



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE METALLURGIE ET GENIE DE MATERIAUX

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE MÉTALLURGIE
OPTION Ingénierie des Matériaux et des Surfaces

Intitulé

Etude du Comportement Tribologique et Electrochimique d'un Revêtement de Galvanisation à Chaud en Continu

Présenté par :

M. BOURENEB BADREDINE

Directeur du mémoire : Pr LABAÏZ Mohamed

Devant le jury :

Président : Pr LABAÏZ Mohamed

Examineur : Pr TOUHAMI Mohamed Zine

Examineur : Dr ASSALA Omar

Examineur : Dr TLILI Samira

Examineur : Mme OUCHENANE

Année Universitaire : 2017 / 2018

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ma mère source de courage et volante qui m'a
soutenu tous le long de ma vie.*

A mes frères aussi à mes sœurs.

*A mon père La miséricorde de Dieu sur lui, j'ai souhaité tellement que tu sois là
pour ce moment.*

Je souhaite que tu sois satisfait pour moi et pour ce que j'ai fait.

A ma famille la plus chère à ma vie.

A tous mes collègues du département de métallurgie et génie des matériaux.

A mes chères amis : Sabri, Walid, Mohamed, Nada.

Et à tous ceux qui m'ont soutenue pendant ces années.

Remerciements

J'aimerais avant tout remercier « الله »

Je tiens à remercier mes parents qui m'ont soutenu tout le long de ma vie et c'est grâce à eux que je suis arrivé à ce niveau.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Pr LABAÏZ Mohamed pour m'avoir tant apporté durant cette aventure. Je le remercie de m'avoir encadré et soutenu pendant ces mois. Merci de la confiance que tu m'as accordé, de ta grande disponibilité, de ta patience et de tous les conseils que tu as pu me donner.

Je remercie vivement mon encadreur de stage à l'URASM/CRTI Mme le Docteur BOUREBIA qui a continué à m'aider jusqu'à la fin. J'exprime également ma reconnaissance aux Mlle TALEB, ingénieur de recherche URASM/CRTI et toute l'équipe de l'URASM/CRTI, Mme ZEDDOURI ingénieur principal des laboratoires et toute l'équipe de l'école supérieure des mines et métallurgie (ENSMM Annaba).

Je remercie sincèrement toute les enseignants du département de métallurgie et génie des matériaux avec qui j'ai eu un plaisir à suivre ma formation.

Un grand Merci à tous mes amis, DERRADJI Sabri, BOUGHABA Walid, DAHBANE Sarra. Je leur souhaite à tous bon courage pour la suite.

J'adresse mes vifs remerciements à tous mes collègues du département de métallurgie. Nombreuses sont les personnes qui m'ont aidé à l'élaboration de ce travail. C'est aussi à elles que s'adressent mes remerciements et ma sympathie.

Et enfin un grand merci tout spécial à ma mère qui partage ma vie et qui endure au quotidien les difficultés et les incertitudes de la vie d'un étudiant chercheur notamment sa faible disponibilité et son humeur inégale.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I Recherche Bibliographique	
I.1 Introduction	4
I.2 Corrosion	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Différents modes de corrosion.....	4
I.2.2.1 Corrosion sèche	5
I.2.2.2 Corrosion humide	5
I.2.3 Morphologie de la corrosion.....	6
I.2.3.1 Corrosion uniforme (généralisée)	6
I.2.3.2 Corrosion localisée.....	6
I.3 Protection contre la corrosion	11
I.3.1 Méthodes de protection contre la corrosion.....	11
I.3.2 Protection électrochimique par galvanisation.....	12
I.3.3 Microstructure d'une couche de galvanisation.....	14
I.3.4 Galvanisation et aluminage en continue.....	14
I.3.4.1 Présentation du procédé.....	15
I.3.4.2 Bain de galvanisation.....	17
I.3.4.3 Description des principaux équipements de la ligne de galvanisation	19
I.3.4.4 les différentes étapes du traitement avant galvanisation	21
I.4 Tribologie	23
I.4.1 Les frottements.....	23
I.4.2 L'usure.....	26
I.4.2.1 Usure par abrasion.....	26
I.4.2.2 Usure par adhésion.....	27
I.4.2.3 Usure par corrosion.....	27
I.4.2.4 Usure par fatigue.....	28

I.4.3 Lubrification.....	28
I.4.4 Rugosité.....	30
I.4.4.1 Définition.....	30
I.4.4 .2 Principaux paramètres de la rugosité.....	31
I.4.4.3 Mesure de la rugosité.....	31
I.4.4.4 Le choix des critères	32
I.4.4.5 Principales exigences	32
I.5 Conclusion.....	33

Chapitre II Matériaux et techniques expérimentales

II .1 Introduction	35
II.2 Matériels et méthodes.....	35
II.2.1 Caractérisation du matériau.....	35
II.2.1.1 Préparation des échantillons	35
II.2.1.2 Analyse chimique	36
II.2.1.3 Observation microstructurale	36
II.2.1.4 Mesure de rugosité	36
II.3 Réalisation des essais	37
II.3.1 Test Tribologique	37
II.3.1.1 Présentation du dispositif	37
II.3.1.2 Réalisation des essais tribologiques	38
II.3.2 Essai de corrosion électrochimique	39
II.4 Conclusion	41

Chapitre III : Résultats et discussions

Table des matières

III.1.Analyse du substrat et du revêtement galvanisé	43
III.1.1. Analyse métallographique du substrat.....	43
III.1.2.Analyse métallographique du revêtement galvanisé.....	44
III.1.3.Mesure de la taille des grains	45

III.2. Mesure de la Rugosité	46
III.3. Propriétés tribologiques du revêtement galvanisé	47
III.3.1 : Variation du coefficient de frottement.....	48
III.3.2 : Variation de largeur de l’empreinte d’usure.....	51
III.4. Observation de l’état de surface des empreintes d’usure	52
III.5. Etude électrochimique du revêtement galvanisé	59
III.5.1 Courbes de polarisation des deux aciers galvanisés dans NaCl à 10 g/l.....	59
III.5.2 Spectroscopie d’impédances électrochimiques EIS 10 g/l NaCl.....	61
III.5.3 Courbes de polarisation des deux aciers galvanisés dans NaCl à 30 g/l.....	63
III.5.4 spectroscopie d’impédances électrochimiques EIS dans 30 g/l NaC.....	64
III.6.Conclusion	67
CONCLUSION GÉNÉRALE	68
Références Bibliographies	70

I. Introduction

Dans les systèmes mécaniques, les surfaces des pièces de machines ou structure sont les plus exposées aux attaques extérieures qui sont de natures diverses (frottement, usure, corrosion, fatigue,...), l'environnement et l'atmosphère (corrosion sèche ou humide) occasionnent la détérioration des pièces en service.

La qualité de la couche superficielle représente un facteur essentiel pour l'intégrité de la structure mécanique. En effet, la dégradation de la surface de la pièce entraîne l'effondrement de la pièce, ce qui occasionne des avaries voire l'arrêt des ensembles mécaniques (machines, équipements de transport, mécanismes de sécurité,...).

Les procédés de galvanisation des tôles qui contribue par revêtement de la couche superficielle à la protection de la surface fonctionnelle trouvent leur place comme procédés de finition tel que le grenailage, le galetage, le brunissage etc. Ils assurent aux pièces usinées de bonnes propriétés physique et géométrique avec un indice économique relativement amélioré, moins coûteux et consistent à améliorer les propriétés locales (en surface) du matériau.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres qui sont organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, est présentée une étude bibliographique mettant en relief une description du phénomène de corrosion, des différents modes de corrosion ainsi que les moyens de protection contre la corrosion. Par la suite, un aperçu sur la tribologie a été exposé avec sec différentes branches en l'occurrence les frottements, l'usure, et la lubrification ainsi que l'importance de la rugosité de surface dans le futur revêtement.

Le deuxième chapitre comprend une description du matériel utilisé dans le travail expérimental, essentiellement les équipements de caractérisation ainsi que l'appareillage de mesure. Les différents dispositifs utilisés dans les essais tribologiques et de corrosion ont été présentés. Par ailleurs, le matériau utilisé a été caractérisé et les échantillons destinés pour l'expérimentation ont été préparés.

Le troisième chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais réalisés en tribologie et corrosion. En outre, les résultats micrographiques obtenus pour ce matériau avant et après les essais envisagés ont été interprétés.

Le mémoire s'achève par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Recherche Bibliographique

Tables des matières

I.1 Introduction	4
I.2 Corrosion	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Différents modes de corrosion.....	4
I.2.2.1 Corrosion sèche	5
I.2.2.2 Corrosion humide	5
I.2.3 Morphologie de la corrosion.....	6
I.2.3.1 Corrosion uniforme (généralisée)	6
I.2.3.2 Corrosion localisée.....	6
I.3 Protection contre la corrosion	11
I.3.1 Méthodes de protection contre la corrosion.....	11
I.3.2 Protection électrochimique par galvanisation.....	12
I.3.3 Microstructure d'une couche de galvanisation.....	14
I.3.4 Galvanisation et aluminage en continue.....	14
I.3.4.1 Présentation du procédé.....	15
I.3.4.2 Bain de galvanisation.....	17
I.3.4.3 Description des principaux équipements de la ligne de galvanisation	19
I.3.4.4 les différentes étapes du traitement avant galvanisation	21
I.4 Tribologie	23
I.4.1 Les frottements.....	23
I.4.2 L'usure.....	26
I.4.2.1 Usure par abrasion.....	26
I.4.2.2 Usure par adhésion.....	27
I.4.2.3 Usure par corrosion.....	27
I.4.2.4 Usure par fatigue.....	28
I.4.3 Lubrification.....	28
I.4.4 Rugosité.....	30
I.4.4.1 Définition.....	30

I.4.4 .2 Principaux paramètres de la rugosité.....	31
I.4.4.3 Mesure de la rugosité.....	31
I.4.4.4 Le choix des critères	32
I.4.4.5 Principales exigences	32
I.5 Conclusion.....	33

I.1 Introduction

La corrosion est un domaine qui fait intervenir plusieurs principes rattachés à la chimie, l'électrochimie, la métallurgie, la physique et la thermodynamique [1]. Elle est un processus naturel et inévitable qui est impossible d'éliminer, mais qu'on peut contrôler. Par ailleurs, l'étude de la FHWA estime que la mise en œuvre de pratiques de gestion optimales de la corrosion pourrait permettre d'économiser de 25 à 30 % du coût annuel de la corrosion aux États-Unis.

Le phénomène de corrosion a de lourdes conséquences lorsqu'il n'est pas maîtrisé, il concerne tout les secteurs d'activités (centrales nucléaires, industrie pétrochimique...). En effet il peut avoir des impacts sur la sécurité tels que l'instabilité des structures, rupture d'assemblages, conduite de gaz percée, sur l'économie tel une percée à la (conduite de pétrole, ainsi que sur l'environnement (dispersion des résidus dans les eaux de ruissellement). Il est primordial de comprendre le mécanisme de corrosion afin de prescrire et appliquer des méthodes adéquates pour éviter son développement.

I.2 Corrosion

I.2.1 Définition

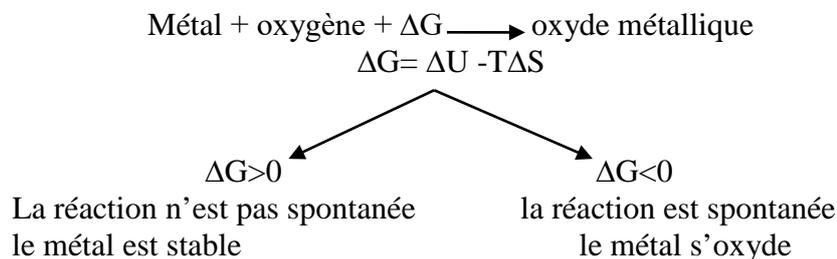
La corrosion décrit le phénomène de détérioration des matériaux par le milieu environnant [1]. Selon la norme ISO 8044 la corrosion se définit comme une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, et de son environnement. Elle correspond aux divers phénomènes d'attaque des matériaux métalliques, métaux et alliages par des agents chimiques, le plus souvent de nature atmosphérique, tel que la pluie acide ou l'humidité provoquant ainsi leurs destructions progressives permettant ainsi un retour à la situation stable de sulfure d'oxyde [2] qui était la sienne avant les opérations d'élaboration et d'extraction [2, 3].

I.2.2 Différents modes de corrosion

En générale, les surfaces réagissent avec les ambiances agressives, les lubrifiants altérés. L'attaque chimique ou électrochimique est en général d'abord rapide, puis ralentie par la formation de films plus au moins protecteurs qui peuvent passiver les matériaux et stopper au moins provisoirement le processus. D'où on peut définir deux types de corrosion selon le milieu, corrosion sèche si le milieu est un gaz et corrosion humide ou électrochimique si le milieu est liquide.

I.2.2.1 Corrosion sèche

La corrosion sèche est l'attaque d'un métal par un gaz, conduisant à la formation d'un troisième composé. La plus rencontrée est celle qui est provoquée par l'attaque des métaux ou des alliages au moyen de l'oxygène qui constitue un processus d'oxydation très complexe. Ce pendant, le métal est placé dans une atmosphère gazeuse, sa surface adsorbe les particules de gaz par un processus physique ou chimique selon la température où la vitesse de corrosion dépend ainsi de la température du métal.



I.2.2.2 Corrosion humide

La corrosion humide regroupe tous les types de corrosion par un milieu liquide conducteur, ce milieu peut être de l'eau, une solution acide de base ou d'autres [4]. Cette corrosion est de différentes natures tels que

- Corrosion chimique ;
- Corrosion électrochimique ;
- Corrosion biologique.

▪ Corrosion chimique

La corrosion chimique est une réaction hétérogène, elle se fait à la présence d'une phase liquide ou gazeuse avec un solide sans catalyseur. Il existe très peu de cas de corrosion chimique pure, elle est souvent liée à une corrosion électrochimique et généralement rencontrée dans les industries produisant ou utilisant les acides.

▪ Corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique est essentiellement l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes. Elle a lieu dans des solutions aqueuses ou dans des sels fondus. Ces derniers sont susceptibles de conduire le courant par déplacement d'ions, les courants ioniques mis en jeu donnent au phénomène de la corrosion un aspect particulier. Elle diffère de la corrosion sèche par le fait que le milieu corrosif participe au déplacement d'ions de la solution vers le métal. Les principaux oxydants sont :

- Les protons solvatés.
- L'oxygène dissous.
- Les cations métalliques (Cu^{2+} , Fe^{3+} , Sn^{4+}), les anions (NO_2 , NO_3 , CrO_4 , MnO_4) et les gaz dissous (O_3 , Cl_2 , SO_3) [2].

- **Corrosion biologique (bactérienne)**

La corrosion biologique est l'attaque des métaux par des bactéries. Il peut alors y avoir formation de composés, tels que le dioxyde de carbone, l'anhydride sulfureux, ou des acides organiques qui détériorent le métal. La corrosion biologique intervient en particulier dans les canalisations enterrées et les coques de bateau. La lutte contre cette forme de corrosion est à l'heure actuelle essentiellement d'ordre biologique, elle est réalisée par injection de produits bactéricides dans les milieux corrosifs [5].

I.2.3 Morphologie de la corrosion

En tenant compte de la forme et des sites d'attaque, les différentes formes de corrosion sont réparties en deux grandes familles : la corrosion généralisée et la corrosion localisée [1].

I.2.3.1 Corrosion uniforme (généralisée)

La corrosion uniforme est la forme la plus classique, elle se caractérise par une réaction chimique ou électrochimique qui se produit uniformément sur toute la surface considérée (Figure I.2). Elle se traduit par une diminution d'épaisseur par unité de temps ou en perte de poids par unité de surface et par unité de temps [7].



Figure I.1 Représentation schématique du mécanisme de corrosion uniforme

I.2.3.2 Corrosion localisée

La corrosion localisée est cernée sur des sites bien précis du métal, la vitesse de corrosion étant plus grande sur les sites préférentiels de la surface (Figure I.2). En pratique, la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité (existence de micro-piles) du matériau ou de l'environnement. Ce type de corrosion ne peut pas être mesuré par la perte de masse ou par la diminution de l'épaisseur. On doit réaliser des observations métallographiques et des mesures électrochimiques [4]. Ce type de corrosion englobe à son tour les formes suivantes :

Réduction Oxydation



Figure I.2 Principe de la corrosion localisée

- **Corrosion galvanique (bimétallique)**

La corrosion galvanique se manifeste dans un assemblage de deux métaux différents plongés dans un milieu aqueux, une pile électrochimique se forme et seul le métal le moins noble est dissout (Figure I.3).



Figure I.3 Corrosion galvanique pour un assemblage de tôles aluminium et cuivre par un rivet sans isolation.

- **Corrosion par piqûre**

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse, l'attaque se limite à des trous ou piqûre, très localisés et pouvant progresser très rapidement en profondeur alors que le reste de la surface reste indemne (figureI. 4). L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte en poids appréciable de l'ensemble de la structure n'apparaisse. Elle concerne la plupart des métaux et alliages et notamment ceux d'usage courant tels que l'acier au carbone, l'acier inoxydable, les alliages d'aluminium et le cuivre [5].

