

# INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES SURFACES USINÉES SUR LA RÉSISTANCE À LA CORROSION D'UN ACIER INOXYDABLE AUSTÉNITO – FERRITIQUE

Wassila Bouzid Saï\* and Ezzeddine Triki \*\*

\*Laboratoire de Génie de Production Mécanique et Matériaux, ENIS, Sfax, Tunisie

\*\*Laboratoire de Corrosion et de Protection des Métalliques, ENIT, Tunis, Tunisie

Contact : wassilabouzid@yahoo.fr

Received February 2005, Accepted March 2006

No. 05-CSME-09, E.I.C. Accession 2861

---

## RESUME

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des caractéristiques mécaniques des surfaces usinées sur la résistance à la corrosion localisée en eau de mer synthétique. Le matériau étudié est un acier inoxydable duplex austénito ferritique. Les surfaces analysées sont tournées, tournées ensuite rectifiées, tournées et galetées ou tournées, rectifiées et galetées. Ces surfaces sont caractérisées par la rugosité et les contraintes résiduelles. Les courbes potentiodynamiques, permettant de déduire les potentiels de corrosion, de piqûre et de repassivation, ont montré une meilleure résistance à la corrosion des pièces rectifiées et des pièces galetées par rapport à l'état initial tourné. En effet, en tournage, les contraintes résiduelles sont de traction à cause des températures de coupe élevées. La rectification améliore l'état de la surface mais introduit des contraintes résiduelles de traction généralement faibles par rapport à celles introduites par le tournage, il en résulte une diminution du potentiel de corrosion et de piqûre. Quant au galetage, il détruit les contraintes résiduelles de traction pour introduire des contraintes de compression. A ceci, s'ajoute une diminution de la rugosité par rapport aux surfaces tournées ou rectifiées. Ces caractéristiques offrent au galetage, quand il est comparé au tournage et à la rectification, le meilleur comportement à la corrosion.

---

## INFLUENCE OF MACHINED SURFACE CHARACTERISTICS ON A DUPLEX STAINLESS STEEL CORROSION RESISTANCE

### ABSTRACT

The aim of this study is to analyze the influence of machined surface characteristics on localized corrosion in synthetic sea water. The studied material is a duplex stainless steel. Mechanical surfaces are finished by turning, grinding or burnishing after turning or after grinding. Potentiodynamic tests show an increase of pitting potential for grinded and burnished samples. In turning, residual stresses are positive because of the elevation of temperature during machining. Grinding improves surface roughness and introduces tensile residual stresses often less important than in turning. Burnishing gives excellent surface roughness and compressive residual stresses. So, this last mechanical treatment is the best for improving corrosion resistance.

## 1. INTRODUCTION

Les pompes de circulation d'eau de mer des centrales thermiques de production d'électricité sont des structures sollicitées à des conditions relativement sévères liées essentiellement à la présence d'eau de mer. Les défaillances généralement déclarées sont en relation avec des problèmes de corrosion localisée [4-6]. Les aciers inoxydables austénite - ferritiques (duplex) sont les meilleurs candidats vu leur excellente résistance à la corrosion localisée très fortement liée aux teneurs importantes en chrome et au PRE (pitting resistance equivalent) élevé [1,9]. Plusieurs études récentes ont montré que pour les duplex à teneur en C  $\leq 0,02$  %, la sensibilisation à la CIG (corrosion inter granulaire) et l'aptitude à la piqûration persistaient [4, 5]. Le comportement à la corrosion localisée caractérisé par les potentiels de corrosion, de piqûre et de repassivation, dépend des caractéristiques des surfaces, qui sont liées au procédé d'usinage et aux paramètres utilisés [7,11, 2, 10].

