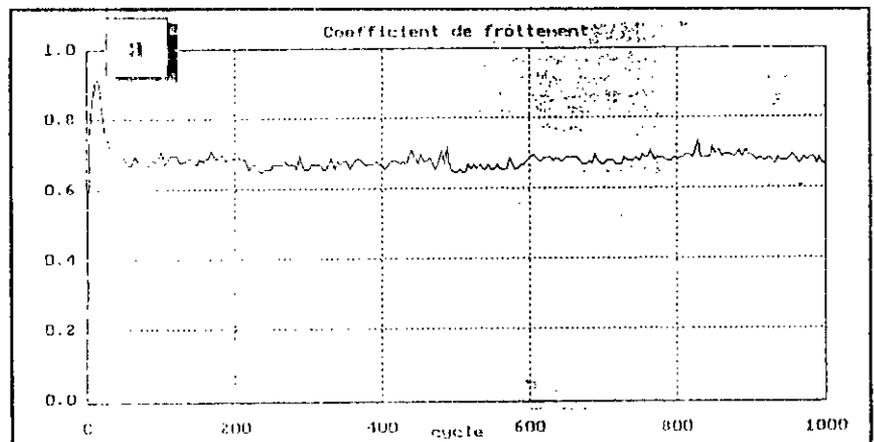


Figure IV-48: Rugosité de la surface avant frottement

**Essai de frottement**

Ech. Mobile: 30NCD16 Nit. 3 heures  
 Ech. fixe: Bille ( 100C6 )  
 Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence ( t/mn ) : 20.00  
 Nombre de cycle : 1000



**Essai de frottement**

Ech. Mobile: 30NCD16 Nit. 3 heures  
 Ech. fixe: Fonte G.S 38-15  
 Force normale (DaN): 2  
 Déplacement (mm) : 2  
 Fréquence ( t/mn ) : 20.00  
 Nombre de cycle : 1000

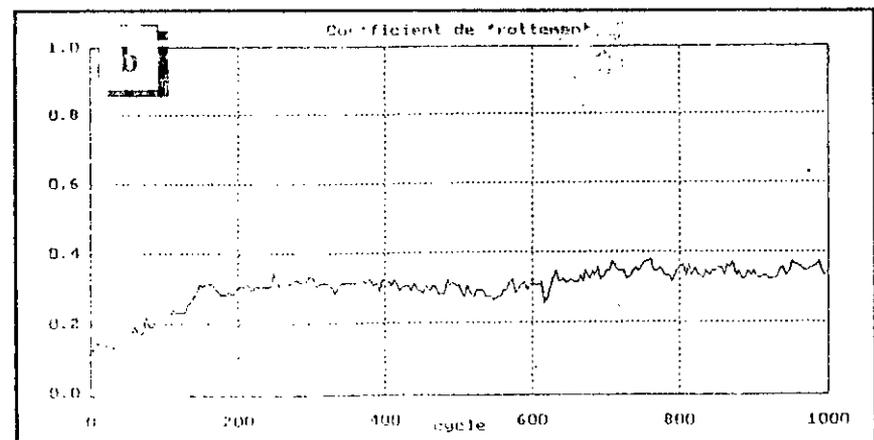


Figure IV-49: Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycle.

- a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}\text{C}}$ ,  $R_V 600^{\circ}\text{C}$  + Nituration à 570°C pendant 3 heure)- acier 100C6*  
*b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{H850^{\circ}\text{C}}$ ,  $R_V 600^{\circ}\text{C}$  + Nituration à 570°C pendant 3 heure) - fonte G.S. 38-15.*

**CONCLUSION**

**GENERALE**

L'intérêt et l'application classique du chrome dur, concerne l'ensemble de toutes les surfaces soumises au frottement pour lesquelles il est nécessaire d'étudier l'avantage d'un revêtement de chrome. Ainsi, nous trouvons dans l'aéronautique une multitude de pièces mécaniques justiciables du chrome dur tels que les portées d'arbres de compresseur, arbres d'hélice ... etc.

En outre, des conditions bien déterminées de concentration des constituants du bain et des valeurs des densités de courant et températures du bain, sont indispensables pour obtenir un dépôt correct.

L'adhérence du dépôt de chrome au substrat est tributaire de la bonne préparation de la surface avant chromage.

Il existe une différence importante dans le nombre de fissures que présente les divers dépôts de chrome. Les résultats relatifs aux changements de densité de courant, montrent que moins un dépôt présente des fissures, plus élevée est la densité de courant appliquée. Cette corrélation entre la densité de courant et le nombre de fissures est probablement liée aux tensions internes dans le dépôt.