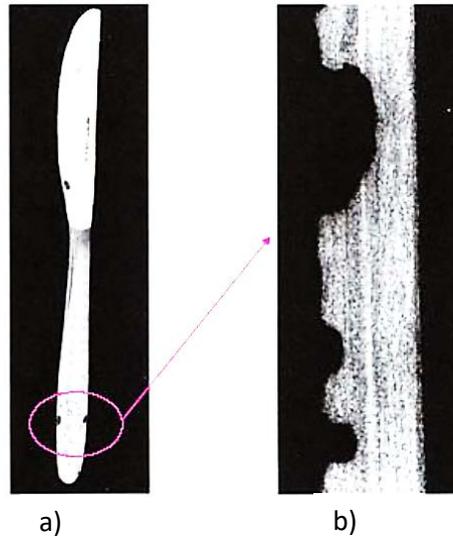


Figure I.4 a) Piqûres de corrosion sur un couteau en acier inoxydable (12% Cr). b) Coupe métallographique de piqûres (plan de coupe perpendiculaire à la lame) [7].

- *Corrosion intergranulaire*

Dans certaines conditions, les joints de grains sont le siège d'une corrosion localisée très importante alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. En conséquence l'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques. Ce type de corrosion peut être dû soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants. A titre d'exemple, la corrosion feuilletante des alliages d'aluminium laminés se développe dans la plupart des cas de façon intergranulaire (figure I.5) [8].

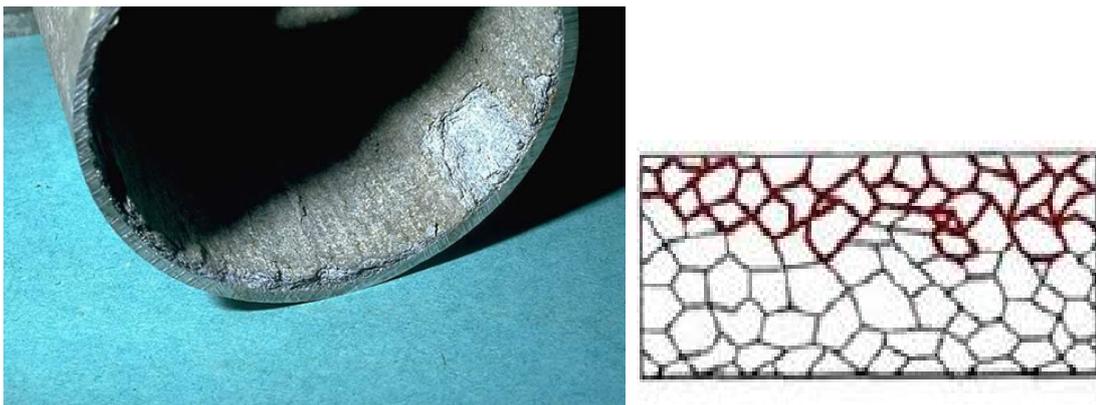


Figure I.5 Corrosion feuilletante d'une canalisation en alliage d'aluminium véhiculant de l'eau

- *Corrosion sous contrainte*

La corrosion sous contrainte se définit comme un processus de développement de fissures (figure I.6), pouvant aller jusqu'à rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une

tension mécanique et d'un milieu corrosif. Ces fissures sont de type intergranulaire ou transgranulaire et plus rarement de type mixte.

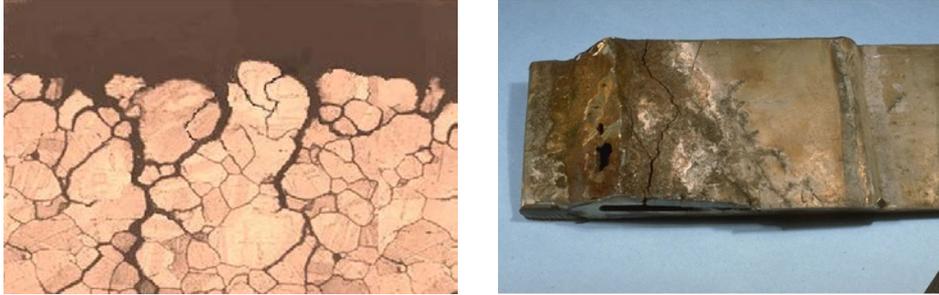


Figure I.6 Corrosion sous contrainte

- **Corrosion par fatigue**

La corrosion par fatigue se distingue de la C.S.C par le fait que les contraintes appliquées ne sont pas plus statiques mais cycliques (efforts périodiques alternés) (figure I.7). Elle peut être réduite en diminuant les contraintes, soit par un recuit de détente, soit en modifiant la conception de l'appareil, soit enfin par des traitements mécaniques comme le grenailage qui par déformation plastique introduisent des contraintes superficielles de compression qui contribuent à l'amélioration de la résistance à la fatigue du matériau [5].

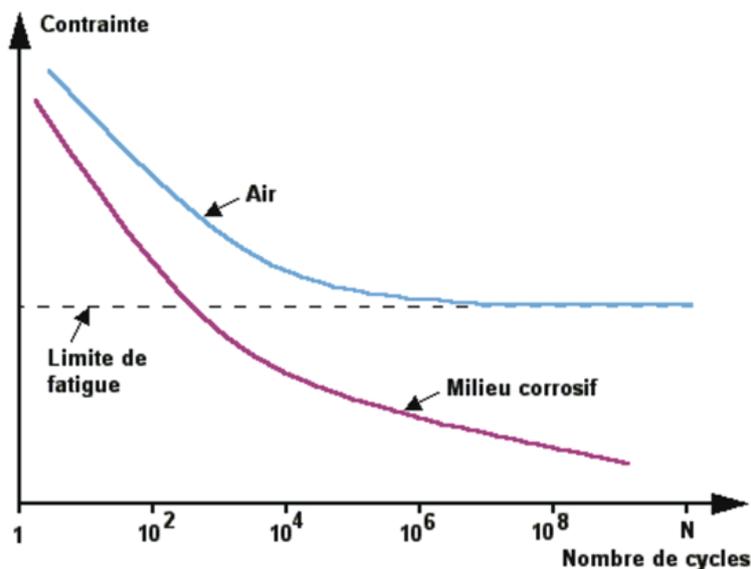


Figure I.7 Contrainte appliquée en fonction du nombre de cycles

- ***Corrosion sélective***

Certains alliages exposés à des atmosphères agressives, un des composants peut se subir une attaque préférentielle. L'attaque peut être localisée et conduire à des perforations, ou répartie uniformément et aboutir à une chute des caractéristiques mécaniques. Dans le second cas, les dégradations peuvent échapper à l'observation visuelle, la pièce conservant sa forme et son état de surface initial.

Les différents cas de corrosion sélective sont classés suivant la nature des alliages considérés

- dézincification des laitons: Corrosion sélective du zinc (ou corrosion de l'alliage puis redéposition du cuivre). Le laiton prend la teinte rouge du cuivre (figure I.8).
- Graphitisation des fontes : corrosion du fer, le graphite n'étant pas attaqué.

Avec les fontes à graphite lamellaire, l'attaque progresse en profondeur sans dégradation visible à l'œil nu [6].

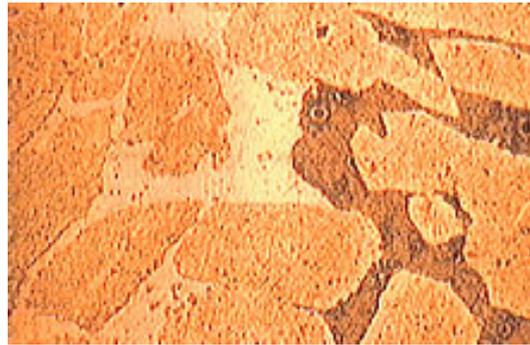


Figure I.8 Coupe métallographique montrant une corrosion sélective d'un laiton [6]

- ***Corrosion par crevasse***

La corrosion cavernueuse est un type de corrosion qui est généralement associée à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des interstices, sous des dépôts et des joints et dans des crevasses, par exemple sous les écrous et têtes de rivets [5]. Le processus de développement de la corrosion cavernueuse n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûre, cependant la cinétique et la morphologie de l'attaque s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt et non pas en profondeur comme corrosion pour les piqûres (figure I.9) [4].

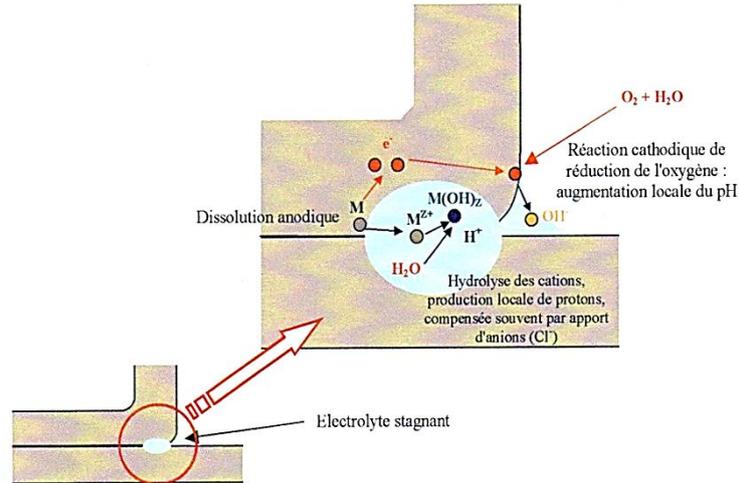


Figure I.9 Représentation schématique du mécanisme de corrosion caverneuse entre deux plaques par création d'une cellule d'aérations différentielle [5].

I.3 Protection contre la corrosion

I.3.1 Méthodes de protection contre la corrosion

La prévention de la corrosion doit être envisagée au début de la phase de conception d'une installation. En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une durée de vie d'une pièce ou système mécanique, notamment pour des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves sur le plan humain ou l'environnement. La lutte contre la corrosion englobe les méthodes suivantes :

- Prévention par une forme adaptée des pièces.
- Prévention par un choix judicieux des matériaux.
- Protection par revêtements.
 - Protection par inhibiteurs.
 - Protection électrochimique.

I.3.2 Protection électrochimique par galvanisation

La corrosion est la résultante de réactions électrochimiques dues à la formation de piles locales qui sont composés de 4 éléments:

- Un électrolyte (eau, sol...),
- Deux électrodes à potentiels différents,
- Une connexion électrique.

L'électrode ayant le potentiel le plus électronégatif est appelée anode. En effet, c'est elle qui subit les phénomènes d'oxydation (perte d'électrons) donc de corrosion alors que, l'électrode ayant le potentiel le moins électronégatif est nommé cathode, où il ya des phénomènes de réduction (gain d'électrons) donc de protection. Dans le cas d'une pièce en acier galvanisée, les matériaux acier – zinc forment une pile électrochimique où l'acier est la cathode et le zinc l'anode avec un Potentiel du fer = $-0,44V$ et un potentiel du zinc = $-0,76V$. L'acier sera protégé par le zinc qui se dissoudra dans une réaction cathodique lente. L'attaque du zinc (perte d'électrons, ou oxydation $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$) se fera avec la formation d'oxydes, d'hydroxydes, d'hydrocarbonate, etc., sels à caractère protecteur conduisant à une cicatrisation locale de la détérioration de l'acier qui n'est pas recouvert (figure 10 a). A cette protection électrochimique s'ajoute bien évidemment la protection physico-chimique (ou protection barrière) que confère une couche sur une surface (comme une peinture, métal...). Une seule couche de peinture ne permet pas une protection électrochimique, si la surface de revêtement n'est pas continue (ou si elle est blessée), il y'a formation de rouille, donc soulèvement et dégradation du revêtement par la rouille (FeO_3) (figure 10 b).

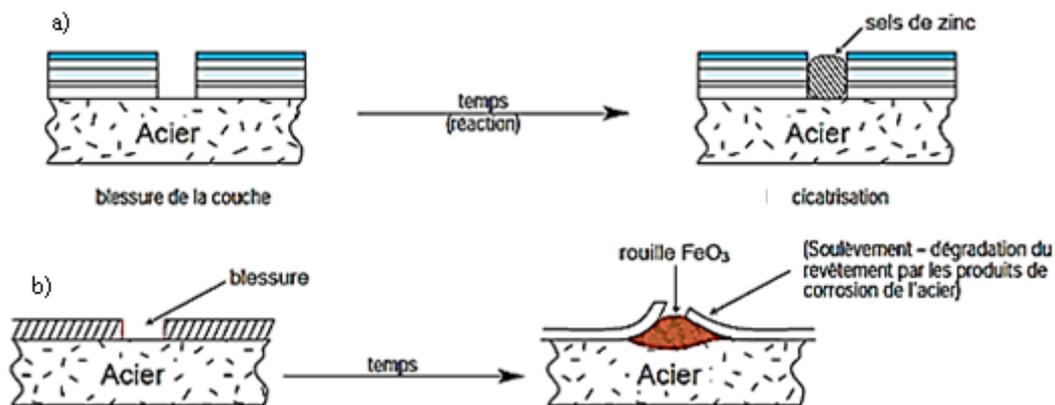


Figure I.10 Protection barrière simple sans galvanisation (exemple peinture) [9].

I.3.3 Microstructure d'une couche de galvanisation

L'immersion de l'acier dans le bain de zinc fondu, entraîne la formation d'un revêtement par diffusion du zinc dans l'acier [10]. La réaction du zinc avec le fer de l'acier engendre formation de plusieurs composés intermétalliques fer-zinc, confèrent au revêtement une bonne adhérence et une résistance à l'abrasion, qui ne consiste pas seulement en une superposition d'une couche de zinc sur le subjectile acier, mais bien des couches différentes d'alliage.

La coupe micrographique du revêtement obtenu par galvanisation à chaud montre nettement la différence qui apparaît dans la formation des intermétalliques due à la réaction Fe- Zn (figure I.11), chacune constitue une phase stable, ce revêtement est composé de quatre phases.

1. Phase « Γ » (gamma), ou couche d'adhérence formé d'un composé de $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$ de structure cubique, d'épaisseur d'ordre 1 à 2 μm , elle est difficilement visible, sa diffusion parfois très rapide, par ce fait elle est transformée en phase delta.
2. Phase « δ » (delta), ou couche en palissade, présentant un alliage de formule FeZn_7 se cristallise dans le système hexagonal, et d'épaisseur d'environ 30 à 40 μm qui est particulièrement fragile.
3. Phase « ζ » (dzêta) composée de $\text{Fe}_3\text{Zn}_{13}$ sa cristallisation structurale est monoclinique, d'épaisseur variant entre 7 et 20 μm , elle est également cassante.
4. Phase « η » (êta), ou zinc pur contenant la teneur en fer du bain de galvanisation, c'est-à-dire 0,020%. Elle cristallise dans le système hexagonal, son épaisseur est 8 à 12 microns [11].

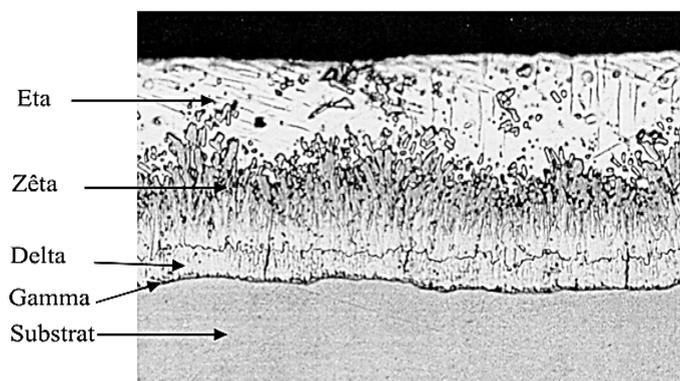


Figure I.11 Coupe micrographique d'un revêtement galvanisé [12]

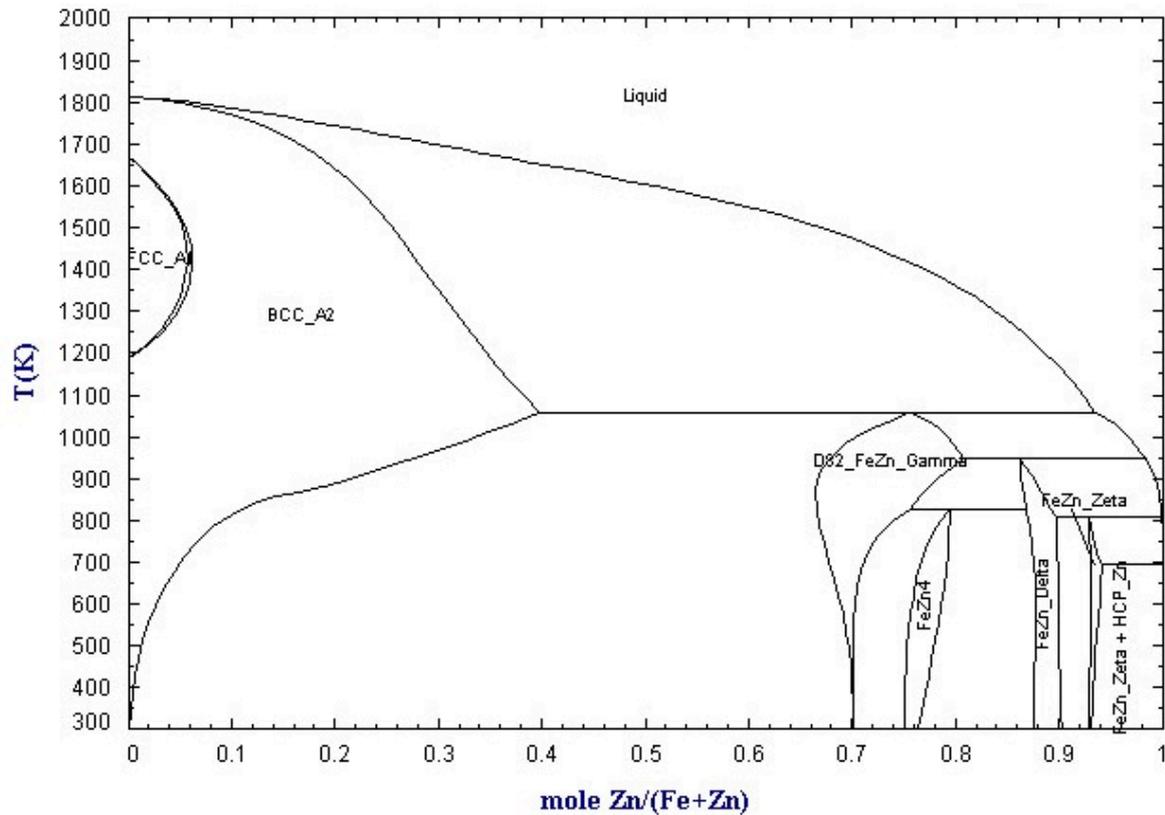


Figure I.12 : Diagramme de phases du système Fe-Zn

Le diagramme Fe-Zn permet de déterminer les phases formées en fonction de la température et de la composition Fe-Zn.

