

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique  
Ecole nationale Polytechnique



وزارة التعليم العالي  
و البحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

P0009/  
05 B

**DEPARTEMENT DE METALLURGIE**

**Projet de fin d'études**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie

Thème

**Comportement en fretting et micropercussion  
d'un alliage de titane (T40) traité par LASER  
YAG-Nd<sup>+3</sup>.**

*Proposé et dirigé par :*

**M<sup>r</sup>: N. MESRATI.**

**M<sup>me</sup>: C. LANGLADE-BOMBA.**

*Etudié par :*

**M<sup>r</sup>: O. LADJALI.**

**Promotion 2005**

**E.N.P 10, Avenue Hassen-Badi, EL HARRACH, ALGER.**

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

- *A mes très chers et tendres parents, que Dieu les protège ;*
- *A mes frères, mes soeurs, mes neveux et nièces ;*
- *A ma grand mère et toute ma famille;*
- *A tous les étudiants de 5<sup>ème</sup> année et du département de métallurgie ;*
- *A tous mes amis, particulièrement, Karim, Rafik, Abdelazize, Adnane, Ahmed, Hmida, Amine et Nabil.*
- *A tous ceux que j'aime et qui m'aiment, où qu'ils soient.*

*Omar LADJALI.*

## Remerciement

*Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage afin d'arriver à faire ce modeste travail.*

*J'exprime toute ma gratitude à mon directeur de projet, Monsieur Nadir MESRATI pour avoir encadré et dirigé mon projet de fin d'études.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur D. TRÉHEUX, directeur du laboratoire STMS du département de LTDS de m'avoir accueilli dans son laboratoire à l'Ecole Centrale de Lyon.*

*Je suis honoré que Monsieur M.L. DJAGHLEL ait accepté de présider mon jury. Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur M. LARJBI et Monsieur H.YOUSFI qui ont accepté d'évaluer mon travail.*

*Je voudrais aussi remercier tous les enseignants du département de métallurgie.*

*Mes remerciements aussi Mme LANGLADE-BOMBA mon co-directeur et toute l'équipe du laboratoire STMS.*

*Enfin, nous remercions tous nos amis, sans exception et sans distinction, pour leur présence et leur soutien.*

*Merci à tous.*

## TABLE DES MATIERES

<i>Introduction générale</i>	2
<b>CHAPITRE I : Les traitements thermiques superficiels par laser</b>	<b>4</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2. Principe</b>	<b>6</b>
2.1 Généralités	6
2.2 Caractéristiques des faisceaux laser	8
2.3 Principe de fonctionnement	11
2.3.1 Milieu actif	11
2.3.2 Source de pompage	13
2.3.3 Résonateur optique	13
2.3.4 Inversion de population	14
<b>3. Types de lasers industriels pour les traitements superficiels</b>	<b>15</b>
3.1 Le laser à CO <sub>2</sub>	16
3.2 Le laser YAG-Nd <sup>3+</sup>	16
3.3 Le laser à excimère	16
3.4 Le laser à diode	17
<b>4. Traitements de surface par laser</b>	<b>17</b>
4.1 Interaction laser-matière	17
4.1.a Effet thermique	18
4.1.b Effet photochimique	18
4.1.c Effet mécanique	19
4.2 Paramètres d'interaction laser-matière	19
4.2.1 Paramètres liés au faisceau laser	19
4.2.2 Paramètres liés au matériau	21
4.2.3 Paramètres liés à l'environnement	23
<b>5. Applications du laser aux traitements thermiques</b>	<b>23</b>
5.1 Durcissement en phase solide	24
5.2 Durcissement en phase liquide (Refusion)	25
5.3 Formation d'alliages en surface	25
5.4 Revêtement	25
<b>6. Rôles et intérêts du Laser</b>	<b>25</b>
<b>CHAPITRE II : Propriétés du titane et ses alliages</b>	<b>27</b>
<b>1. Historique</b>	<b>28</b>
<b>2. Le titane à l'état naturel</b>	<b>28</b>
<b>3. Transformation allotropique</b>	<b>29</b>
<b>4. Effet des éléments d'alliage</b>	<b>29</b>
<b>5. Propriétés du titane</b>	<b>30</b>
<b>6. Transformation de phase</b>	<b>32</b>
6.1 Cristallographie de la transformation de phase	32
6.2 Les diverses morphologies obtenues	33
<b>7. Application des alliages de titane</b>	<b>36</b>

<b>CHAPITRE III : Usure induite par petits débattements « fretting ».</b>	<b>38</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>39</b>
<b>2. Généralisation du phénomène</b>	<b>40</b>
<b>3. L'essai de fretting</b>	<b>40</b>
3.1 Principe de l'essai	40
3.2 Paramètres de l'essai	42
3.3 Etude de la bûche de fretting	42
<b>4. La transformation tribologique superficielle « TTS »</b>	<b>45</b>
4.1 Caractéristiques de la TTS	45
4.2 Paramètres de formation de la TTS	46
<b>Chapitre IV : Endommagements par impacts « Micropercussion ».</b>	<b>48</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>49</b>
<b>2. L'essai de micro percussion</b>	<b>49</b>
2.1 Principe	49
2.2 Les paramètres de marquage	50
2.3 Effet de la charge	50
<b>3. Mécanique de l'impact</b>	<b>51</b>
3.1 Impact élastique	51
3.2 Impact plastique	52
<b>4. La tribologie en micropercussion</b>	<b>53</b>
<b>Chapitre V : ETUDES EXPERIMENTALES ET RESULTATS.</b>	<b>55</b>
<b>1. Matériau étudié</b>	<b>56</b>
<b>2. Techniques expérimentales et résultats obtenus</b>	<b>57</b>
2.1 Le traitement thermique par LASER : matériel et les conditions d'études	57
2.2 Micrographie obtenue après traitement	57
2.3 Le fretting et analyses	58
a. Les bûches obtenues	59
b. Etude de la microdureté	63
2.4 La micropercussion et analyse	65
2.4.1 Conditions d'essai	66
2.4.2 Caractérisations physico-chimiques	67
a. Profondeur de l'empreinte	68
b. L'épaisseur de la TTS	70
c. La microdureté du T40	74
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>78</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>79</b>

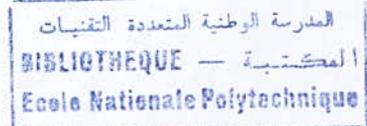
## Liste des figures

Figure I.1 : Le spectre électromagnétique de la lumière [4].	7
Figure I.2 : Distribution de l'énergie lors d'une émission laser [5].	10
Figure I.3.a : Schéma des principaux éléments d'un laser [1].	11
Figure I.3.b : L'absorption [7].	12
Figure I.3.c : Emission spontanée [7].	12
Figure I.3.d : Emission stimulée [7].	13
Figure I.4.a : Amplificateur des radiations [1].	14
Figure 4.b : Schémas des lasers à trois et quatre niveaux [2].	15
Figure I.5.a : Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde des faisceaux lasers [5-6].	20
Figure I.5.b : Absorptivité en fonction de l'angle d'incidence du faisceau laser [5].	21
Figure I.6 : Absorptivité en fonction de la température pour un acier inoxydable [5].	22
Figure I.7 : Applications industrielles des faisceaux lasers [6].	23
Figure I.8 : Les différents traitements de surface par laser [9].	24
Figure II.1 : Cristallographie du titane [15].	29
Figure II.2 : Diagramme pseudo-binaire applicable aux alliages de titane [15].	30
Figure II.3 : Structures micrographiques d'équilibre des alliages de titane [15].	30
Figure II.4 : Transformation allotropique $\alpha$ (cc) $\rightarrow$ $\beta$ (hc) [15].	33
Figure II.5 : Morphologies du TA6V [14].	34
Figure II.6 : Exemples de morphologie que l'on peut obtenir à partir du domaine $\beta$ [15].	35
Figure III.1 : Montage de l'essai de fretting (cas cylindre/plan) [22].	40
Figure III.2 : Exemple de bûche de fretting [23].	41
Figure III.3 Les trois types de cycles de fretting [23].	42
Figure III.4 : Liens entre l'évolution de la bûche de fretting et celle du contact [23].	43
Figure III.5 : Remontées en fin de glissement dues à l'interaction débris-bourrelets [23].	44
Figure III.6 : Création et évolution des débris à l'interface du contact [26].	44
Figure III.7 : Coupe longitudinale schématique d'une empreinte de fretting [21].	45
Figure III.8 : Evolution de l'épaisseur de TTS avec le nombre de cycles ( $\pm 50 \mu\text{m}$ , 300 N, 1 Hz) pour plusieurs alliages de titane [20].	46
Figure III.9 : Evolution de l'épaisseur en fonction du débattement réel ( $f = 1\text{Hz}$ , $F_n = 300 \text{N}$ , $N = 50000$ cycles [26]).	47
Figure III.10 : Variation de l'épaisseur de la TTS en fonction du nombre de cycles pour deux matériaux ayant différents pourcentages d'austénite résiduelle [26].	47
Figure IV.1 Machine de marquage (Percuteur) [11].	49
Figure IV.2 : Courbe de traction en statique et en dynamique [28].	51
Figure IV.3 : Contact hertzien sphère/plan [27].	52
Figure IV.4 : Exemples de la TTS [27].	53
Figure V.1 : Observation en microscopie optique de la microstructure du T40.	56
Figure V.2 : La nouvelle morphologie obtenue après le traitement.	57
Figure V.3 : dispositif expérimental.	58
Figure V.4 : Courbes représentatives de l'essai de fretting.	62
Figure V.5 : Profils de la microdureté en fonction de la distance de mesure dans les différentes zones.	63
Figure V.6 : Descriptif de la machine [31].	65
Figure V.7 : Bâti à colonne [31].	66
Figure V.9 : Observation des coupes d'empreintes de micropercussion.	67
Figure V.10 : Détermination de la profondeur de l'empreinte.	68
Figure V.11.1 : Profil de la profondeur en fonction du nombre de coups (a) et de la force appliquée (b).	68
Figure V.11.2 : Profil de la profondeur en fonction du nombre de coups (a), et de la force appliquée (b).	69
Figure V.11.3 : Profils de la profondeur en fonction du nombre de coups (a), et de la force appliquée (b).	69
Figure V.12 : Méthode de calcul de l'angle.	71
Figure V.13.1 : L'évolution de l'épaisseur de la TTS le long de l'empreinte et l'influence de n (a) et F (b).	71
Figure V.14 : Positions des empreintes de la microdureté.	74
Figure V.15.1 : Evolution de la microdureté en fonction de l'épaisseur moyenne des zones étudiées. Influence de F (a) et n (b).	74

المدسة الوطنية المتعدة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — مكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# INTRODUCTION

## Introduction générale



Le titane est un métal qui est traditionnellement réservé à des applications à hautes performances. La production mondiale est actuellement de 60.000 tonnes/an et les spécialistes estiment qu'elle devrait atteindre 100.000 tonnes en 2013. L'industrie de l'aérospatiale en emploie environ 80% mais l'avenir de ce matériau semble dépendre fortement de son utilisation dans de nouveaux secteurs d'activité tels que l'avionnerie, le biomédical ou la construction [1].

Ce métal possède une importante résistance mécanique spécifique et une excellente résistance à la corrosion, conséquence de la formation d'un film d'oxyde passivant à sa surface. Mais il présente de mauvaises qualités tribologiques ce qui peut être un frein conséquent à son développement et à son utilisation [1].

Afin d'accroître leur résistance à l'usure, le titane et ses alliages ont fait l'objet d'un nombre très important de recherches notamment dans le domaine des traitements de surface. Les travaux réalisés étaient généralement guidés par les mêmes objectifs comme la formation de couches très dures et suffisamment épaisses ainsi que la conservation des propriétés du substrat.

Compte tenu de la très large gamme de solutions possibles et des difficultés rencontrées, les résultats obtenus avec les méthodes conventionnelles n'ont pas permis d'aboutir à une solution universelle. Désormais, l'intérêt se porte vers l'utilisation de nouvelles techniques comme le laser. Ainsi, notre projet consiste à utiliser le laser YAG-Nd<sup>+3</sup> pour effectuer des traitements de surface en vue d'améliorer la résistance à l'usure dans le cas du fretting ou de la micropercussion du titane.

Notre étude est basée essentiellement sur le durcissement de matière par laser YAG dans le but d'étudier l'influence de quelques paramètres du laser, de la micropercussion et du fretting sur la tribologie du titane et l'amélioration acquise par le traitement superficiel.

A partir de cet objectif, on a élaboré le plan suivant :

- 1- **Introduction** : position du problème et présentation du sujet.
- 2- **Chapitre I** : étude bibliographique concernant les lasers, les traitements superficiels.
- 3- **Chapitre II** : généralités sur les propriétés du titane et ses alliages.
- 4- **Chapitre III** : usure induite par petits débattement ou le fretting.
- 5- **Chapitre IV** : usure induite par micropercussion.
- 6- **Chapitre V** : techniques expérimentales, équipements et matériaux employés dans nos essais.  
Différents résultats obtenus suivis de quelques conclusions partielles.
- 7- **Conclusion** : évaluation générale de notre étude.

**CHAPITRE I : Les  
traitements thermiques  
superficiels par laser**

## 1. Introduction

En 1917, *Albert Einstein* démontra qu'une molécule pouvait être stimulée et libérée de l'énergie sous la forme d'un rayonnement radioélectrique. Il a fait la différence entre l'émission spontanée de l'émission stimulée. Il fallut néanmoins attendre 1954 pour que soit réalisée une expérience mettant en pratique cette théorie. A. Schawlow et C. Townes mirent au point un oscillateur hyperfréquence à ondes ultracourtes, le MASER ("Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation"), l'ancêtre du laser. En 1960, A. Javan et T. Maiman réussirent à faire émettre des oscillations radioélectriques fonctionnant par émission stimulée dans un gaz sur des fréquences dans le visible [1].

Le **LASER** ("Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation") venait de naître. La génération de cette lumière intense, monochromatique, directionnelle et cohérente allait susciter dans le monde scientifique un engouement sans précédent. De 1962 à 1968, la plupart des types de laser furent conçus. Au début, les dispositifs étaient fragiles, encombrants et manquaient de fiabilité, mais peu à peu ils furent améliorés pour finalement être utilisés industriellement [1-2].

En 1958, Basov propose un laser à semi conducteur (diode laser à injection) qui se réalisera en 1962 parallèlement dans les laboratoires de Général Electric, IBM et au MIT [3].

Dans la compétitivité industrielle d'aujourd'hui, c'est un atout considérable que de pouvoir réaliser des produits qui ne s'usent pas, résistent à la corrosion, conservent dans le temps leurs propriétés électriques, optiques ou thermiques... Grâce aux réponses toujours plus précises qu'ils apportent à des situations industrielles toujours plus diversifiées et exigeantes, les traitements de surfaces sont devenus incontournables [1].

Le laser utilisé comme outil pour induire des transformations dans les matériaux, notamment dans le domaine des traitements de surface, dont le but est d'améliorer la résistance

soit aux agressions physico-chimiques extérieures (corrosion), soit aux sollicitations de type mécanique (usure), remonte à la nuit des temps, cette technologie est innovante « jeune ».

Les principes physiques de la réalisation des faisceaux laser font que l'énergie est concentrée et donc que les sources d'énergie sont des vecteurs naturellement bien mieux adaptés à la réalisation de traitement de surface étendue. Ce dernier type de traitement est nécessaire pour améliorer la résistance à la corrosion, alors que les premiers peuvent suffire à optimiser la résistance à l'usure ; c'est donc cet aspect que nous nous proposons de développer en élargissant à l'analyse des effets de ces traitements sur les propriétés mécaniques en générale (dureté, contraintes résiduelles, résistance à la fatigue, tests d'usure...) [2].

L'étude principale lors de l'utilisation d'un faisceau laser dans les traitements superficiels est l'effet de l'interaction laser-matériaux, elle est avancée depuis près de vingt ans, leur mise en pratique sur des sites de production industrielle nécessite, d'une part d'améliorer la compatibilité de la technologie des sources et des systèmes avec les contraintes liées au monde industriel (fiabilité, baisse du coût des sources,...), et d'autre part de poursuivre les efforts en vue de la maîtrise des applications (connaissances des phénomènes de base, élaboration du cahier des charges du système laser, méthodes de contrôle et d'assurance qualité...) [3].

La spécificité des sources lasers ; intensité superficielle élevée (comprise entre  $10^3$  et  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>), transfert d'énergie très rapide (de l'ordre de  $10^{-13}$  s), sur des profondeurs de quelques dizaines de nanomètres, temps d'interaction très variables et très courts (typiquement de quelques nanosecondes à quelques secondes), font une large gamme des traitements superficiels qui peuvent être réalisés à l'aide de cette technique [3].

## 2. Principe

### 2.1 Généralités

Le rayonnement lumineux n'est qu'une onde électromagnétique. Ce rayonnement électromagnétique se compose comme une somme d'ondes électromagnétiques [4]. Une onde

donnée est caractérisée par une certaine amplitude ainsi qu'une certaine *fréquence* ( $\nu$ ) et une certaine *longueur d'onde* ( $\lambda$ ), ces deux quantités étant reliées l'une à l'autre par la *vitesse de propagation* de l'onde qui pour la lumière est une constante de l'ordre de  $3.10^8$  m/s dans le vide [4].

L'oeil humain ne détecte que ceux dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 0,77  $\mu\text{m}$  et qu'il transcrit en couleur, ce que l'on appelle la lumière visible figure I.1.

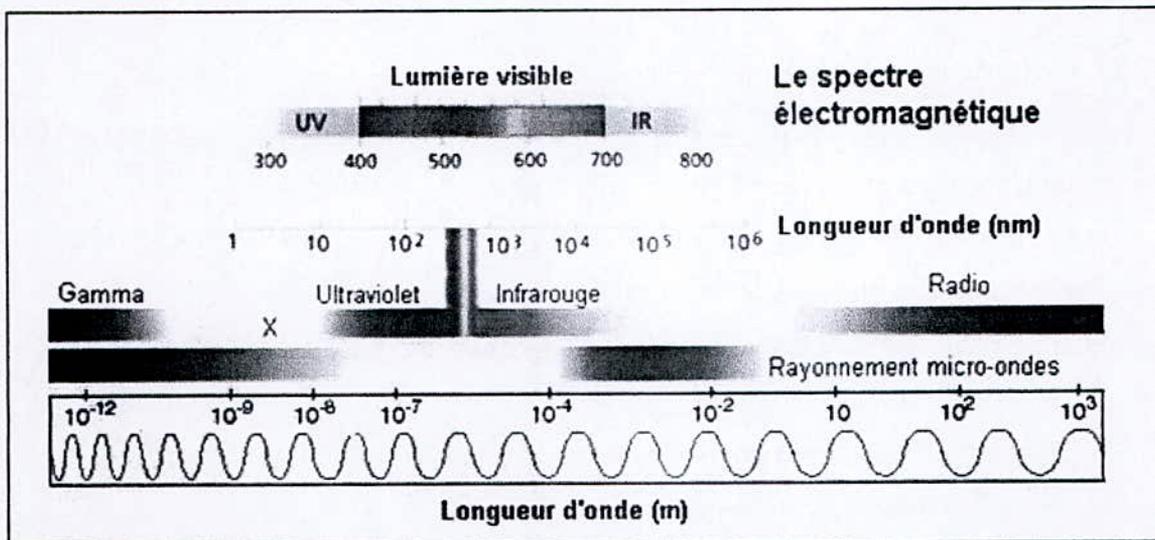


Figure I.1 : Le spectre électromagnétique de la lumière [4].

Les autres rayonnements portent des noms différents selon la gamme de longueur d'onde (figure 1) à laquelle ils appartiennent [2]:

- *Le rayonnement infrarouge* : ses longueurs d'ondes vont de 0,770  $\mu\text{m}$  à une fraction de millimètre.
- *Le rayonnement micro-onde ou rayonnement hyperfréquence* : est un rayonnement de plus grande longueur d'onde, allant du millimètre à 30 centimètres.
- *Le rayonnement radio* : correspond aux grandes longueurs d'ondes supérieures à 30 centimètres.

- *Le rayonnement ultraviolet* : sa longueur d'onde va de 0,4 micron à un centième de micron.
- *Le rayonnement X* : correspond à des longueurs d'onde comprises entre dix et cinq millièmes de nanomètre.
- *Le rayonnement gamma* : représente tous les rayonnements de longueur d'onde inférieure à un centième de nanomètre.

## 2.2 Caractéristiques des faisceaux laser

L'émission laser est une onde continue sinusoïdale sans saut de phase ou de fluctuation d'amplitude contrairement à une source de lumière conventionnelle.

Les faisceaux lasers présentent des propriétés qui ne sont pas facilement accessibles, leurs caractéristiques sont étudiées de façon exhaustive, et ses propriétés sont distinguent aux sources traditionnelles (soleil, lampes,...) [5].

Les propriétés les plus importantes pour les applications industrielles [5-6] :

- cohérence du faisceau,
- divergence du faisceau,
- modes de fonctionnement des lasers,
- distribution énergétique et mode de champ,
- et l'intensité du faisceau.

### a. Cohérence :

Le rayonnement est dit cohérent dans le temps et dans l'espace, si l'on peut calculer la phase de l'onde et son amplitude, à chaque moment et à chaque endroit, donc on distingue deux types de cohérences ; la cohérence temporelle et la cohérence spatiale.

Cette propriété est la plus importante du rayonnement laser qui est elle même résultat des autres caractéristiques, sa cohérence manifestée par sa mono chromaticité liée à sa cohérence temporelle et par son front d'onde uni phase lié à sa cohérence spatiale.

Lorsque deux ondes issues d'un même point d'une source parcourent un trajet différent et interfèrent au point où on les reçoit, on dit que leur cohérence est temporelle.

Lorsque deux ondes proviennent de deux points distincts d'une source et interfèrent, on dit que la lumière émise est spatialement cohérente.

*b. Divergence :*

Les sources lumineuses conventionnelles émettent dans toutes les directions. Par conséquent, leur intensité décroît avec la racine carrée de la distance. Dans le cas des lasers, à cause des propriétés du résonateur, il y a émission de la lumière uniquement très près et parallèlement à l'axe optique de la cavité.

Dans le cas d'une cohérence spatiale parfaite, le faisceau, de dimension finie, présente inévitablement une divergence du fait de la diffraction.

La divergence est d'autant plus importante que la cohérence du faisceau est partielle. L'angle de divergence est une fonction plutôt des propriétés du faisceau laser que de la géométrie de la cavité dont elle dépend quand : sa valeur est généralement limitée à quelques milliradians.

*c. Modes de fonctionnement des lasers :*

Le laser fonctionne en continu ou en impulsionnel. Pour ce dernier mode, l'énergie est délivrée par une seule impulsion ou par une série d'impulsions répétitives. Étant donné que la durée d'une impulsion peut être très courte ( $10^{-9}$  s), la puissance instantanée est très grande (1 MW) même si l'énergie totale délivrée est très faible ( $10^{-3}$  J).

Pour le mode continu, le faisceau peut être modulé temporellement afin d'asservir la puissance incidente à la température de la zone d'interaction

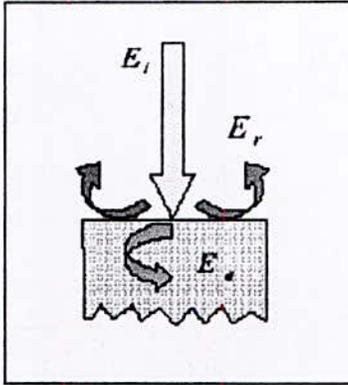
*d. La distribution énergétique et le mode de champ :*

La répartition de l'énergie dans la section d'un faisceau laser détermine sa distribution d'énergie. La forme de la distribution de l'énergie est déterminée par la configuration du résonateur (forme des miroirs, diamètre du tube, ouverture, etc.). Différentes formes sont possibles sous le nom Mode Transversal Electromagnétique ou TEM<sub>xy</sub> (*Transverse Electromagnetic Mode*). Les indices  $x$  et  $y$  entiers positifs dénombrent les zones d'intensité le long des deux axes  $x$  et  $y$  perpendiculaires à la direction de projection  $z$  (ou  $z$  axe du faisceau). Ces indices transversaux représentent les modes transversaux du laser.

En effet, d'une manière plus simple l'énergie émise ou l'énergie incidente ( $E_i$ ) par le faisceau laser peut être entièrement divisée en deux énergies, une absorbée ( $E_a$ ) qui dépend de plusieurs coefficients et une autre réfléchie ( $E_r$ ) comme le montre la figure I.2.

Le rendement énergétique est représenté par le rapport suivant :

$$\rho = E_i / E_a$$



$E_i$  : Energie incidente.

$E_r$  : Energie réfléchie.

$E_a$  : Energie absorbante par le matériau.

**Figure I.2 :** Distribution de l'énergie lors d'une émission laser [5].

*e. intensité du faisceau :*

Le laser est focalisé sur la surface du matériau à l'aide des lentilles. L'intensité du faisceau laser peut être très grande car la puissance délivrée est focalisée sur une très petite surface.

La détermination des caractéristiques géométriques du faisceau ne peut se faire sans tenir compte de la densité de flux d'énergie  $I$  exprimée en  $W/cm^2$ . La densité  $I(r)$  suit le mode fondamental de la cavité optique.