D'après notre étude bibliographique, la diminution des tensions par formation des fissures, constitue une explication satisfaisante de la diminution des tensions de traction dans un dépôt. Pour justifier ce phénomène, nous avons procédé à un décapage sélectif du dépôt.

La différence de dureté entre les deux dépôts obtenus à  $35 \text{ A/dm}^2$  et  $45 \text{ A/dm}^2$ , est très faible surtout après le traitement de dégazage qui relaxe les contraintes internes. Aussi, ce dernier libère l'hydrogène " $\text{H}_2$ " en augmentant l'adhérence par la diffusion du chrome dans le substrat. Cependant, on note un meilleur rendement avec une vitesse de déposition plus accrue lorsque nous utilisons une densité de courant  $i_d = 45 \text{ A/dm}^2$ .

La dureté du chrome qui voisine  $900 \text{ Hv}$  à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , diminue considérablement après traitement de diffusion. Par conséquent, cette dureté est fortement liée à la présence d'hydrogène occlus dans le dépôt et qui donne naissance aux contraintes interne. Ces dernières,

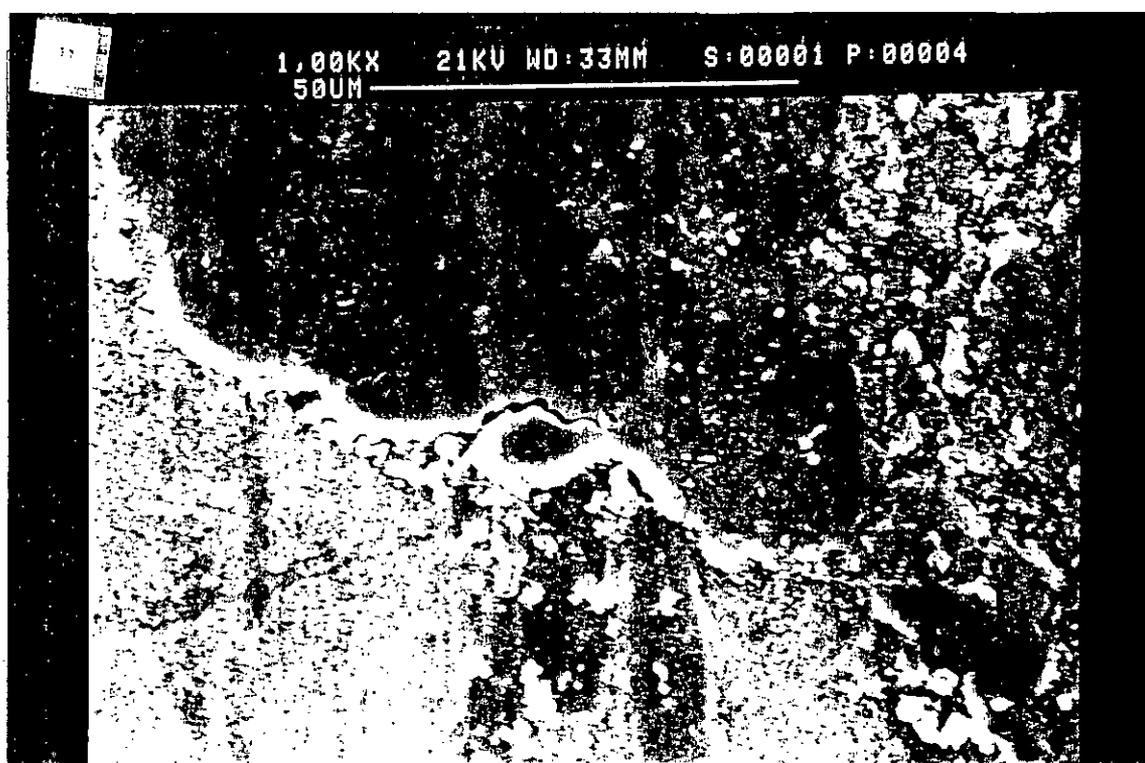
Comparativement à l'acier 30NCD16 nitrurée, le chrome dur présente à la température ambiante une dureté superficielle plus élevée et un coefficient de frottement plus faible. Il ressort nettement que la dureté est un paramètre important à prendre en compte; pour un type de chromage et de surface nitrurée donnée toute augmentation de dureté s'est traduit par une augmentation résistance à l'usure.

L'avantage de la structure superficielle fissurée du chrome est la quantité de chaleur dégagée lors du frottement. Car l'importance du frottement dépend dans une large mesure de la surface de contact effective; nous pouvons donc dire que la diminution de surface résultant de la porosité, contribue à abaisser la température de fonctionnement des pièces chromées en frottement, ce qui permet d'accroître leur durée de vie.