I.3.4 Galvanisation et aluminage en continu

La galvanisation et l'aluminage en continu de tôle d'acier doux sont des opérations qui consistent à revêtir une bande d'acier d'une fine couche de métal protecteur par passage dans un bain fondu de ce métal qui est le zinc pour la galvanisation et l'aluminium pour l'aluminage. Par ailleurs, pour ces deux métaux, les mêmes techniques de fabrication sont utilisés pour le revêtement de leurs alliages à différentes teneurs : Zn-Al à 1 % d'aluminium (GALFLEX ; CRACK-FREE), Zn-Al à 5 % d'aluminium (GALFAN ; SUPER ZINC), Al-Zn à 55 % d'aluminium (GALVALUME) [technique de l'ingénieur]. Ces opérations mettent en jeu les mêmes technologies de préparation de surface, commençant par le recuit de la tôle support, l'enduction du métal de revêtement et le contrôle de son épaisseur. Elles se pratiquent sur des lignes industrielles pratiquement identiques, ou sur une même ligne dite alors ligne mixte. L'origine de la galvanisation en continu a été introduit par Sendzimir 1938,

l'idée de base était de procéder en même temps au recuit métallurgique de la tôle et à sa préparation de surface pour la réalisation du processus de galvanisation (figure 13)

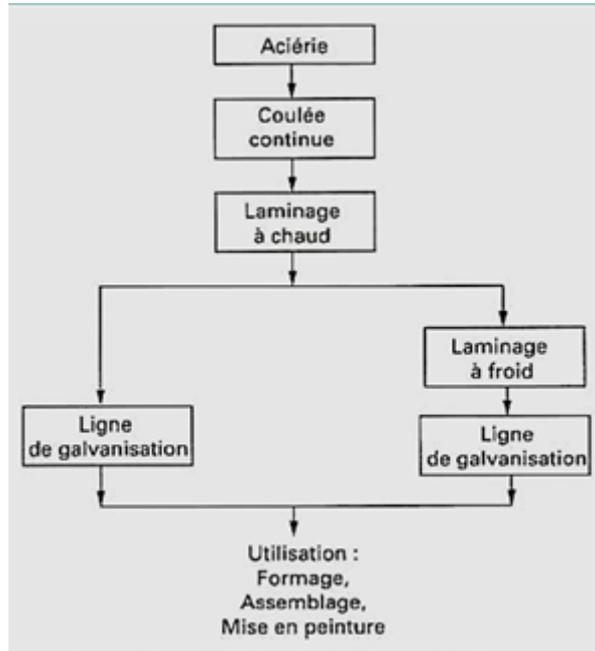


Figure I. 13 : circuit de fabrication de la galvanisation en continu.

I.3.4.1 Présentation du procédé

La galvanisation en continu est un processus industriel qui consiste à dérouler une bobine d'acier et à la faire passer dans un bain de zinc liquide pour être ensuite refroidie et enroulée à nouveau (figure I.14). Dans la plupart des cas, les aciers galvanisés selon ce procédé (appelé aussi Sendzimir) sont destinés à être prélaqués, la vitesse de passage dans le bain est de l'ordre de 100 m/mn, le processus se déroule selon les étapes suivantes :

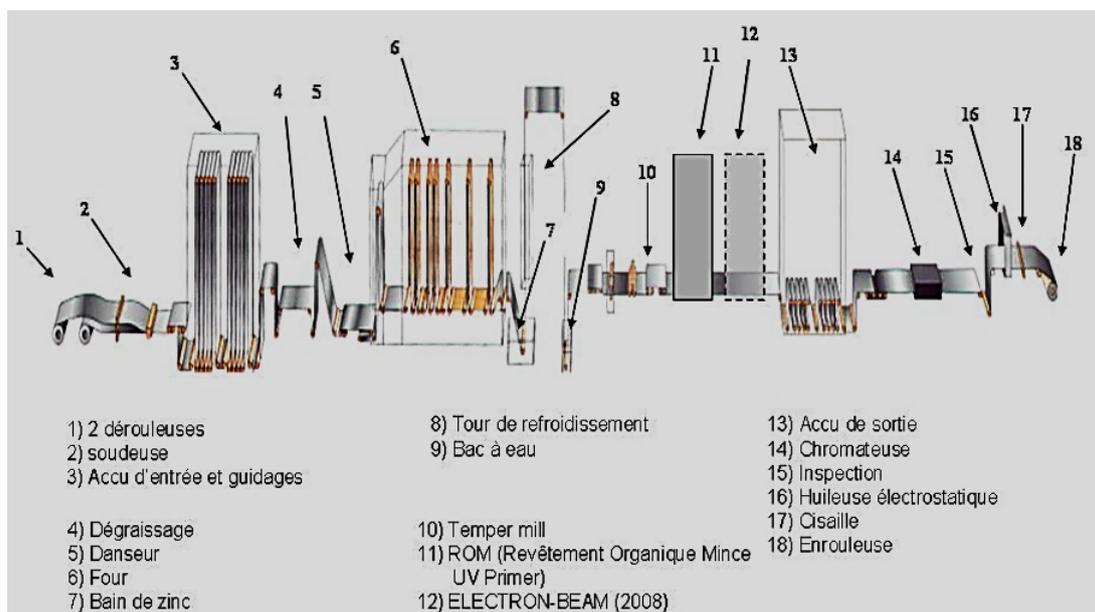


Figure I.14 : Ligne de galvanisation en continu [12].

- **La section d'entrée**

Les tôles d'acier arrivent sous forme de bobines et ils y sont déroulées, soudées entre elles, puis nettoyées. Les différentes séquences de nettoyage consistent en un dégraissage alcalin par brosse ou par spray d'hydroxyde de sodium et un décapage pour les tôles laminées à chaud à l'état brut de laminage. Ce traitement est très important car il permet d'obtenir une surface extrêmement propre pour une meilleure adhérence du zinc sur la tôle d'acier [12,13].

- **La section centrale**

Le traitement thermique est réalisé sous atmosphère non oxydante contrôlée de $N_2 + 5$ à 20 % de H_2 , comprend plusieurs parties qui sont respectivement, le préchauffage, le chauffage, le maintien en température, le refroidissement lent, le refroidissement rapide et l'overaging. L'immersion de la tôle dure environ 3 secondes dans le bain de zinc fondu. En sortie de bain, la bande entraîne par capillarité un film de zinc liquide dont il faut maîtriser l'épaisseur afin de respecter les dimensions du revêtement utilisé pour l'automobile (10 à 13 μm). La tôle passe donc entre deux couteaux de gaz (air ou azote) qui essorent le trop-plein de zinc liquide [12,13].

- **La section finale**

Un accumulateur de sortie permet le fonctionnement en continu de la section centrale lors du skin pass. Cette technique consiste à donner à la pièce la rugosité de surface et la planéité et d'éliminer les contraintes qui apparaissent lorsqu'un acier non "skin passé" est vieilli. La bande est ensuite ajustée suivant les dimensions désirées. Certaines applications post galvanisation demandent un traitement d'acide chromique, consistant en un dépôt sur la surface de la pièce d'une fine couche de chromate de zinc, particulièrement résistant à la rouille blanche ZnO . L'application d'un film d'huile assure une protection temporaire contre la corrosion et facilite l'emboutissage des tôles. Celles-ci sont, à la fin du processus, rembobinées en coil. En sortie de bain, la bande peut également subir un nouveau traitement thermique qui consiste à maintenir la température autour de $500^\circ C$ pendant quelques secondes afin de favoriser la formation de composés intermétalliques Fe-Zn en lieu et place du revêtement de zinc du galvanizing. Ce procédé est appelé galvannealing, qui est la contraction de galvanizing et de annealing. Après ces deux types de procédés, la bande est refroidie en passant à travers des jets d'air à température ambiante. Une jauge d'épaisseur permet de suivre les dimensions du revêtement des deux côtés de la bande [12,13].

I.3.4.2 Bain de Galvanisation :

La galvanisation a été réalisée dans un bain de zinc thermique dont la composition chimique est donnée dans le tableau. La température du bain de galvanisation a été maintenue à 455 à 500C.

Ces éléments présents dans le bain de zinc (Tableau1) ont une grande influence sur l'aspect de surface des produits galvanisés obtenus.

Elément	Cu	Al	Pb	Cd	Fe	Sn	Cr	Zn
%	0,02	0,0565	0,19	0,03	0,062	0,05	0,57	98,75

Tableau1 : composition chimique du bain de zinc.

I. Eléments d'alliage contenant dans l'acier :

I.1. Influence du silicium :

La galvanisation des aciers contenant du silicium se traduit par l'obtention de revêtement d'épaisseur exagérée d'aspect terne et d'adhérence médiocre dès que la teneur en silicium dépasse 0,1% [32][31].

I.2. Influence du phosphore :

Cette impureté a une influence non négligeable à la réaction Fe-Zn même sa teneur est très faible. Le phosphore s'accumule à l'interface δ_1/ζ en créant des fissures dans le composé δ_1 . La couche ζ initialement formée, peut jouer un rôle d'écran, isolant ainsi le zinc liquide et imposant, un processus de réaction entre phases solides dans l'espace entre cette couche et le métal à galvaniser [36].

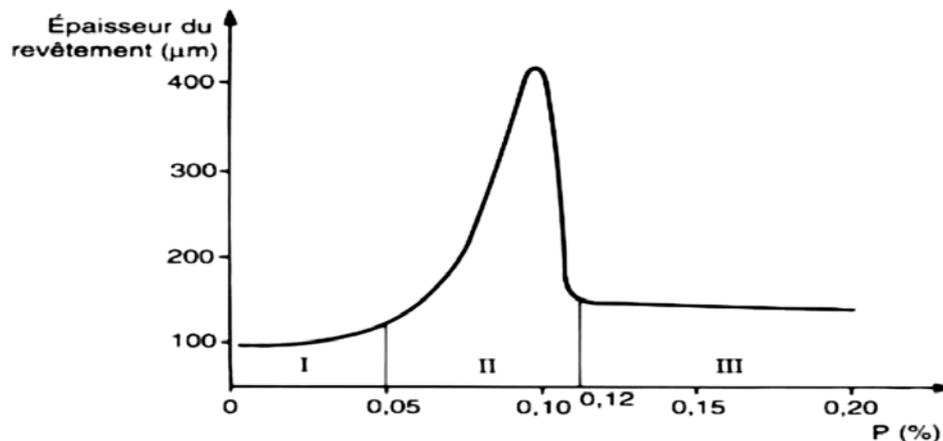


Figure.I.15 : Effet du phosphore [33].

I.3. Influence du carbone :

La présence du carbone dans l'acier augmente la réactivité de l'acier vis à vis du zinc, qui peut conduire à une augmentation importante de l'épaisseur du revêtement d'alliage Fe-Zn.

II. Influence des éléments d'addition dans le bain de galvanisation:

Pour certains usages particuliers, des additions ou ajouts complémentaires de métaux peuvent être demandés, tels que Al, Mg, Ni... etc. Ceci fera l'objet d'une clause spéciale à la commande et leur pourcentage ne sera pas inclus dans le total des matières étrangères. En général, c'est la qualité Zn7 qui est employée. On peut aussi utiliser d'autres bains faiblement alliés. [30] [31].

II.1. Influence de l'aluminium:

L'aluminium est élément d'addition extrêmement important dans le bain de zinc lors de la galvanisation, car il joue, d'une façon très sensible, sur la prise de zinc et sur l'aspect du revêtement. Une teneur de 0,1 à 0,2% d'aluminium dans le bain est suffisante pour ralentir suffisamment la vitesse d'attaque de l'acier par le zinc de telle sorte que l'on obtienne des couches très fines et régulières de phase intermétalliques assurant ainsi une bonne cohésion de l'édifice (revêtement)[34].

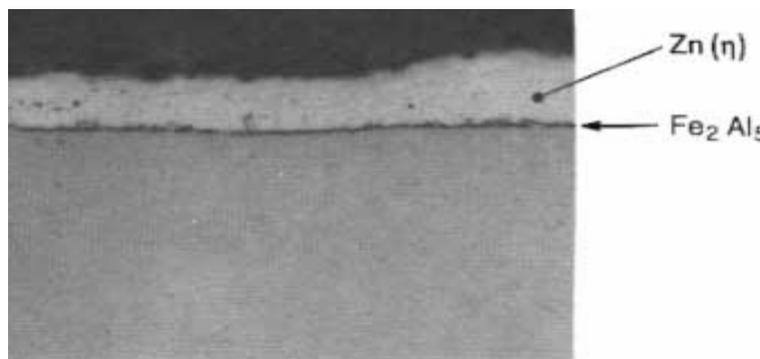


Figure.I.16 : Revêtement galvanisé : bain Zn + 0,16% Al [33].

II.2. Influence du plomb :

L'ajout du plomb intentionnellement au bain de zinc modifie l'aspect extérieur du revêtement. Il permet à la couche de se solidifier sous forme de grands cristaux à fleurs. Ces dernières sont des cristaux d'eutectiques se forment lors du refroidissement à 318 °C. L'étain favorise également le fleurage, augmente la fluidité du bain et améliore la brillance du revêtement. Si sa teneur dépasse 1%, l'effet de l'aluminium est neutralisé. Il influence la cristallisation de la phase externe et forme un eutectique avec le zinc qui provoquée durant la solidification (par développement de larges fleurs) [35].

II.3. Influence du cuivre :

Des additions de cuivre jusqu'à 0,8-1% augmentent l'épaisseur du dépôt de zinc et accroissent sa résistance à la corrosion mais augmentent également la quantité de mattes formées. Au-delà de ces teneurs, l'influence est plus mitigée sur la prise de zinc [36].

II.4. Influence du cadmium:

En raison de la formation d'une couche discontinue γ , des additions de 0.5 à 10% de Cd dans le zinc accroissent la vitesse de réaction Fe-Zn et déplacent le domaine d'attaque linéaire vers des basses températures. Au-dessus de 4.5% de Cd, la phase ξ disparaît et seul de gros cristaux de δ_1 subsistent dans le dépôt.

II.5. Influence du fer:

La présence du fer dans le bain de zinc conduit à la formation de mattes qui se déposent le plus souvent au fond de la cuve. Ce phénomène peut emmener à une augmentation de la viscosité du bain et aussi à la mouillabilité de l'acier.

II.6. Influence d'autres éléments:

Le magnésium jusqu'à 0,6% accroît la vitesse de réaction, au-delà de cette teneur, l'attaque diminue en intensité. L'antimoine influe sur la cristallisation de la phase externe η . Il forme un eutectique avec le zinc qui provoque durant la solidification le développement de larges fleurs.

L'argent accélère la croissance du dépôt, alors qu'à l'inverse le Cr, Ni, Ti, V, et Zr sont des inhibiteurs efficaces de la réaction Fe-Zn. Ces derniers éléments ont tendance à former des composés ternaires à l'interface ξ/η et à réduire l'épaisseur de la phase ξ .