Pour un mode fondamental TEM00 (gaussien) la densité est [5]:

$$I(r) = I_0 \exp. (-2 r^2/R^2).$$

Avec :  $I_0$  : densité de puissance au centre du faisceau ;

$R$  : rayon d'éclairement ;

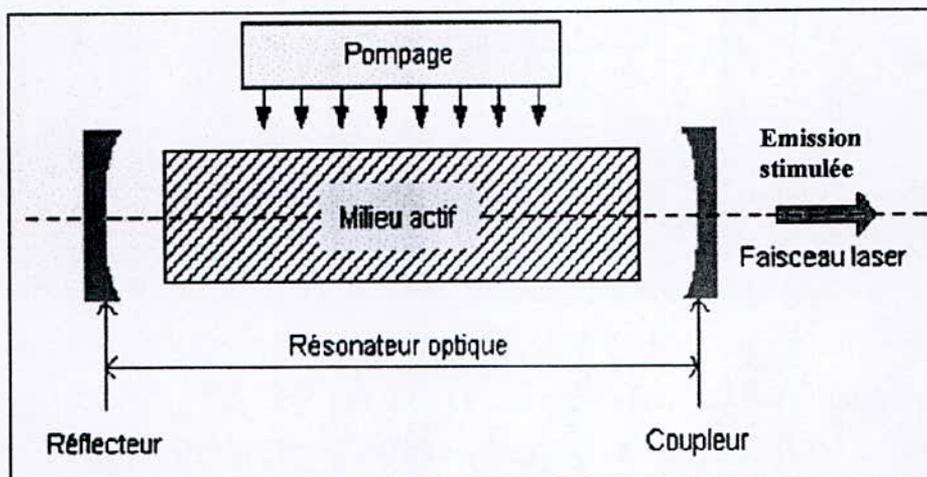
$r$  : rayon suivant l'axe orthogonal à l'intensité.

### 2.3 Principe de fonctionnement

Le laser est essentiellement constitué de trois éléments principaux comme le montre la figure I.3.a :

- un milieu actif ou milieu amplificateur ;
- une source de pompage ;
- un résonateur optique ou cavité optique.

Le laser est un ensemble où un pompage crée une inversion de population amplificateur placé dans un résonateur optique ce qui conduit à la formation intense, monochromatique, directive et d'émission stimulée [6-7].



*Figure I.3.a : Schéma des principaux éléments d'un laser [1].*

#### 2.3.1 Milieu actif

Quand un atome est exposé à une radiation électromagnétique, sa distribution de charge électrique est affectée périodiquement par l'énergie des photons de la radiation. Par conséquent, un transfert d'énergie a lieu entre les photons et l'atome. Trois processus d'interaction peuvent être envisagés dites interaction matière- rayonnement :

- ❖ **L'absorption** : Si l'on considère un atome pourvu des états quantifiés 1 et 2 qui correspondent respectivement aux niveaux d'énergie  $E_0$  et  $E_1$  ( $E_0 < E_1$ ) (figure I.3.b) et si l'on suppose qu'il reçoit l'énergie d'un rayonnement qui interagit avec lui, alors l'énergie de l'atome passe de  $E_0$  au niveau plus élevé  $E_1$ . Ce processus s'appelle l'**absorption** ; il est réversible et s'accompagne alors d'émission de lumière.

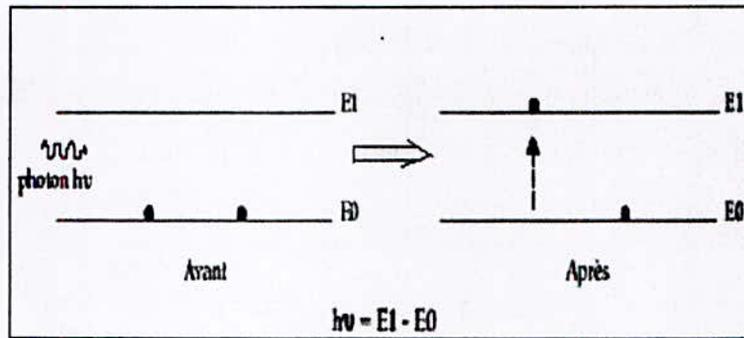


Figure I.3.b : L'absorption [7].

- ❖ **L'émission spontanée** : On sait que, seul, l'état fondamental est le plus stable. Cela signifie qu'après un certain temps, l'atome excité finit par *retomber* spontanément à l'état fondamental. Il restitue alors l'énergie  $E_1 - E_0$  sous forme d'un photon de fréquence  $\nu$  telle que  $h\nu = E_1 - E_0$ . Ce phénomène s'appelle l'**émission spontanée** (figure I.3.c) [7].

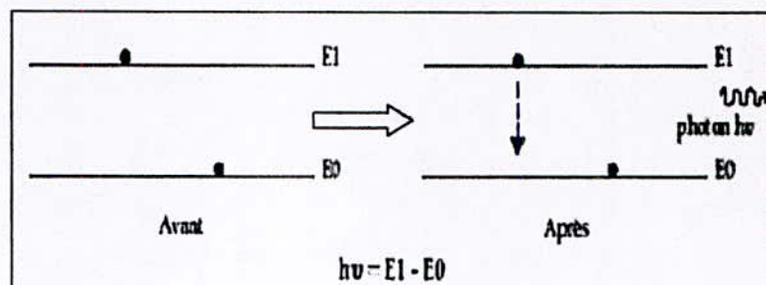
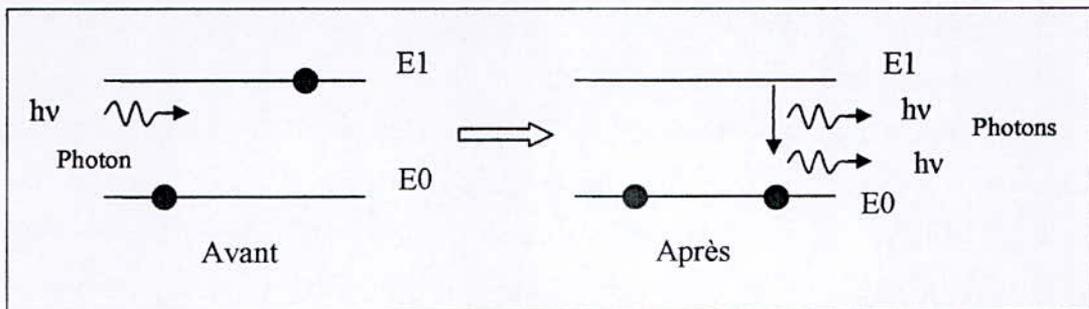


Figure I.3.c : Emission spontanée [7].

- ❖ **L'émission stimulée** : De plus, si l'atome excité est frappé par un photon provenant de l'extérieur et ayant exactement la même énergie que celle du photon due à l'émission de  $E1$  et  $E0$ , il émet un second photon. Le photon émis et le photon incident ont exactement les mêmes caractéristiques (direction, fréquence, phase, polarisation). Ce processus s'appelle **émission induite ou stimulée** (figure I.3.d). On réussit l'émission laser grâce à l'émission stimulée [7].



*Figure I.3.d : Emission stimulée [7].*

Le constituant sur lequel on peut réussir l'émission laser est appelé milieu actif du laser, et il peut être à l'état solide, liquide ou gazeux [7].

### 2.3.2 Source de pompage

Selon la théorie des états d'énergie, l'inversion de population, qui est indispensable pour obtenir l'émission laser, exige l'excitation des atomes au niveau d'énergie supérieur. Elle peut être obtenue par l'intermédiaire d'une source extérieure d'énergie : c'est le pompage.

Il y a actuellement de nombreuses méthodes de pompage (optique, électronique, thermique, chimique, par particules lourdes, par rayonnement ionisant) [1].

### 2.3.3 Résonateur optique

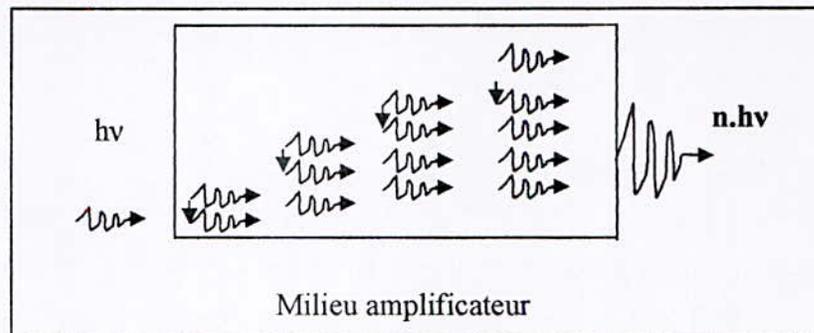
L'amplification de la lumière peut être obtenue non seulement grâce à la puissance de la source d'excitation extérieure, mais aussi en augmentant la longueur du milieu actif. Le milieu actif ayant évidemment une longueur limitée, il faut trouver un procédé qui permette d'exploiter plusieurs traversées du rayonnement stimulé à travers ce milieu amplificateur. Cela se produit en

utilisant une cavité résonnante constituée de deux miroirs (figure I.3.a), dont l'un semi-réfléchissant laisse échapper une partie de l'émission laser tout en renvoyant l'autre partie dans le milieu dont les atomes excités produisent de nouveau l'émission stimulée. Cette cavité s'appelle résonateur optique, puisque l'on travaille principalement dans le domaine des fréquences des rayonnements infrarouges, visibles ou ultraviolets [1].

### 2.3.4 Inversion de population

Lorsqu'une source d'énergie extérieure appelée pompe renverse l'équilibre thermodynamique en peuplant un niveau d'énergie supérieure davantage que le niveau fondamental, on a une inversion de population.

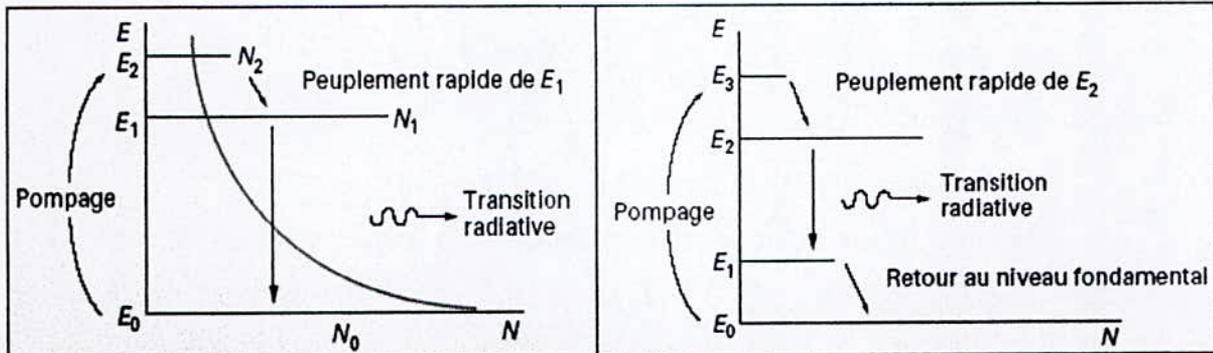
L'état obtenu n'est plus en équilibre, aussi les atomes de l'état excité vont manifester une disponibilité accrue à retomber dans l'état fondamental pour rétablir cet équilibre thermodynamique. L'action d'un photon incident peut donner naissance à un nombre de photons stimulés supérieur au nombre de photons absorbés (Figure I.4.a). On a donc une amplification des radiations par émission stimulée grâce au maintien de ce déséquilibre. Cette amplification va dépendre de la longueur d'onde du milieu actif et sera donc limitée [1].



*Figure I.4.a : Amplificateur des radiations [1].*

Pour réaliser une inversion de population, il faut au moins trois niveaux d'où les lasers à trois et quatre niveaux représentés à la Figure I.4.b. Lorsqu'on a trois niveaux, le pompage a lieu du niveau fondamental à la bande d'absorption  $E_3$ . Il y a une transition non radiative très rapide

entre  $E_3$  et  $E_2$ . Le niveau fondamental est le niveau d'arrivée de la transition laser. Il faut que la durée de vie du niveau  $E_2$  soit assez longue et que la moitié des atomes soient dans un état excité ce qui donne un seuil de pompage élevé et un fonctionnement plus facile de ce type de laser en régime pulsé [2].



*Figure 4.b : Schémas des lasers à trois et quatre niveaux [2].*

Le laser à quatre niveaux présente le même principe de fonctionnement mais comme le niveau  $E_2$  est dépeuplé, les premiers atomes pompés mèneront à  $N_2 > N_1$ , d'où une meilleure efficacité du procédé.

Il existe plusieurs types de pompages [1-2] :

- Pompage optique : il est produit par des lampes spectrales de forte intensité riches dans le visible. Ces lampes sont en général des sources non cohérentes au mercure ou au xéno.
- L'inversion de population est rendue possible grâce à des molécules dans un état excité obtenues par des réactions chimiques particulières.
- Le pompage par décharge électrique : des électrons sont créés dans un milieu gazeux (milieu actif) puis accélérés par un champ électrique intense.

### 3. Types de lasers industriels pour les traitements superficiels

Parmi les multiples sources lasers disponibles sur le marché, le monde industriel ne s'intéresse qu'à ceux qui tendent à relever le défi de la puissance [5-6, 8-10].

### 3.1 Le laser à CO<sub>2</sub>

Le laser à CO<sub>2</sub> émet dans l'infrarouge lointain (IR), les longueurs d'onde d'émission sont principalement à 9.6 μm et 10.6 μm, d'une puissance de quelques watts jusqu'à 25 kW et même plus. Dans ce type le milieu amplificateur dans le cas de l'état gazeux, le plus souvent un mélange de CO<sub>2</sub> (6 % en volume), de N<sub>2</sub> (12% en volume) et d'hélium (82 % en volume).

C'est le laser le plus utilisé dans l'industrie pour les raisons suivantes :

- des fortes puissances accessibles;
- de son faible coût de fonctionnement;
- de sa fiabilité industrielle acquise depuis fort longtemps et bien avant les autres types de

source.

### 3.2 Le laser YAG-Nd<sup>+3</sup>

La longueur d'onde d'émission des lasers YAG-Nd<sup>+3</sup> est 1,064 μm ; ce laser émet dans l'infrarouge (IR) proche et dont le milieu amplificateur est à l'état solide dit YAG (grenat d'aluminium et d'yttrium Y<sub>3</sub> Al<sub>5</sub> O<sub>12</sub>) dopé au néodyme et émettant, en mode continue ou pulsé. La concentration atomique de Nd est généralement comprise entre 0,6 et 1,2 %.

L'avantage principal de la technologie Nd- YAG réside dans la possibilité de transporter le faisceau laser par fibre optique. Le faisceau est également mieux absorbé par les substrats métalliques environ trois fois que dans le cas où un faisceau à 10.6 μm (laser à CO<sub>2</sub>) est utilisé.

L'inconvénient principal reste le coût d'utilisation.

### 3.3 Le laser à excimère

Le mot **excimère** est une contraction des mots anglo-saxons « *excited dimer* » qui s'explique par l'utilisation, dans la cavité résonnante du laser, d'un mélange d'un gaz rare et d'un halogène, excité électroniquement par exemple ArF\*, KrF\* ou XeF\*. Les molécules excimères sont formées par des réactions chimiques provoquées par une décharge UV haute tension préionisée et pulsée, dont la cinétique est complexe.

Ce type émet dans l'UV entre 0.15 et 0.4 μm de longueur d'onde. Ces lasers, délivrent en général un faisceau de section rectangulaire présentant une répartition d'énergie quasi uniforme.

### 3.4 Le laser à diode

Ce laser est de développement industriel récent qui offre des rayonnements continus jusqu'à 3 KW de puissance. Son intérêt est le faible encombrement de la tête laser, un rayonnement (920 nm) mieux absorbé par les éléments métalliques et un faisceau de dimensions rectangulaires qui permettent les revêtements larges. Dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons exclusivement au laser à diode. C'est un laser dont le milieu actif est un cristal semi-conducteur constitué d'atomes neutres arrangés dans le réseau cristallin correspondant au matériau considéré [5].

## 4. Traitements de surface par laser

### 4.1 Interaction laser-matière

Pour un métal, l'interaction du rayonnement a lieu avec les électrons libres au voisinage de la surface. Seule une partie de l'énergie émise par la radiation incidente est absorbée par la surface et on définit le coefficient d'absorption tel que [1] :

$$A_{\lambda} = 1 - R_{\lambda} = \frac{4n_{\lambda}}{(n_{\lambda} + 1)^2 + K_{\lambda}^2}$$

Où :  $R_{\lambda}$  : coefficient de réflexion à la longueur d'onde incidente ;

$n_{\lambda}$ ,  $K_{\lambda}$  : indices optiques du matériau à la longueur d'onde incidente  $\lambda$ .

En général, le coefficient d'absorption augmente lorsque la longueur d'onde augmente. La puissance absorbée se transforme en chaleur dans les premières dizaines de nanomètres sous la surface puis cette chaleur diffuse vers le coeur du substrat. Les pertes thermiques vers l'extérieur sont considérées négligeables. Le flux thermique sera alors gouverné par la diffusivité thermique  $a$  du matériau [1].

La profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique absorbé est tel que :

$$\delta_{\lambda} = \lambda / 4\pi K$$

Où :  $\delta_{\lambda}$  : la profondeur de pénétration du rayonnement.

$\lambda$  : la longueur d'onde.

$K$  : conductivité thermique du matériau.

Et la profondeur thermiquement affectée est définie par :

$$Z = (4at)^{1/2}$$

Avec  $a$  : diffusivité thermique du matériau ( $m^2/s$ )

$t$  : temps d'interaction.

La profondeur affectée thermiquement est supérieure à La profondeur de pénétration du rayonnement.

La température atteinte au bout d'un temps d'irradiation  $\tau$  par un rayonnement déposant une densité de puissance  $q_0$  est telle que :

$$T = q_0 \cdot Z / K(\pi)^{1/2} \text{ (en degré kelvin)}$$

Les électrons qui sont dans un état excité suite à l'absorption de photons vont relaxer en un temps très court et on aura trois effets : thermique, photochimique et mécanique [1].

#### 4.1.a Effet thermique

La propagation de la chaleur dans le matériau conduit au chauffage, à la fusion ou à la vaporisation selon la puissance du laser pour des temps d'interaction très courts. Sous certaines conditions, on peut avoir une liquéfaction et vaporisation quasi-instantanée du matériau.

Dans ce cas, l'énergie est principalement stockée dans les particules enlevées et c'est un effet recherché pour le décapage, durcissement, formation d'alliage, la découpe, le soudage... [1].

#### 4.1.b Effet photochimique

La réactivité chimique va provoquer des perturbations des liaisons interatomiques dues à l'excitation des électrons par absorption d'au moins un photon. Si l'énergie des photons est de l'ordre de l'énergie de liaison du solide, il pourra y avoir rupture des liaisons en surface. Un des principaux avantages de cette technique est la possibilité d'une réactivité sélective sur une surface. D'autre part, l'absence d'effet thermique permet la réalisation de motifs de dimensions de l'ordre du dixième de micromètre. Les applications concernent surtout le domaine de la microélectronique [1].

### 4.1.c Effet mécanique

Il s'agit de créer une onde de choc dans le matériau avec une pression suffisante en surface pour déformer plastiquement le matériau. Pour empêcher la détente rapide du plasma dès l'interruption de l'irradiation laser, on recouvre l'échantillon d'un matériau diélectrique transparent à la longueur d'onde comme l'eau ou le verre. Comme le plasma dispose d'un volume restreint pour sa formation et sa détente, il est dit confiné et sa pression est accrue par rapport au cas de choc direct. D'autre part, pour éviter la création de contraintes de traction par effet thermique, on dépose sur le matériau une couche protectrice absorbante de peinture ou d'aluminium que l'on enlève après traitement.

Un des avantages de ce traitement par rapport au grenailage, c'est qu'il n'entraîne aucune modification chimique ou métallurgique de la pièce et que la modification de l'état de surface en terme de rugosité est moins importante. On l'utilise par exemple pour le renforcement des trous de rivets sur une carlingue. Il permet également de réaliser une densification superficielle et une restauration des surfaces [1].

## 4.2 Paramètres d'interaction laser-matière

Les paramètres régissant l'interaction laser-matière sont nombreux. Les effets produits dépendent [5-6]:

1. du faisceau laser ;
2. du matériau.
3. de l'environnement ;

### 4.2.1 Paramètres liés au faisceau laser

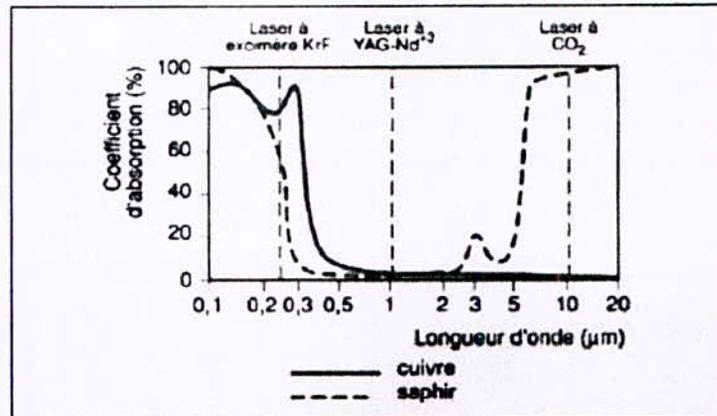
#### *a. Facteur de l'intensité du faisceau laser :*

Au delà d'une intensité critique spécifique du matériau et de l'atmosphère, le coefficient d'absorption pour des surfaces métalliques polies se situe entre 2 et 20 %. Tant que ce le faisceau est en contact avec la surface, on observe un coefficient d'absorption de près de 100 % (absorption anormale). Si la densité de puissance est plus élevée, on constate un décollement du nuage de plasma et l'absorption diminue à nouveau [6].

**b. Facteur lié à la longueur d'onde du faisceau :**

L'absorption de l'énergie d'une onde électromagnétique par un métal est fonction de sa longueur d'onde. La figure I.5.a représente l'évolution de l'absorption pour un métal (cuivre) et pour un matériau isolant (saphir). L'énergie du faisceau laser à CO<sub>2</sub> est mal absorbée par les métaux, mais elle est par contre bien absorbée par les céramiques.

Pour la plupart des matériaux métalliques, l'absorption est très grande pour les longueurs d'onde de laser à excimères, à savoir de l'ordre de 80 % au lieu de 5 % dans le domaine de l'IR [6].



**Figure I.5.a :** Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde des faisceaux lasers [5-6].

**c. Facteur énergétique :**

La distribution énergétique du faisceau dans une section dans le mode fondamental est gaussienne, en multimode, cette répartition est complexe.

Pour les traitements de surface, il faut s'attacher à définir au mieux cette répartition et à la continuer dans le temps vis-à-vis de l'homogénéité et de la reproductibilité des transformations recherchées.

**d. Angle d'incidence :**

L'absorption de l'énergie du faisceau laser par une surface métallique polie varie suivant l'angle d'incidence du faisceau (figure I.5.b). Pour un certain angle (angle de Brewster), l'absorption du rayonnement dans la direction parallèle au plan d'incidence  $R_p$  est maximale et celle dans la direction perpendiculaire au plan d'incidence  $R_s$  est nulle (effet Brewster). Dans les traitements superficiels par laser, il faut tenir compte de cet effet [5].

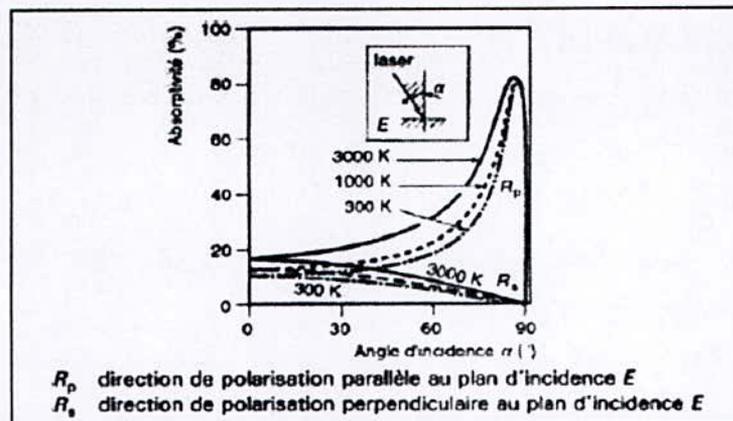


Figure I.5.b : Absorptivité en fonction de l'angle d'incidence du faisceau laser [5].

#### e. Dimension du spot :

La densité de puissance du faisceau laser peut être modifiée en faisant varier le diamètre du spot au point d'impact [5].

#### f. Vitesse de balayage du faisceau :

Différents auteurs ont montré qu'il y a une relation entre les valeurs du coefficient d'absorption et la vitesse de balayage du faisceau, la température atteinte varie en sens inverse de la vitesse de balayage [5].

### 4.2.2 Paramètres liés au matériau

#### a. État de surface (rugosité)

L'absorption dépend de l'état de surface, notamment de la rugosité et de la présence d'impuretés (créées généralement par les phénomènes d'oxydation) qui influent sur les propriétés optiques du matériau. Une rugosité élevée produit une augmentation de l'absorption, due à des effets de Brewster et à des réflexions multiples, dites effets de puits.

La présence d'impuretés modifie le phénomène d'absorption, soit parce qu'elles absorbent le rayonnement, soit parce qu'elles le réfléchissent, ce qui, dans les deux cas, change la répartition du champ électromagnétique associé à la structure cristalline, provoquant ainsi une variation d'absorptivité [5].

#### b. Couches absorbantes

Le rôle des couches absorbantes est d'améliorer le pouvoir absorbant de la surface, d'une part, et d'assurer la stabilité du couplage faisceau laser-matière, d'autre part [5].

### *c. Propriétés thermiques*

L'énergie absorbée dépendra des caractéristiques intrinsèques du matériau considéré. Interviennent alors les différents paramètres usuels, tels que : la capacité thermique ( $C_p$ ), la conductivité thermique ( $k$ ), la diffusivité ( $\alpha$ ), la masse volumique ( $\rho$ ) et les enthalpies de transformation relatives de chacune des phases présentes [5].

### *d. Propriétés électriques*

Les bandes de valence et de conduction, ainsi que la conductivité électrique influent également sur le processus d'absorption [5].