Certaines études ont montré qu'un traitement mécanique de la surface, le sablage qui pourtant détériorait la topographie de la surface, améliorerait la résistance à la corrosion localisée d'un acier duplex relativement chargé en carbone (0,05 %) et sensibilisé à la CIG à 800 °C [6] (tableau 1). Ce résultat est très fortement lié aux contraintes résiduelles de compression introduites par ce traitement. Dans cet esprit et pour mieux justifier les effets bénéfiques du traitement mécanique des surfaces dans la résistance à la corrosion localisée dans une solution d'eau de mer synthétique, cette étude porte sur la génération des surfaces par différents procédés : le tournage, la rectification et le galetage.

| Procédé       | $R_a$ | Eau de mer synthétique |           |           | Eau de mer naturelle |           |           |
|---------------|-------|------------------------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
|               |       | $E_{cor}$              | $E_{piq}$ | $E_{rep}$ | $E_{cor}$            | $E_{piq}$ | $E_{rep}$ |
| Polissage     | 0,55  | -780                   | 1000      | 900       | -700                 | 1000      | 870       |
| Rectification | 1,13  | -450                   | 900       | -180      | -610                 | 900       | -70       |
| Sablage       | 3,36  | -660                   | 900       | -130      | -540                 | 880       |           |

Tableau 1: Résistance à la corrosion d'un acier inoxydable austénite ferritique [6].

## 2. PRESENTATION DES ESSAIS

### 2.1. Matériau étudié

Les pièces étudiées sont en acier duplex austénite-ferritique de faible teneur en carbone (0,02 %). Avant usinage, le matériau a subi un recuit de normalisation à 1100 °C pendant une heure suivi d'une sensibilisation à 800 °C pendant une heure. Les observations de ce matériau à l'état recuit ont montré une structure  $\delta/\gamma$  classique d'un duplex austénite ferritique dans une proportion proche du 50/50. Après la sensibilisation, une très grande partie de la ferrite est transformée en un composé biphasé de type eutectoïde (figure 1). La composition chimique de l'acier étudié est présentée dans le tableau 2.

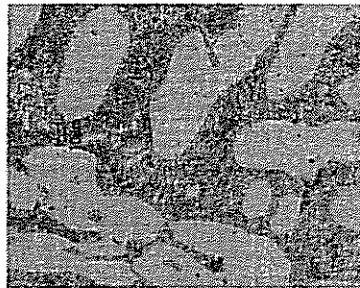


Figure1 : Microstructure de l'acier étudié, micrographie optique.

| Eléments | $C_{max}$ | Si   | Ni   | Cr    | Mo   | Cu   | Mn   | N    |
|----------|-----------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Wt %     | 0,02      | 0,62 | 7,43 | 24,66 | 2,81 | 2,52 | 0,49 | 0,16 |

Tableau 2 : Composition chimique (% massique).

## 2.2. Essais effectués

### 2.2.1. Génération mécanique des surfaces

Chacune des pièces a été initialement chariotée (référence  $T$ ) au diamètre de 60 mm avec un outil en carbure métallique de nuance P35. Elle est ensuite rectifiée (référence  $R_T$ ) ou galetée (référence  $G_T$ ) ou rectifiée et galetée (référence  $G_{RT}$ ) (figure 2).

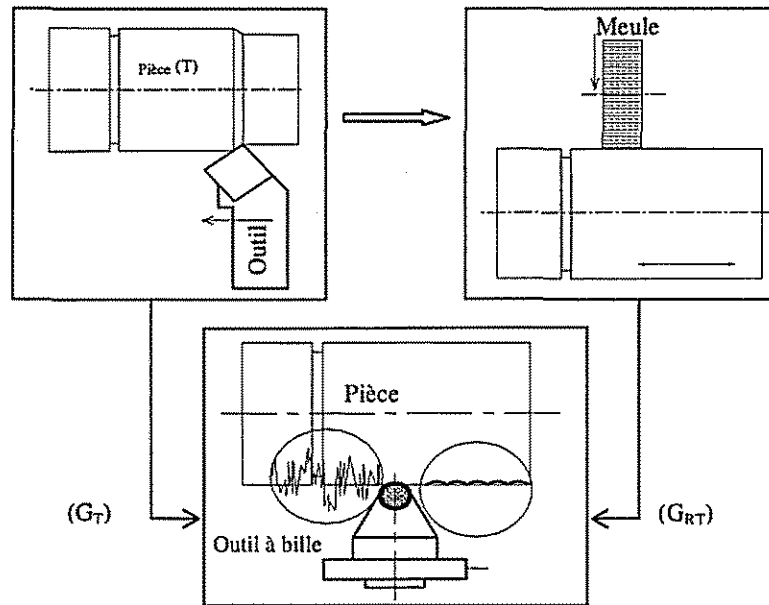


Figure 2 : Différents procédés de génération des surfaces.