La fonte GS 38-15 par son graphite sphéroïdal qui joue le rôle d'un lubrifiant, assure le plus faible coefficient de frottement avec la surface chromée en laissant beaucoup de débris d'usures, ce qui minimise le risque de grippage.

D'une façon plus générale, notre étude confirme que la nature, la dureté et l'état de surface de la couche superficielle jouent un rôle important sur leur usure. Cependant, compte tenu de l'importance des phénomènes interactifs dans le contact, (3<sup>ème</sup> corps), il était primordiale d'analyser les débris d'usures, de suivre leur évolution en fonction du type de traitement de surface, ainsi qu'une analyse par la méthode des X Rasants était indispensable pour définir la nature physico-chimique des constituants de la couche superficielle. Toutefois, par manque de moyens, nous nous sommes contenté par les essais que nous avons effectués avec soins. Ainsi que l'interprétation des résultats se trouve limité par ces essais.

# ***BIBLIOGRAPHIE***



**Figure IV-50:** Traces d'usure et formation des débris après frottement à sec.

- a/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{HES0^{\circ}C}$ ,  $R_{f\ 400^{\circ}C}$  + Nitruration à  $570^{\circ}C$  pendant 3 heure) - acier 100C6  
 b/ couple acier 30 NCD 16 ( $T_{HES0^{\circ}C}$ ,  $R_{f\ 400^{\circ}C}$  + Nitruration à  $570^{\circ}C$  pendant 3 heure) - fonte G.S.3S-15.

- 1- P. SALMON. Chromage «Techniques et applications», 1952, p. 13.
- 2- P. SALMON. Chromage dur et décoratif, 1961, pp. 29-188.
- 3- SARGENT. Tran. Am. Electrochim. (U.S.A ), 1920, p. 479.
- 4- E. MULLER. Contribution à la théorie des dépôts de chrome dans les solutions aqueuses d'acide chromique. 1949, pp. 20-110.
- 5- Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 5 Surface Cleaning, Finishing and Coating, 1982.
- 6- HARING et BRROWS. Dépôt électrolytique de chrome à partir de bains à l'acide chromique, 1972.
- 7- H. NOBLE. Fragilité par l'hydrogène, 1941, pp. 45-51.
- 8- J. JEVONS. La métallurgie de l'emboîtement profond, 1941.
- 9- American Society for Testing Materials. Chromage de l'acier pour usage mécaniques, 1955, pp. 55-177.
- 10- K. GEBAYER et K. SOMMER. Influence de la rugosité du métal de base sur le poli des dépôts de chrome dur. 1942, pp. 5-41.
- 11- P. JACQUET et A. R. WEILL. Application du polissage électrolytique et des R. X à l'étude du chrome dur. Résultats préliminaires relatifs à l'influence de l'état de surface de l'acier de base-chrome dur (France), Fasc. 1994, p. 4.
- 12- C. LEVY et G. CONSOLAZIO. Examen par spectrographie de masse de l'hydrogène dans l'acier chromé, 1958, P. 624.
- 13- S. MAKARIEWA et D. BIRYNKOV. Dureté du chrome électrolytique, 1953, pp. 42-838.
- 14- A. BRENNER, P. BURKEAD et C. JENNINGS. Propriétés physiques des dépôts électrolytiques de chrome, 1995, pp. 31-59.
- 15- P. SCOTT. Métaux en poudre usinés et revêtus, 1950, pp. 87-90.
- 16- J. STARECK, J. SEYB et A. TULUMELLO. Les influences de divers dépôts de chrome sur l'endurance à la fatigue des aciers, 1956, pp. 139-402, 561.
- 17- A. POPOFF et P. BASTIEN. L'existence de microfissures dans les dépôts de chrome électrolytique - chrome dur (France), Fasc. 1984, p. 13.
- 18- L. GRANT et F. GRANT. Notes sur la dureté et la structure des dépôts de chrome, 1982, pp. 25-509.
- 19- K. GEBAUER. Etude systématique de la structure du chrome électrolytique, 1941, p. 21.
- 20- C. SNAVELY. Théorie du mécanisme du chromage et des caractéristiques physiques du dépôt de chrome, 1949, pp. 35-92.
- 21- J. COHEN. Pellicule sur chrome déposée électrolytiquement, 1944, pp. 56-441.
- 22- H. BROWN et E. HOOVER. Etude sur la corrosion de divers dépôt de chrome, 1953, p. 74.
- 23- WAHL et GEBAUER. Essai d'usure des dépôts de chrome dur, 1984, p. 320.