### *e. Température*

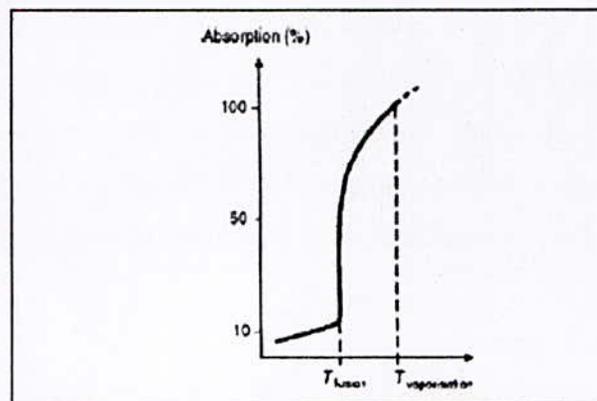
L'absorption d'un métal peut varier considérablement avec la température. Elle varie d'un facteur 2 à 5 dans l'intervalle de température usuel pour des traitements de surface par laser (figure I.6) On constate que, même en dessous de la température de fusion, l'absorptivité varie de façon sensible en fonction de la température [5].

### *f. Structure du matériau*

En réalité un matériau sans défauts n'existe pas, il contient de nombreuses discontinuités : lacunes, dislocations, joints de grains, qui font diminuer la réflectivité du matériau et influent donc sur le processus d'absorption par leur présence et leur évolution au cours des traitements par laser [5].

### *g. Composition chimique*

La composition chimique détermine le nombre d'électrons de valence et les réactions chimiques possibles en surface [5].



**Figure I.6 :** Absorptivité en fonction de la température pour un acier inoxydable [5].

### 4.2.3 Paramètres liés à l'environnement

Le milieu environnant peut être le vide, un gaz spécifique ou de l'air, de la vapeur d'eau...Il peut intervenir par : sa température, sa pression, son activité chimique, sa nature optique (transparence) et sa nature ionique [5].

## 5. Applications du laser aux traitements thermiques

Le laser a trouvé beaucoup d'applications industrielles (figure I.7), comme le découpage, le perçage, le soudage et les traitements superficiels...

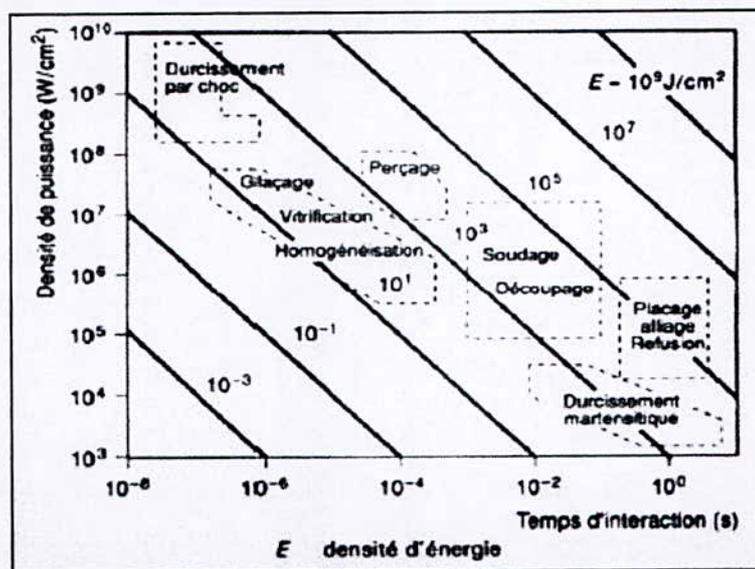


Figure I.7 : Applications industrielles des faisceaux lasers [6].

Actuellement, le laser est la seule source de chaleur disponible, permettant d'obtenir des densités de puissance dans l'air très élevées (de l'ordre de  $10^8 W/cm^2$ ). Par conséquent, les procédés par faisceau laser et ceux par faisceau d'électrons, qui sont moins récents, sont souvent meilleurs que toutes les autres méthodes lorsque l'on recherche des gradients importants de température [6].

Les principaux types de traitements sont :

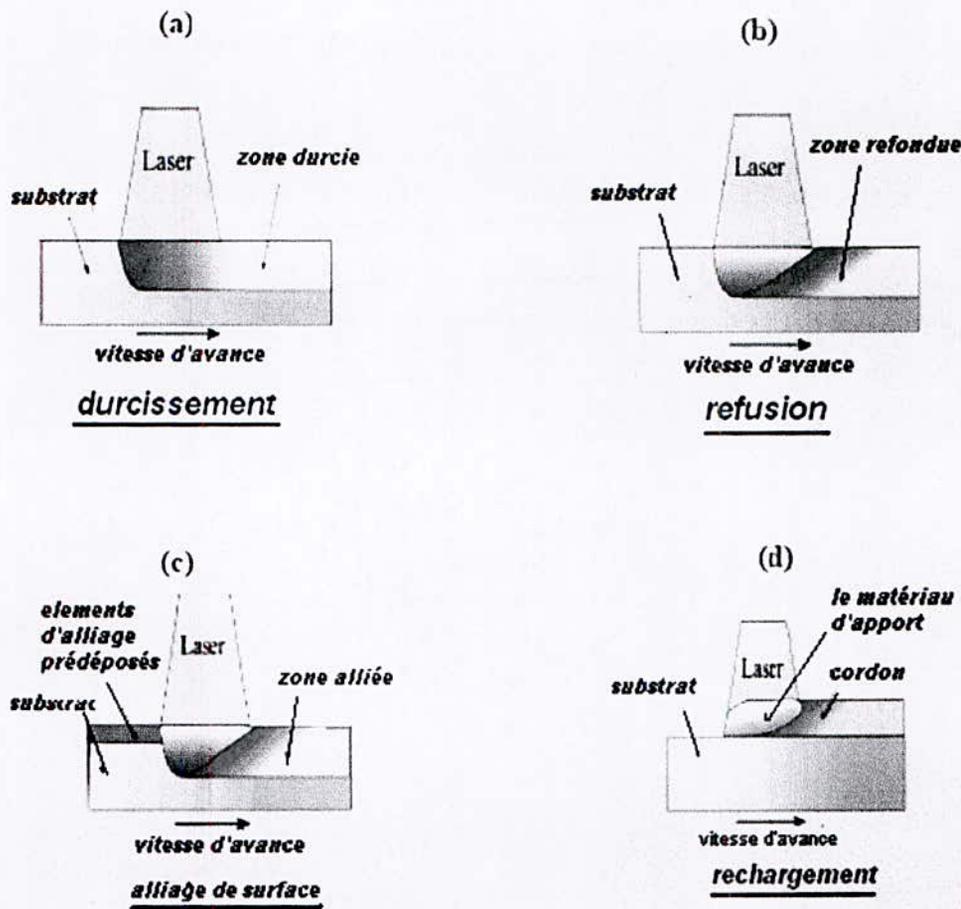


Figure I.8 : Les différents traitements de surface par laser [9].

### 5.1 Durcissement en phase solide

Dans ce cas, il s'agit de chauffer par un faisceau laser une couche superficielle du matériau à traiter (figure I.8.a), sans atteindre la fusion en surface. Mais il faut que la transformation des phases à l'état solide soit possible en un temps maximum de l'ordre de la seconde.

Les avantages de ce type de traitement par rapport aux autres traitements employés sont la faible distorsion, les faibles contraintes thermiques induites dans le substrat, la définition exacte de la zone à traiter, une grande flexibilité et une bonne reproductibilité [9].

### 5.2 Durcissement en phase liquide (Refusion)

La refusion consiste à porter la surface traitée au delà de sa température de fusion et de la resolidifier très rapidement par autotrempe (figure I.8.b). Ceci se fait en utilisant un faisceau de grande densité de puissance (de l'ordre de 10 kW /mm<sup>2</sup>) avec des temps d'interaction faisceau/ matière très courts et inférieurs à 100 ms. Avec des vitesses de 100 mm/min à 10m/s, ce procédé permet d'obtenir des structures très fines et assez homogènes et apparition de phase hors équilibres [9].

### 5.3 Formation d'alliages en surface

Le procédé d'alliage de surface, consiste à modifier la composition chimique de la surface traitée par l'apport de nouveaux éléments (figure I.8.c). Ceci peut se réaliser soit par la refusion d'une couche prédéposée par une quelconque méthode, soit par injection de poudre lors du passage du faisceau laser [9].

### 5.4 Revêtement

Il s'agit ici de créer un nouvel alliage de surface, métalliquement lié au substrat (figure I.8.d), dans lequel les éléments provenant du substrat ne sont présents qu'en faible quantité. Ceci, s'effectue par apport d'un matériau que l'on fond à la surface du substrat. La technique d'apport la plus commune consiste à injecter des poudres par l'intermédiaire d'une buse [9].

## 6. Rôles et intérêts du Laser

Les faisceaux à haute densité d'énergie fournissent des densités de puissance très élevées pendant des temps très courts et sur des zones bien localisées, ne donnant pas naissance à des distorsions importantes des pièces ainsi traitées [8].

Les propriétés des surfaces traitées sont souvent impossibles à obtenir à partir des techniques conventionnelles [8].

Les applications concernent des matériaux très divers soumis à différents types de sollicitations (résistance à l'usure, à l'érosion, à l'oxydation, à la fatigue, ...) on peut également utiliser ce procédé en vue de la préparation de surface pour un traitement ultérieur (décapage, préparation de surface avant collage, ...).

Les atouts essentiels des procédés laser sont variés et peuvent avoir une répercussion économique importante : l'aspect localisé du traitement permet de traiter uniquement la zone soumise aux sollicitations (réduction du temps de traitement, de la quantité d'énergie et de matière consommées).

Malgré des potentialités importantes, les procédés laser dans le domaine des traitements de surface n'ont pas encore connu le développement industriel qu'ils méritent. Il s'agit d'une technologie encore jeune à laquelle le monde industriel préfère souvent des procédés peut être moins performants mais totalement maîtrisés, moins coûteux et qui ont fait leurs preuves [8].

# **CHAPITRE II : Propriétés**

## **du titane et ses alliages**

## 1. Historique

On s'accorde généralement sur le fait que c'est le moine britannique *William Gregor* qui a découvert, en 1790, une espèce minérale qu'il appela dans un premier temps "*Menaccanite*", puis par la suite "*Ilménite*". Il avait bien identifié la présence de fer dans ce minerai mais associé à un autre élément qui restait mystérieux. Cette Ilménite est un composé de formule chimique approchée  $\text{FeTiO}_3$  ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FexOy}$ ). Cinq ans plus tard, le chimiste allemand *M-H Klaproth* redécouvre ce même mystérieux élément dans une autre espèce minérale, qui reçoit le nom de "*Rutile*" et qui était en fait un oxyde de ce métal ( $\text{TiO}_2$ ) qu'il baptise Titan (Titane en français, Titanium en anglais). Mais l'industrie du titane n'a réellement démarré que vers les années 50 en raison de nombreuses difficultés de métallurgie extractive [11].

On peut schématiquement présenter les propriétés du titane et de ses alliages en deux classes :

Celle liée à la nature de sa surface : la résistance à la corrosion est en effet excellente et, associée à une bonne souplesse de mise en œuvre.

Celle liée à des propriétés mécaniques qui sont élevées et d'un niveau comparable aux aciers; comme la densité est en revanche plus faible, les alliages de titane sont des matériaux de choix dans l'aéronautique en particulier [12-15].

## 2. Le titane à l'état naturel

Relativement abondant dans l'écorce terrestre, on extrait le minerai de titane d'un grand nombre de roches et de sables (roches marines, alluvions...). Dans ceux ci, le métal se trouve principalement sous forme oxydée  $\text{TiO}_2$ , cristallisé sous trois formes : l'anatase, la brookite et le rutile, plus rarement sous forme d'anasowite ( $\text{Ti}_3\text{O}_5$ , structure orthorhombique). L'anatase a une structure quadratique, elle contient 99 %  $\text{TiO}_2$ , avec une faible teneur en fer. La brookite de structure orthorhombique, contient 94 à 99 %  $\text{TiO}_2$  et son impureté principale est le silicium. Le rutile quand à lui cristallise sous forme quadratique et a une teneur d'environ 97 % en  $\text{TiO}_2$  [16].

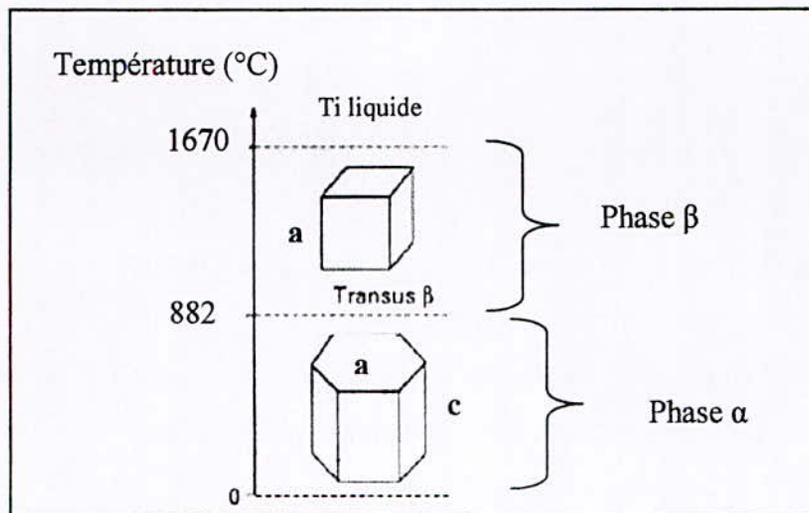
### 3. Transformation allotropique

Le titane se présente sous deux structures cristallines, avec transformation allotropique du type martensitique à la température 882°C, il se cristallise dans le système hexagonal pseudo-compact en dessous de la température de transformation (à 25° C,  $a = 295 \text{ pm}$  ;  $c = 468 \text{ pm}$  ;  $c/a = 1,587$ ) cette phase est appelée phase alpha ( $\alpha$ ), la deuxième structure appelée bêta ( $\beta$ ), stable de 882°C jusqu'au point de fusion (1670°C), elle cristallise dans le système cubique centré ( $a = 332 \text{ pm}$  à 900° C)(*figure 1*) [15].

Le titane bêta est moins dense que le titane alpha.

La température de transition  $\alpha \rightarrow \beta$  est appelée *transus  $\beta$*  ou  $T_\beta$  en abrégé.

La valeur de *transus  $\beta$*  est variable en fonction des éléments d'alliage [14-15].



*Figure II.1 : Cristallographie du titane [15].*

### 4. Effet des éléments d'alliage

Les éléments **alphagènes** (Al, O, C, et le N) stabilisent et durcissent la phase  $\alpha$  et augmentent la température  $T_\beta$  et les **bêtagènes** (Mo, H, V, Nb, Mn, Fe, Ni, Si, Cu, et le Cr) stabilisent la phase  $\beta$  et diminuent  $T_\beta$  (*figure 2*). Il y a aussi des éléments qui sont qualifiés de **neutres**, tels que le zirconium (Zr) et l'étain (Sn) [14-15].

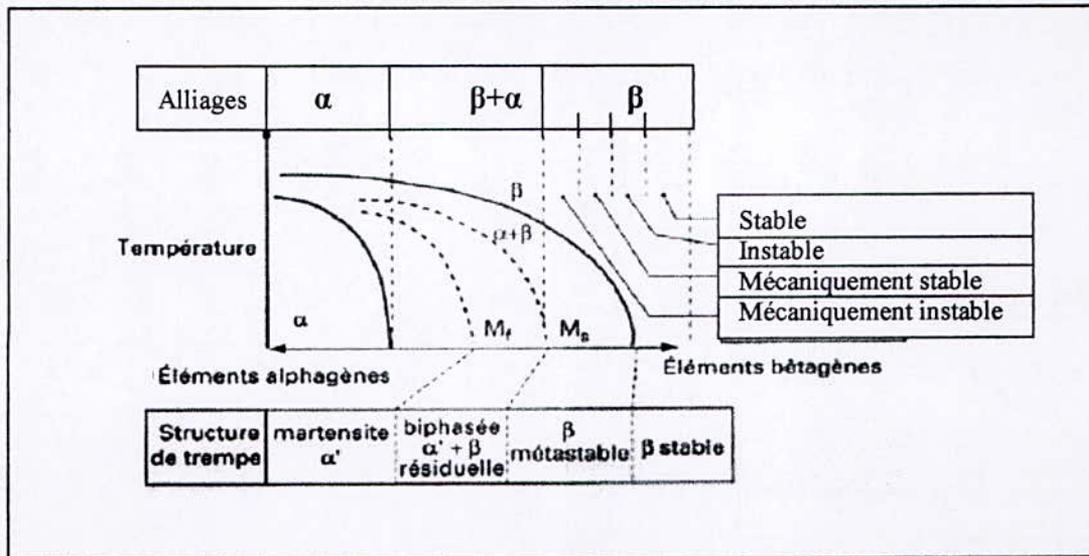


Figure II.2 : Diagramme pseudo-binaire applicable aux alliages de titane [15].

Les structures d'équilibre typiques ont été représentées schématiquement sur la *figure II.3*. On a également indiqué la position des plus utilisés parmi les alliages industriels ainsi que l'effet de la structure sur les principales propriétés d'emploi des alliages de titane [15].

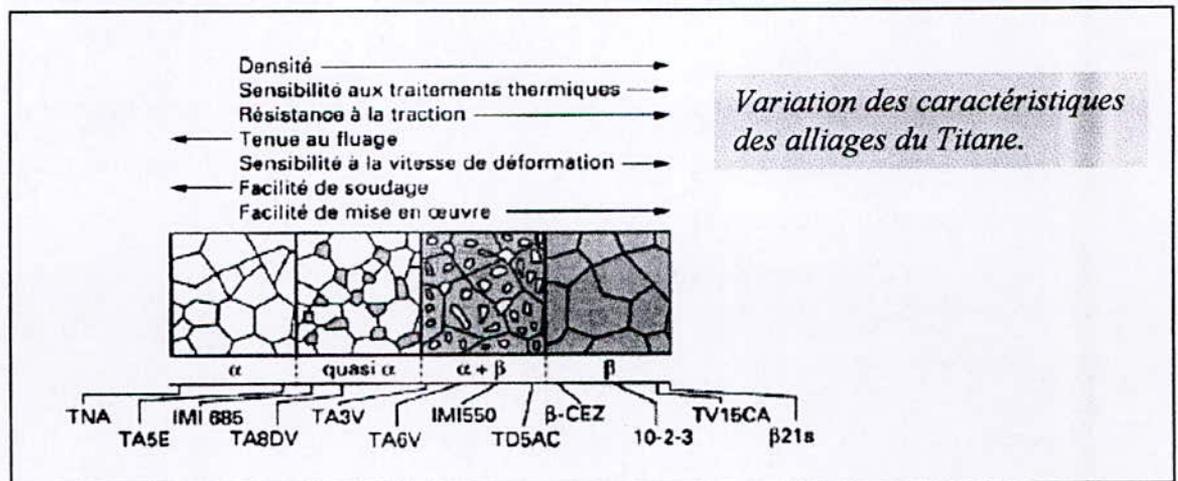


Figure II.3 : Structures micrographiques d'équilibre des alliages de titane [15].

## 5. Propriétés du titane

Le titane est un métal de la colonne IIB de la classification périodique des éléments. De numéro atomique  $Z= 22$ , sa configuration électronique est la suivante :  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^2, 4s^2$  [16].

Le titane pur, Si l'on compare à d'autres métaux possède des différences assez marquantes de propriétés physiques résumées dans le *tableau 1* suivant :

Métaux	Titane	Fer	Aluminium
<b>Propriétés</b>			
<i>Densité (g/cm<sup>3</sup>)</i>	4,5	7,8	2,7
<i>Température de fusion (°C)</i>	1670	1535	658
<i>Module d'élasticité (GPa)</i>	110	204	71
<i>Conductivité thermique (W/m.K)</i>	21,6	71	242
<i>Diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/s)</i>	7,7E-3	21,8E-3	102E-3
<i>Coefficient de dilatation thermique de 0 à 100 °C (10<sup>-6</sup>K<sup>-1</sup>)</i>	8,5	12,3	23,7
<i>Potentiel standard (V)</i>	-1.75	-1.65	-0.42

**Tableau II.1 : Propriétés physiques et chimiques du Ti, Al, et Fe [14, 17].**

Le titane qui a une densité de 40 % inférieure à celle des aciers au carbone peut voir sa résistance mécanique encore améliorée par addition d'éléments d'alliage tels que l'aluminium et le vanadium [14].

Il est amagnétique [14-15, 17].

Son aptitude à se passiver (formation d'un film protecteur d'oxyde) donne au titane une résistance exceptionnelle à la corrosion et aux attaques chimiques, ainsi qu'à l'érosion par des fluides chargés de produits à caractère abrasif (par exemple : sable dans l'eau de mer). Il résiste parfaitement à tous les milieux naturels (atmosphère, eau de mer,...) et à de nombreux produits chimiques, en particulier à ceux qui contiennent du chlore. Mais il résiste mal à certaines solutions chaudes ou concentrées (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, acides organiques). **Le tableau II.2 (a et b)** ci-dessous permet de comparer la résistance à la corrosion du titane aux différents matériaux dans deux situations particulières [17] :

- Dans l'eau de mer :

Ecoulement (m/s)	Durée d'exposition (mois)	Taux de corrosion (mm/an)		
		T 40	Cu-Ni 70/30	Al
9,8	12	<0,0025	0,3	1,0
8,5	2	$1,2 \times 10^{-4}$	0,05	—
7,2	1	$5,10 \times 10^{-4}$	0,12	—

*Tableau II.2.a : Les taux de corrosion de T40, laiton, et l'Al [17].*

- Solution bouillante à 90 % de HN03 :

Température du métal (°C)	T40 (mm/an)	Inox 18-10 (mm/an)
116	0.03 ÷ 0.17	3.8 ÷ 13.2

*Tableau II.2.b : Corrosion du Ti et de l'inox dans une solution 90% de HNO<sub>3</sub> à 116 °C [17].*

## 6. Transformation de phase

La présence dans le titane et la plupart de ses alliages, de deux structures différentes selon la température, impose l'existence d'une transformation allotropique. Nous allons montrer les particularités de cette transformation en fonction de ses caractéristiques cristallographiques [15].

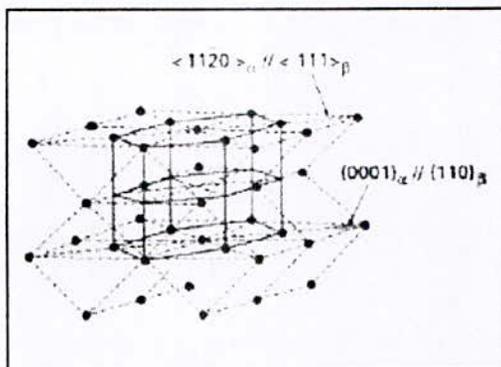
### 6.1 Cristallographie de la transformation de phase

La transformation allotropique  $\alpha \rightarrow \beta$  présente les caractères spécifiques de la transformation martensitique, selon le mécanisme proposé par Bürger pour le zirconium [15].

La transformation allotropique de titane  $\beta \rightarrow \alpha$  montre que l'on peut passer de la forme cubique centrée à la forme hexagonale (*figure II.4*) par un faible déplacement de quelques atomes et par un léger réarrangement de ceux-ci : cette transformation se déroule avec des réactions sans diffusion [15].

Dans cette transformation, on a les correspondances suivantes :

Plans :  $\{110\}_\beta // \{0001\}_\alpha$   
 Directions :  $\langle 111 \rangle_\beta // \langle 1120 \rangle_\alpha$



**Figure II.4** : Transformation allotropique  $\alpha$  (cc)  $\rightarrow$   $\beta$  (hc) [15]

Il faut ajouter que :

La transformation cc  $\rightarrow$  hc du titane se produit toujours par un mécanisme de cisaillement avec germination athermique (formation, sans diffusion de phase  $\alpha$  martensitique) suivie éventuellement, dans le cas des refroidissements lents (de l'ordre de 2°C/min) d'une croissance thermiquement activée ;

Les plaquettes  $\alpha$  qui se forment par refroidissement lent ou par transformation isotherme ont avec la phase mère  $\beta$  les mêmes correspondances cristallographiques et les mêmes plans d'accrolement que la martensite obtenue par trempe ;

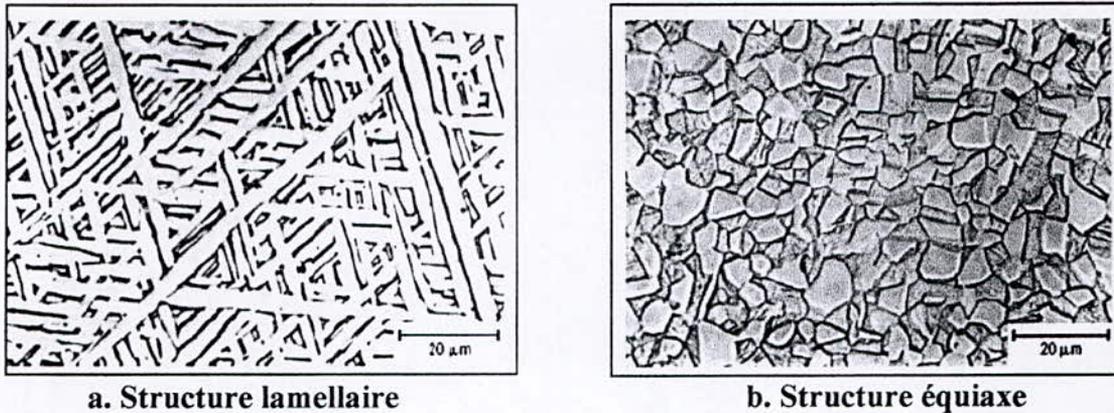
Bien qu'il existe théoriquement pour un monocristal, de nombreuses orientations possibles après double traversée du point de transformation (41 pour le cycle  $\beta \rightarrow \alpha \rightarrow \beta$  et 57 pour le cycle  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ ), on ne trouve en fait qu'une seule orientation : celle de départ, ce qui caractérise une hérédité cristallographique très forte qui est par exemple mise en évidence lors de l'examen des textures [15].