Les paramètres de coupe choisis pour le tournage des pièces sont ceux qui conduisent au meilleur état de surface et appartenant à des gammes de vitesses et d'avances recommandées par le fabricant d'outil (Sandvik). Ainsi, la vitesse de coupe  $V_c$  a été fixée à 200 m/min, l'avance  $f$  à 0,065 mm/tr et la profondeur de passe  $p$  à 0,5 mm.

La rectification cylindrique est effectuée sur les pièces tournées de référence  $T$ . La vitesse d'avance longitudinale  $V_f$  de la pièce est égale à 11 cd/min (cd: course double). La vitesse d'avance transversale  $V_{fT}$  de la pièce a été fixée à 4  $\mu\text{m}/\text{cd}$ , la vitesse de coupe  $V_{cr}$  à 35 m/s et la course  $C$  à 55 mm. La profondeur de passe  $p$  est maintenue constante et égale à 0,05 mm.

Quant aux essais de galetage, ils ont été réalisés sur un tour parallèle avec un outil de galetage à une bille de diamètre 9 mm. Le matériau de cette dernière est le Z100CDV5. La vitesse de coupe  $V_c$  est égale à 105 m/min et l'avance  $f$  à 0,065 mm/tr. L'effort  $F$  appliqué par la bille sur la surface à galetter a été fixé égal à 350 N. En effet, des résultats antérieurs [3] ont montré que la rugosité est faible et devient peu sensible à la variation de ces paramètres à partir des valeurs choisies pour cette étude.

### 2.2.2. Détermination des caractéristiques mécaniques des surfaces usinées

Les paramètres de rugosité sont mesurés avec un rugosimètre (DIAVITE DT-100). Les paramètres de mesure sont présentés dans le tableau 3.

|                      | $R_a$              | $R_t$              |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| Precision            | 0,08 $\mu\text{m}$ | 2,06 $\mu\text{m}$ |
| Répétabilité         | 0,02 $\mu\text{m}$ | 0,5 $\mu\text{m}$  |
| Géométrie du diamant | <i>Rayon</i>       | <i>Angle</i>       |
|                      | 5 $\mu\text{m}$    | 90°                |

|                    |         |
|--------------------|---------|
| Longueur de mesure | 12,5 mm |
| Longueur d'onde    | 2,5 mm  |
| Vitesse de mesure  | 1 mm/s  |

Tableau 3 : Paramètres de mesure de la rugosité.

Les contraintes résiduelles sont déterminées par diffraction des rayons X sur un équipement SET-X en utilisant la méthode des  $\sin^2\psi$  [12] (tableau 4).

| Poudre | $\frac{1}{2S_2} (N/mm^2)^{-1}$ | $S_1 (N/mm^2)^{-1}$    | Longueur d'onde | Radiation    | Filtre | Angle de Bragg $2\theta$ (°) |
|--------|--------------------------------|------------------------|-----------------|--------------|--------|------------------------------|
| Fey    | $7,091 \cdot 10^{-6}$          | $-1,649 \cdot 10^{-6}$ | Mn              | $K_{\alpha}$ | Cr     | 150,5 (hkl) (311)            |

Tableau 4 : Paramètres de détermination des contraintes résiduelles.

Elles sont calculées à partir du champ de déformations déterminées en fonction de la distance entre les plans inter - réticulaires :

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{1}{2} S_2 [(\sigma_{11}^{\psi} - \sigma_{33}^{\psi}) \sin^2\psi + \sigma_{13}^{\psi} \sin 2\psi + \sigma_{33}^{\psi}] + S_1 [\sigma_{11}^{\psi} + \sigma_{22}^{\psi} + \sigma_{33}^{\psi}]$$

$S_1$  et  $\frac{1}{2}S_2$  sont les constantes cristallographiques.