I.3.4.3 Description des principaux équipements de la ligne de galvanisation

La ligne de galvanisation comprend six sections et chaque section procède une fonction bien déterminée et un certain nombre d'équipements.

a. Section entrée

La section entrée permet de :

- Introduire la bande dans la ligne.
- Eliminer les sur épaisseurs en tête et queue des bobines.
- Constituer par soudage une bande continue.

Cette section comporte en plus un accumulateur de bande de 360 m dont le rôle est d'assurer une marche continue de la ligne pendant les arrêts dus aux opérations de soudage.

b. Section traitement thermique

La section traitement thermique joue le rôle suivant :

- Nettoyage et dégraissage la bande par chauffage.
- Assurance des qualités de dureté de la bande par l'un des traitements thermiques.
- Assurance de la protection de la bande jusqu'à l'immersion dans le bain.

Cette section englobe les étapes de traitement suivantes :

- Four de préchauffe de longueur totale de 22,6 m non oxydant, chauffage par brûleurs où le combustible est le gaz naturel et l'air.
- Four de recuit ou laboratoire d'une longueur de 38,9 m. Le chauffage est assuré par des tubes radiants et sous atmosphères réductrice (HNX).
- Four de maintien et refroidissement contrôlé d'une longueur de 17,9 m chauffage par résistances électriques et refroidie par tubes à circulation d'air à l'aide d'un ventilateur.
- Four de refroidissement par jet d'une longueur de 13,2 m, refroidi par circulation de gaz d'atmosphère avec ventilateurs et échangeurs refroidis à l'eau à travers des tubes perforés.
- Four de refroidissement final d'une longueur de 34,2 m ayant le même principe que celui du refroidissement contrôlé.
- Four de refroidissement forcé par jet final d'une longueur de 4,4 m, même principe que le refroidissement par jet primaire.

c. Section bain de zinc :

Le bain de Zinc est réalisé dans une cuve en céramique de dimensions :

Longueur : 4070 mm.

Largeur : 3050 mm.

Hauteur : 2000 mm.

Le chauffage est assuré par induction, la température du bain est comprise entre 4500C et 4600C, un rouleau de fond de diamètre 600mm sert de guide à la bande qui lui permet de remonter verticalement vers la colonne de refroidissement.

d. Section refroidissement

Après revêtement, la bande est refroidie par un système d'air soufflé sous pression. Le refroidissement de la bande s'achève dans un système de refroidissement à eau où une pulvérisation d'eau froide sous un débit de 50 m³/h est envoyée sur la bande.

e. Section planage et traitement chimique

La section planage et traitement chimique comporte :

- Un skin pas.
- Une planeuse sous traction.
- Jauge de mesure de l'épaisseur du revêtement.
- Une installation de passivation constituée d'un bain de chromage pour augmenter la résistance contre l'oxydation du revêtement.

f. Section sortie

La section sortie a pour rôle

- D'enrouler la bande pour faire des bobines ;
- La mise à poids de ces bobines pour chaque client ;
- Le stockage des bobines par client et par choix.

Cette section est munie d'un accumulateur d'une capacité de 180 m qui assure le maintien de la ligne en marche lors du cisailage des bobines.

I.3.4.4. les différentes étapes du traitement avant galvanisation

Avant d'être mène dans le bain de zinc à la température de 450°C, la surface de la bande doit être débarrassée de toute trace de graisses ou d'oxydes. Ce nettoyage de surface se fait par voie thermique, la bande passe à travers un four tunnel où elle subit divers traitement [4].

a. Dégraissage par brûlage

La bande traverse d'abord le four de préchauffe dans lequel elle subit un brûlage à la flamme qui volatilise les huiles du laminage à T° de 600°C à 700°C.

b. Décapage par recuit réducteur

Dans ce four, l'oxyde est réduit sous atmosphère réductrice riche en hydrogène à une température de 800°C. La bande fortement écrouie au laminage à froid subit un traitement de recristallisation qui régénère ses propriétés mécaniques.

c. Refroidissement de la bande

En sortant du four de recuit, la bande subit un premier refroidissement jusqu'à 750°C un deuxième très rapide par jet jusqu'à 500°C et enfin un refroidissement final par jet qui abaissera la température de la bande jusqu'à 450°C. La vitesse de déroulement de la bande est fonction des dimensions, plus la bande est épaisse et plus la vitesse est lente. Ce four tunnel est prolongé par une goulotte plongée dans le bain de zinc qui permet une protection contre l'oxydation grâce à l'atmosphère réductrice qui y règne.

I.3.4.4 Caractéristiques et Normes

III 6.1. Normes, masse et épaisseur

Les masses et épaisseurs sur divers produits galvanisés sont données par le tableau ci-après :

Tableau : Vitesse de corrosion du zinc [14].

Produits	Masse de Zinc (g/m ²)	Épaisseur de couche de Zinc (μ m)	Normes AFNOR
Produits manufacturés (galvanisation à chaud au trempé)	350 à 500	50 à 70	NFA 91-121
Toles	Double face 100 à 600	7 à 42	NFA 36-321 NFA 36-322
Fils	30 à 290	4 à 40	NFA 91-131

I.3.4 La galvanisation en continu des tôles

Les principales caractéristiques des revêtements de tôles galvanisées sont regroupées dans le tableau ci-après (d'après les normes NF EN10142 et NFA 36-322).

Désignation du revêtement	g/m ² double face essai en 3 points	g/m ² double face essai en 1 point
Z 100	100 (7 μm)	85
Z 200	200 (14 μm)	170 (12 μm)
Z 225	225 (16 μm)	200 (14 μm)
Z 275	275 (19 μm)	235 (16,3 μm)
Z 350	350 (25 μm)	300 (21 μm)
Z 450	450 (31 μm)	385 (27 μm)
Z 600	600 (42 μm)	510 (35 μm)
Alliage Fer-Zinc		
ZF 100	100	85
ZF 180	180	150

I.4 Tribologie

La tribologie est définie comme étant l'étude des interactions entre surfaces solides en mouvement relatif (Figure I.17). Le mot tribologie a été proposé par Peter Jost en 1966 et est basé sur le mot grec "tribos" qui signifie frotter [15]. Il s'agit donc de la science du frottement, de l'usure et de la lubrification.

- le frottement constitue la cause primordiale de perte d'énergie et de l'usure.
- l'usure est la cause de perte de matière et des performances mécanique des systèmes.
- la lubrification a pour but de diminuer les frottements des solides en contact et de prédire leur endommagement

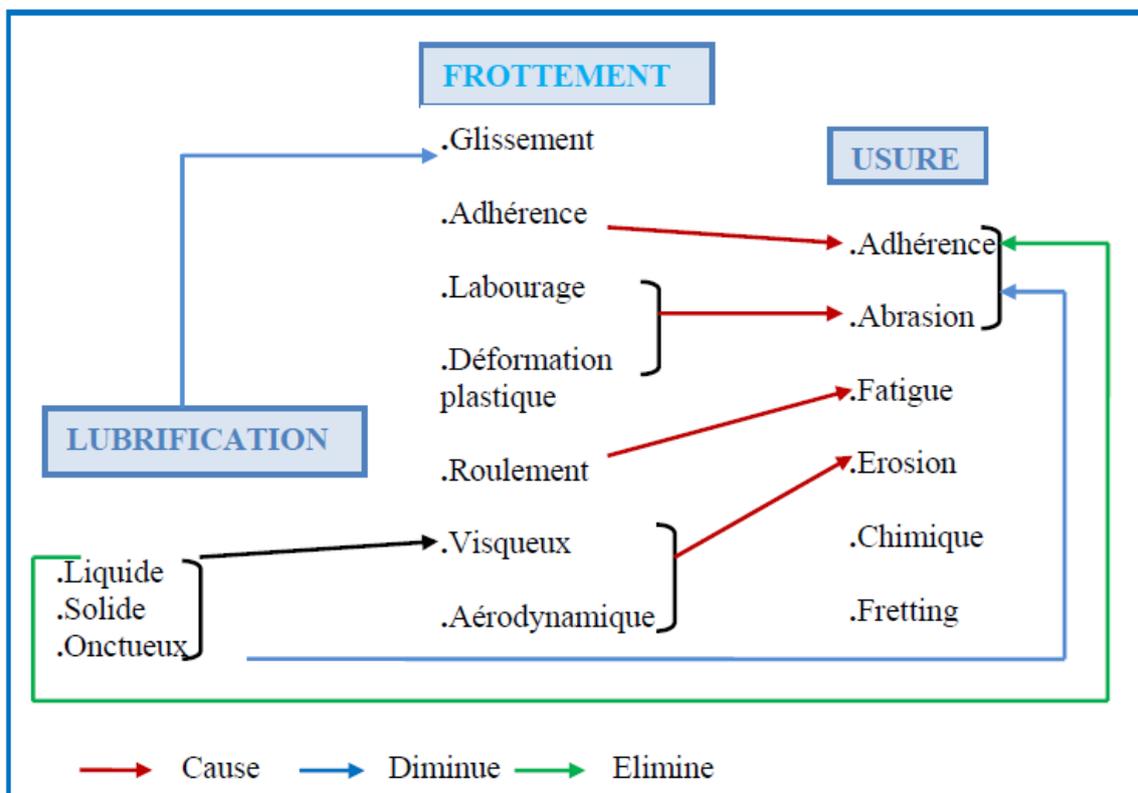


Figure I.17 Schéma général de la tribologie [15]

I.4.1 Les frottements

Les phénomènes de frottement contribuent dans de nombreuses applications habituelles et industrielles. Le frottement se définit comme étant une résistance à un mouvement entre des surfaces en contact. Lorsque deux solides en contact sont en mouvement, des frottements s'opposent aux forces de déplacement. Ces derniers se produisent au niveau des irrégularités des surfaces en contact (Figure I.18).

Pour les atténuer, on peut appliquer un lubrifiant entre les deux surfaces. Dans tous les cas, il engendre une résistance au mouvement provoquant la création de contraintes mécaniques superficielles et la dissipation de chaleur, entraînant ainsi l'usure plus ou moins rapide des corps en contact et par conséquent la modification de leurs surfaces (Figure I.18). [16].

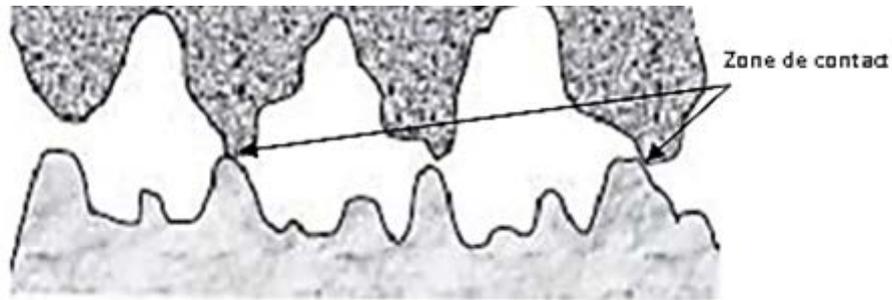


Figure I.17 : L'interface de contact de deux surfaces en mouvement.

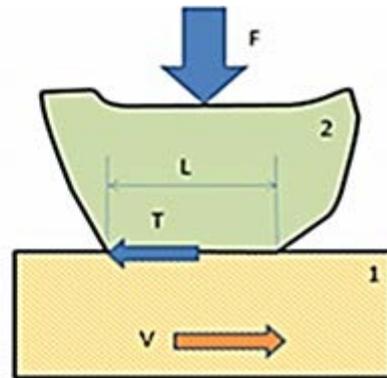


Figure I.18 : Contact entre deux solides en présence de frottement.

On distingue différents types de frottement : frottement de glissement (figure I.19b), le frottement déroulement (figure I.19c) et le frottement visqueux ou frottement fluide (figure I.19d) quand un corps se déplace dans un fluide (un gaz ou un liquide) [15].

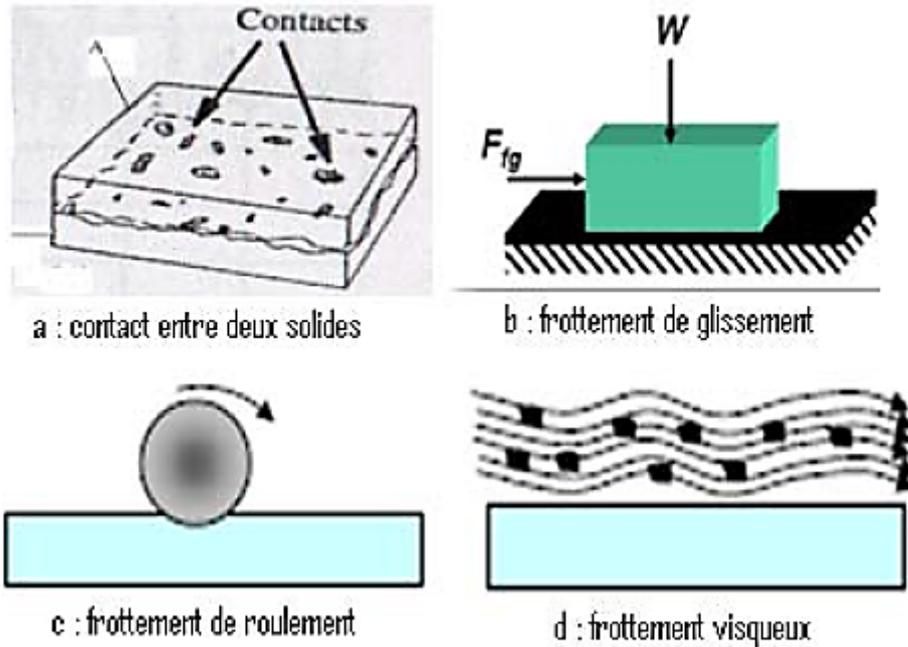


Figure I.19 : Différents types de frottement [15]

C'est au niveau de la surface d'une pièce que naissent les frottements, les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles sont marquées par les traces dus aux procédés d'usinage (rugosité) engendrant ainsi des défauts [17]. La qualité de l'état de surface influence considérablement sur la tenue en service des systèmes mécaniques ainsi l'augmentation de la rugosité de surface provoque une élévation des frottements ce qui va nuire aux surfaces de contact, diminuant ainsi les performances du mécanisme (Figure I.20).

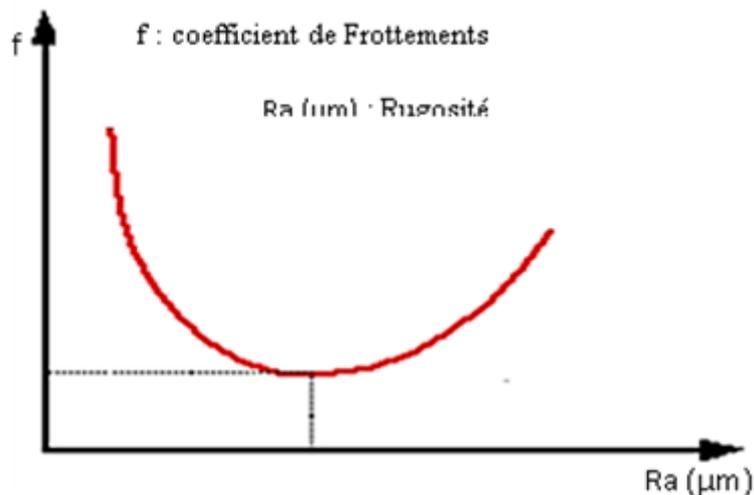


Figure I.20 : Influence de la rugosité sur les frottements [18].

I.4.2 L'usure

L'usure constitue l'une des causes majeures de la destruction des matériaux et de la diminution des performances des systèmes mécaniques [19]. En effet l'usure des surfaces désigne le phénomène de dégradation des couches superficielles d'un solide sous l'action mécanique du milieu extérieur. Cette dégradation est souvent associée à différents phénomènes (Figure I.21) soit chimiques dus à la corrosion, mécanique due au frottement ou électrique dus au phénomène d'arc, elle peut prendre la forme d'une perte de masse, de côte, de forme, ou encore d'une modification de la structure [20].

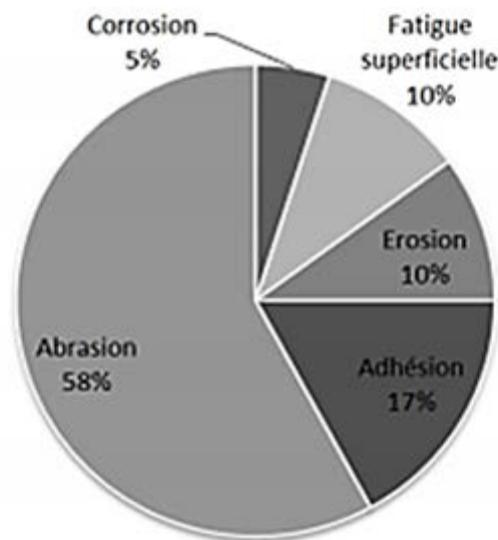


Figure I.21 : Les différents types d'usure et leurs importances [21].

Il existe plusieurs types d'usures mécaniques parmi eux :

- Usure par abrasion.
- Usure par adhésion.
- Usure par corrosion.