## 6.2 Les diverses morphologies obtenues

Si, pour le titane pur, la transformation  $\alpha \rightarrow \beta$  est sans diffusion, il n'en est pas de même pour les alliages. Pour un alliage de type  $\alpha$  ou  $\alpha + \beta$ , un refroidissement rapide de la phase  $\beta$  conduit à une structure aiguillée fine (morphologie  $\alpha$  aiguillée) [14].

Quand la vitesse de refroidissement diminue, le diamètre des aiguilles augmente puis les aiguilles se transforment en lamelles d'épaisseur de plus en plus importante (morphologie  $\alpha$  lamellaire) (*figure II.5.a*).

Par traitement thermomécanique (déformation à chaud ou simple traitement thermique sur structures déformées), on peut briser les lamelles  $\alpha$  et les faire recristalliser en nodules sphériques. On obtient alors la morphologie  $\alpha$  équiaxe (*figure II.5.b*).



*Figure II.5 : Morphologies du TA6V [14].*

#### ⬇ Structures obtenues par traitement thermique dans le domaine $\alpha$

Le traitement thermique des alliages de titane a pour base le fait que l'on peut obtenir, par trempe de la phase  $\beta$  stable à haute température, une forme métastable ( $\alpha + \beta_{\text{mét}}$ ) qui sera susceptible de modification par retour à l'équilibre structural.

Il s'ensuit donc que les alliages  $\alpha$ , pour lesquels la rétention de la phase  $\beta$  est impossible, ne répondent pas (ou très faiblement) aux traitements thermiques.

Le seul traitement thermique qui est applicable sur ce type de ces structures est le recuit dont le but est de relaxer les contraintes ou de recristalliser une structure écrouie en vue d'obtenir une structure d'équilibre stable et homogène [14].

#### ⬇ Structures obtenues après traitement dans le domaine $\beta$

Il faut distinguer 4 cas [14] :

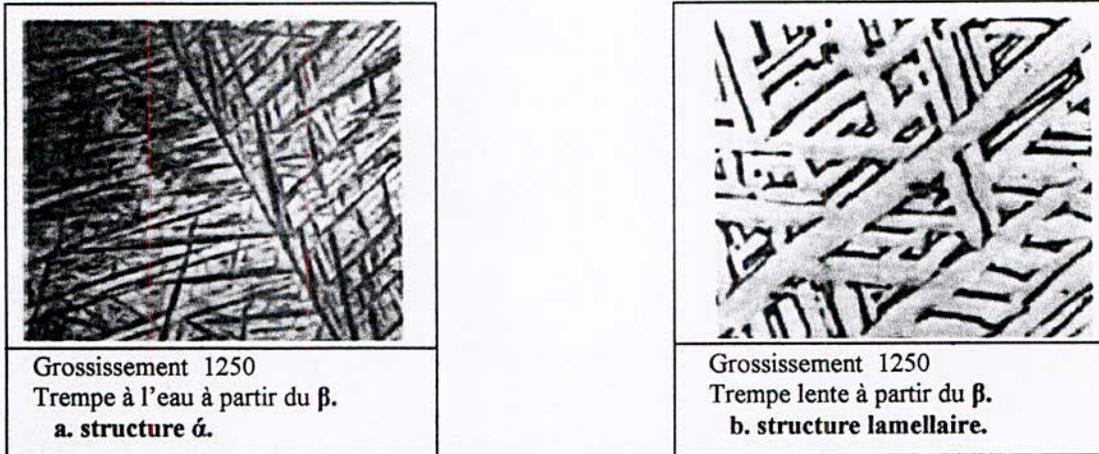
##### a. Les alliages contenant peu d'éléments bêtagènes :

Pour ce type d'alliage, la phase  $\beta$  stable à haute température est susceptible, comme dans le cas du métal non allié, de subir une transformation martensitique au moins partielle, lors d'une trempe énergétique.

Dans ce type d'alliage, la phase martensitique obtenue (phase  $\alpha$ ) possède la structure hexagonale du titane mais la composition chimique de la phase  $\beta$  dont elle est issue : formée sans diffusion, elle est donc hors d'équilibre. Elle est par conséquent apte au durcissement

après retour à l'équilibre structural lors d'un maintien à température moyennement élevée. C'est le cycle classique de durcissement par trempe et revenu.

L'observation micrographique, permet de voir l'aspect aciculaire de la martensite, l'orientation des plaquettes  $\alpha$  étant en relation cristallographique avec celle de la phase mère  $\beta$  (figure II.6.a et II.6.b).



**Figure II.6 :** Exemples de morphologie que l'on peut obtenir à partir du domaine  $\beta$  [15].

*b. Au delà d'une certaine teneur en éléments bêtagènes :*

Dans ce cas la phase  $\beta$  peut être conservée à l'ambiante à l'état métastable  $\beta_{\text{mét}}$  lors d'un refroidissement énergétique. Cette phase  $\beta_{\text{mét}}$  peut également être durcie par retour à l'état d'équilibre lors de revenus.

*c. Pour des teneurs élevées :*

La phase  $\beta$  est fortement stabilisée : on peut distinguer, comme dans le cas des aciers, les alliages mécaniquement stables et instables. Pour ces derniers, la phase  $\beta$  métastable obtenue par trempe se transforme en phase  $\alpha''$  sous l'effet d'une déformation plastique à la température ambiante (martensite mécanique d'écrouissage).

*d. Les alliages  $\beta$  parfaitement stables :*

Ce type d'alliage est inapte à tout type de traitement thermique (hormis l'adoucissement des contraintes appliquées).

### ✚ Structures obtenues par traitement dans le domaine $\alpha + \beta$

Dans ce cas, il est bien évident que la phase  $\alpha$  ne subira pas de transformation : cependant, sa présence modifiera profondément les mécanismes de germination ses microstructures rassemblent celle de la figure I.3.

On peut distinguer 3 cas :

- Avec une trempe rapide depuis le domaine  $\alpha + \beta$ , toute la phase  $\beta$  s'est transformée en phase  $\alpha'$ , ce qui donne  $\alpha + \alpha'$ .
- Refroidissement un peu plus lent que précédemment, ce qui a permis une décomposition de la phase  $\beta$  et donne la présence de  $\alpha + \beta_t$ .
- Chauffage à basse température et/ou refroidissement très lent  $\rightarrow \alpha + \beta_{\text{stable}}$  [14].

## 7. Application des alliages de titane

Les minerais de titane sont abondants, mais cet élément est encore peu employé à ce jour, il peut être considéré comme un matériau encore relativement confidentiel. Aujourd'hui, son coût unitaire apparaît comme élevé et son marché comme limité quand on fait des comparaisons, de manière classique avec les autres familles de matériaux (*tableau 3*).

<i>Métal</i>	<i>Demande mondiale (1000 tonnes)</i>	<i>\$/tonne</i>
<i>Acier</i>	<b>730.000</b>	<b>400</b>
<i>Aluminium</i>	<b>20.000</b>	<b>1.500</b>
<i>Aciers Inox</i>	<b>13.000</b>	<b>2.000</b>
<i>Titane</i>	<b>50</b>	<b>18.000 à 25.000</b>

*Tableau 3* : Marché mondial du titane et autres métaux [17].

Il existe dorénavant une gamme très étendue de semi produits de dimensions standard ou non, d'ébauches ou de pièces livrées "presque à la cote" répondant aux besoins des concepteurs.

Les technologies d'usinage, de déformation (à chaud/à froid) et d'assemblage (soudage, collage) ont également beaucoup progressé.

Les principaux sectoriels d'utilisation du titane (selon une étude récente réalisée pour le compte du Ministère des Finances et de l'Industrie de France, sur le marché mondial) sont les suivantes [12, 17-18]:

- l'énergie, la chimie, la pétrochimie (environ 47 % avec une consommation de 20000 à 25000 tonnes) : l'off-shore, les usines de dessalement et de production de chlore, de chlorate et d'urée, les échangeurs de chaleur, les papeteries, les vannes, les pompes, la robinetterie ... etc.
- L'aéronautique civile (environ 35 %) et l'aéronautique militaire (environ 7 % pour une consommation de 17000 à 23000 tonnes) : pièces moteur, turbines d'hélicoptères, pièces de structure d'aéronefs, éléments de train d'atterrissage, boulonnerie.
- Les sports et loisirs (environ 6 %, 3000 tonnes) : les équipements de golf, queues de billard, raquettes de tennis, turbines de jet ski et pièces de cycle.
- Le médical (environ 2 %, consomme 800 tonnes) : les prothèses de hanches, de rachis, de genoux, articulaires, buccales et dentaires, les tiges fémorales, agrafes, vis, crochets, pivots, plaques ....
- Le bâtiment (environ 1 %, 500 tonnes) : matériau de surface
- Autres (environ 2 %, 1000 tonnes) : la lunetterie (monture), l'horlogerie (boîtier), pièces de voiture de compétition (soupape, ressort, culbuteur, bielle, axe de transmission...), le militaire (blindage, canon léger, fusil d'assaut), le soudage par ultrasons (sonotrode), les machines à très grande cadence (éléments de manutention...), coutellerie, instruments de musique (flute), l'industrie navale (éléments de bateau, de sous marin...) ....

# **CHAPITRE III : Usure**

**induite par petits**

**débattements « fretting ».**

## 1. Introduction

De nombreuses structures industrielles ont des durées de vie fortement limitées à cause de dégradations survenues dans des régimes où divers éléments peuvent être en contact. Sous l'effet de sollicitations, souvent secondaires, de petits débattements entre les surfaces au contact entraînent des pertes de matière ou l'apparition de fissures. Très pénalisante pour l'industrie, cette dégradation est connue sous le nom de fretting auquel on accole souvent les mots wear, fatigue ou encore corrosion pour essayer d'indiquer le mécanisme initial de dégradation. Force est de constater que la littérature française ne nous permet pas de proposer un mot aussi générique que le fretting et que l'ancienne appellation de corrosion de contact est à rejeter car très mal adaptée [19].

Les mots français permettant le mieux de décrire ce phénomène sont « petits débattements » et l'on utilise aujourd'hui les sigles UIP ou FIP qui signifient respectivement usure induite en petits débattements et fissuration induite en petits débattements. Toutefois ces termes proposés initialement par le laboratoire, font essentiellement référence à la nature de la dégradation (usure ou fissuration) qui peut se produire pour même type de sollicitation. En particulier, il faut immédiatement lever le malentendu, le terme FIP n'est pas traduisible par fretting-fatigue : les fissures peuvent s'amorcer dans le contact sans application de chargements extérieurs au contact. De même, un mécanisme plus classique d'usure, défini par UIP, peut être à l'origine des dégradations dans le cas du fretting-fatigue c'est à dire dans le cas du cumul de la sollicitation de contact et d'une sollicitation de type fatigue, extérieure au contact [19].

Comme dans tout problème incluant à la fois la mécanique du contact et les propriétés du matériau, un grand nombre de paramètres interviennent et interagissent. La complexité du phénomène d'usure est encore augmentée par le caractère confiné d'un contact et donc par la difficulté de pouvoir expérimentalement isoler un paramètre ou un phénomène. De ce fait, beaucoup d'études ont été effectuées pour obtenir souvent à des résultats divergents et contradictoires [20].

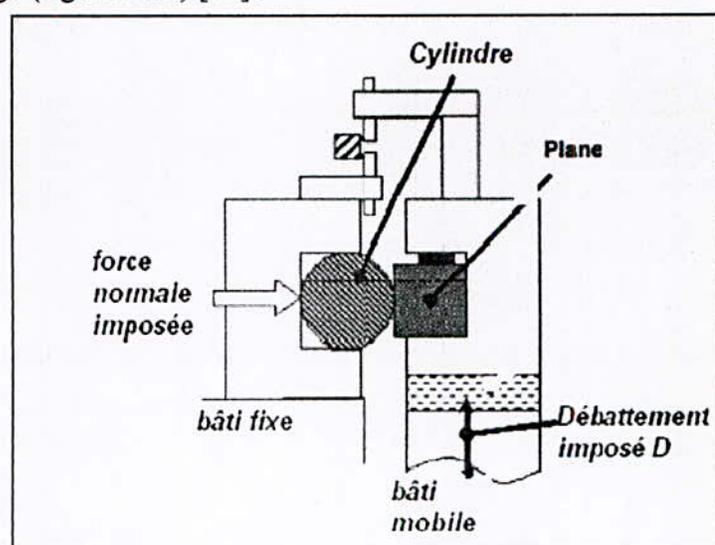
## 2. Généralisation du phénomène

Cette étude a mis en évidence, d'une part la nécessité de s'intéresser aux tout premiers cycles pour comprendre la formation des débris (en moins de 1000 cycles, le lit de poudre est établi et le contact peut ne plus évoluer) et d'autre part la présence d'évolutions structurales dans les couches superficielles (phases dure et fragile). Les matériaux réponsus à ce phénomène sont : les alliages d'aluminium, de titane, les aciers...etc. Tous ces matériaux présentent en effet ces types de zones réagissant différemment de l'alliage initial lors d'une attaque chimique des surfaces. Ces zones très dures sont observées lors des contacts bombé/plan ou plan/plan pour des petits débattements et des efforts normaux bien définis. Par commodité, nous appellerons ces zones des transformations tribologiques superficielles (TTS). Il s'avère donc de plus en plus nécessaire d'étudier et de comprendre leur formation [20].

## 3. L'essai de fretting

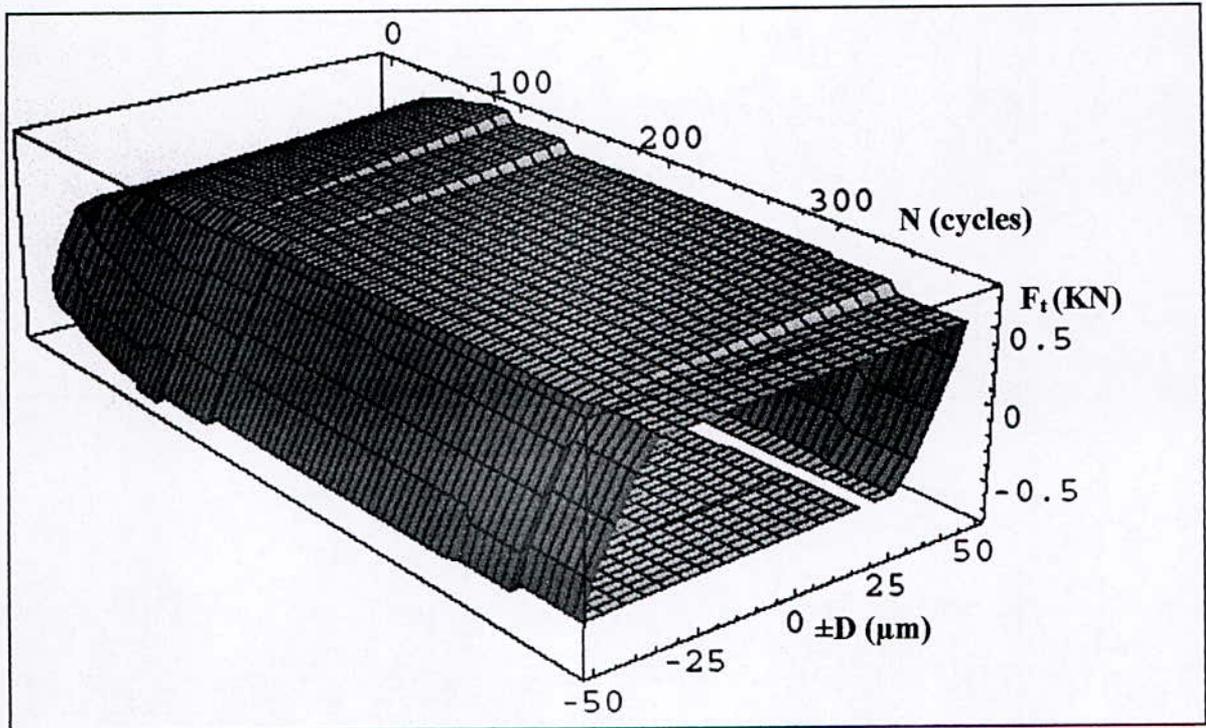
### 3.1 Principe de l'essai

L'essai utilisé consiste à appliquer un mouvement alternatif de faible amplitude entre deux éprouvettes. L'une est montée sur un bâti rigide, l'autre solidaire du piston d'une machine hydraulique, est animée d'un mouvement imposé d'amplitude et de fréquence fixées. L'effort normal, mesuré en continu au cours de l'essai, est appliqué par l'intermédiaire d'un rectangle de charge (figure III.1) [21].



**Figure III.1** : Montage de l'essai de fretting (cas cylindre/plan) [22].

L'enregistrement en continu de l'effort tangential  $F_t$  en fonction du débattement  $D$  permet de tracer les cycles  $F_t$ - $D$  de fretting tout au long de l'essai. La superposition de ces cycles selon un troisième axe représentatif du numéro du cycle donne une représentation tridimensionnelle connue sous le nom de bûche de frottement (figure III.2).

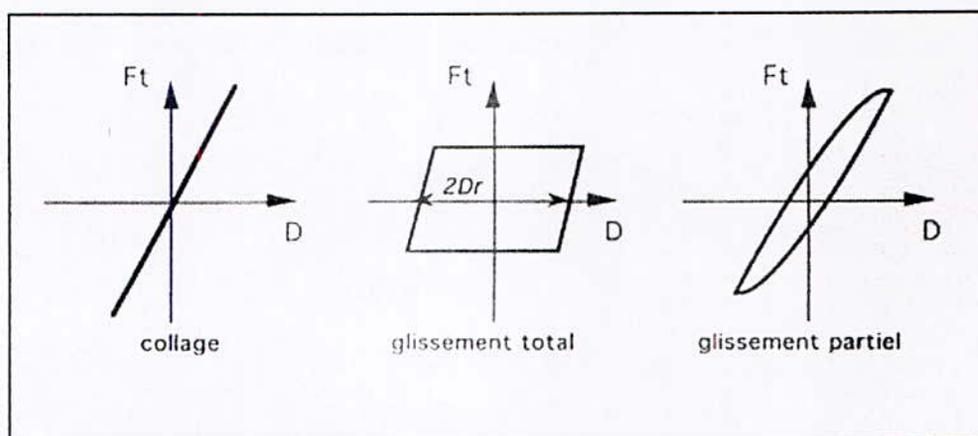


**Figure III.2 :** Exemple de bûche de fretting [23].

Classiquement trois types de cycles  $F_t$ - $D$  ont été observé (voir fig. III.3) [23] :

- Le cycle  $F_t$ - $D$  est fermé : la force tangentielle augmente linéairement avec le débattement le déplacement relatif entre les échantillons est négligeable, la déformation élastique du système montage-échantillons est suffisante pour accommoder le déplacement.
- Le cycle  $F_t$ - $D$  est parallélogramme : au début l'effort  $F_t$  augmente linéairement avec  $D$  comme précédemment, puis reste constant ou augmente légèrement à partir d'une valeur seuil. Le cycle  $F_t$ - $D$  est alors caractéristique du glissement total. Le coefficient de frottement est égal à  $F_t/F_n$ . L'amplitude réelle de glissement  $D_f$  entre les deux surfaces en contact est la moitié de la largeur du cycle à effort tangentiel nul.

- Le cycle  $F_t$ - $D$  est elliptique :  $F_t$  n'évolue plus linéairement avec  $D$  au cours du mouvement. Dans ce cas, en configuration sphère/plan, une partie annulaire en périphérie de contact glisse alors que le centre reste collé : le contact est alors sollicité en glissement partiel.



**Figure III.3** Les trois types de cycles de fretting [23].

### 3.2 Paramètres de l'essai

Les gammes des grandeurs caractéristiques de l'essai sont :

- le débattement imposé  $D$  ;
- la force normale  $F_n$  ou la pression appliquée ;
- la fréquence  $f$  ;
- le nombre de cycle  $N$  ;
- et la géométrie du contact.

### 3.3 Etude de la bûche de fretting

L'analyse d'une bûche de fretting en glissement total (figure III.4) définit trois stades [21, 24-25] :

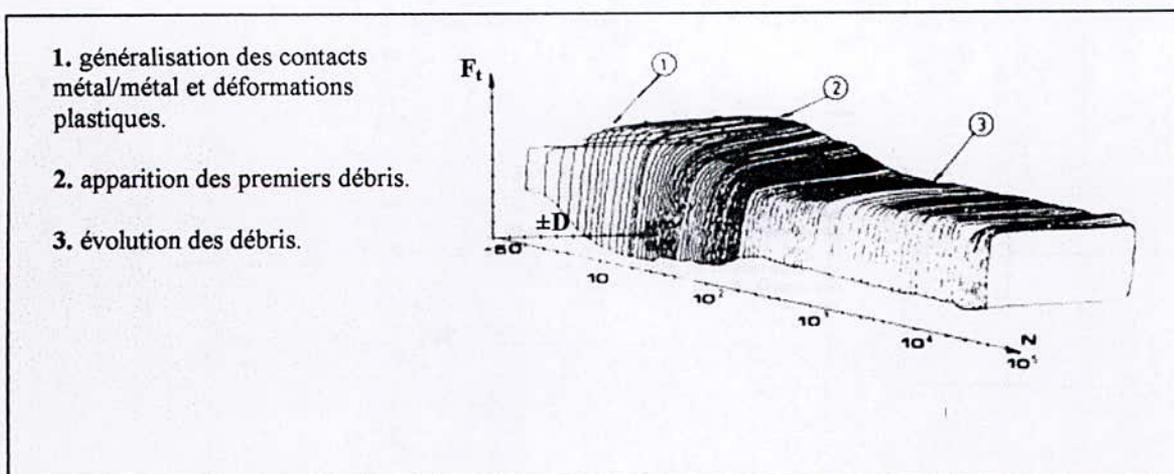
1. Augmentation de l'aire de contact métal/métal : lors de cette première étape, les écrans de pollution provenant de l'interaction entre le métal et son environnement sont détruits localement. Cette destruction conduit à des contacts métal/métal et une augmentation locale de l'adhérence. Apparaissent alors des déformations plastiques qui se généralisent à l'ensemble du contact, avec écrouissage superficiel intense et modification structurale.

2. Apparition des premiers débris : ainsi fragilisé, le contact ne peut plus se déformer pour accommoder des déplacements imposés. Des ruptures se produisent aux points critiques

et les premiers débris apparaissent : le tribosystème évolue d'un contact à deux corps vers un contact à trois corps. Ce passage s'accompagne souvent d'une diminution de l'effort tangentiel.

Des déformations plastiques superficielles accentuent le piégeage des débris. D'autre part l'augmentation du volume spécifique du matériau, liée à l'apparition des débris, tend à augmenter le champ de pression dans le contact. Ces deux phénomènes combinés provoquent de fortes déformations plastiques aux extrémités des rayures lors du charriage des débris vers les frontières du contact. Les blocages des particules alors occasionnés aux bourrelets sont parfois mis en évidence par une remontée de l'effort tangentiel à chaque extrémité du cycle de fretting (figure III.5).

3. Evolution des débris et état stationnaire : piégés dans le contact, les débris forment un lit de particules, ou troisième corps, qui sépare les premiers corps et gouverne la suite du processus. Les débris, broyés de plus en plus finement, continuent à s'écrouir. C'est alors que la corrosion ou l'oxydation entre en jeu. L'environnement qui entraîne une modification de composition et donc souvent du comportement rhéologique du troisième corps gouverne d'autant plus l'évolution du contact que la surface spécifique du lit augmente. Un état stationnaire est atteint relativement rapidement comparé à la durée de vie du mécanisme. Le coefficient de frottement chute légèrement et se stabilise.



**Figure III.4** : Liens entre l'évolution de la bûche de fretting et celle du contact [23].

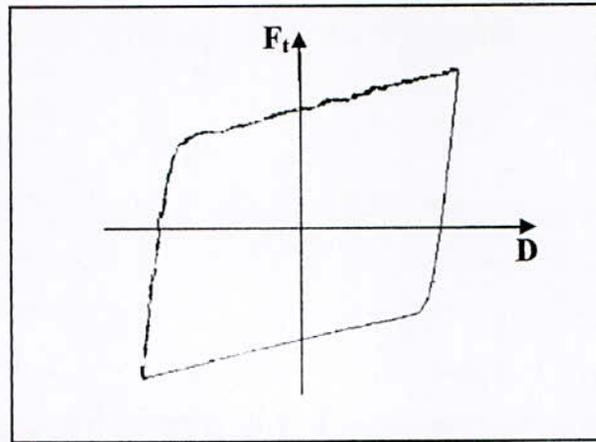


Figure III.5 : Remontées en fin de glissement dues à l'interaction débris-bourrelets [23].

La figure III.6 résume la création et l'évolution des débris d'un contact métallique au cours de l'essai de fretting. Cette figure illustre clairement que la formation de la TTS intervient dans les premiers cycles du contact.