### 2.2.3. Essais de corrosion localisée

La détermination des potentiels et des courants caractérisant la résistance à la corrosion par piqûre a été réalisée en faisant appel à des essais potentio-dynamiques cycliques. Le milieu de travail est une solution d'eau de mer synthétique. La salinité de cette solution est de 36,022 g/l et son pH est de 8,2. La composition de cette solution est donnée dans le tableau 5.

| Désignation  | NaCl  | MgCl <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | CaCl <sub>2</sub> | KCl   | HNaCO <sub>3</sub> | KBr   | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> | SrCl <sub>2</sub> |
|--------------|-------|-------------------|---------------------------------|-------------------|-------|--------------------|-------|--------------------------------|-------------------|
| Teneur (g/l) | 24,53 | 5,20              | 4,09                            | 1,16              | 0,695 | 0,201              | 0,101 | 0,027                          | 0,025             |

Tableau 5 : Composition de l'eau de mer synthétique.

Toutes les courbes ont été tracées en utilisant une vitesse de balayage en potentiel égale à 1 mV/s, le domaine d'exploration est limité entre -1000 et +1300 mV/ECS. Cependant, le potentiel de départ est le potentiel de corrosion ( $E_{cor}$ ), pris par l'électrode après 60 minutes d'immersion. La cellule électrochimique est un système à trois électrodes composée de l'électrode de travail (la pièce), l'électrode de référence étant au calomel saturé et la contre électrode en platine.

## 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La justification de la résistance à la corrosion caractérisée par  $E_{cor}$ ,  $E_{rep}$  et  $E_{piq}$ , des pièces ayant subi des traitements mécaniques différents, dépend de l'état de surface de chacune des pièces, défini dans ce travail, à travers la rugosité arithmétique moyenne  $R_a$  et la contrainte résiduelle en extrême surface  $\sigma_{par}$  déterminée dans une direction parallèle à l'axe de la pièce.

### 3.1. Caractéristiques mécaniques des surfaces

La figure 3 montre une diminution de  $R_a$  par rectification et par galetage. En effet, la rugosité obtenue en rectification ( $R_a = 0,593 \mu m$ ) est plus faible que celle des surfaces tournées ( $R_a = 0,687 \mu m$ ). Le galetage par bille introduit grâce à l'effort appliqué, des déformations plastiques qui diminuent la hauteur des stries générées par tournage ou par rectification. Une amélioration de l'état de la surface par galetage est observée sur les profils de rugosité de la figure 3. Les profils engendrés par ce dernier

traitement sont formés d'ondulations dues à l'impact de la bille sur la surface traitée. On retrouve ici l'effet du galetage sur le profil de la surface qui consiste à aplatir les pics et à remplir les creux. La modification de la rugosité des surfaces obtenues par galetage est très importante et ceci pour les deux cas de pièces initialement tournées ou rectifiées. La valeur de la rugosité obtenue pour la surface  $G_{RT}$  ( $R_a = 0,175 \mu\text{m}$ ) est légèrement supérieure à celle de la surface  $G_T$  ( $R_a = 0,160 \mu\text{m}$ ), ceci peut être dû à la modification par rectification de la microstructure du matériau en surface (dureté, écrouissage). Le dégagement de chaleur qui se produit lors de la formation du copeau en tournage ou en rectification induit des contraintes résiduelles de traction en extrême surface de la pièce usinée (figure 4). Ces dernières sont plus faibles en rectification ( $\sigma_{par} = 319 \text{ MPa}$ ) qu'en tournage ( $\sigma_{par} = 907 \text{ MPa}$ ). Quant au galetage, il est à l'origine de la génération de contraintes résiduelles de compression plus élevées dans les échantillons initialement tournés  $G_T$  ( $\sigma_{par} = -420 \text{ MPa}$ ) que dans les échantillons initialement rectifiés  $G_{RT}$  ( $\sigma_{par} = -278 \text{ MPa}$ ). De même, l'épaisseur de la couche affectée par ces contraintes devient faible pour la surface  $G_{RT}$ .