I.4.2.1 Usure par abrasion

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière produite par des particules dures ou des protubérances dures. Les particules dures peuvent se trouver encastrées dans l'une des surfaces ou être entre les deux surfaces en mouvement relatif (Figure I.22a) [20]. Les surfaces endommagées (Figure I.22b) par abrasion présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement

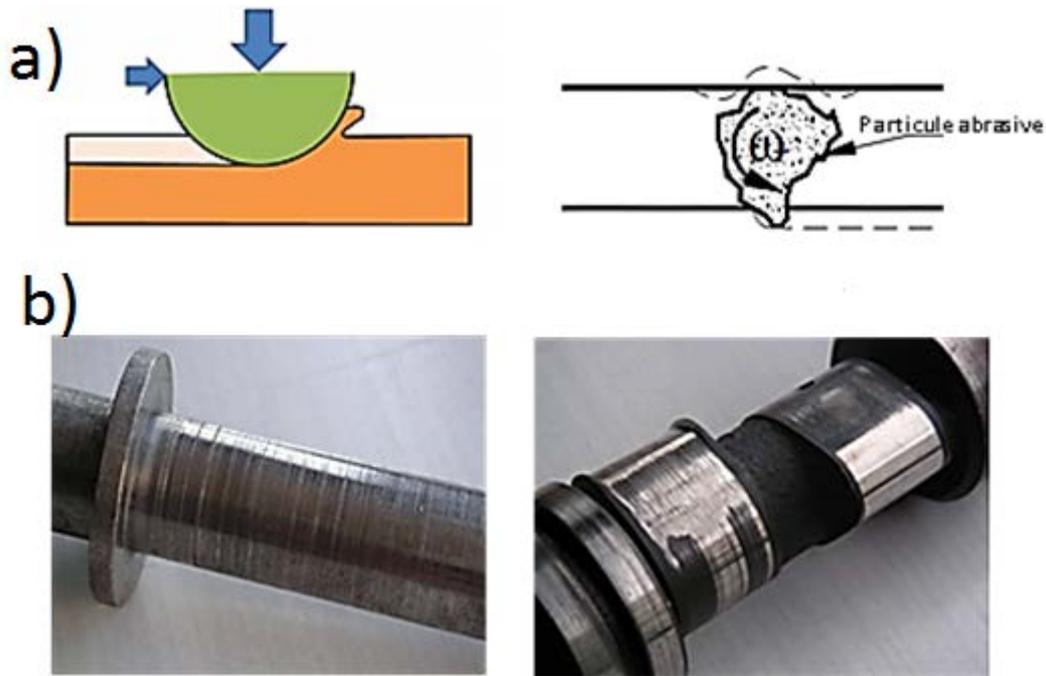


Figure I.22 a) : Mécanisme d'usure par abrasion [22].
 b) : L'état de surface présentant une usure par abrasion.

I.4.2.2 Usure par adhésion

Le mécanisme d'adhésion est une usure par transfert de matière d'une surface sur l'autre pendant leur mouvement relatif, due à un processus de soudure en phase (Figure I.23a) [21]. L'adhésion dépend de l'énergie de surface des matériaux en effet lorsque les pressions de contact sont élevées et que les matériaux ont un travail d'adhésion élevée, il est possible d'atteindre un régime sévère d'adhésion où les surfaces sont soudées. Le mécanisme est alors complètement bloqué, on parle de grippage.

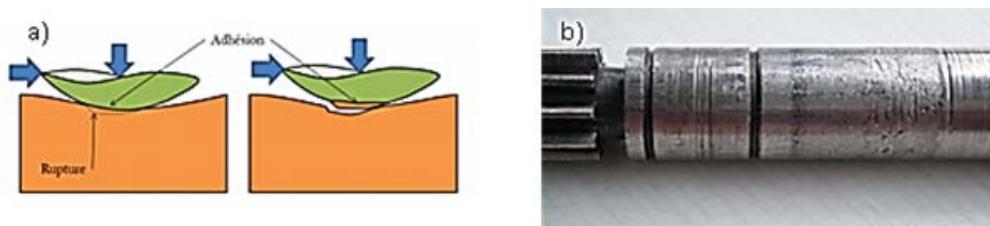


Figure I.23 a) : usure par adhésion [15]. b) Surface présentant un grippage

I.4.2.3 Usure par corrosion

L'usure par corrosion n'est pas directement liée aux mouvements des pièces, mais elle intervient dans les situations où le contact fonctionne en environnement corrosif (Figure I.24). L'énergie dissipée dans le contact peut alors activer les phénomènes de corrosion et accélérer la dégradation des surfaces. L'attaque chimique ou électrochimique est en générale rapide,

puis ralentie par la formation de films plus ou moins protecteurs qui peuvent passiver les matériaux et stopper au moins provisoirement le processus.

Le processus général de corrosion, des phénomènes de corrosion localisée peuvent se produire tels que la corrosion par piqûres, la corrosion caverneuse et la corrosion bimétallique ou galvanique. Cette dernière se produit lorsqu'un métal est en contact avec un métal différent et qu'ils sont tous les deux dans une solution corrosive [22].

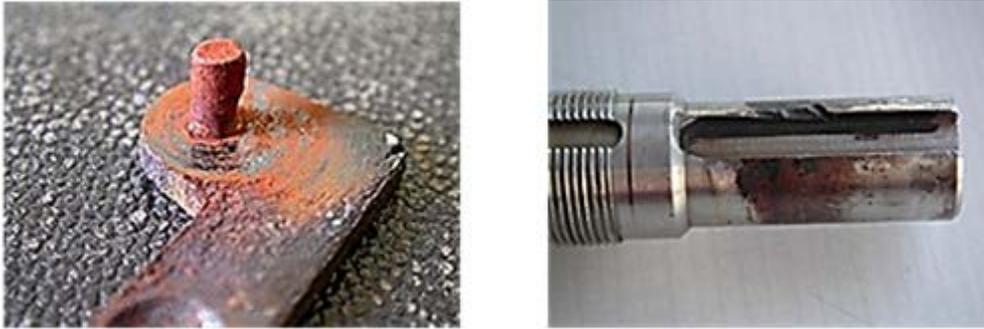


Figure I.24 : L'état de surface présentant une usure par corrosion.

I.4.2.4 Usure par fatigue

La détérioration des surfaces par fatigue de contact (Figure I.25a) se manifeste lorsque les couches superficielles sont soumises à des contraintes répétées ou alternées qui conduisent à l'amorçage des fissures. Ces sollicitations peuvent être d'origine mécanique ou thermique. Les dégradations apparaissent sous forme des piqûres, fissures, écaillage et s'accompagnent par des modifications structurales (Figure I.25b).

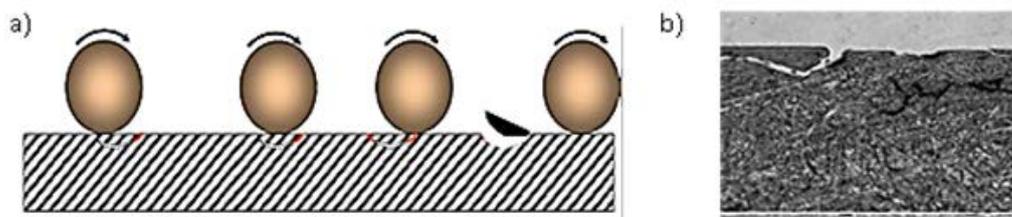


Figure I.25a) : Différents mécanisme d'usure par fatigue [22]

b) Modification structurale du a la fatigue.

I.4.3 Lubrification

La lubrification est l'un des moyens les plus efficaces actuellement connus pour réduire le frottement et contrôler l'usure. Cette technique consiste à créer un film mince de liquide, gaz ou solide entre deux surfaces pour faciliter le mouvement, en réduisant le minimum d'énergie et permettant de prévenir les endommagements possible [23]. Or ce film joue un rôle essentielle dans la séparation des aspérités des surfaces en contact facilitant ainsi le

mouvement en réduisant les frottements ce qui permet d'éviter la détérioration des couches superficielles et d'augmenter la durée de vie des mécanismes. Ainsi c'est en fonction de l'importance de cette rugosité que vont être définis les régimes de lubrification qui sont en nombre de trois.

Généralement pour caractériser le régime de lubrification on utilise le rapport Λ définie par la relation suivante [24].

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sigma}$$

h_{\min} : hauteur minimale du film au centre du contact

σ : écart type de la rugosité des deux surfaces en contact.

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

- Si $\Lambda > 3$, les effets de la rugosité sur le film ne sont pas importants, les surfaces sont totalement séparées donc on se positionne dans le cas d'une lubrification à film épais. Dans ce cas les deux surfaces sont complètement séparées par le film lubrifiant.
- Si $1.5 < \Lambda < 3$, les rugosités commencent à devenir non négligeables, dans ce cas les surfaces sont parallèles, le lubrifiant est introduit sous pression pour assurer la portance et pouvoir séparer les surfaces. Dans ce régime la charge est supportée en même temps par le film lubrifiant et les aspérités en contact.
- Si $\Lambda < 1.5$, les aspérités interagissent les unes avec les autres, le contact métallique est sévère, alors il s'agit d'un régime de lubrification limite. Dans ces conditions de fonctionnement la charge est supportée entièrement par les aspérités des solides en contact, donc le film de lubrifiant est ultimes mince d'où l'appariation de frottement et l'usure des surfaces (Figure I.26).

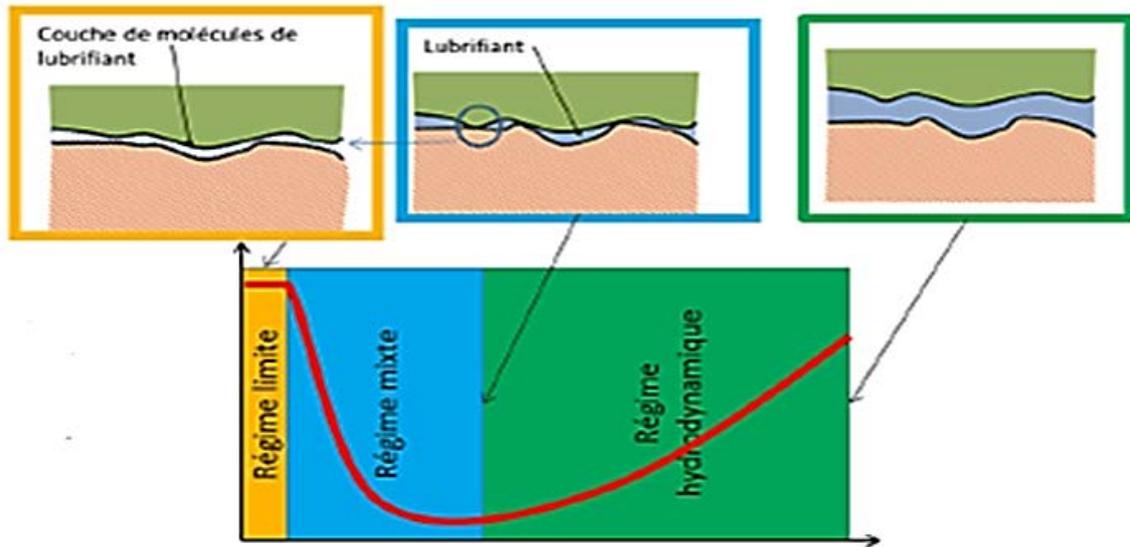


Figure I.26 : Les différents régimes de lubrification [15]

I.4.4 Rugosité

La confusion est souvent faite entre le degré de propreté et la rugosité d'une surface, il importante de rappeler que ces deux notions sont différentes et totalement indépendantes l'une de l'autre.

- la propreté est une caractéristique chimique.
- la rugosité est une caractéristique physique.

La rugosité peut être considérée comme un élément complémentaire du degré de soins (état de propreté) ou comme l'élément essentiel de contrôle, suivant la nature des traitements ou revêtements postérieurs [25].

I.4.4.1 Définition

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils et à la matière (Figure I.27) [26].

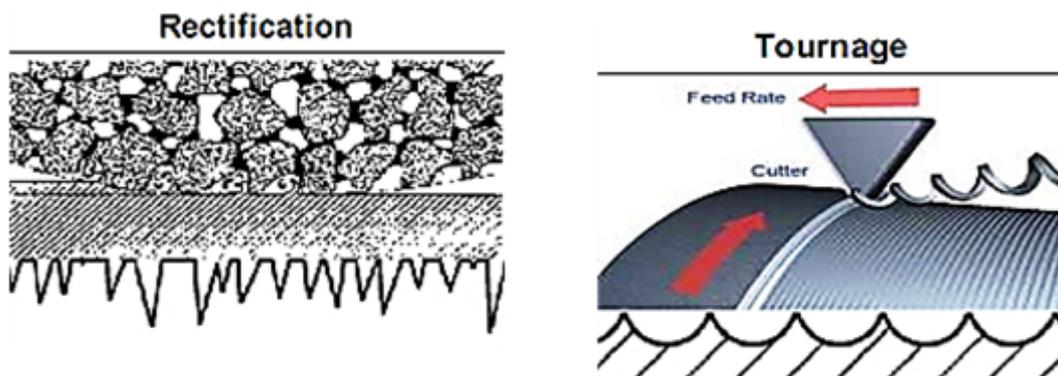


Figure I.27 Les types de surface selon le procédé de mise en forme [27].

La rugosité est le résultat de la modification micro-géométrique d'une surface, provoquée par le bombardement intensif de cette surface par des projectiles (voir rubrique définitions). Apparaissent alors:

- Des aspérités appelées "Pics"
- Des cavités appelées "Creux"

Sur une coupe perpendiculaire à la surface traitée, les pics et les creux se répartissent également de part et d'autre d'une "ligne centrale" (moyenne algébrique) appelée aussi "ligne moyenne". La "ligne enveloppe" est celle qui réunit entre eux les sommets des pics et les fonds des creux. La "ligne enveloppée" prend en compte la totalité des longueurs créées par la succession des pics et des creux. Elle est importante puisqu'elle génère la surface augmentée dont l'adhérence sera fonction [28].

I.4.4.2 Principaux paramètres de la rugosité

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité mais en pratique dans un profil et sur une longueur considérée seuls trois d'entre eux sont retenus:

- **"Ra"**: écart moyen, c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et Les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale. On admet couramment Que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité.
- **"Rt"**: écart total, c'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux.
- **"Rz"**: régularité, c'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 longueurs [28].

I.4.4.3 Mesure de la rugosité

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne sont pas suffisantes pour distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un rugosimètre qui détermine de manière sûre et précise un certain nombre de paramètres de rugosité (Ra, Rz...). Parmi les applications industrielles nécessitant l'utilisation d'un rugosimètre on peut citer les domaines suivants [29].

- **Mécanique:** l'optimisation de la rugosité permet un meilleur ancrage mécanique, notamment au sein de dispositifs où les forces de friction jouent un rôle fonctionnel prépondérant (ex: cônes morses).

- **Qualité:** l'utilisation d'un rugosimètre permet le contrôle de la qualité de finition en bout de chaîne de production permettant de détecter et de corriger d'éventuels problèmes survenus durant l'usinage.
- **Recherche:** la mesure de la rugosité permet d'évaluer la qualité d'un nouvel enduit ou procédé de traitement de surface [28].

I.4.4.4 Le choix des critères

Pour un revêtement anticorrosion par exemple, la classe de la rugosité à obtenir sera à définir en fonction de 3 critères:

- La nature du matériau à projeter.
- Le système de projection envisagé, ou bien le procédé d'application.
- L'épaisseur prévue pour le revêtement qui sera appliqué. (La valeur "Rt" ne peut être supérieure à la moitié de l'épaisseur). La rugosité sera ainsi définie par les 3 paramètres "Ra" - "Rt" - "Rz" auxquels s'ajoutera la notion de profil lié au projectile, "angulaire" ou "sphérique".

Le procédé de projection est réalisé selon le matériau à projeter et la puissance de l'impact qui seront déterminés en fonction des critères de la rugosité à obtenir [28].

I.4.4.5 Principales exigences

Le principal critère est d'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le futur revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue micro-géométrique de la surface qui consiste à créer un maximum d'aspérités, où le futur revêtement à déposer viendra s'ancrer. Par ailleurs, il faut éviter les creux profonds de faible ouverture que le futur dépôt n'atteindra pas ainsi que les vides recouverts qui pourraient constituer des amorces de corrosion en plus des défauts d'adhérence et proscrire les "pics" de hauteur anormale dont les sommets pourraient dépasser, ou diminuer l'épaisseur ponctuelle d'un revêtement mince. En conséquence, lorsque la rugosité finale obtenue aura un aspect où les exigences seront alors essentiellement visuelles et tactiles [28].