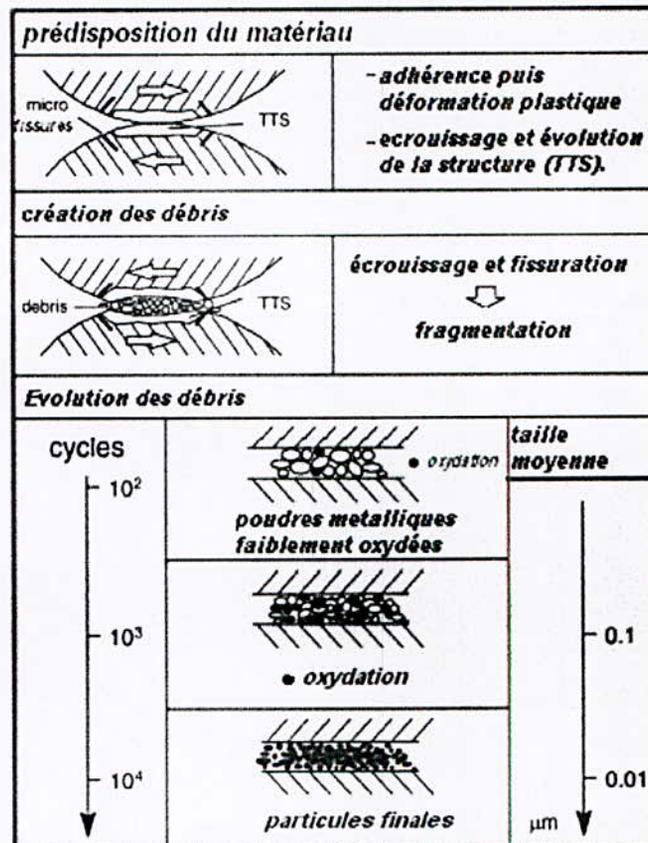
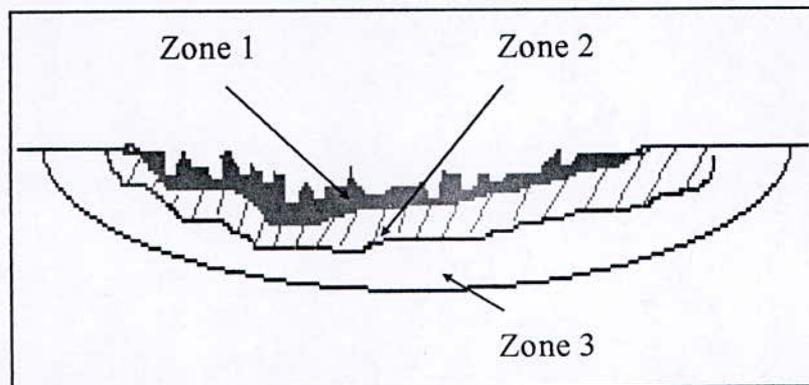


Figure III.6 : Création et évolution des débris à l'interface du contact [26].

Une coupe longitudinale de la zone dégradée nous distingue trois zones différentes (figure III.7) :

- un lit de débris oxydés ou brillants (zone I) ;
- la TTS (zone II) ;
- une zone fortement écrouie (zone III).



**Figure III.7 :** Coupe longitudinale schématique d'une empreinte de fretting [21].

Les débris qui apparaissent brillants avant attaque, présentent les mêmes caractéristiques microstructurales que la TTS.

## 4. La transformation tribologique superficielle « TTS »

### 4.1 Caractéristiques de la TTS

La transformation tribologique superficielle est caractérisée par nombreuses propriétés [21]:

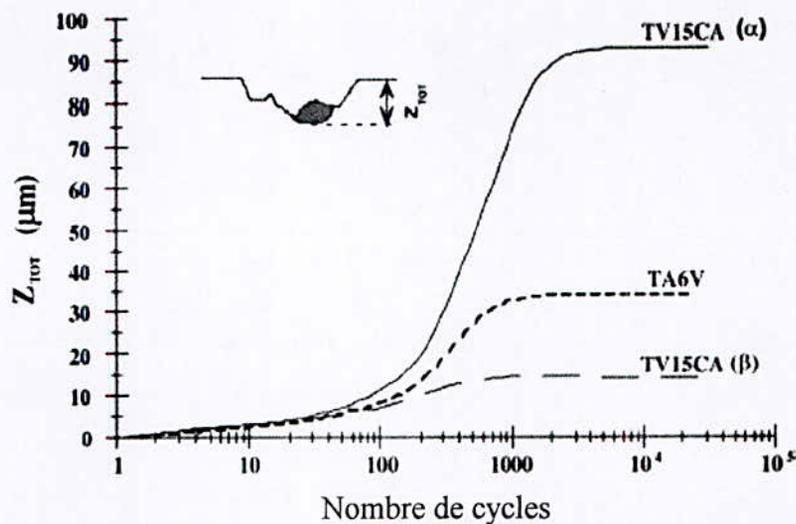
- la TTS se forme dès les 100 premiers cycles pour donner naissance aux débris.
- la dureté de la TTS est très élevée (souvent deux ou trois fois supérieure à leur dureté initiale). L'ensemble des matériaux donne naissance d'une nouvelle phase ou structure extrêmement dure et fragile.
- l'épaisseur de la TTS formée dépend de la structure initiale. Elle augmente avec le nombre de cycles et l'amplitude du glissement.
- la composition chimique de la TTS est identique à celle de l'alliage initial mais avec des changements de phase et des textures.

#### 4.2 Paramètres de formation de la TTS

La formation de la TTS est causée par plusieurs facteurs soit intrinsèques et extrinsèques :

##### a. influence du nombre de cycles :

La figure III.8 montre l'évolution de la profondeur maximale atteinte par le front de transformation  $Z_{TOT}$  avec le nombre de cycles.



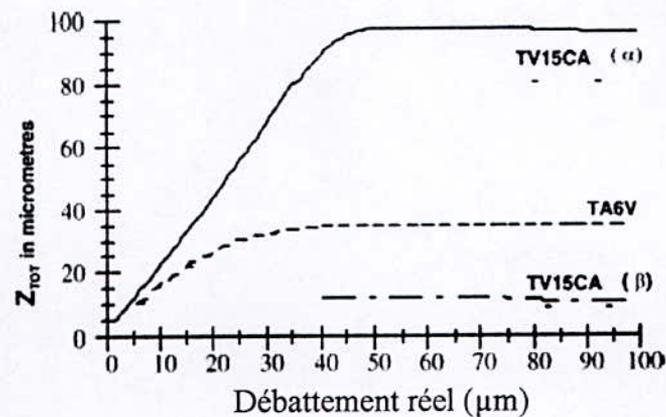
**Figure III.8 :** Evolution de l'épaisseur de TTS avec le nombre de cycles ( $\pm 50 \mu\text{m}$ , 300 N, 1 Hz) pour plusieurs alliages de titane [20].

Les courbes illustrent la rapidité de formation de la TTS au delà de 100 cycles et stabilise pour des valeurs supérieures à 1000 cycles.

##### b. influence du débattement :

Les transformations qui apparaissent lors du frottement sont causées par de grandes déformations, elles mêmes occasionnées par les mouvements relatifs entre les deux surfaces. En glissement total, une partie du débattement est accommodée par la déformation élastique des échantillons et du montage de fretting.

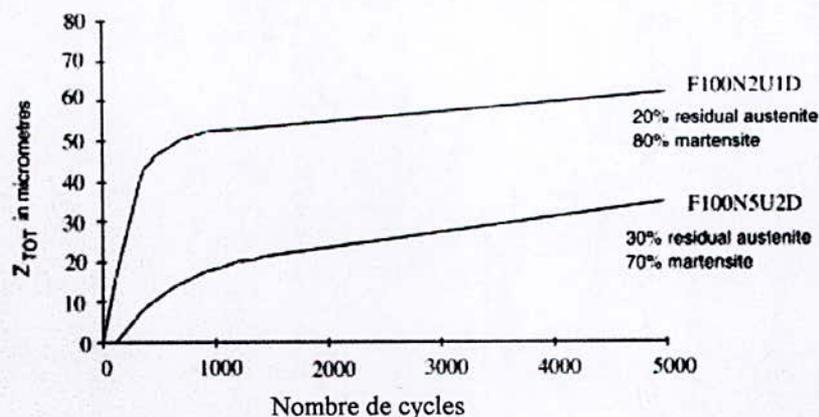
L'épaisseur de la TTS stabilisée augmente avec débattement réel de glissement jusqu'à une valeur seuil (figure III.9)



**Figure III.9 :** Evolution de l'épaisseur en fonction du débattement réel ( $f = 1\text{Hz}$ ,  $F_n = 300$  N,  $N = 50000$  cycles [26]).

*c. influence de la microstructure :*

La microstructure est un des paramètres majeurs pour la formation de la TTS. Le matériau à structure  $\alpha$  produit des épaisseurs plus importantes de TTS et le taux de l'austénite résiduelle important retarde la transformation (figure III.10).



**Figure III.10 :** Variation de l'épaisseur de la TTS en fonction du nombre de cycles pour deux matériaux ayant différents pourcentages d'austénite résiduelle [26].

La sollicitation induite en petits débattements est un phénomène significatif qui nous permet d'étudier la réponse du matériau s'agissant de :

- l'apparition de la TTS et les mécanismes de formation ;
- les propriétés mécaniques du matériau ;
- et la dégradation des matériaux en contact.

**Chapitre IV :**  
**Endommagements par**  
**impacts « Micropercussion ».**

## 1. Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons mis en évidence un mécanisme de dégradation, dans ce chapitre on entamera un autre processus de dégradation qui est la micropercussion00.

Ce problème est rencontré par exemple dans le cas d'érosion par des particules solides, aussi, le problème de la modélisation des mécanismes d'endommagement induits par ce processus, s'est posé. En fait, il s'agit, connaissant la forme, les caractéristiques et l'énergie d'une particule de tenter de simuler les effets d'un et/ou de multiples impacts en un point donné [11].

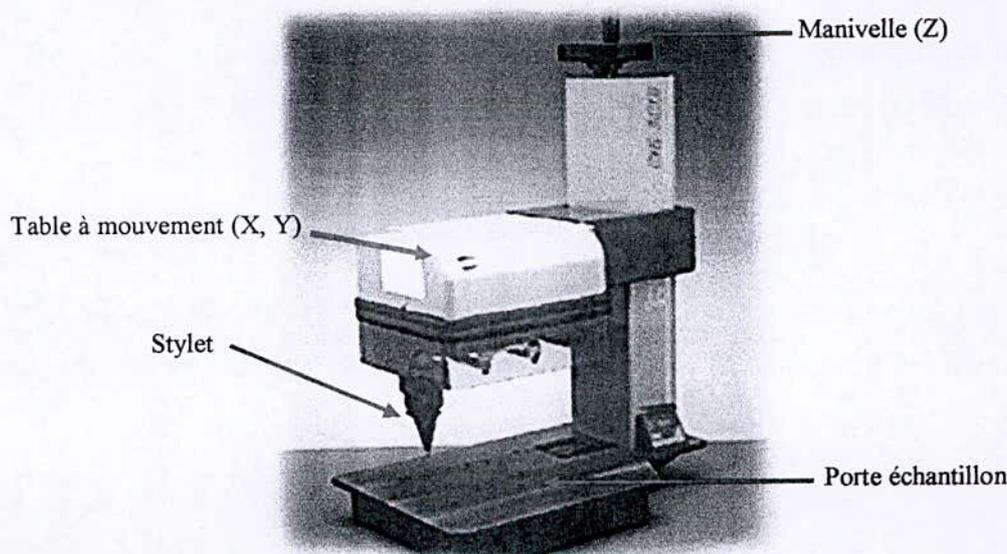
Nous montrerons que l'essai de micropercussion ou l'endommagement induit par impact permet de produire des fissures et des zones transformées tribologiquement *TTS*.

## 2. L'essai de micro percussion

### 2.1 Principe

Les essais ont constitué à effectuer des impacts successifs sur un matériau à l'aide d'une machine de marquage. Cette dernière comporte une tête appelée stylet, afin de réaliser une transformation tribologique de la zone superficielle.

Le stylet est fixé sur une table à mouvements (x, y) piloté par un moteur pas à pas. L'ajustage de la hauteur de la tête de marquage par rapport à la pièce est réglable à l'aide d'une manivelle (figure IV.1).



**Figure IV.1** Machine de marquage (Percuteur) [11].

Le marquage d'une pièce est effectué par le déplacement d'une pointe en cermet introduite dans le stylet [27].

Pour commander le mouvement de la pointe, deux modes de propulsion sont à notre disposition :

- propulsion par air comprimé,
- système électromagnétique.

Suivant les modes d'alimentation, deux types de stylet sont fournis : stylet électromagnétique et stylet pneumatique.

Dans chaque cas, la remontée du stylet est assurée par un ressort de rappel. La version à air comprimé permet de faire des impacts plus puissants. La version électromagnétique permet de faire des impacts de très faible puissance et à un rythme mieux maîtrisé.

## 2.2 Les paramètres de marquage

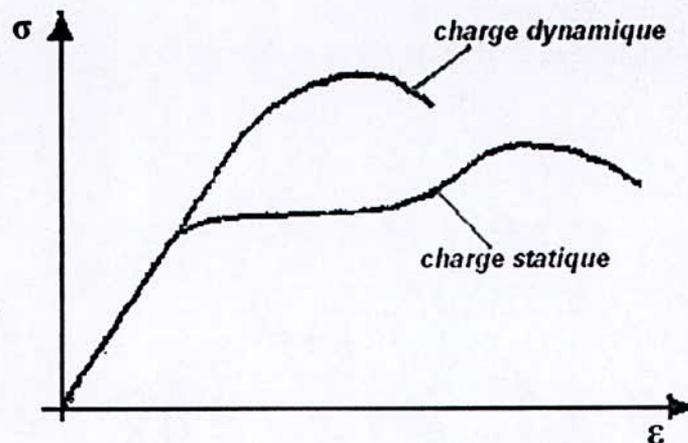
Le marquage ou l'essai de micropercussion se gère par plusieurs paramètres et une fois l'échantillon est fixé, nous devons effectuer le réglage de ces derniers pour réaliser les impacts dans les conditions voulues.

Ces paramètres sont :

- Le diamètre de la pointe ;
- Les coordonnées (X, Y) du point d'impact sur la surface de l'échantillon ;
- Le nombre d'impacts à réaliser ;
- Distance entre la surface de l'échantillon et la pointe ;
- La force de frappe ;
- La fréquence d'impact.

## 2.3 Effet de la charge

Les matériaux ont un comportement différent sous charge dynamique, les déformations plastiques n'ont pas le temps de s'effectuer complètement lorsque la mise en charge est rapide [28]. Le matériau devient plus fragile quand la vitesse de déformation croît comme le montre la figure IV.2.



*Figure IV.2 : Courbe de traction en statique et en dynamique [28].*

### 3. Mécanique de l'impact

#### 3.1 Impact élastique

La théorie de l'impact élastique est basée sur la théorie du contact élastique figure IV.3. Cette théorie est valide si le temps d'impact est plus grand que le temps de propagation de l'onde élastique dans la région de contact [27].

Le temps  $t$  d'impact était au plus égal à :

$$t < 2 \frac{a}{c}$$

Où  $a$  : est le rayon de contact.

Et  $c$  : est la vitesse de propagation d'une onde élastique longitudinale dans le projectile.

Dans le cas de l'impact d'une sphère non élastique dans un demi-espace élastique Hertz, développe les relations suivantes :

La profondeur maximum d'indentation dans la surface plane est :

$$\delta_{\max} = \left( \frac{5}{4} M \frac{V_i^2}{B} \right)^{2/5}$$

- Où -  $M$  : la masse de la sphère.  
 -  $V_i$  : la vitesse d'impact.  
 -  $B$  : constante qui dépend du rayon de la sphère.

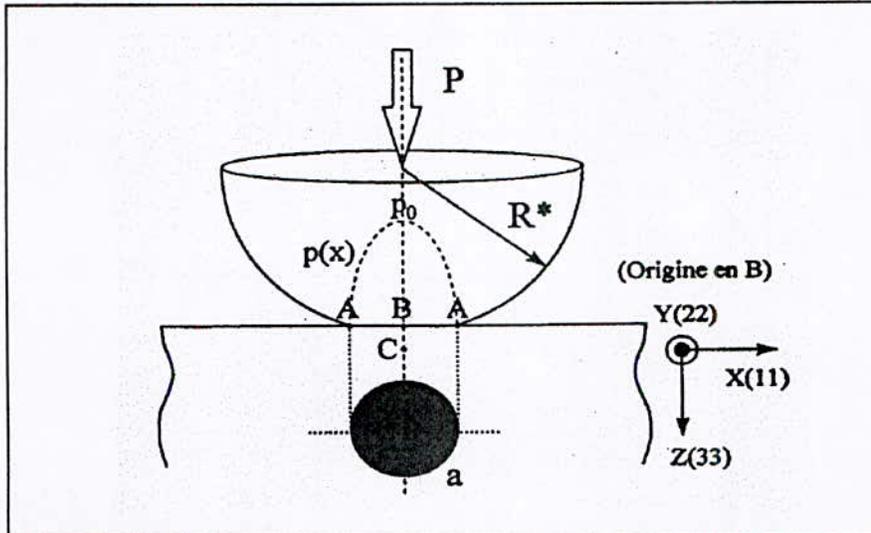


Figure IV.3 : Contact hertzien sphère/plan [27]

### 3.2 Impact plastique

Dans le cas d'une indentation sphérique statique, un écoulement plastique apparaît, pour une pression maximum de contact  $P_{max} \geq 1.6 \sigma_y$ , correspondant à une pression moyenne de  $P_{moy} \geq 1.1 \sigma_y$  où  $\sigma_y$  est la limite d'élasticité [29].

La vitesse d'impact critique  $V_y$  peut être calculée par l'équation suivante :

$$V_y = \left( \frac{\sigma_y}{E^*} \right)^2 \sqrt{26 \frac{\sigma_y}{\rho}}$$

Dans le cas des métaux cette équation donne des vitesses critiques très faibles (0.14 m/s) d'où l'apparition de la déformation plastique lors d'un impact.

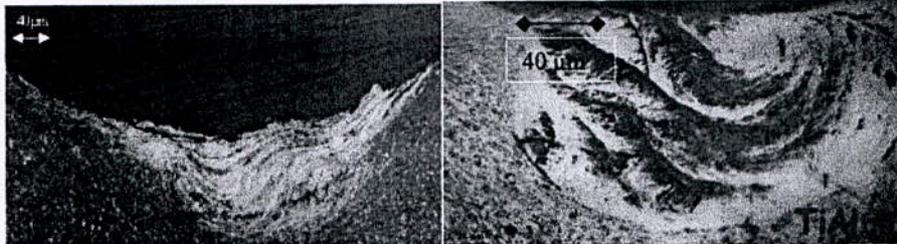
Dans la phase de retour ( $V_i < 0$ ), l'énergie de rebondissement de la bille est produite par un retour élastique. Dans le cas d'un contact métal ductile / sphère rigide, NOBRE a montré que le rayon de courbure de l'empreinte d'indentation est supérieur au diamètre de la bille. Ce fait est attribué à l'énergie élastique emmagasinée au voisinage de l'empreinte d'indentation [30].

## 4. La tribologie en micropercussion

L'écroûissage ou (et) les transformations induites par des sollicitations tribologiques modifient la morphologie de la surface, en jouant sur certains paramètres. Dans les approches classiques en tribologie, en sollicitation par impacts, il est très généralement obtenu une transformation tribologique de surface ou TTS précédée par un écroûissage progressif de la zone concernée. Cette transformation, illustrée par la figure IV.4, conduit à l'apparition d'une structure constituée [27]:

- de la phase la plus stable du matériau considéré formée à partir d'une solution solide sursaturée par une dissolution progressive des précipités pré-existants,
- d'un réseau nanocristallin (quelques dizaines de nanomètres de taille moyenne) renfermant une très forte densité de dislocations et ne présentant pas d'orientation préférentielle.

Cette structure est donc très dure mais aussi très fragile. De plus, à partir de la formation d'un réseau de microfissures en son sein, les particules d'usure sont générées.



**Figure IV.4 :** Exemples de la TTS [27].

*A gauche* : acier faiblement allié soumis à 375 cycles, énergie par impact : 8,54 mJ, vitesse d'impact : 0,7 m/s : la zone claire correspond à la partie transformée. *A droite* : alliage de titane soumis à 1000 impacts, énergie par impact 1,86 mJ, vitesse d'impact : 0,31 m/s : les filaments noirs correspondent à la zone transformée.

Percuter ou impacter un matériau métallique à l'aide d'un indenteur rigide, introduit systématiquement des déformations plastiques. Les conditions et les énergies mises en œuvre, peuvent être associés à ces déformations.

L'accumulation des déformations et des défauts dans la zone étudiée subie les chocs cycliques de micropercuteur et conduit à des microfissures et des zones transformées tribologiquement en surface (TTS).

**Chapitre V : ETUDES  
EXPERIMENTALES ET  
RESULTATS.**

## 1. Matériau étudié

Nos essais ont été effectués sur un alliage de titane le T40 dont les propriétés essentielles sont :

### *Composition chimique*

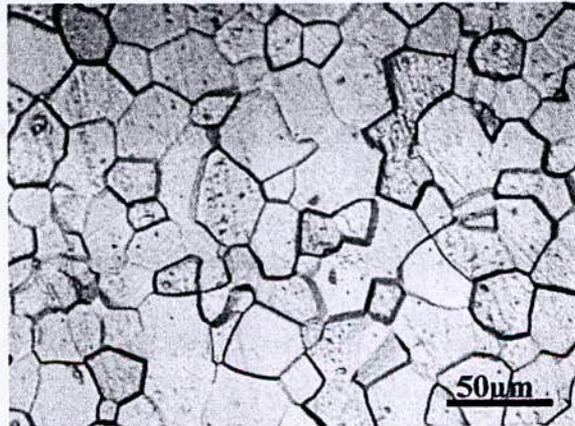
Eléments	C	Fe	H	N	O	Autres éléments	Chaque autre élément
Valeurs (ppm)	40	324	9	34	1385	<6000	<1000

### *Caractéristiques mécaniques*

- Module d'élasticité :  $E = 110 \text{ GPa}$ .
- Contrainte à la rupture :  $R_m = (470 \pm 5) \text{ MPa}$ .
- Limite d'élasticité :  $R_e = (315 \pm 5) \text{ MPa}$ .
- Allongement à la rupture : 30 %.
- Dureté :  $(155 \pm 5) \text{ HB}$ .
- Résilience  $K = 120 \text{ J/cm}^2$ .

### *Microstructure*

Des éprouvettes ont été réalisées avec le T40 à l'état de livraison et présentant la microstructure constituée de grains hexagonaux  $\alpha$  (HC) (figure V.1).



**Figure V.1** : Observation en microscopie optique de la microstructure du T40.

## 2. Techniques expérimentales et résultats obtenus

### 2.1 Le traitement thermique par LASER : matériel et les conditions d'études

Le laser utilisé est le laser YAG-Nd<sup>3+</sup> de 50 kW de puissance. Dans notre cas on a considéré les paramètres suivants :

- la puissance choisie est de 75% de la puissance du laser ( $P = 75\% \times 50\text{kW} = 37,5\text{ kW}$ ).
- une impulsion de 50 ns, en mode impulsionnel.
- une vitesse d'avance  $v$  variée pour chaque échantillon de 20 à 50 mm/s.
- le nombre de passes  $n$  appliqué sur l'échantillon est de 1 ou 5 passes.

Le tableau V.1 montre les différents paramètres appliqués sur nos échantillons

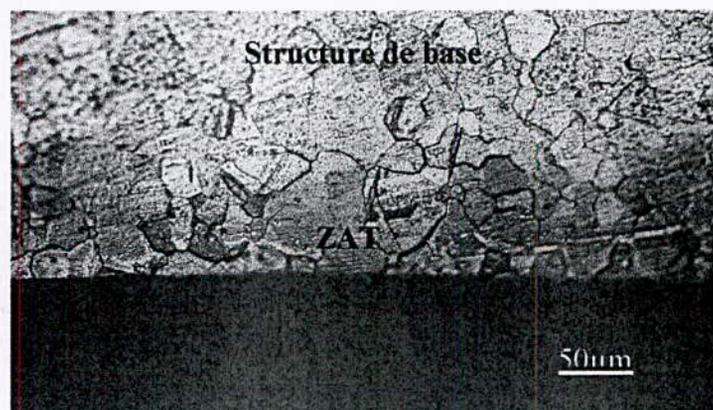
N° de l'échantillon	$v$ (mm/s)	$n$ (passes)
Echantillon 1 non traité	-	-
Echantillon 2	50	5
Echantillon 3	30	1
Echantillon 4	40	1

**Tableau V.1 : Les essais réalisés pour le traitement thermique par laser.**

Une fois les paramètres réglés, on place notre échantillon sur un plateau de chargement des pièces et on applique le faisceau laser sur la surface des échantillons (2, 3 et 4) pour les traiter.

### 2.2 Micrographie obtenue après traitement

La figure V.2 montre bien les différentes zones obtenues suite à ce traitement et la ZAT est bien mise en évidence.