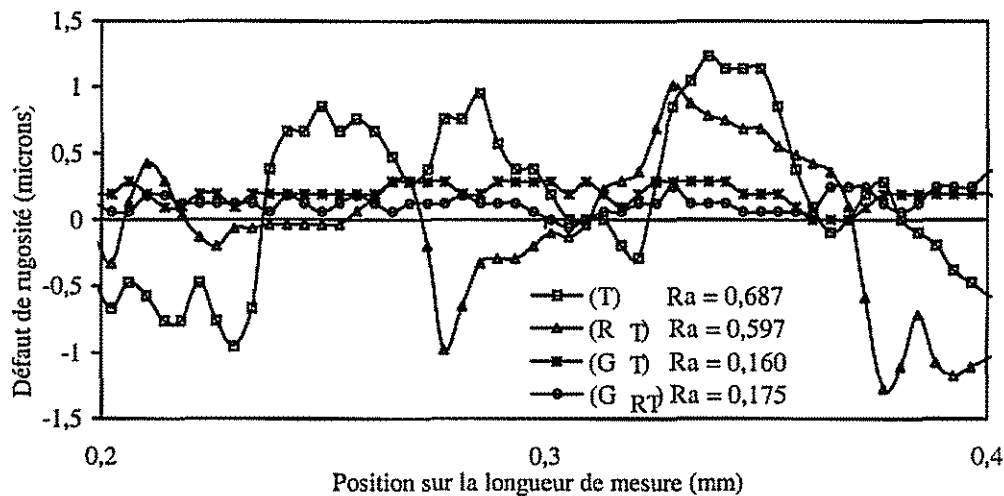


Figure 3 : Profil de rugosité pour les différents procédés mécaniques.

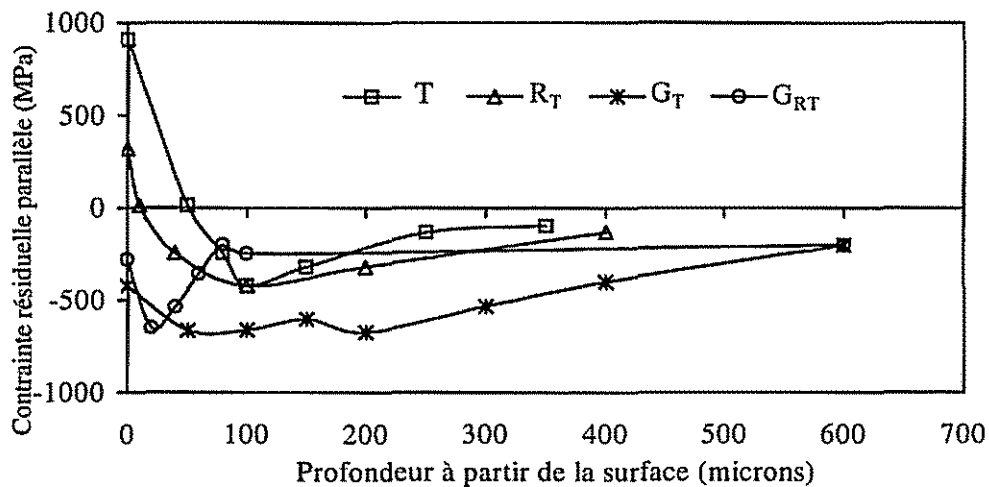


Figure 4 : Évolution de la contrainte résiduelle parallèle en fonction de la profondeur.

### 3.2. Comportement électrochimique et analytique pour les différents états de surface

Les courbes de polarisation  $I=f(E)$  des différents systèmes considérés sont regroupées sur la figure 5. D'abord, toutes les courbes présentent un large palier de passivation, ensuite l'influence du traitement

mécanique se manifeste par des modifications au niveau des caractéristiques de la réponse  $I=f(E)$  (figure 5).

Le potentiel de corrosion s'anoblit depuis  $-165$  à  $+110$  mV/ECS. La densité du courant correspondant au palier de passivation diminue au fur et à mesure que l'état de surface s'améliore.

De même, le potentiel de piqûre augmente avec l'amélioration de la qualité de la surface. La courbe retour relative à la surface  $G_{RT}$  de la figure 5 montre que le potentiel correspondant à cette augmentation rapide du courant traduit l'apparition des piqûres. En effet, celle-ci présente un courant élevé (3 mA) et coupe l'axe des potentiels à des valeurs négatives.