I.5 Conclusion

D'après la recherche bibliographique, on peut conclure que la corrosion a un impact considérable sur la durée de vie des structures et par conséquent sur l'économie. Dans ce chapitre un aperçu sur la corrosion a été abordé avec ces différents modes ainsi que la morphologie de la corrosion. D'où pour lutter efficacement contre ce phénomène, il existe diverses méthodes à adapter aux conditions d'exploitation du matériau : revêtements, protection cathodique, systèmes duplex, cependant plusieurs méthode de protection contre la corrosion ont été exposées parmi les quelles la galvanisation en continue. Ce procédé a été décrit avec ces principaux équipements. Par ailleurs, une introduction sur la tribologie a été énoncée avec ces différentes branches (frottement, usure, lubrification). la rugosité de surface et son importance dans les revêtement a été mise en relief. Des travaux d'expérimentation seront développés dans le prochain chapitre.

Chapitre II

Matériaux et techniques expérimentales

Table des matières

II .1 Introduction35

II.2 Matériels et méthodes.....35

II.2.1 Caractérisation du matériau.....35

II.2.1.1 Préparation des échantillons35

II.2.1.2 Analyse chimique36

II.2.1.3 Observation microstructurale36

II.2.1.4 Mesure de rugosité36

II.3 Réalisation des essais37

II.3.1 Test Tribologique37

II.3.1.1 Présentation du dispositif37

II.3.1.2 Réalisation des essais tribologiques38

II.3.2 Essai de corrosion électrochimique39

II.4 Conclusion41

II .1 Introduction

Il a été abordé dans la bibliographie que le phénomène de corrosion a des conséquences fâcheuses sur la sécurité, l'économie ainsi que sur l'environnement. Il est primordial de comprendre le mécanisme de corrosion afin d'entreprendre des solutions adéquates pour prévenir son apparition. Par ailleurs, la tribologie qui regroupe les phénomènes de frottement, usure et lubrification a un impact sur le comportement des surfaces en service. Ce chapitre a été consacré à la description des dispositifs et moyens expérimentaux utilisés lors de la caractérisation des échantillons. Par ailleurs, des équipements destinés aux essais de corrosion et tribologie seront présentés.

II.2 Matériels et méthodes

II.2.1 Caractérisation du matériau

II.2.1.1 Préparation des échantillons

La préparation d'échantillon destiné à la détermination de la composition chimique ainsi que l'observation au microscope doivent être préparée selon la norme ISO 14284 :2002. Les échantillons ont été découpés sur une tronçonneuse type MECATOME T300 (Figure II.3a). La préparation de la surface consiste à réaliser un polissage au moyen des papiers abrasifs de granulométrie 400 à 4000, on utilisant une polisseuse (figure II .3b) suivi d'un polissage fin au moyen d'une pate diamantée de 0,01 μm , jusqu'à l'obtention de l'aspect miroir. Finalement, les échantillons (figure II .3c) sont nettoyés par l'acétone puis séchées à l'air.



Figure II.3 a) : Tronçonneuse
MECATOME T300

b) : Polisseuse

c) : échantillons après

II.2.1.2 Analyse chimique

Le matériau utilisé est un acier industriel « Hypo-Sandelin », la teneur de chaque élément est indiquée sur le tableau 1.

Tableau 1 : Composition chimique du matériau

Eléments	C	Si	Mn	Al	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Mo	Sn
%	0,07	0,03	0,35	0,082	0,006	0,0012	0,033	0,009	0,0016	0,002	0,005	0,001

II.2.1.3 Observation microstructurale

L'observation microstructurale a été réalisée sur un microscope optique (Figure II.2). Les échantillons ont été polis en suivant les procédures métallographiques classiques ont été observés avec différents grossissement avant et après les différents essais (tribologique, corrosion).



Figure II.2 : Microscope optique

II.2.1.4 Mesure de rugosité

La rugosité est l'une des caractéristiques de l'état de surface, elle influe de manière significative sur la qualité de surface. Les mesures des rugosités ont été exécutées par un rugosimètre modèle Mitutoyo Surf test SJ-210 indiqué sur la figure II.4, sur chaque échantillon deux mesures ont été effectuées et les valeurs moyennes.



Figure II.4 : Rugosimètre Mitutoyo Surf test SJ-210

II.3 Réalisation des essais

II.3.1 Test Tribologique

II.3.1.1 Présentation du dispositif

Les essais de frottement ont été réalisés sur un tribomètre de type Bille-Disque et Pion-Disque « modèle TRB6-S-DE-0000, Marque CSM Instrument » dans laboratoire d'ENSMM-Annaba (figure II.5) et dont les caractéristiques sont indiquées sur le tableau II.2. Il est destiné à étudier la tenue à l'usure des surfaces soumis aux frottements, ce dispositif possède deux mouvements possibles, un mouvement alternatif et un mouvement de rotation (figure II.6). Le bras supérieur (porte-bille) peut être motorisé par un système de positionnement vertical et un système sur tribomètre la force de frottement dynamique et le coefficient de frottement instantané ont été mesurés en fonction de la durée des tests [24]. Les propriétés tribologiques d'usure (mouvement rotatif) pour les différents échantillons ont été évaluées sur le système TRB6-S-DE-0000 à l'air libre, avec une température de 25-30 °C sans lubrifiant. La bille d'acier 100C6 dont les caractéristiques sont : diamètre de 6 mm, dureté 832 Hv a été choisie comme antagoniste pour éviter des réactions chimiques supplémentaires.

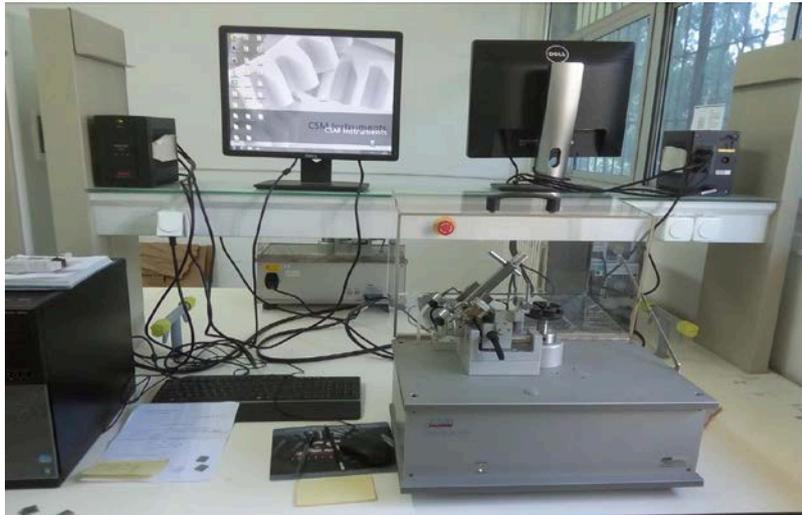


Figure II.5 : tribomètre de type TRB6-S-DE-0000.

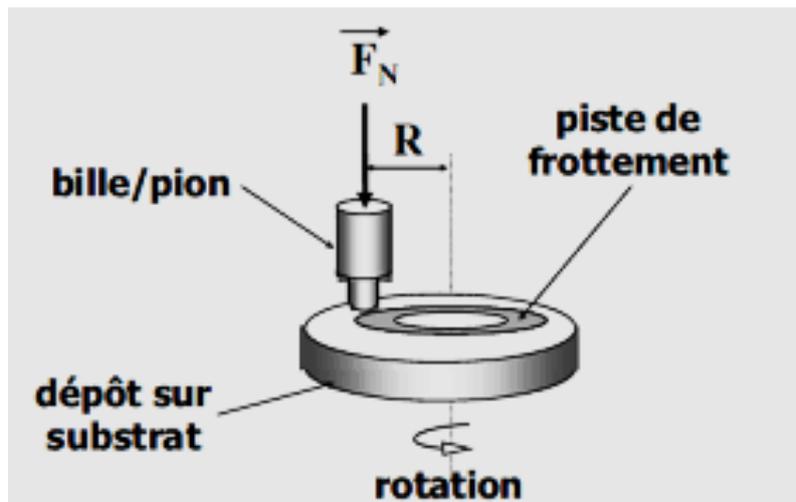


Figure II.6 : Schéma de principe des analyses.

II.3.1.2 Réalisation des essais tribologiques

Les essais tribologiques ont été effectués sur quatre échantillons dont les épaisseurs sont respectivement (0.57, 0.75, 1, 1.45) mm et qui se sont déroulés dans les conditions suivantes :

Tableau 3 : Conditions de déroulement des essais

Acquisition	<ul style="list-style-type: none"> • Rayon: 1N : [6-7,70] mm. 3N: [4-5] mm. 5N: 2mm. • Vitesse linéaire : 3,00 [cm/s]. • Force normale : 1.00 ,3.00 et 5.00 [N]. • Condit. D'arrêt : 50,00 [m]. • Taux d'acquisition : 31,0 [hz].
Partenaire statique	<ul style="list-style-type: none"> • Substrat : 100C6. • Dimension : 6,00 [mm]. • Géométrie : Ball.
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Température : 25,00 Oc. • Atmosphère : Air. • - Humidité : 50,00 [%].

Après les essais les coefficients de frottements ont été mesurés pour chaque échantillon, les résultats sont enregistrés sur le tableau II.4. Par ailleurs, la morphologie de chaque trace d'usure a été observée par microscopie optique (MO).

II.3.2 Essai de corrosion électrochimique

Les appareillages qui permettent d'étudier les processus électrochimiques ont une importance primordiale puisqu'elles sont capables de contrôler et de mesurer les potentiels et/ou les courants électriques sur une interface électrochimique.

L'essai électrochimique a été réalisé à l'aide d'une chaîne électrochimique (figure II.7) qui comprend les éléments suivants :

- Une unité de traitement informatique dotée d'un logiciel permettant de tracer la courbe de polarisation et de déterminer la vitesse, le courant et le potentiel de corrosion.
- Une cellule d'électrolyse a trois électrodes reliées à un potentiostat – galvanostat de type GAMRY INSTRUMENTRY REFERENCY600.

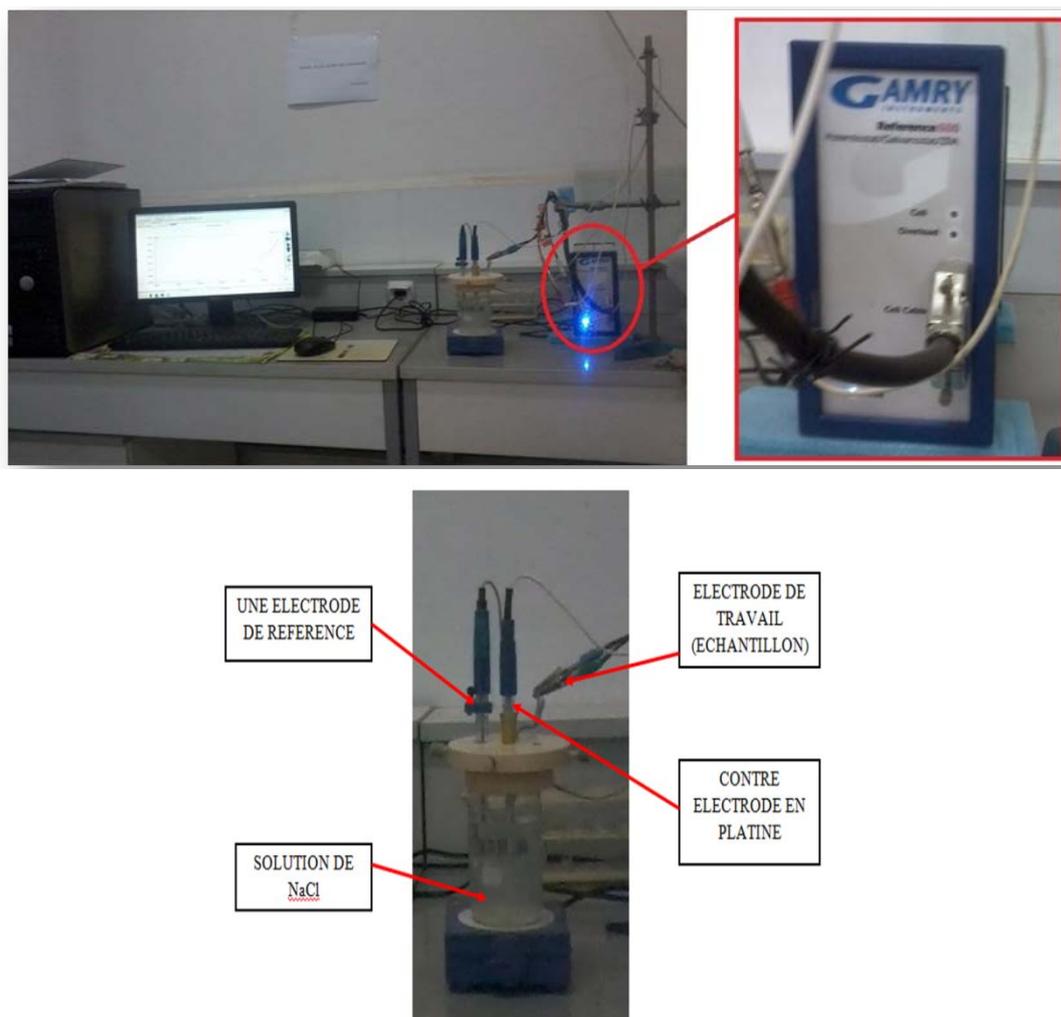


Figure II.7 : La chaîne électrochimique GAMRY.

Le travail a été effectué sur une cellule électrochimique à trois électrodes (Electrode de travail, électrode de référence et contre électrode) [39]. Les échantillons au nombre de dix (figure II.8) ont été préparés pour ces essais, chaque échantillon a été en placé dans un milieu de chlorure de sodium (solution de NaCl à 3,5%), non aéré avec une agitation de 500 tours / minute, un potentiel imposé entre l'électrode de travail et l'électrode de référence (ECS) variant entre -1v (potentiel de départ) et +1,6 v (potentiel final) et une vitesse de balayage en tension de l'ordre de 5 mV / S a été employé pour la réalisation de ces expériences. La cellule électrochimique à double paroi est maintenue par l'intermédiaire d'un bain thermostaté, à une température constante de (37°C).



Figure II.8 : échantillons avant l'essai de corrosion.

II.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux différents équipements utilisés pour l'expérimentation où tous les équipements qui ont servi durant le travail expérimental ont été exposés ainsi que les différents essais réalisés (tribologie et corrosion électrochimique). Dans le chapitre suivant les résultats obtenus pour les essais effectués seront interprétés.

Chapitre III

Résultats et discussions

Table des matières

III.1. Analyse du substrat et du revêtement galvanisé	43
III.1.1. Analyse métallographique du substrat.....	43
III.1.2. Analyse métallographique du revêtement galvanisé.....	44
III.1.3. Mesure de la taille des grains	45
III.2. Mesure de la Rugosité	46
III.3. Propriétés tribologiques du revêtement galvanisé	47
III.3.1 : Variation du coefficient de frottement.....	48
III.3.2 : Variation de largeur de l’empreinte d’usure.....	51
III.4. Observation de l’état de surface des empreintes d’usure	52
III.5. Etude électrochimique du revêtement galvanisé	59
III.5.1 Courbes de polarisation des deux aciers galvanisés dans NaCl à 10 g/l.....	59
III.5.2 Spectroscopie d’impédances électrochimiques EIS 10 g/l NaCl.....	61
III.5.3 Courbes de polarisation des deux aciers galvanisés dans NaCl à 30 g/l.....	63
III.5.4 spectroscopie d’impédances électrochimiques EIS dans 30 g/l NaC.....	64
III.6. Conclusion	67

III.1. Analyse du substrat et du revêtement galvanisé :

III.1.1. Analyse métallographique du substrat :

Pour l'observation microstructurale, les échantillons ont été polis en suivant les procédures métallographiques classiques et observés avec différents grossissement. La structure initiale révèle une structure à grains ferritiques recristallisés et de perlite (figure III.1.a,b).

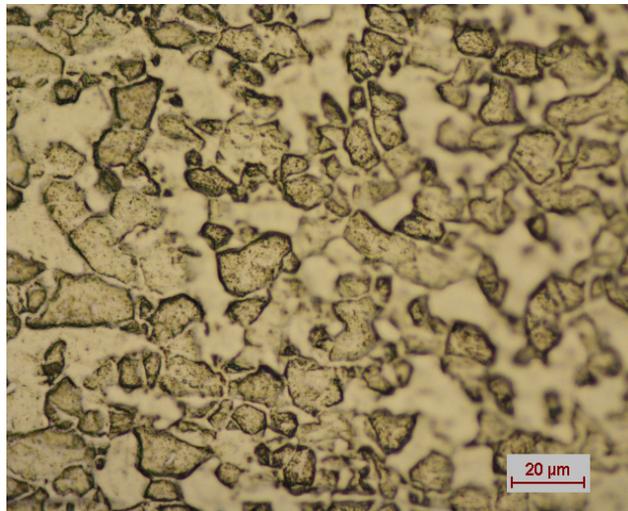


Figure III.1.1.a) : Structure ferrito-perlitique du substrat x500.



Figure III.1.1.b) : structure de substrat x500 3d.

III.1.2. Analyse métallographique du revêtement galvanisé :

Nous avons fait des coupes des échantillons revêtus pour observer l'épaisseur du revêtement. La mesure de l'épaisseur a été faite sur l'image donnée par le microscope optique (figure III.1.2 a,b).