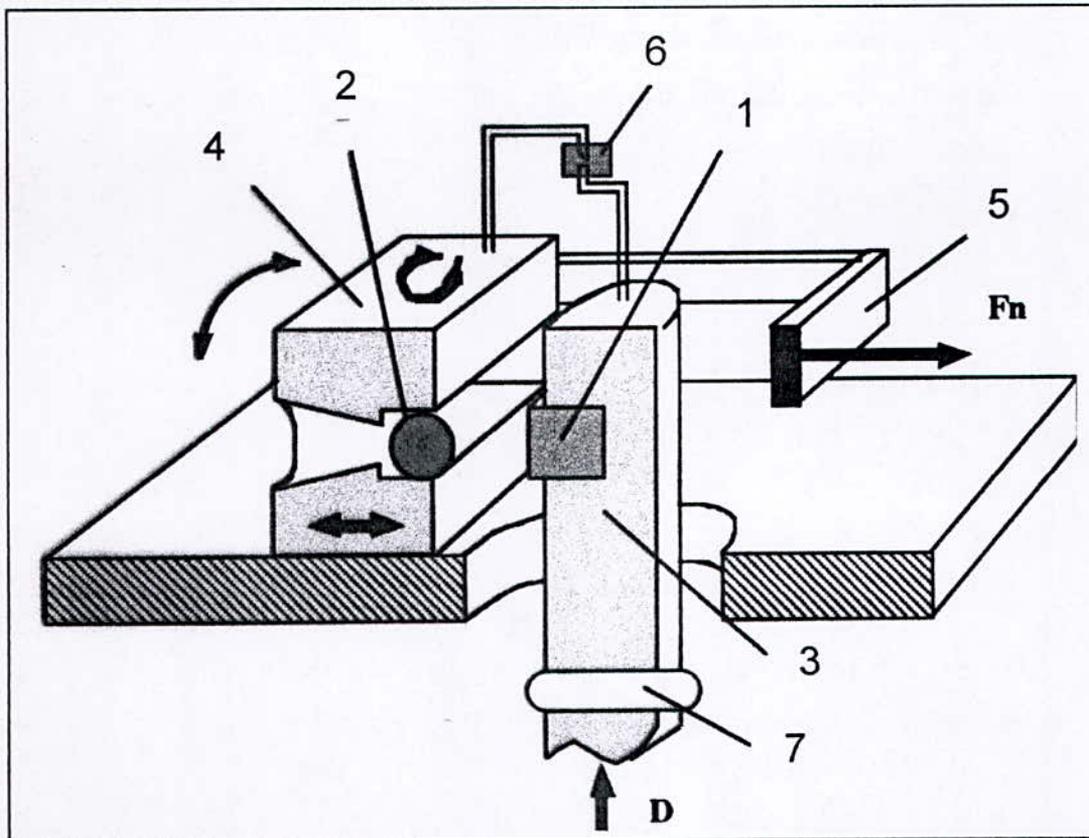


**Figure V.2 : La nouvelle morphologie obtenue après le traitement.**

### 2.3 Le fretting et analyses

L'objectif de cette étude a été d'analyser le comportement en fretting des alliages de titane T40 traité par laser en contact élastoplastique avec un acier 100Cr6 de roulement sous un niveau de pression en service.

Le dispositif expérimental est installé sur une machine hydraulique de traction-compression. Une éprouvette (1) solidaire du piston (3) est animée d'un mouvement alternatif de forme et d'amplitude donnée. Une deuxième éprouvette (2) fixe est solidaire du bâti par l'intermédiaire d'un chariot mobile (4) permettant l'application de l'effort normal à l'aide d'un rectangle de charge (5).



*Figure V. 3 : dispositif expérimental*

Nous travaillons à déplacement imposé en limitant le mouvement du piston par l'intermédiaire d'un extensomètre (6).

Nous imposons l'effort normal initial et nous enregistrons l'effort tangentiel à l'aide d'un capteur à jauges (7) placé sur le piston. Cet enregistrement est effectué en continu au cours du déplacement sur un cycle et ceci tout le long de l'essai.

L'acquisition de tous les signaux (effort tangentiel, effort normal, déplacement, et nombre du cycle) est réalisée à l'aide d'un ordinateur et grâce un logiciel spécifique « PS2 ».

Dans notre cas, on a considéré pour chaque échantillon les paramètres suivants :

- un débattement  $D = \pm 25 \mu\text{m}$  ;
- une force normale  $F_n = 50 \text{ daN}$  ;
- une fréquence  $f = 5 \text{ Hz}$  ;
- un nombre de cycles  $N = 500$  et  $250000$  cycles ;
- une géométrie de contact de type cylindre/plan.

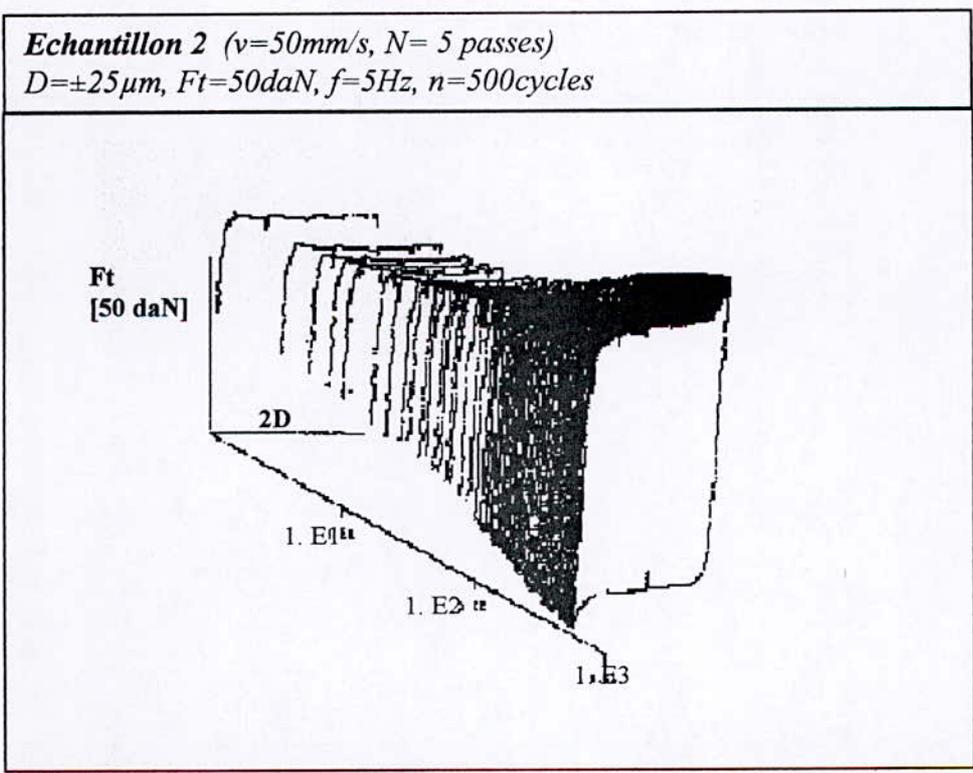
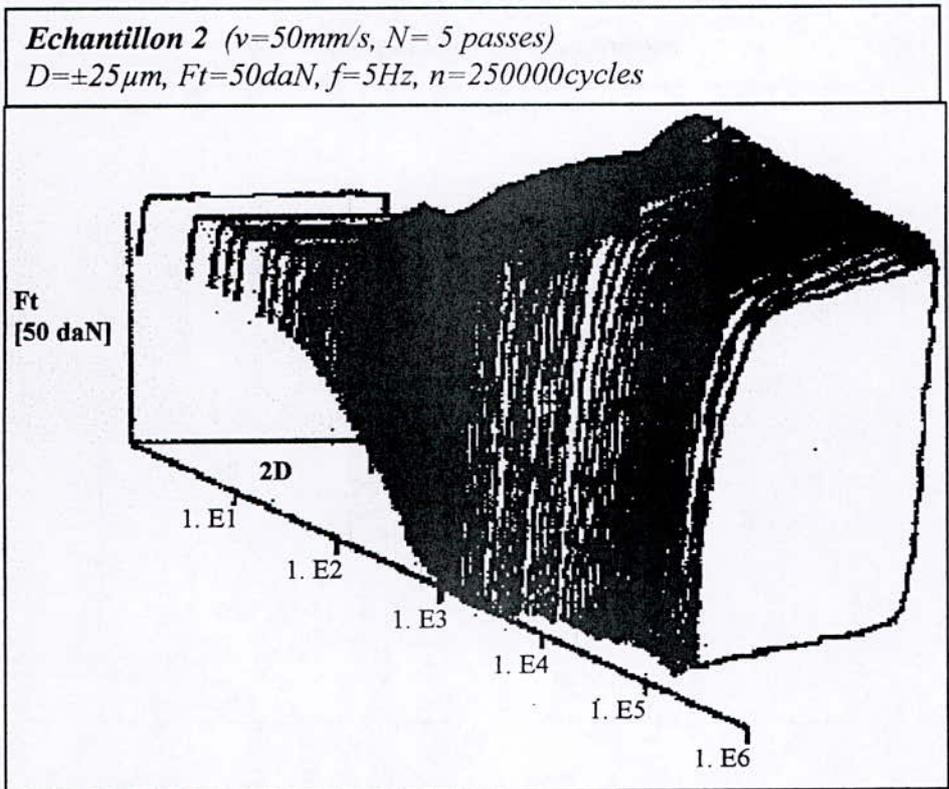
Les surfaces de deux corps sont dégraissées par ultrason dans un bain d'acétone puis à l'éthanol juste avant le début de l'essai pour assurer que le frottement soit sec.

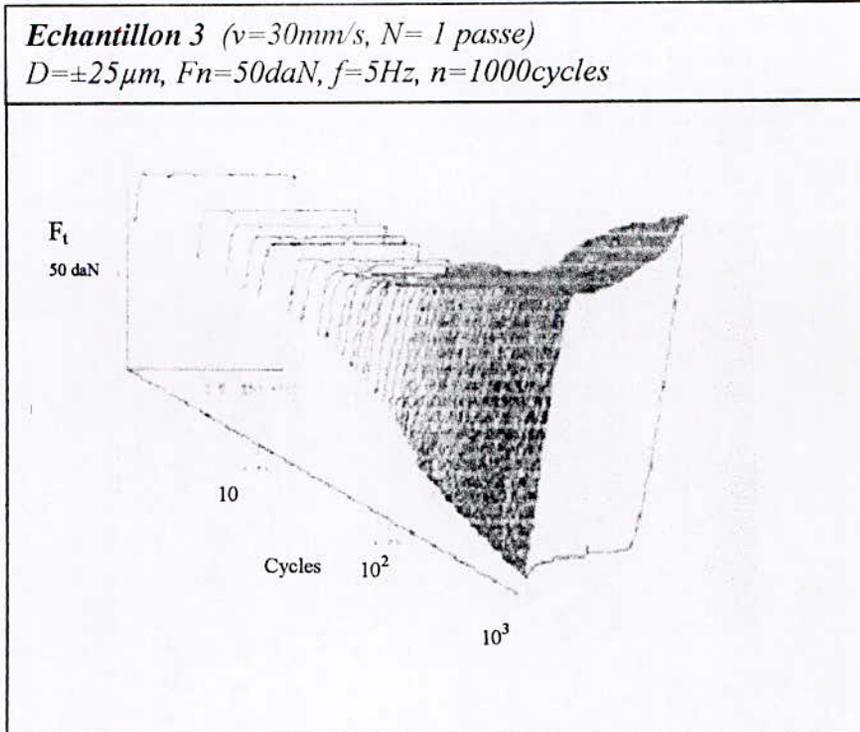
Les caractéristiques du cylindre sont :

- matériau à base du 100C6 ;
- $E_{eq} = 79,32$  ;
- $R_a = 0,04 \mu\text{m}$  ;
- dureté = 850 HV avec 500 g de charge ;
- trempé et revenu ( $180^\circ\text{C}$ ) ;
- le diamètre du cylindre  $D = 20 \text{ mm}$  ;
- la longueur du contact  $l = 5 \text{ mm}$ .

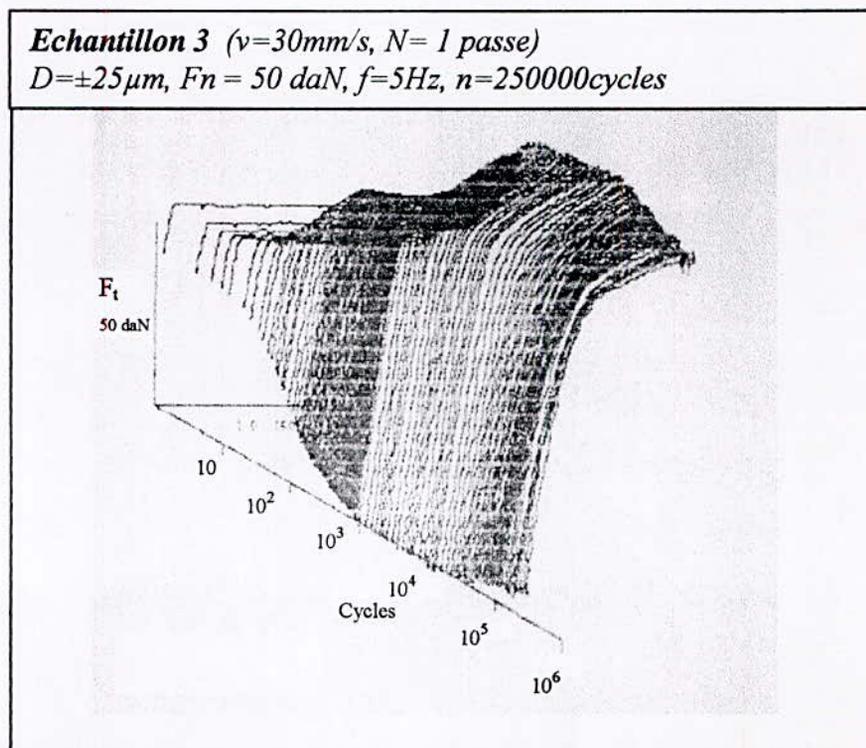
#### ***a. Les bûches obtenues***

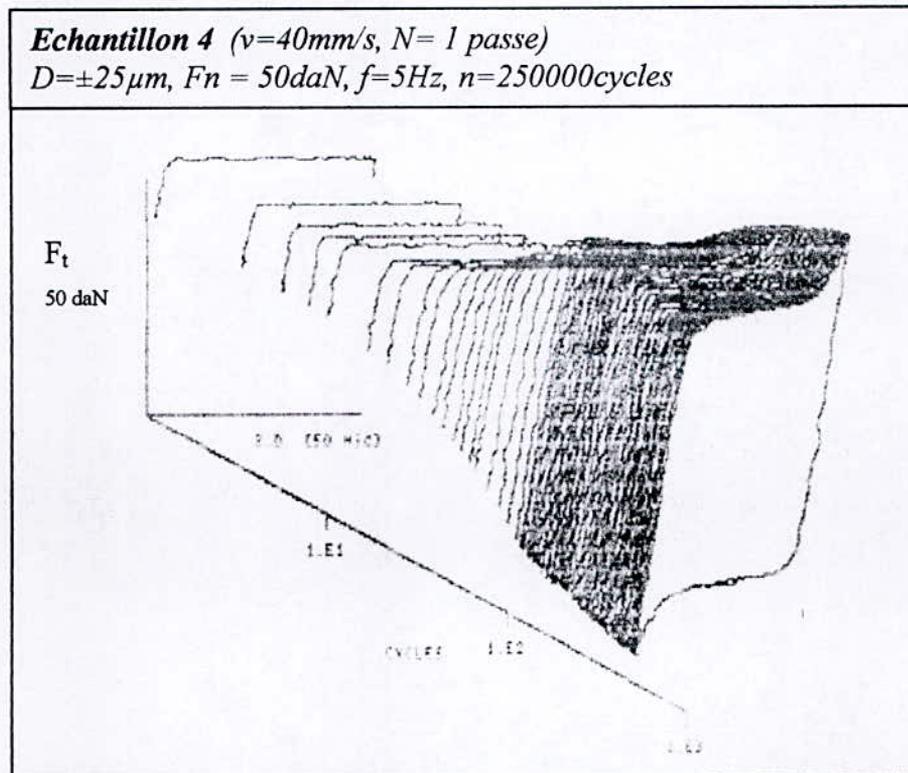
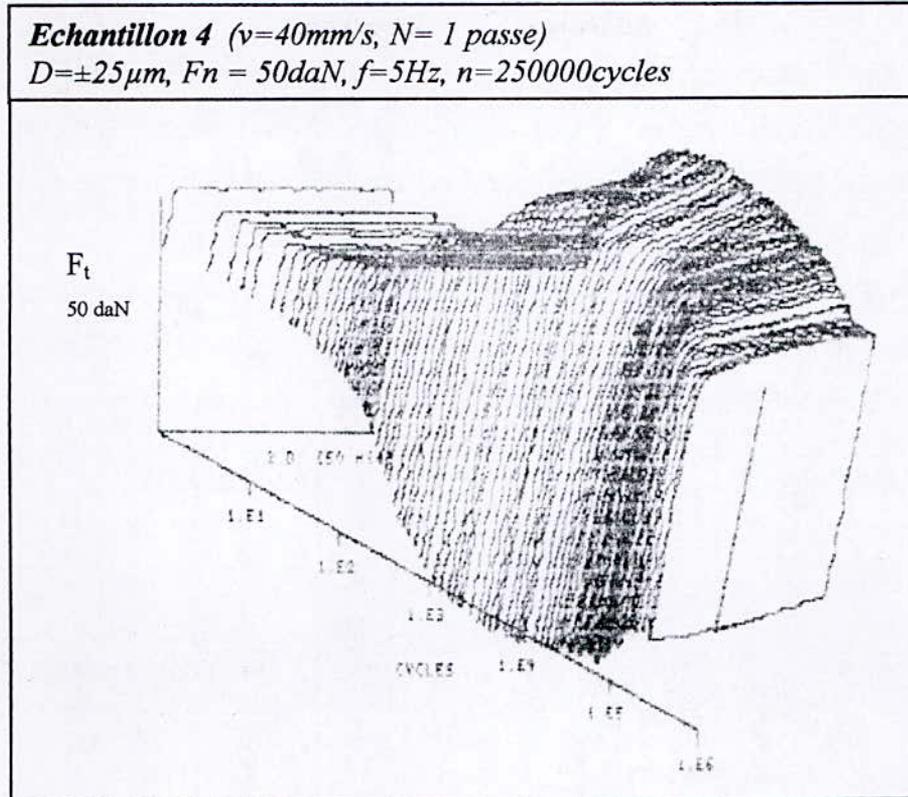
D'après le montage réalisé et les conditions voulues on a pu avoir les courbes de fretting « les bûches » présentées sur les figures suivantes :





10°





*Figure V. 4 : Courbes représentatives de l'essai de fretting.*

### b. Etude de la microdureté

On a fait les mêmes démarches de la micropercussion sauf dans cette expérience on a pris deux zones (zone TTS et la structure de base), et une seule empreinte ; celle de 250000 cycles pour la mesure de la microdureté, car la zone formée est très petite comparant à celle de la première méthode (micropercussion).

La figure 5 représente les graphes de la microdureté de nos échantillons traités (2, 3 et 4) en fonction de l'épaisseur où on l'a mesuré.

On a travaillé avec une charge de 0,1 Kg pour un temps de 5 secondes.

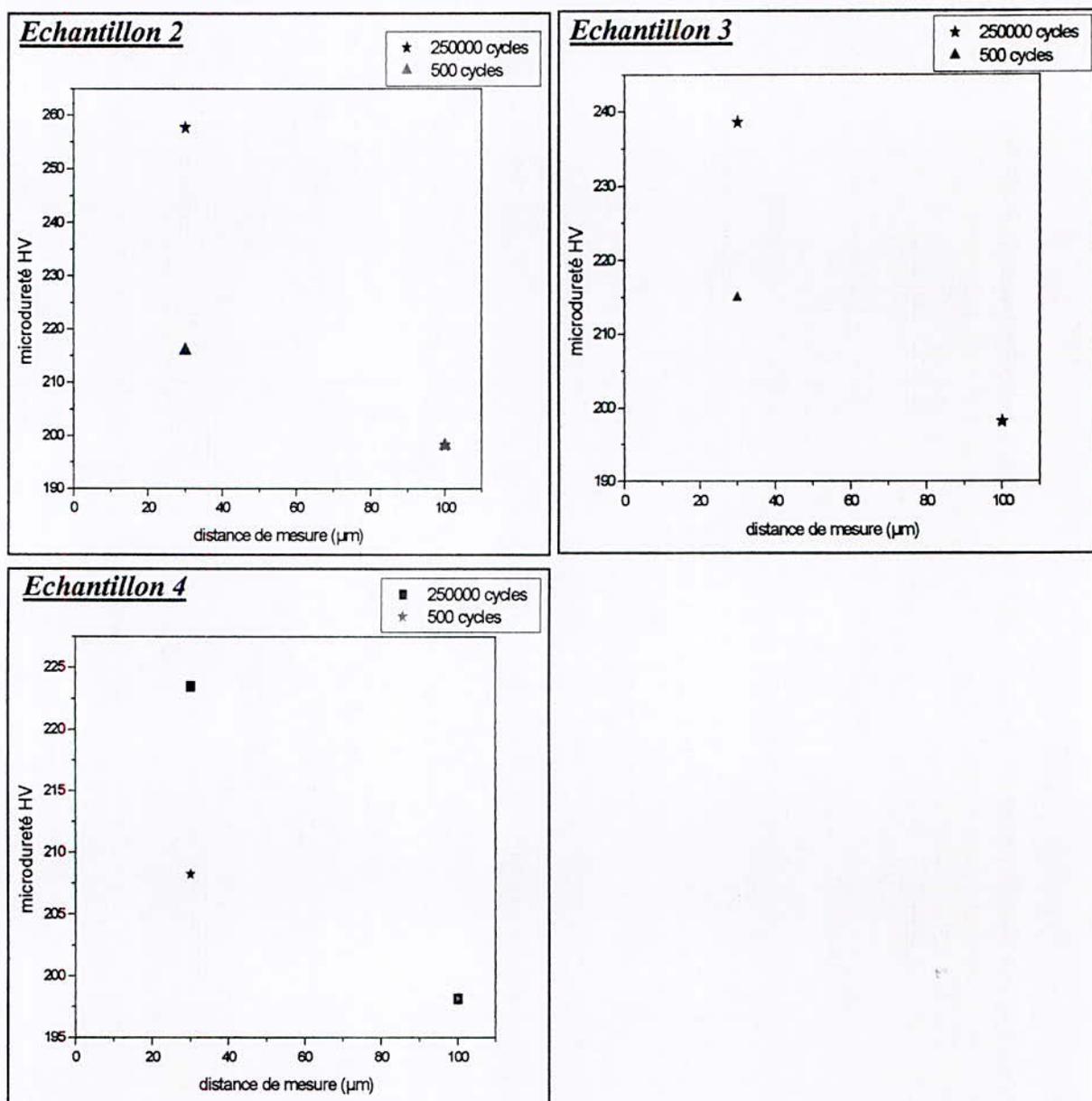


Figure V. 5 : Profils de la microdureté en fonction de la distance de mesure dans les différentes zones.

On note que la dureté de la zone traitée par rapport à la structure de base augmente.

Dans le zone traitée, on remarque qu'en s'éloignant de la surface extérieure la dureté diminue, par exemple pour l'échantillon 2 la dureté subit une chute importante de 260 à 200 HV pour une distance de 30 à 100 $\mu$ m près par rapport à la surface externe de l'échantillon respectivement.

Cette augmentation est due à une déformation plastique ainsi qu'à une TTS qui est beaucoup plus dure, pouvant atteindre une dureté de l'ordre de 270 HV<sub>0,1</sub> dans nos conditions.

L'augmentation du nombre de cycles, entraîne une augmentation de la dureté, ceci est dû à la formation d'une importante zone de la TTS.

Si on compare les courbes de l'échantillon 3 et l'échantillon 4 qui sont traités par mêmes conditions de laser sauf la vitesse du balayage qui est différente, on voit clairement l'influence cette dernière, donc si en diminuant  $v$  notre matériau devient plus dur.

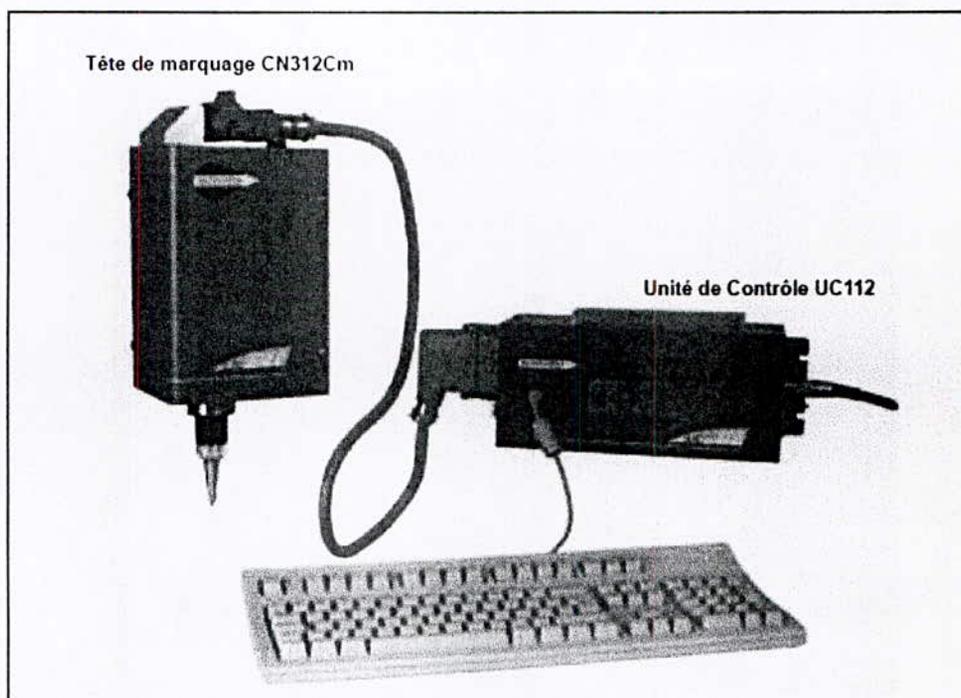
Il y a même le nombre de passes du faisceau laser sur le matériau influe sur la dureté et l'épaisseur de la zone TTS, si on compare l'échantillon 4 et 2 qui ont des vitesses de balayage proches mais le deuxième est à 5 passes par contre l'échantillon 4 a subit une seule passe, on résulte que le nombre de passes augmente la dureté.