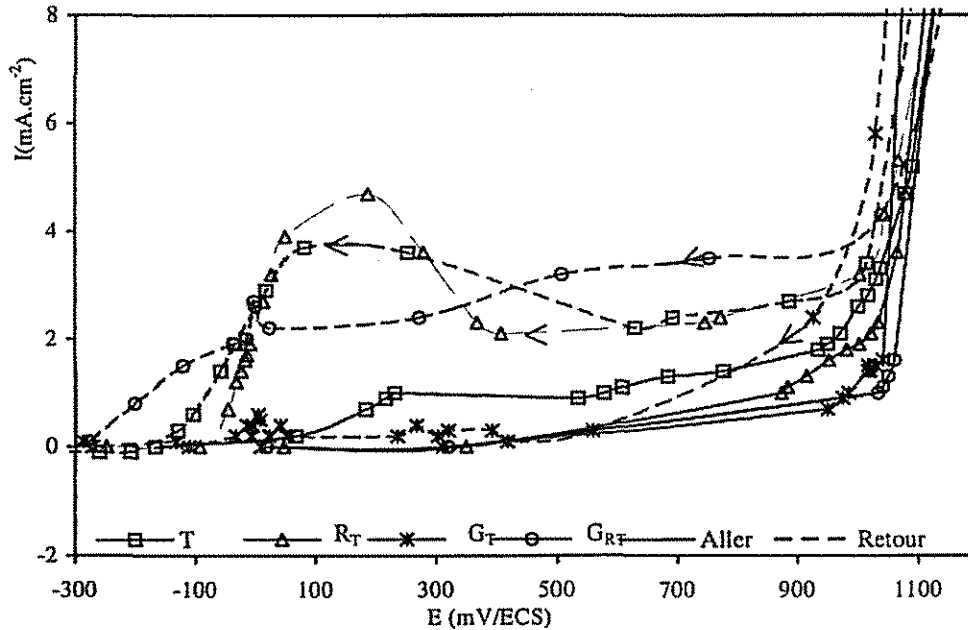
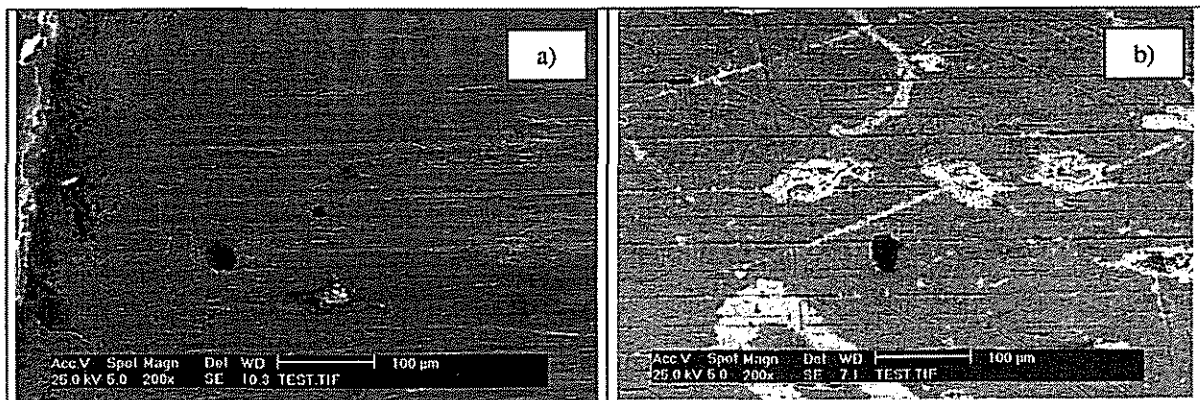


Figure 5 : Courbes de polarisation  $I=f(E)$ .

Conjointement à cette étude électrochimique, des observations de l'état de surface ont été réalisées (figure 6). Les observations des différentes surfaces au microscope électronique à balayage ont montré d'une part les différences de la morphologie de surface générée par chacun des procédés, et d'autre part les piqûres de corrosion sur la surface. La taille et la répartition des piqûres changent en fonction du type de traitement. La surface  $G_{RT}$  contient les piqûres de taille la plus faible (figure 6 - d).