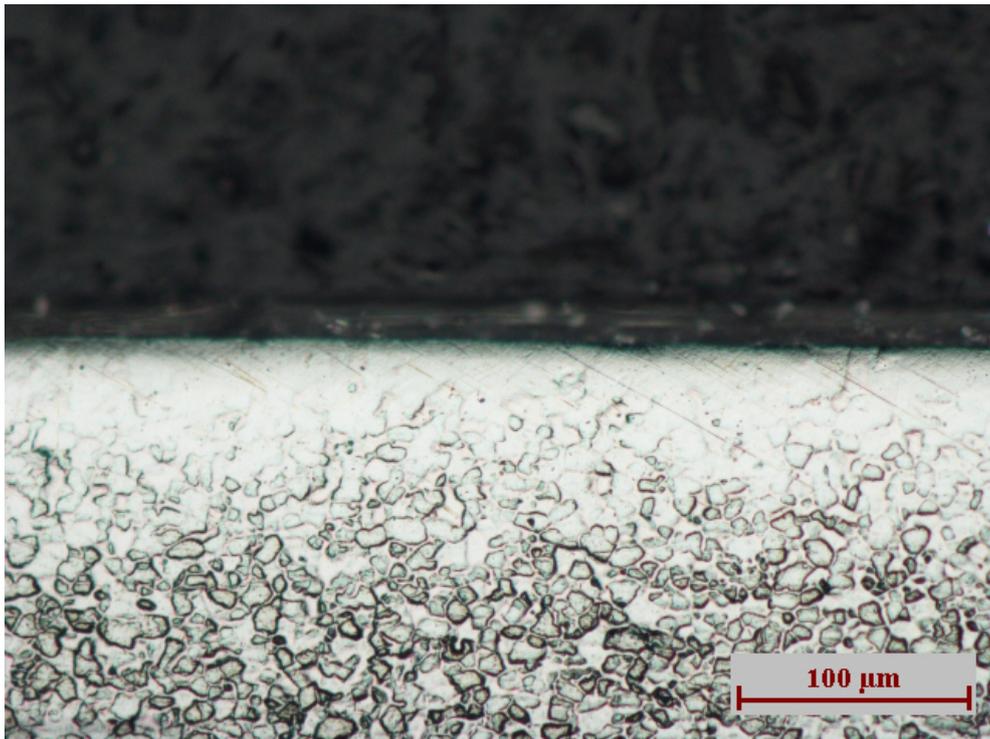


Figure III.1.2.a) : Structure du substrat qui représente le revêtement x200.

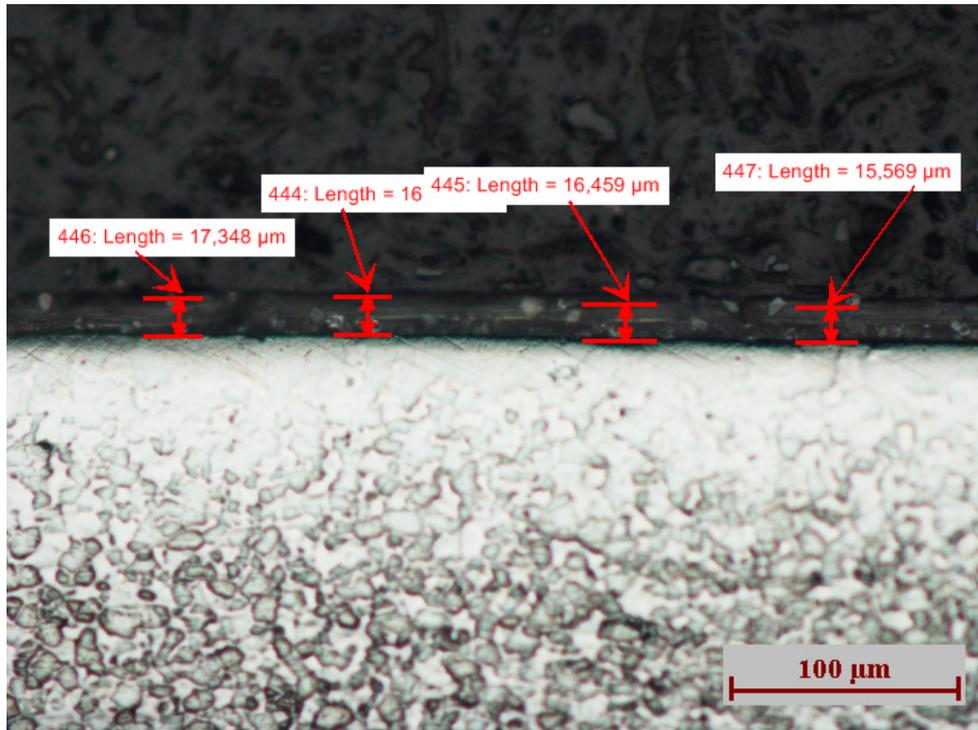


Figure III.1.2.b): le revêtement d'acier (0.57mm) observé par microscope optique x200.

III.1.3.Mesure de la taille des grains :

La taille des grains de ferrite et de perlite a été déterminée par analyse d'image à l'aide d'un logiciel suivant la norme standard **ASTM E1382-97**.

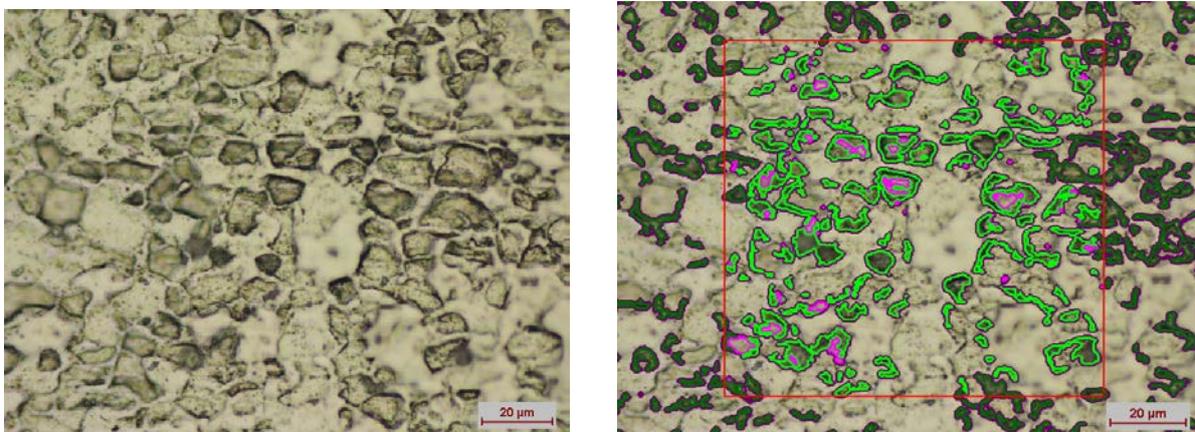


Figure III.1.3: Structure du substrat représentant les grains de ferrite et de perlite.

Statistiques	Ferrite	Pearlite
Grain Size G:	15,8	13,8
Method:	Planimetric	
Standard:	ASTM E1382-97	
Field ID:	15	
Num. of grains:	71	173
Grain Area	2,32	8,88
Fraction:	81 %	19 %
Mean:	2,3 μm^2	8,9 μm^2
Minimum:	0,1 μm^2	0,1 μm^2
Maximum:	22,6 μm^2	69 μm^2
Std. deviation:	4,2 μm^2	13,1 μm^2
95% Conf. inter.:	1 μm^2	2 μm^2
Rel. accuracy:	43 %	22 %

Tableau 1: Mesure statistique de la taille des grains (acier épaisseur 0.57 mm).

III.2. Mesure de la Rugosité

La rugosité a été mesurée en 2D avec un rugosimètre à contact. Dans Les contacts mécaniques pour mettre en évidence la déformation plastique ou pour comprendre les problèmes de frottement, on doit prendre en considération la rugosité.

D'après le tableau III.1 qui donne la moyenne de la rugosité Ra, on remarque que l'échantillon 1 a un coefficient de rugosité Ra plus faible que les autres échantillons. On remarque aussi que l'échantillon 4 a un coefficient de rugosité Ra plus grand que les autres échantillons.

Rugosité	Echantillon							
	1		2		3		4	
Façades	M1	M2	M1	M2	M1	M 2	M 1	M2
Ra moy(μm)	0,43	0,95	0,61	1,02	0,96	1,27	1,44	0,76

Tableau III.1 : Les valeurs mesurées de Ra.

Pour montrer l'aspect de la rugosité du revêtement on a pris par un microscope optique une image 3D de la surface du revêtement (figure III.3).

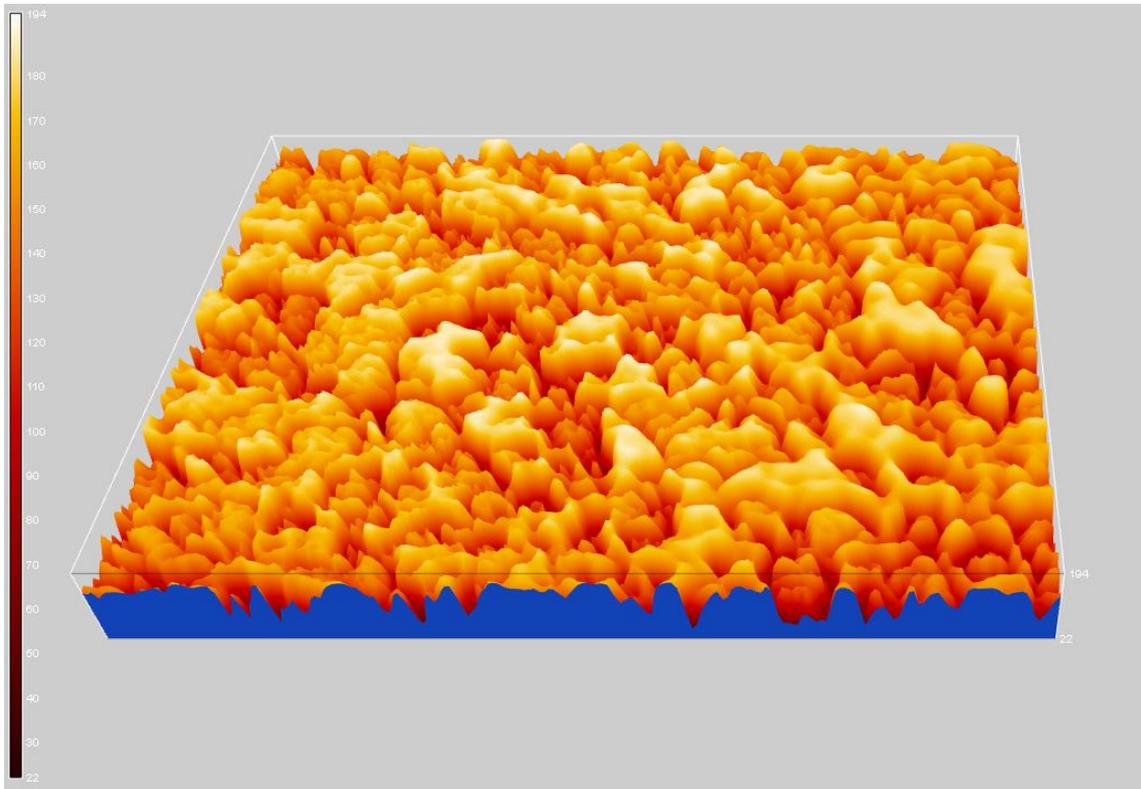


Figure III.2: La rugosité 3D.

III.3. Propriétés tribologiques du revêtement galvanisé

Les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre rotatif bille-plan de CSM. Quatre échantillons dont les épaisseurs sont respectivement (0.57, 0.75, 1, 1.45) mm ont été utilisés pour la réalisation des essais tribologiques qui se sont déroulés dans les conditions suivantes :

Paramètres	Valeurs
Vitesse trs/min	100trs/min
Charge N	1N, 3N et 5N.
Parcours m	500m

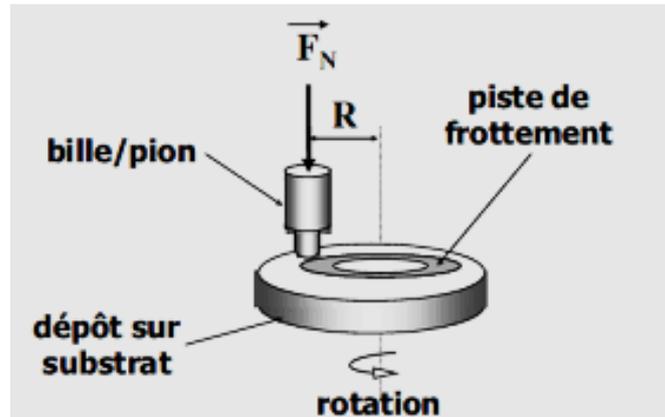


Figure III.3 : Schéma de principe des analyses tribologiques.

III.3.1 : Variation du coefficient de frottement:

Les résultats du coefficient de frottement sont présentés dans le tableau III.2

Acier	1N	3N	5N
Acier1 (0,57mm)	0,175	0,427	0,407
Acier2 (0,75mm)	0,124	0,548	0,431
Acier3 (1,00mm)	0,372	0,455	0,492
Acier4 (1,45mm)	0,27	0,464	0,509

Tableau III.2. Les coefficients de frottement en fonction de la charge appliquée.

La figure III.5 présente des histogrammes de la variation du coefficient en fonction de la charge et l'épaisseur du substrat en acier. On remarque que le coefficient de frottement est proportionnel à la charge c'est-à-dire pour chaque échantillon le coefficient de frottement augmente lorsque la charge appliquée augmente, et on remarque aussi que le coefficient de frottement augmente lorsque l'épaisseur du substrat en acier augmente.

On voit aussi que le coefficient de frottement de l'acier 4 est supérieur à celui des autres aciers, quelle que soit la charge appliquée, parce que l'acier 4 a une rugosité élevée par rapport aux autres aciers (voir tableau III.1). L'observation par microscopie optique montre qu'il y a des sillons d'usure abrasive dans l'acier 4, néanmoins elles n'apparaissent plus dans les autres aciers.

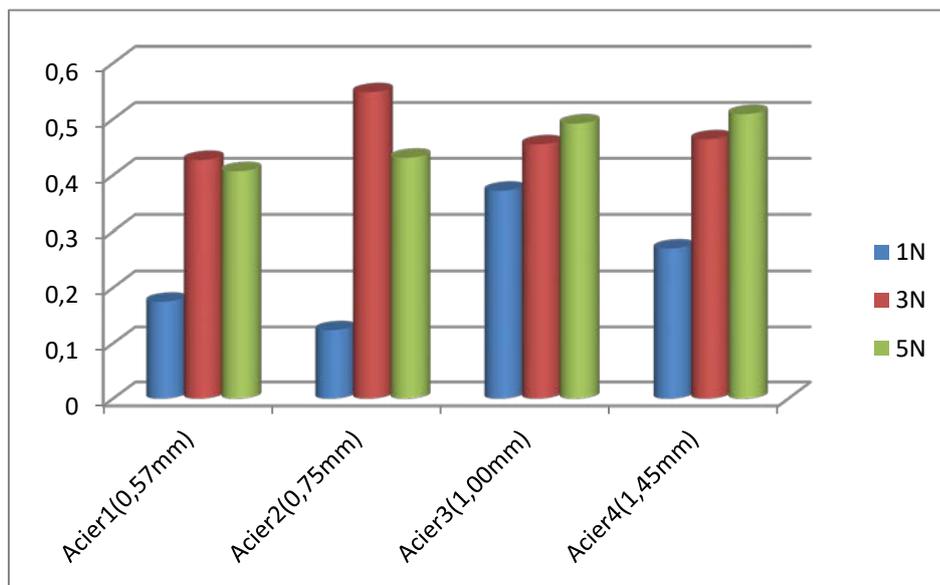
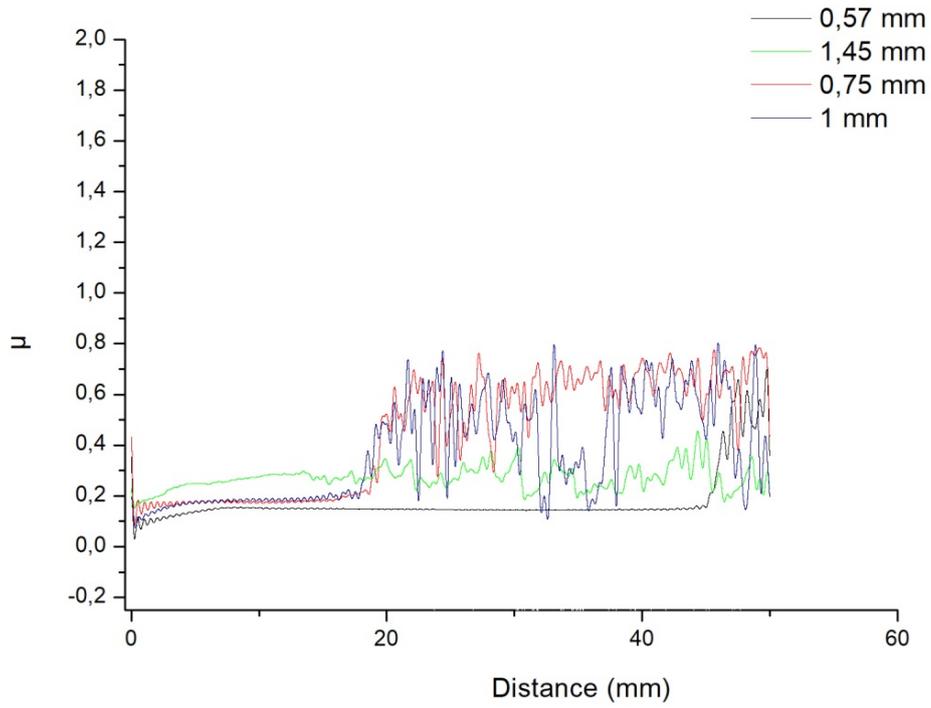