## 2.4 La micropercussion et analyse

La CN312Cm est une machine de marquage en creux à commande numérique (figure V.6). Elle est montée sur un bâti à colonne (figure V.7). Cette machine de marquage par micro-percussion son fonctionnement est basé sur le principe d'une table à mouvements x, y (figure V.8), déplaçant un stylet électromagnétique, dont la particularité est de pouvoir marquer en trait continu. L'unité de contrôle de la machine gère le marquage par l'intermédiaire d'un programme interne.

Le réglage de la hauteur de la tête de marquage par rapport à la pièce est fait manuellement par une manivelle.

Le marquage d'une pièce est effectué par le mouvement alternatif de la pointe introduite dans le stylet.



*Figure V.6 : Descriptif de la machine [31].*

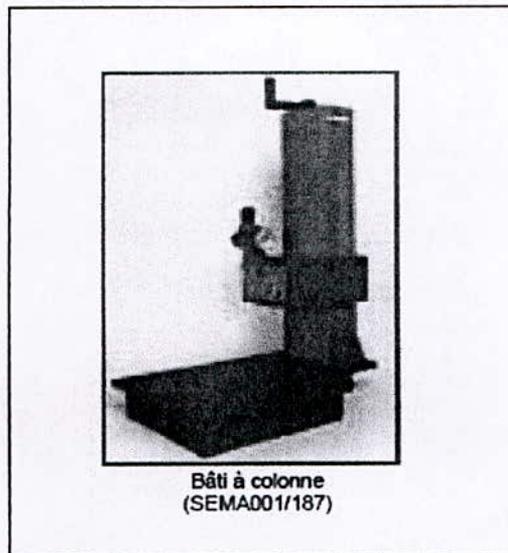


Figure V.7 : Bâti à colonne [31].

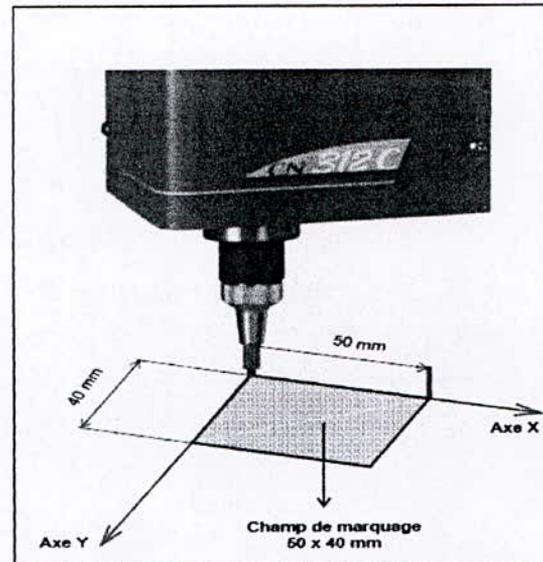


Figure V.8 : Système de coordonnées [31].

#### 2.4.1 Conditions d'essai

Nous avons cité dans le chapitre précédent les différents paramètres qui gèrent la micropercussion : une fois l'échantillon est bien fixé sur le port échantillon, nous devons effectuer le réglage de certains paramètres pour réaliser les impacts dans les conditions voulues.

- Les échantillons utilisés sont :
- Echantillon 1 (Brut).
  - Echantillons 2, 3 et 4 (traités).

Certaines conditions (la fréquence  $f = 20$  Hz, la distance  $h = 1$  mm et le diamètre de la pointe  $D = 1,5$  mm) restent constantes tout en faisant varier les deux autres paramètres ( $F$  et  $n$ ).

On a réalisé trois essais différents pour chaque échantillon afin de suivre l'influence des deux paramètres  $F$  et  $n$  :

- $F = 2$  ms,  $n = 1000$  impacts.
- $F = 2$  ms,  $n = 2000$  impacts.
- $F = 3$  ms,  $n = 1000$  impacts.

$F = 2$ ms correspond à  $F \approx 630$  N.

$F = 3$ ms n'est pas calculée.

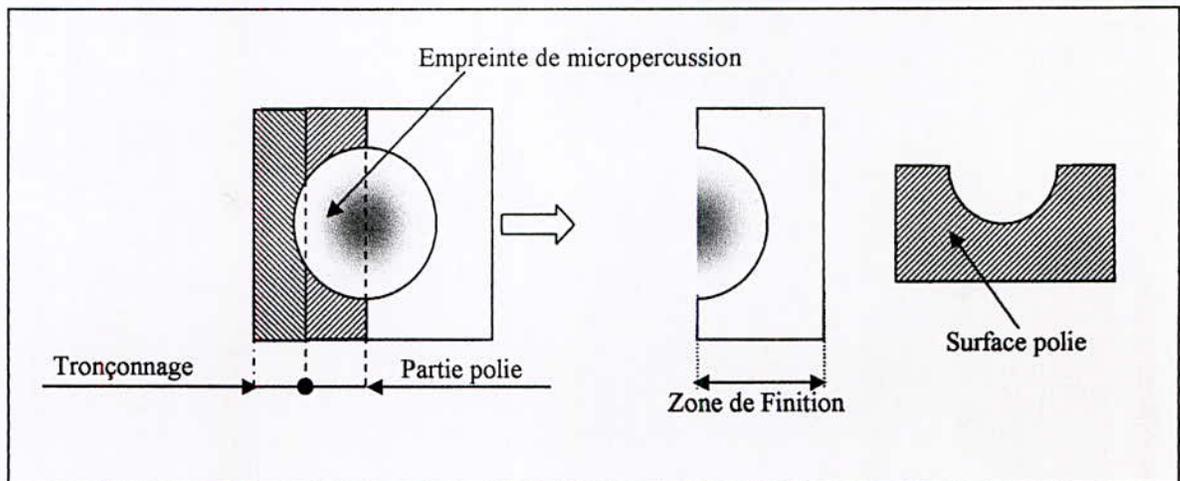
Sachant que  $F = 3$ ms  $>$  2ms.

### 2.4.2 Caractérisations physico-chimiques

Parmi les moyens utilisés pour la caractérisation de l'interface, figurent le microscope optique (MO), le microscope électronique à balayage (MEB), diffraction des rayons X et les mesures de microduretés. Pour faire mieux la caractérisation il faut commencé par une préparation métallographique.

Cette préparation se divise en quatre étapes :

- **le tronçonnage** : cette opération est effectuée perpendiculairement à la surface traitée et un peu loin du plan diamétral comme montre la figure V.9.



**Figure V.9** : Observation des coupes d'empreintes de micropercussion.

- **l'enrobage** : cette opération est indispensable vue que nos échantillons sont de petite taille, cela nous facilitera en particulier le polissage et d'assurer la netteté des bords des empreintes.

Les échantillons sont enrobés à chaud par une résine transparente à l'aide d'une machine mécapresse.

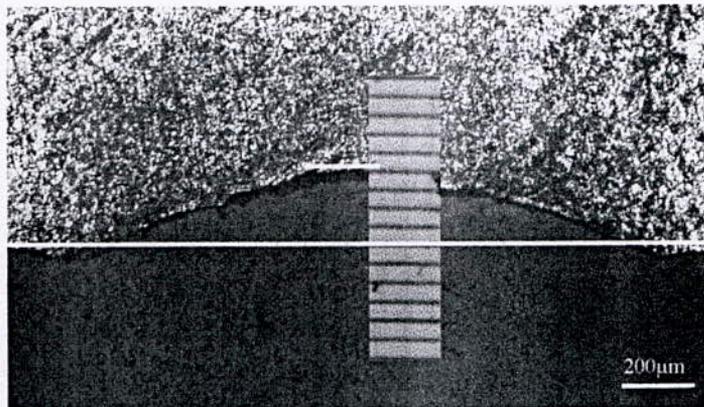
- **le polissage** : c'est l'étape la plus importante et qui comprend les procédures suivantes :
  - utilisation du papier au carbure de silicium (SiC) de granulométrie de plus en plus faible (400-4000) ;
  - un polissage de finition avec la silice nous permettant d'atteindre la surface située dans le plan diamétral avec les qualités optiques nécessaires;
  - rinçage avec de l'alcool  $\text{CH}_3\text{COH}$ .
- **l'attaque chimique** : pour mettre en évidence la microstructure de notre matériau il est nécessaire de procéder à une attaque chimique.

La microstructure des alliages du titane peut être révélée à l'aide des solutions à base de l'acide fluorhydrique de formules suivantes :

- HF (5% acide fluorhydrique) ;
- HF + HNO<sub>3</sub> (KROLL).

#### a. Profondeur de l'empreinte

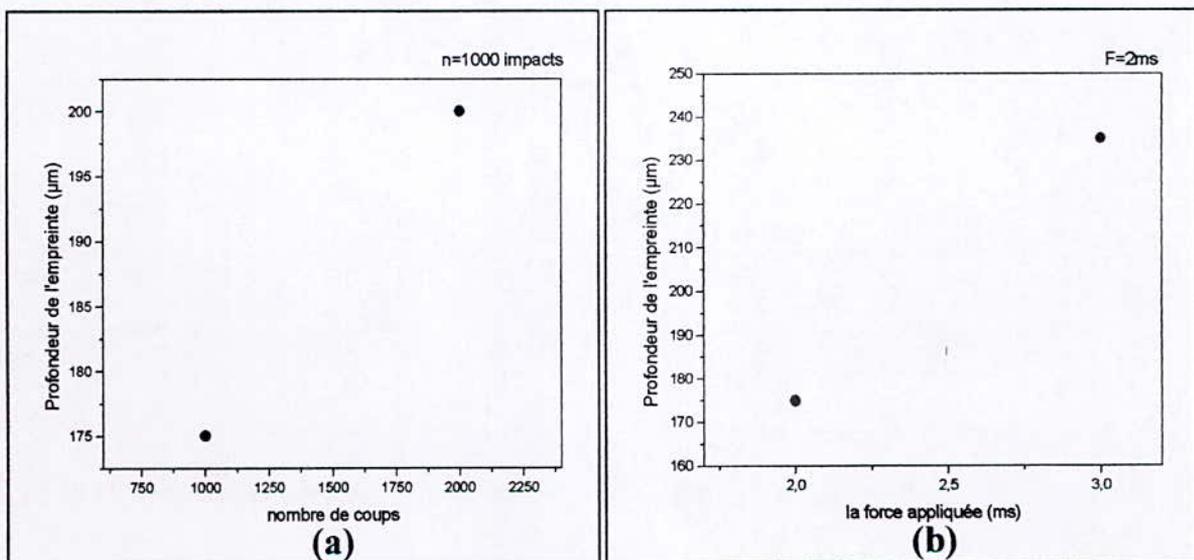
Pour mesurer la profondeur des empreintes par la micropercussion, nous avons utilisé une réglette à la même échelle que la micrographie obtenue (figure V.10).



**Figure V.10** : Détermination de la profondeur de l'empreinte.

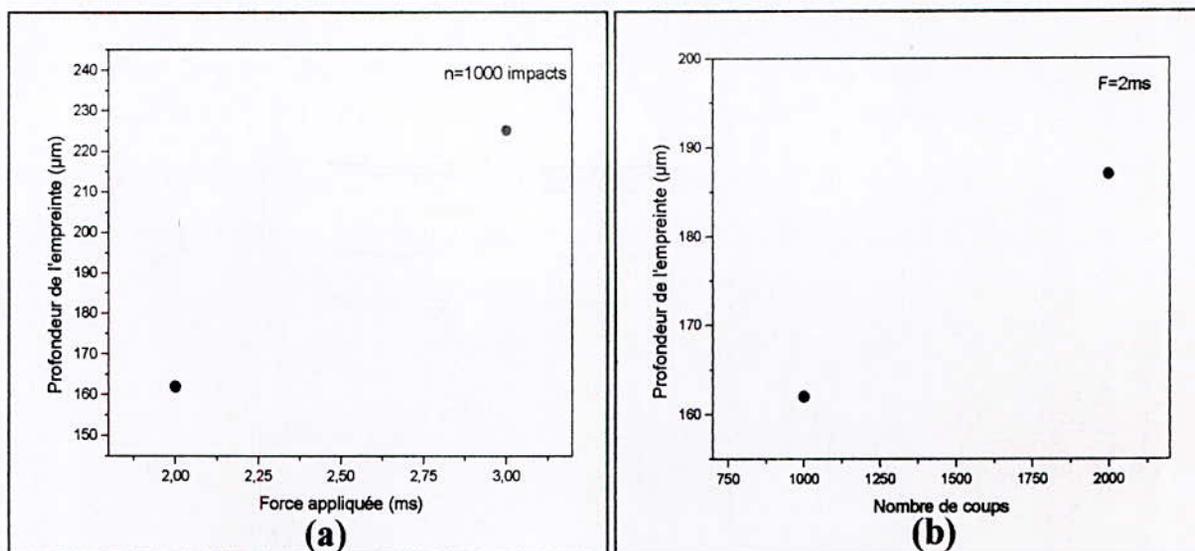
Les figures V.11.1-V.11.4 montrent les valeurs de la profondeur de l'empreinte en fonction du nombre de coups et de la force de frappe.

#### ▪ Echantillon 1 (brut)



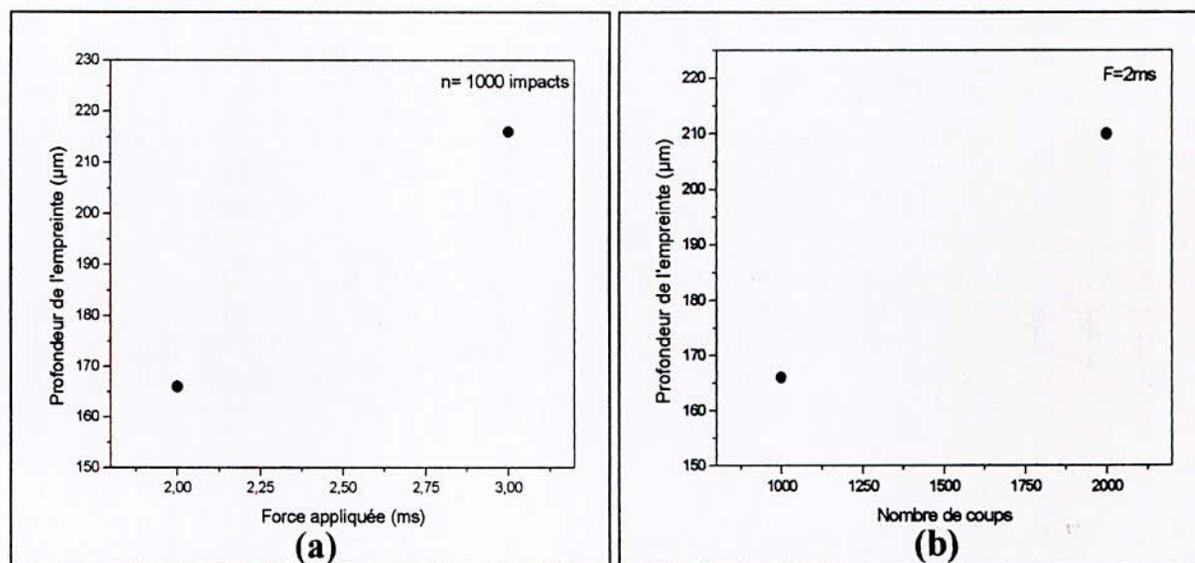
**Figure V.11.1** : Profil de la profondeur en fonction du nombre de coups (a) et de la force appliquée (b).

▪ *Echantillon 2* ( $v = 50 \text{ mm/s}$ ,  $N = 5$ )



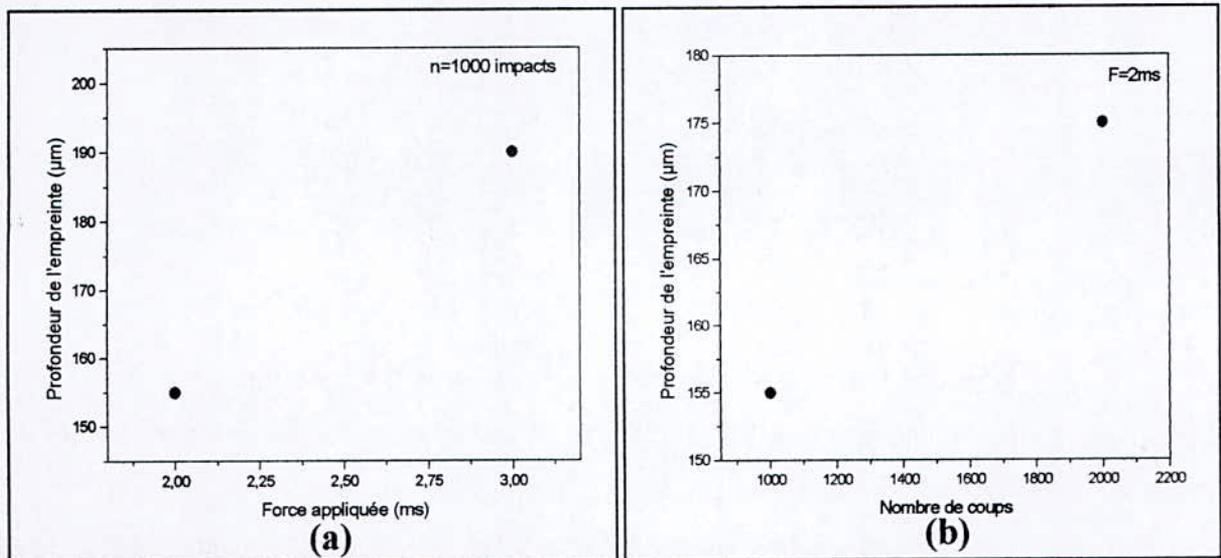
*Figure V.11.2 : Profil de la profondeur en fonction du nombre de coups (a), et de la force appliquée (b).*

▪ *Echantillon 3* ( $v = 30 \text{ mm/s}$ ,  $N = 1$ )



*Figure V.11.3 : Profils de la profondeur en fonction du nombre de coups (a), et de la force appliquée (b).*

▪ **Echantillon 4 ( $v = 40\text{mm/s}$ ,  $N = 1$ )**



**Figure V.11.4** : Profil de la profondeur en fonction de nombre de coups (a), et de la force appliquée (b).

La profondeur varie d'une manière proportionnelle avec la force et le nombre de coups appliqués.

Aussi la vitesse de déplacement du faisceau laser et le nombre de passes ont un effet opposé par rapport aux autres paramètres (la force et le nombre de coups). Ces derniers influent sur le durcissement de la surface traitée. Ainsi, les deux facteurs augmentent la dureté de notre matériau, ce qui implique une empreinte moins profonde.

**b. L'épaisseur de la TTS**

L'observation dans le plan diamétral des zones percutées nécessite une précision de coupe ainsi qu'une très bonne préparation métallographique. Les observations microscopiques montrent que l'épaisseur de l'empreinte varie à chaque point le long de l'arc de l'empreinte produite par la micropercussion, et pour cette raison on a simulé l'épaisseur de l'empreinte en quelques points de l'arc. Ainsi, on a considéré la longueur de l'angle correspondant pour calculer l'épaisseur de la TTS formée (figure V.12).

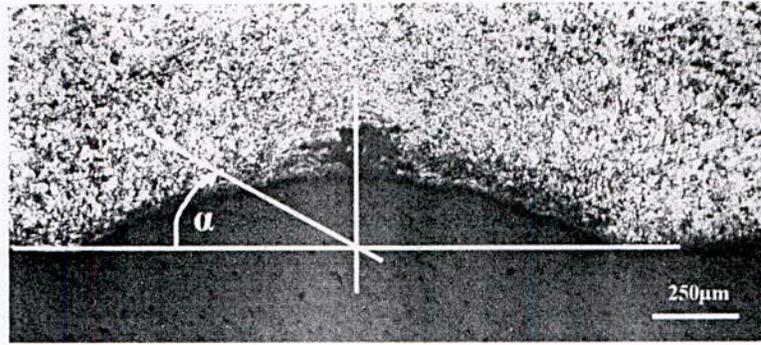


Figure V.12 : Méthode de calcul de l'angle.

Une fois toutes les épaisseurs obtenues, on a tracé l'allure de la TTS qui représente l'aire engendrée entre les courbes de l'épaisseur en fonction des longueurs de l'arc de prélèvement et l'axe des abscisses (figure V.13).

Les courbes de la figure V.13, montrent les influences du nombre d'impacts (a) et celle de la force (b) sur l'épaisseur de la TTS.

▪ *Echantillon 1 (non traité)*

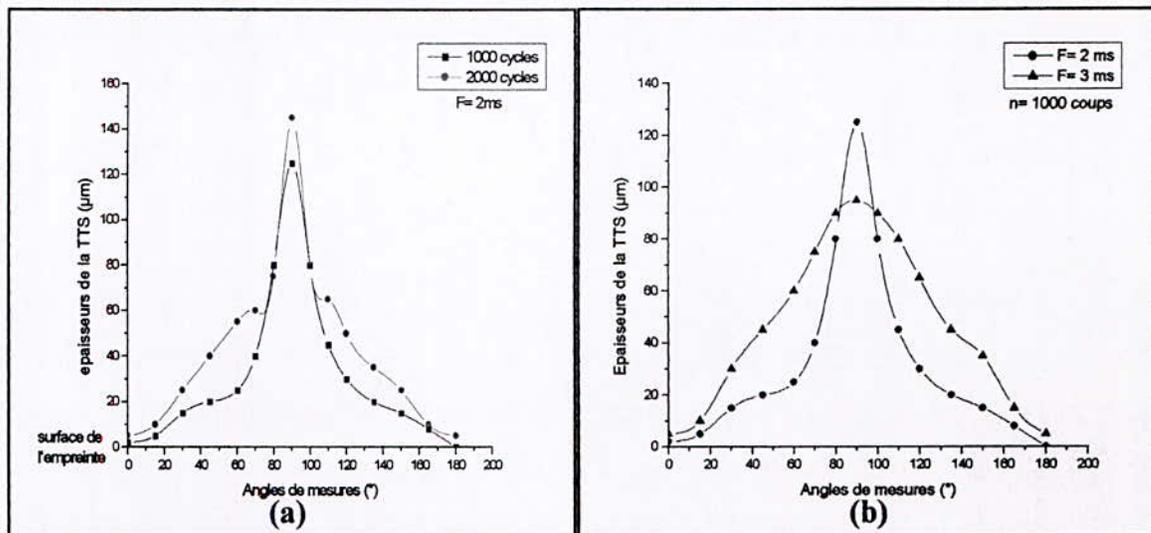


Figure V.13.1 : L'évolution de l'épaisseur de la TTS le long de l'empreinte et l'influence de n (a) et F (b).

▪ *Echantillon 2 ( $v = 50 \text{ mm/s}$  et  $N=5$ )*

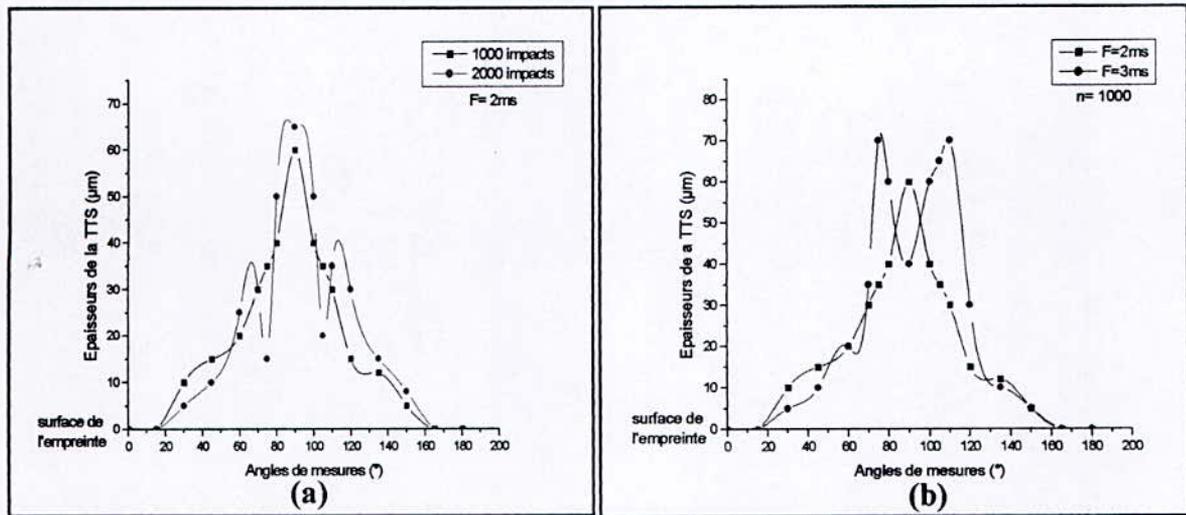


Figure V.13.2 : L'évolution de l'épaisseur de la TTS le long de l'empreinte et l'influence de n (a) et F (b).