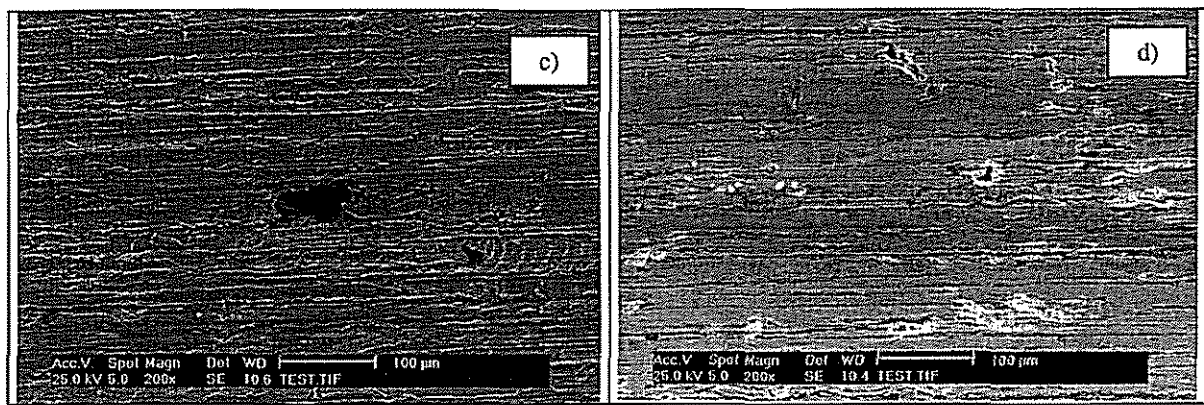


Figure 6 : Micrographies au MEB après essais de corrosion, a)  $T$ , b)  $G_T$ , c)  $R_T$ , d)  $G_{RT}$ .

### 3.3. Discussion

Les valeurs de  $R_a$ ,  $\sigma_{rpar}$ ,  $E_{cor}$ ,  $E_{rep}$  et de  $E_{piq}$  pour les différents traitements mécaniques sont consignées dans le tableau 6. Les essais potentio - dynamiques montrent que les pièces tournées voient leurs potentiels de piqûres augmenter après finition par rectification ou par galetage.

En rectification, l'usinage se fait avec une meule abrasive où chaque grain génère de l'énergie mécanique transformée en déformation plastique et par la suite à un dégagement de la chaleur. Ainsi, les effets du tournage sur les caractéristiques des pièces sont modifiés par ceux de rectification qui introduit des contraintes résiduelles de traction plus faibles que celles introduites par tournage. La rugosité a légèrement diminué. Cependant, l'amélioration de la résistance à la corrosion traduite par une augmentation du potentiel de piqûre est essentiellement due à la diminution de la contrainte résiduelle (6).

| Référence | $R_a$<br>$\mu m$ | $\sigma_{rpar}$<br>MPa | $mV/ECS$  |           |           |
|-----------|------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
|           |                  |                        | $E_{cor}$ | $E_{piq}$ | $E_{rep}$ |
| $T$       | 0,687            | 907                    | -165      | 950       | -200      |
| $R_T$     | 0,593            | 319                    | +2        | 1150      | -75       |
| $G_T$     | 0,160            | -420                   | +50       | 1200      | -100      |
| $G_{RT}$  | 0,175            | -278                   | +110      | 1250      | -300      |

Tableau 6 : Variation des caractéristiques mécaniques et électrochimiques.

La diminution de la rugosité et les contraintes résiduelles de compression introduites par galetage font augmenter le potentiel de piqûre des surfaces initialement tournées ou rectifiées, d'où un meilleur comportement à la corrosion localisée. Malgré que la contrainte résiduelle de compression est plus faible et la rugosité est plus élevée pour la surface  $G_{RT}$ , son potentiel de piqûre est plus élevé que celui de la surface  $G_T$ . Ceci peut être dû à la diminution de l'épaisseur de la couche écrouie de l'échantillon  $G_{RT}$ .

### 4. CONCLUSION

Par rapport au tournage, les procédés de génération de surfaces en finition (rectification, galetage) semblent améliorer la résistance à la corrosion localisée par piqûre.

La rectification, quand elle est comparée au tournage fait diminuer à la fois la rugosité et la contrainte résiduelle de traction, ce qui améliore le comportement vis à vis de la corrosion localisée.