- 24- R. HOWELL. Influence des conditions opératoires sur la dureté des dépôts de chrome, 1952, p. 650.
- 25- M. CYMBOLISTE. Dureté du chrome électrolytique, 1973, pp. 71- 1069.
- 26- H. LAPLANCHE. Les fontes et leurs traitements thermiques. Métallurgie structurale, Tome2 1976, pp. 131-132.
- 27- Techniques de l'ingénieur, précontraintes et traitements superficiels, traité de métallurgie, 4/1995, M1 180- 19.
- 28- M. LEROUX. Les procédés de nitruration appliqués aux outillages de forge à chaud journée ATTI-OTUA- CETIM sur la nitruration des outillages de forge à chaud. Paris 7 février 1991, pp. 49-109.
- 29- A. CONSTANT, G. HENRY et J.C. CHARBONNIER. Principes de base des traitements thermiques, thermochimiques et thermomécaniques des aciers, février 1992, pp. 328-333.
- 30- T. Ya. KOSOLOPAVA. Carbides properties, production and applications, 1971, p. 147.
- 31- L. E. TOTH. Transition metal carbides and nitrides, 1971, p. 79.
- 32- Y. BERRICHE. Frottement et Usure du Composite Aluminalon ( $Al_2 O_3$  - ALON) Influence de Dispersion D'ajouts de BN,  $Y_2 O_3$  , SiC, Thèse de doctorat, 1990.
- 33- J.T. BURWELL and C.D. STRAND, J. of Appl. phys. 1952, pp. 18, 28.
- 34- J.F. ARCHAD and W. HIRST. Royal Society of LONDON, proceeding Serie A, 1956, pp. 236-397.
- 35- R. LEFEVRE. Graissage et tribotechnique, Tome III, Compresseurs Lubrifiants Solides, 1976.
- 36- N. DAHMANI. Etude du Comportement de l'Interface Métal / Polymère en Usure Induite en Débatements, Thèse de doctorat, 1990.
- 37- T.SASADA. Future direction of research in wear and wear resistant matériaux. New Directions in lubrication, materials, wear and surface interactions Noyes publication, 1985.
- 38- D.TABOR. Interaction between surfaces: adhesion and friction. surface physics of materials, Vol.II. Materials Science and Technology-Academic press, 1975.
- 39- A. HEURTEL. Etude de la compatibilité mécanique en frottement à sec en relation avec la notion de solubilité et la diffusion à l'état solide, Thèse de doctorat, 1973.
- 40- E. RABINOWICZ. Jnl. Appl. Phys.1961, pp. 8-32.
- 41- J.J.CAUBET. Théorie et pratique industrielle du frottement, 1964. pp. 7-32, 224-240, 280-282.
- 42- D. TREHEUX et S. FAYEULLE. «Aspects fondamentaux de l'usure ». Le vide, les couches minces, 1987, pp. 42- 409.
- 43- J. MOLGAARD. Wear, 1975, pp. 32, 353-362.
- 44- H. UETZ and J. FOHL. Wear, 1978, pp. 49, 253-264.
- 45- J. MOLGAARD and H. CZICHOS. In wear of materials, eds W.A Glaeser, K.C.Ludema, S.K. Rhee-ASME, New york, 1977, pp. 30-35.

- 46- M. GODET. *Wear*, 1984, pp. 100-437.
- 47- D. PLAY. «Protance et transport des troisièmes corps en frottement sec», Thèse de docteur ès-sciences, INSA/ Lyon, 10 Oct. 1979.
- 48- M.GODET. «The thirde body approach: a mechanical view of wear», 1984, pp. 437-452.
- 49- E. RABINOWCZ. *Fifty years on tribo*, London, 1987, pp. 197-203.
- 50- J. F. ARCHAD. *J. of Appl. phys*, 1953, pp. 24, 981- 988.
- 51- R. GRAHAM, K. WILLIAMS et R. WILSON. Influence des températures sur le comportement des dépôts de chrome électrolytique, 1950, pp. 18-25.
- 52- C. CAILLOT. Chromage lisse et épais d'alliages légers. Etude de la tennue au frottement de glissement à sec - Chrome dur ( France ), Fasc. 1957, pp. 17-27.
- 53- H-DE LEIRIS. Métaux et alliages, Tome III, 1971.
- 54- C.VAN DER MEREWÉ. *Physique générale*, 1982, pp. 179.
- 55- M.A. LAROCHE et F. MORTIER. Contrôle des revêtements électrolytiques et chimiques, 1989, p. 53.