▪ *Echantillon 3 ( $v = 30 \text{ mm/s}$  et  $N=1$ )*

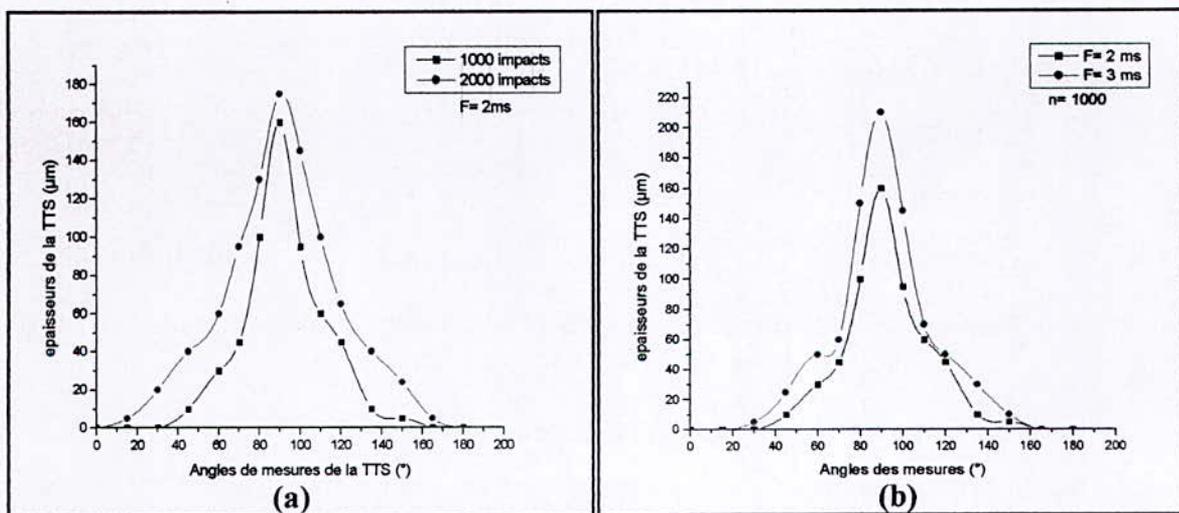
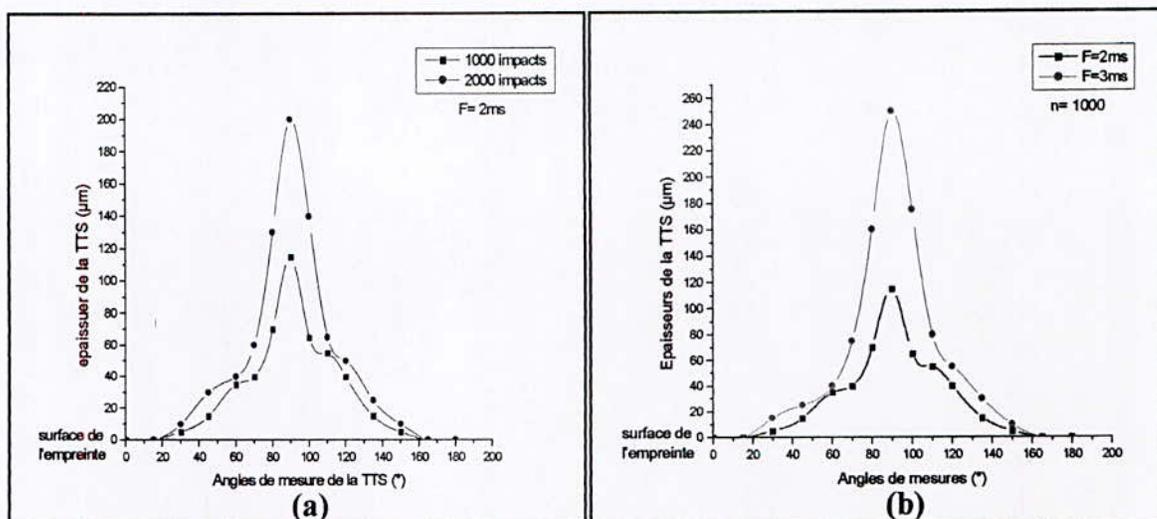


Figure V.13.3 : L'évolution de l'épaisseur de la TTS le long de l'empreinte et l'influence de n (a) et F (b).

▪ *Echantillon 4* ( $v = 40 \text{ mm/s}$  et  $N=1$ )



**Figure V.13.4** : L'évolution de l'épaisseur de la TTS le long de l'empreinte et l'influence de n (a) et F (b).

D'après les courbes de la figure V.13 relatives à l'évolution de l'épaisseur de la TTS le long de la longueur de l'empreinte, on ne peut comparer que les aires de la TTS et d'après les valeurs des aires obtenues (tableau V.2).

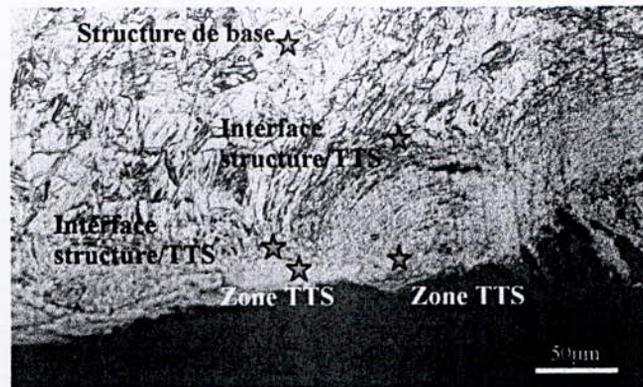
N° de l'échantillon	Empreinte 1	Empreinte 2	Empreinte 3
Echantillon 1	44392,5	68540,5	88715,5
Echantillon 2	23670	31012	38713
Echantillon 3	42966,2	66591,4	82862,2
Echantillon 4	35253,6	61678,8	80391,5

**Tableau 2** : Les surfaces de la TTS obtenues pour chaque empreinte en ( $\mu\text{m}^2$ ).

L'épaisseur et l'aire de la TTS formée augmentent avec l'augmentation de la force ou du nombre de coups. D'autres facteurs influent sur l'épaisseur de la TTS à savoir la vitesse de balayage du laser et le nombre de passes appliqués pour le traitement thermique superficiel. Cette influence apparaît clairement sur la figure V.13.2 : la forme de la TTS le long de l'empreinte change d'apparence. On voit l'apparition de deux autres nouvelles boucles au niveau du fond de l'empreinte (figure V.13.2.a) et une autre forme (figure V.13.2.b) dans le cas où on accroît la force de frappe.

**c. La microdureté du T40**

Pour cette expérience, nous avons utilisé tous les échantillons étudiés. Nous avons analysé la microdureté en profondeur de l’empreinte de différentes zones comme indiquées sur la figure V.14.

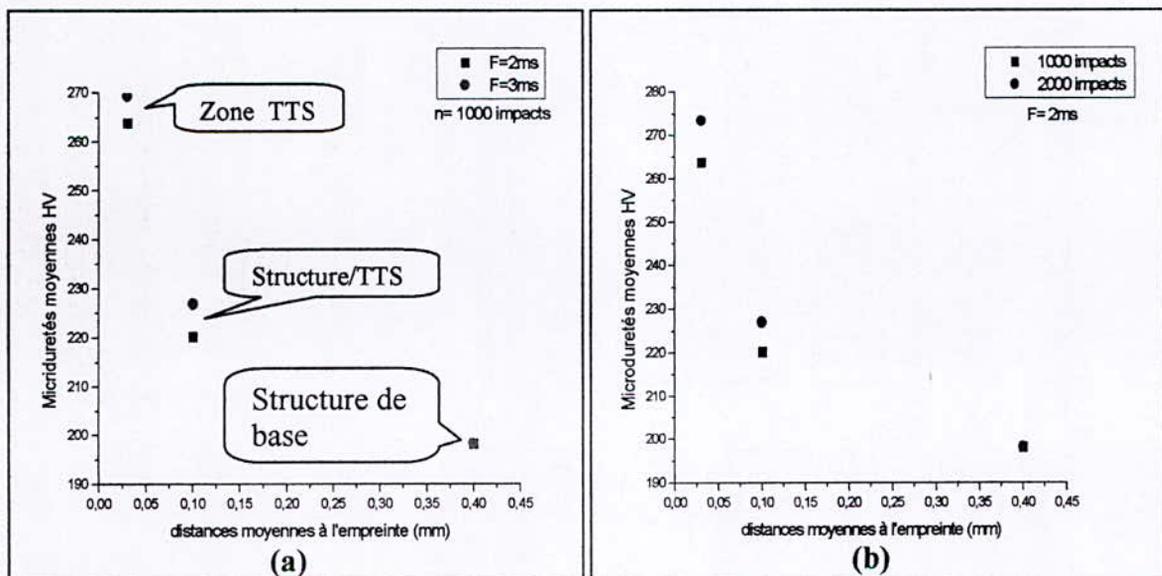


**Figure V.14 : Positions des empreintes de la microdureté**

On a réalisé la microdureté sous une charge de 200g et de part et d’autre de l’interface structure/TTS.

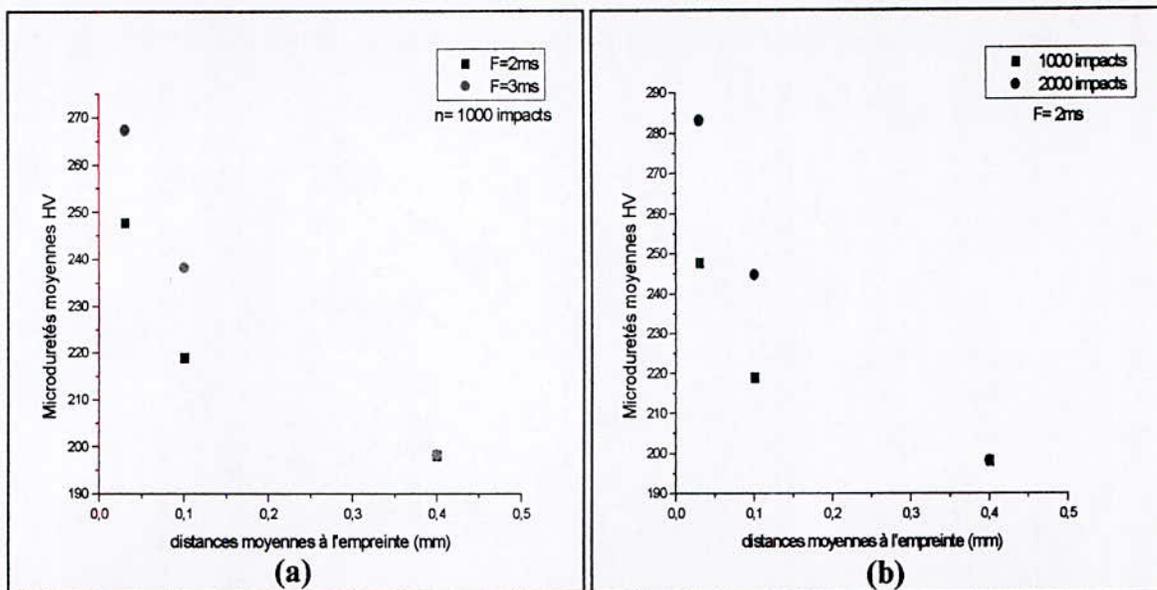
Les figures V.15.1-V.15.4 représentent les résultats de la microdureté en fonction de l’épaisseur des différentes zones obtenues comme indiqués précédemment.

▪ **Echantillon 1 (brut)**



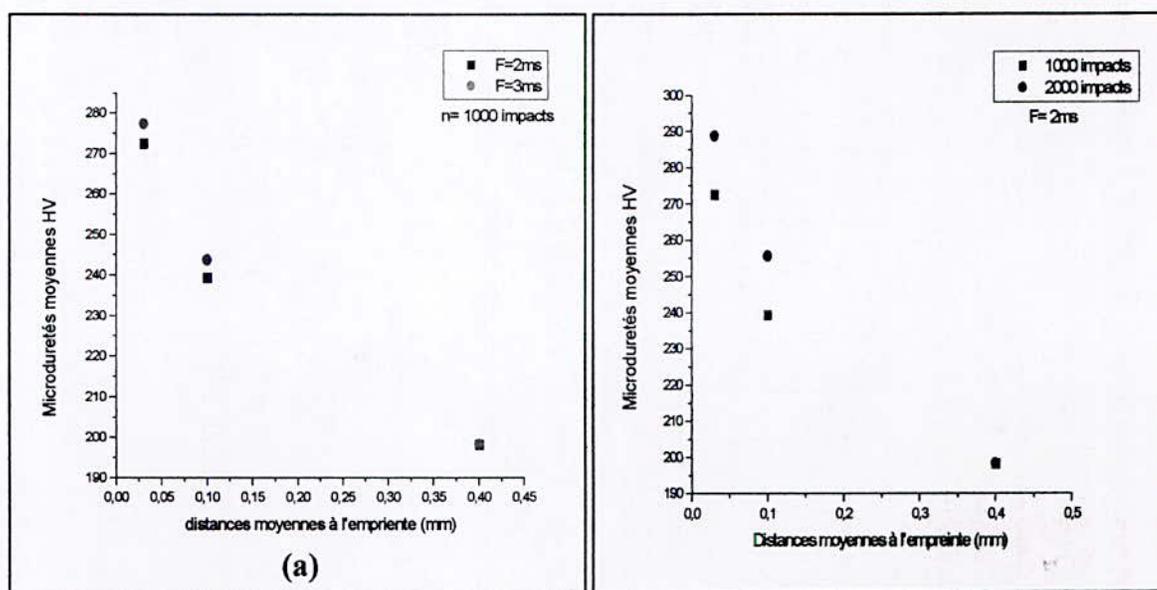
**Figure V.15.1 : Evolution de la microdureté en fonction de l’épaisseur moyenne des zones étudiées. Influence de F (a) et n (b).**

▪ *Echantillon 2* ( $v = 50 \text{ mm/s}$ ,  $N = 5$ )



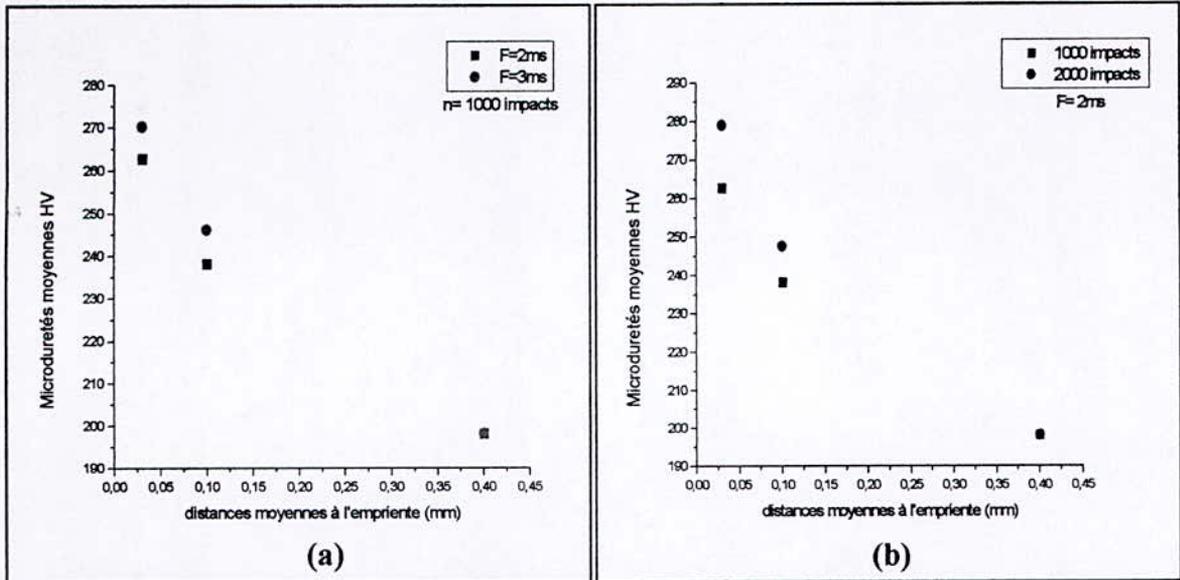
**Figure V.15.2 :** Evolution de la microdureté en fonction de l'épaisseur moyenne des zones étudiées. Influence de F (a) et n (b).

▪ *Echantillon 3* ( $v = 30 \text{ mm/s}$ ,  $N = 1$ )



**Figure V.15.3 :** Evolution de la microdureté en fonction de l'épaisseur moyenne des zones étudiées. Influence de F (a) et n (b).

▪ *Echantillon 4 ( $v = 40 \text{ mm/s}$ ,  $N = 1$ )*



**Figure V.15.4** : Evolution de la microdureté en fonction de l'épaisseur moyenne des zones étudiées. Influence de F (a) et n (b).

On remarque que le durcissement diminue à mesure que l'on s'éloigne de la zone traitée.

Une augmentation du nombre de cycles d'impacts et/ou de la force de frappe, entraîne une augmentation de la dureté, ce qui est dû à l'apparition de la TTS (Structure dure et fragile).

Pour une distance bien déterminée proche à la surface traitée et avec une force ou nombre d'impacts variables on constate une dureté différente à cause de la déformation plastique résultante au cours de l'essai de micropercussion.

**CONCLUSION GENERALE**  
**ET PERSPECTIVES**

## Conclusion et perspectives

Grâce à la diversité des effets induits dans l'ensemble des traitements de surface par laser, il apparaît que cette gamme de procédés est capable d'offrir des solutions variées à l'amélioration des propriétés tribologiques de surface des matériaux (traitements thermiques), et peuvent avoir une répercussion économique importante.

L'aspect localisé du traitement permet de traiter uniquement la zone soumise aux sollicitations (réduction du temps de traitement, de la quantité d'énergie et de matière consommées) ; le dépôt superficiel d'énergie permet d'une part de conserver les propriétés massives du matériau, et d'autre part limite les déformations de la pièce (suppression d'étape de finition, possibilité de traitement sur un produit quasi fini).

Dans notre étude, concernant les traitements thermiques par laser, on a pu constater une amélioration du comportement tribologique face à l'usure induite par de petits débattements ou endommagement par impacts (fretting ou micropercussion), de l'échantillon du titane traité, par rapport à un échantillon sous forme brute.

De ce fait, on a remarqué une diminution notable de la profondeur de l'empreinte dans les deux cas de sollicitation étudiés, une réduction de l'épaisseur de la TTS et une augmentation de la microdureté, et ce, dans tous les cas de figure (variation des paramètres du laser ou des paramètres dépendants du type de sollicitation).

Pour améliorer davantage les performances des éléments traités, plusieurs possibilités pourraient être envisagées dans de travaux futurs.

D'abord, il est essentiel de multiplier le nombre des expérimentations en variant les différents paramètres du laser (vitesse de balayage, le nombre de passes, la forme et la durée des pulsations du faisceau, l'intensité et la puissance du laser...), ce qui constitue en soi un effort considérable, vu le grand nombre de ceux ci.

De même, le nombre de coups et la force de frappe dans le cas de la micropercussion et le nombre de cycles dans le cas de fretting, sont autant de paramètres à varier durant les essais, afin d'affiner les courbes représentatives de la profondeur de l'empreinte et de la microdureté, et d'obtenir les valeurs optimales de ces deux propriétés de la TTS.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. GAZANION. Amélioration de la résistance de l'usure abrasive du titane grâce à la réalisation de traitement de surface par laser.  
Mémoire de maître es science (M.Sc), université Laval, 2000.
- [2] J.P. PRENEL. Physique du laser.  
Réf : AF 3270, techniques de l'ingénieur, 1999.
- [3] R. DANDLIKER. Les lasers, principe de fonctionnement.  
Presse polytechniques et universitaire romandes, 1996.
- [4] J.M.PELLETIER, A.B.VANNES, L.VINCENT. Matériaux et techniques : traitement de surface par laser et propriétés mécaniques, N°7-8, juillet- août 1991, pp.12-35.
- [5] D. PANTELIS. Laser de puissance « Interactions, traitement et utilisation ».  
Réf : A1095, techniques de l'ingénieur, 1992.
- [6] D. PANTELIS. Traitements superficiels par faisceaux à haute densité d'énergie.  
Réf : A1240, techniques de l'ingénieur, 1993.
- [7] J.P. Peyre, C. TOURNIER. Choix des traitements thermiques superficiels.  
Edition CETIM, 1985.
- [8] P. LAURENS, C. DUBOUCHET, D. KECHEMAIR. Application des lasers au traitement de surface. M1643, techniques de l'ingénieur, 1996.
- [9] M.L. HATTALI. Traitements superficiels par laser des alliages de titane T40, TA6V, du Zircaloy-4 et de l'acier 45Si7. Projet de fin d'études, ENP d'Alger, 2004.
- [10] C.LANGLADE-BOMBA, B.VANNES, P.SALLAMAND, D.GREVEY. Lasers de puissance et traitements superficiels. Réf : M1642, technique de l'ingénieur, 2002.
- [11] Y. GACHON. Etude de l'érosion par des particules solides de revêtements multicouches obtenus par procédé PVD sur substrat métallique (base Titane).  
Thèses de doctorat, école centrale de Lyon, 1997.
- [12] P. JACQUOT - BODYCOTE HIT. Traitements et revêtements de surface des alliages d'Al, Mg, et Ti. Conférence ATTT (Association technique de traitement thermique), Toulouse le 23-24 Oct. 2001.
- [13] A.BLOYCE, P.H.MORTON, T.BELL. Surface Engineering of titanium and titanium alloys. Handbook, Volume 5, 1992, pp. 835-885.
- [14] Y.COMBRES. Propriétés du titane et de ses alliages,  
Réf: M557, techniques de l'ingénieur, 1999

- [15] Y-COMBRES, B-CHAMPIN. Traitements thermiques des alliages de titane.  
Réf : M1335, technique de l'ingénieur, 1995.
- [16] A.CHRETIEN, W.FREUNDLICH. Nouveau traités de chimie minérale.  
Tome IX, édition Massonet, 1963, pp.1-22.
- [17] Association du titane "french association of titanium". Propriétés du titane et ses alliages,  
2005. www.titane.asso.fr.
- [18] J.C.GUILLAIS. Traitement de surface, aspects économiques et perspectives.  
Réf : M1422, techniques de l'ingénieur, 1996.
- [19] C. COLOMBIE. Usure induite par petits débattements.  
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1986.
- [20] P. BLANCHARD  
Usure induite en petits débattements : transformation tribologique superficielle d'alliages de titane. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1991.
- [21] E. SAUGER  
Contribution à l'étude de la transformation tribologique superficielle en fretting.  
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1997.
- [22] C. PAULIN, S. FOUVRY, S. DEYBER.  
Wear kinetics of Ti-6Al-4V under constant and variable fretting sliding conditions.  
Wear 259, 2005, pp. 292-299.
- [23] V. FRIDRICI, S. FOUVRY, et P. KAPSA. Etude du comportement en fretting d'un  
alliage de titane TA6V : Application au dimensionnement du contact aubedisque de fan.  
*Rapport d'avancement*, Octobre 2000.
- [24] C. COLOMBIE  
Usure induite sous petits débattements « Identification des phénomènes ».  
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1986.
- [25] Y. BERTHIER, L. VINCENT et M. GODET.  
L'usure et la fissuration induites en petits débattements (UIP et FIP) genèse, formalismes et  
remèdes. Mécanique Matériaux Electricité n°428, Octobre/Décembre 1988.
- [26] E. SAUGER, S. FOUVRY, L. PONSONNET, P. KAPSA, J.M. MARTIN, et  
L. VINCENT. Tribologically transformed structure in fretting.  
Wear 245, 2000, pp. 39-52.
- [27] A. SEKKAL. Etude des transformations tribologiques de surfaces ou "TTS" induites par  
impacts à énergie contrôlée, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2000.
- [28] C. LALANNE. Vibrations et chocs mécaniques, tome 2, Chocs mécaniques.  
Eddition HERMES (1999).

[29] R.F. JOHNSON. Contact mechanics.

Cambridge University Press, Combridge, 1985.

[30] J.P NOBRE, A.M. DIAS, R. GRAS.

Wear, vol 211, 1997, p. 226.

[31] TECHNIFOR. Manuel technique, tête de marquage intégrable à commande numérique stylet électromagnétique, technifor CN31 2Cm.

**Résumé:** Le titane est un matériau de pointe et présente une mauvaise résistance à l'usure. Le laser apparaît novateur et performant pour la réalisation de traitements de surface en vue d'améliorer le comportement tribologique de ce métal. Notre travail consiste à appliquer deux méthodes explicatives de deux phénomènes d'usure ; l'usure induite par petits débattements « fretting » et l'endommagement par impact « micropercussion ». Les analyses et les caractérisations réalisées montrent que le comportement tribologique de notre matériau est changé. Ce changement apparaît clairement dans nos résultats si on compare le matériau brut et les échantillons traités, que soit épaisseur de la TTS, la profondeur des empreintes, les microduretés et les micrographies obtenues.

**Mots clés :** laser, titane, fretting, impact, usure, percussion, transformations tribologiques de surface « TTS ».

**Abstract:** Though titanium is a top material it presents a bad wear resistance. The laser appears to be novator and powerful for the realization of surface treatments in order to improve the tribological behavior of this metal. Our work consists in applying two explanatory methods of two phenomena of wear; the wear induced by small clearances "fretting" and the damage by impact "micropercussion". The analyses and the characterizations carried out show that the tribological behavior of our material is changed; this clearly appears in our results if rough material and the treated samples are compared, that is thickness of the STT, the depth of the prints, the microhardnesses and micrographies obtained.

**Keywords:** laser, titanium, fretting, impact, wear, percussion, surface tribological transformations « STT ».

#### المخلص :

إن التيتان معدن جد مستعمل في التقنيات الحديثة لكنه يبدي مقاومة ضعيفة للتآكل. أشعة الليزر وسيلة حديثة لإجراء معالجات سطحية للمعادن. بهدف تحسين السلوك الاحتكاكي لها. إن عملنا يتمثل في تطبيق طريقتين تفسيريتين لظاهرتين معروفتين: التآكل الناتج عن التذبذبات الصغيرة، وكذلك الناتج عن الضربات المجهرية.

لتحليل المجرات خلال التجارب تظهر أن المعدن المعالج قد تغير. هذا التغير يظهر بطريقة أحسن بعد مقارنة العينات المعالجة مع عينة خلم. وذلك فيما يخص مسك التحويلات الاحتكاكية السطحية، عمق البصمات، الصلابة المجهرية و الصور المجهرية للنقطة.

كلمات مفتاحية: ليزر، تيتان، التذبذبات الصغيرة، الضربات المجهرية، التآكل بالاحتكاك، التحويلات الاحتكاكية السطحية.