L'utilisation du galetage pour la finition des surfaces tournées, en plus du fait que le procédé est simple et peu coûteux, il permet à la fois d'obtenir de très faibles rugosités et des contraintes résiduelles de compression, ce qui rend la résistance à la corrosion plus importante que celle des surfaces rectifiées. Ces résultats incitent les industriels à adopter ce procédé pour la finition des surfaces.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'équipe du Laboratoire de Microstructure et Mécanique des Matériaux « LM<sup>3</sup> » de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris pour leur assistance dans la détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X.

## REFERENCES

- (1) Angelini E. and Zucchi F., Corrosion behaviour of various duplex stainless steels in welded conditions, Br. Corr. J. 21 (1986) (4) 257.
- (2) Barral M., Bouzid W., Contraintes résiduelles induites par tournage de finition dans de l'acier traité superficiellement, Colloque Portugal-France sur les contraintes résiduelles, Coimbra, Portugal, 1992, 261.
- (3) Ben Abid H., Lissage par bille des surfaces planes et cylindriques, Memoire technique, ENIT, 1993.
- (4) Ben Salah N., Bouzid W., Influence du traitement mécanique de surface sur la résistance à la corrosion localisée en eau de mer d'un acier inoxydable duplex, Lebanese Scientific Research Reports 2 (1997), N° spécial, 226-237.
- (5) Ben Salah N., Bouzid W., Modification by mechanical treatments of a duplex stainless steel and its influence on localized corrosion in sea water, Proceeding of Microstructural science, 25, ASM international, Seattle Washington, 1997 pp. 107-112.
- (6) Ben Salah N., Chaouachi M. A. et Chellouf A., Role of surface finishing on pitting corrosion in sea water of a duplex stainless steel, J. Mater. Eng. Perform., 5 (1996) (2) 220-225.
- (7) Bouzid W., Etude expérimentale et numérique de la coupe orthogonale, Thèse, ENSAM Paris 1993.
- (8) Désestret A. et Charles J., Les aciers inoxydables austénite ferritiques, les aciers inoxydables, G.Béranger, les éditions de physique, 1992.
- (9) Dupoirion F., Audouard J. P., Duplex stainless steels : a high mechanical properties stainless steels family, Journal of Metallurgy 25 (1996) 95-102.
- (10) Hassan A. M., An investigation into surface characteristics of burnished cast Al-Cu alloys, Int. J. Mach. Tools Manufact. 37 (1997) (6) 813-821.
- (11) Maeder G., Castex L., Jajari V. D. et Poupeau P., Précontraintes et traitements supercifiels, Techniques de l'Ingénieur traité de métallurgie, MI 180.
- (12) M'Saouibi R., Outeiro J.C., Changeux B., Lebrun J. L. and Morao Dias A., residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316 L steels, Int. J. of Materials Processing Technology, 96 (1999) 225.

## NOMENCLATURE

| <i>Génération mécanique des surfaces</i> |   |
|--|---|
| $V_c$ (m/min)                            | Vitesse de coupe                                |
| $f$ (mm/tr)                              | Avance  |
| $V_{lt}$ (dc/min)                        | Vitesse d'avance longitudinale en rectification |
| $V_{tr}$ (µm/cd)                         | Vitesse d'avance transversale en rectification  |
| $C$ (mm)                                 | Course de la pièce en rectification             |
| $V_{cr}$ (m/s)                           | Vitesse de coupe en rectification               |
| $p$ (mm)                                 | Profondeur de passe                             |
| $F$ (N)                                  | Effort de galetage                              |
| $R_a$ (microns)                          | Rugosité arithmétique moyenne                   |
| $\sigma_{par}$ (MPa)                     | Contrainte résiduelle parallèle                 |
| <i>Corrosion localisée</i>               |   |
| $E_{cor}$ (mV/ECS)                       | Potentiel de corrosion                          |
| $E_{rep}$ (mV/ECS)                       | Potentiel de repassivation                      |
| $E_{pia}$ (mV/ECS)                       | Potentiel de piqûre                             |
| $I$ (mA cm <sup>-2</sup> )               | Densité de courant                              |