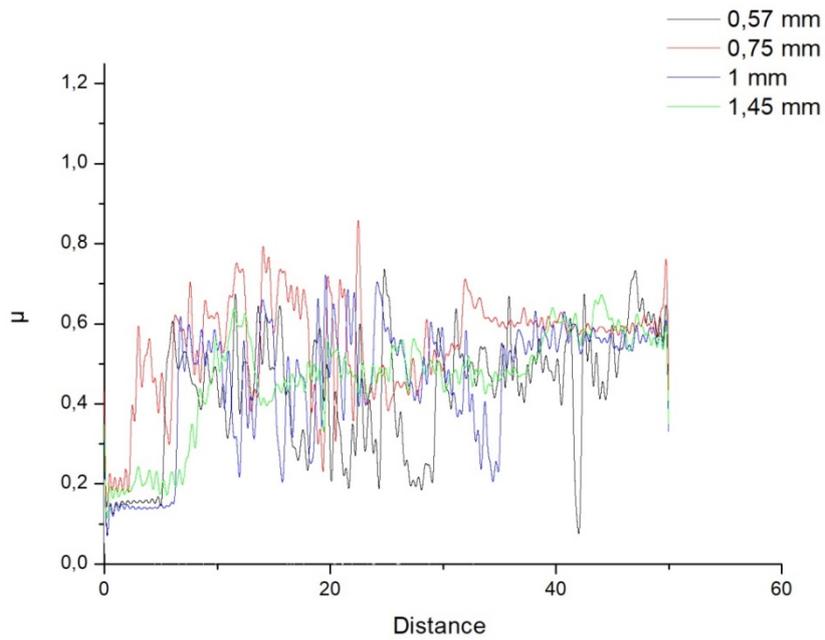
Figure III.5 variation du coefficient de frottement en fonction de la charge.

Les courbes de frottement (figure III.4 a, b, c) montrent trois zones :

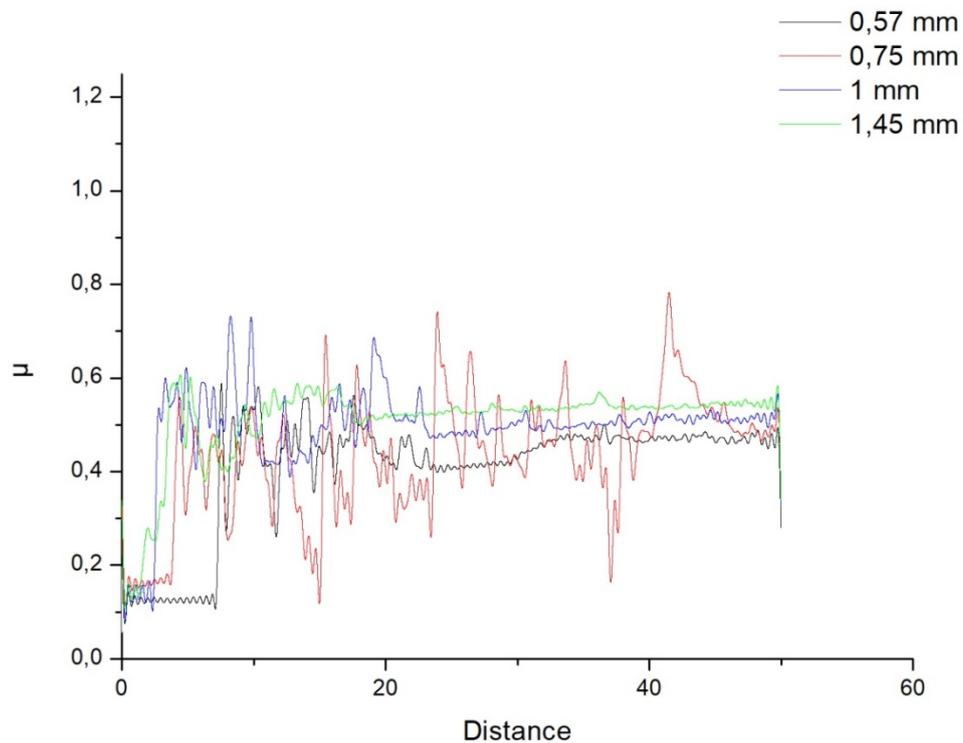
Une zone d'accommodation, une zone de variation du coefficient de frottement, une zone de stabilisation du coefficient de frottement.



a)



b)



c)

Figure III.4 : Courbes d'évolution de coefficient du frottement en fonction de la distance.
Charge 1N, Charge 3N, Charge 5N.

III.3.2 : Variation de largeur de l'empreinte d'usure en fonction de la charge :

Selon le tableau III.3 et la figure III.6 on remarque que la longueur de la trace d'usure est proportionnelle à la charge appliquée, c'est-à-dire pour chaque échantillon la longueur de la trace d'usure augmente lorsque la charge appliquée augmente.

	1N	3N	5N
Acier1 (0.57mm)	169.74	952.341	885.749
Acier2 (0.75mm)	529.073	1209.097	1158.087
Acier3 (1.00mm)	501.403	960.529	1032.734
Acier4 (1.45mm)	515.884	711.854	673.421

Tableau III.3: Variation de largeur de l'empreinte d'usure en fonction de la charge.

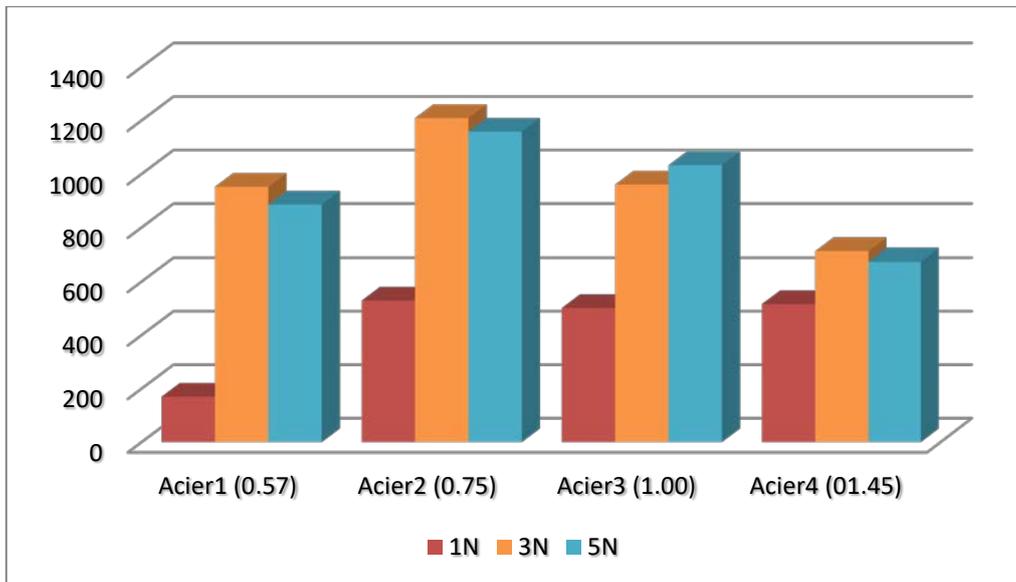


Figure III.6: Variation de largeur de l’empreinte d’usure en fonction de la charge.

III.4. Observation de l’état de surface des empreintes d’usure

Des observations au microscope optique ont été faites sur la surface après l’essai de tribologie de l’échantillon étudié. Les figures (III.7.a) , III.12.b)) montrent cette morphologie. Nous observons des sillons d’usure abrasive orientés dans le sens du parcours. On remarque aussi des zones sombres qui correspondent à un arrachement de matière. Pour connaître plus de détails sur la surface, il serait nécessaire de faire des analyses par EDS.

-Echantillon 1(Ep : 0,57mm) :

- Pour 1N :

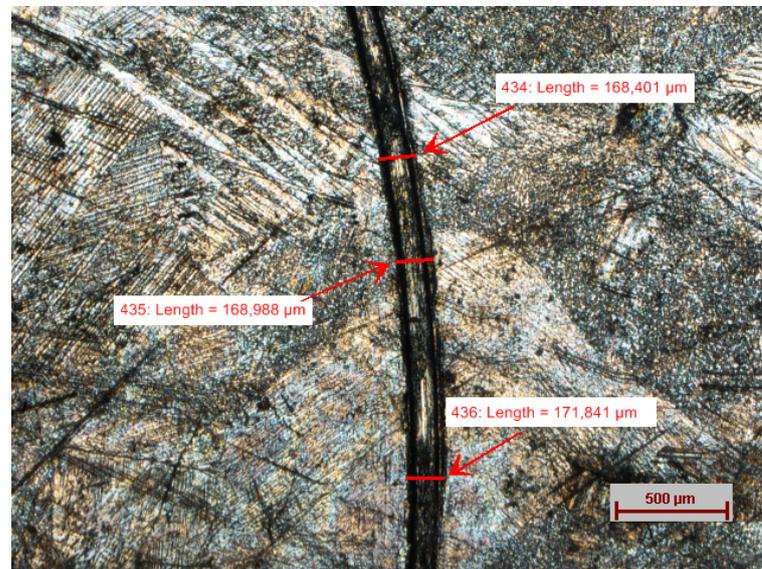


Figure III.7.a) : L'usure de surface observée par microscope optique X25.

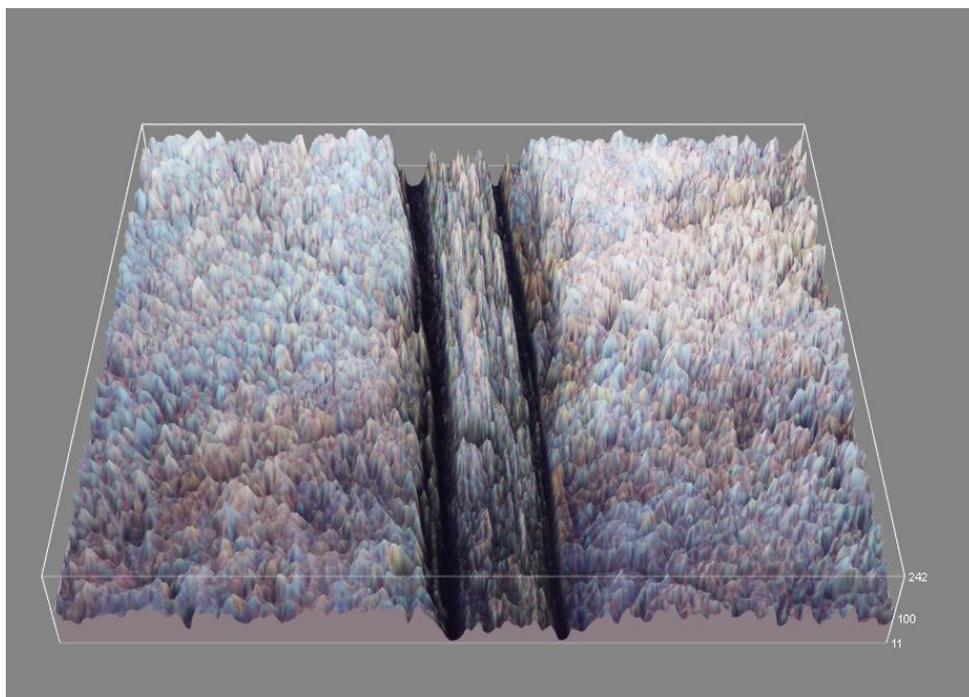


Figure III.7.b) : L'usure de surface observée par microscope optique X100 3D.

- -Pour 3N :

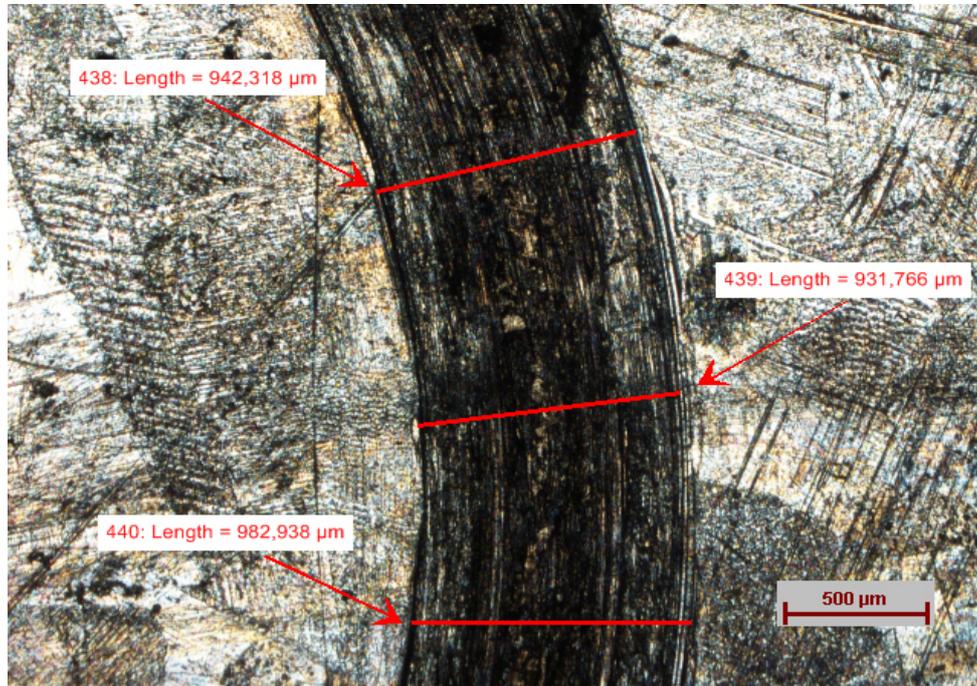


Figure III.8.a) : L'usure de surface observée par microscope optique X25.

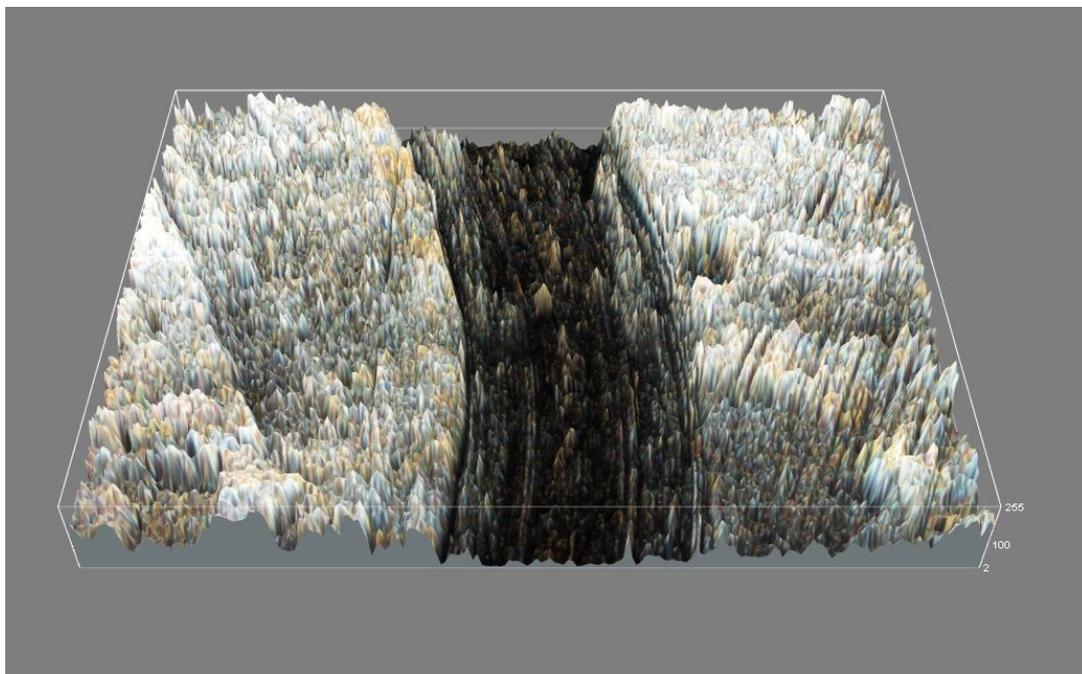


Figure III.8.b) : L'usure de surface observée par microscope optique X25 3D.

- -Pour 5N :

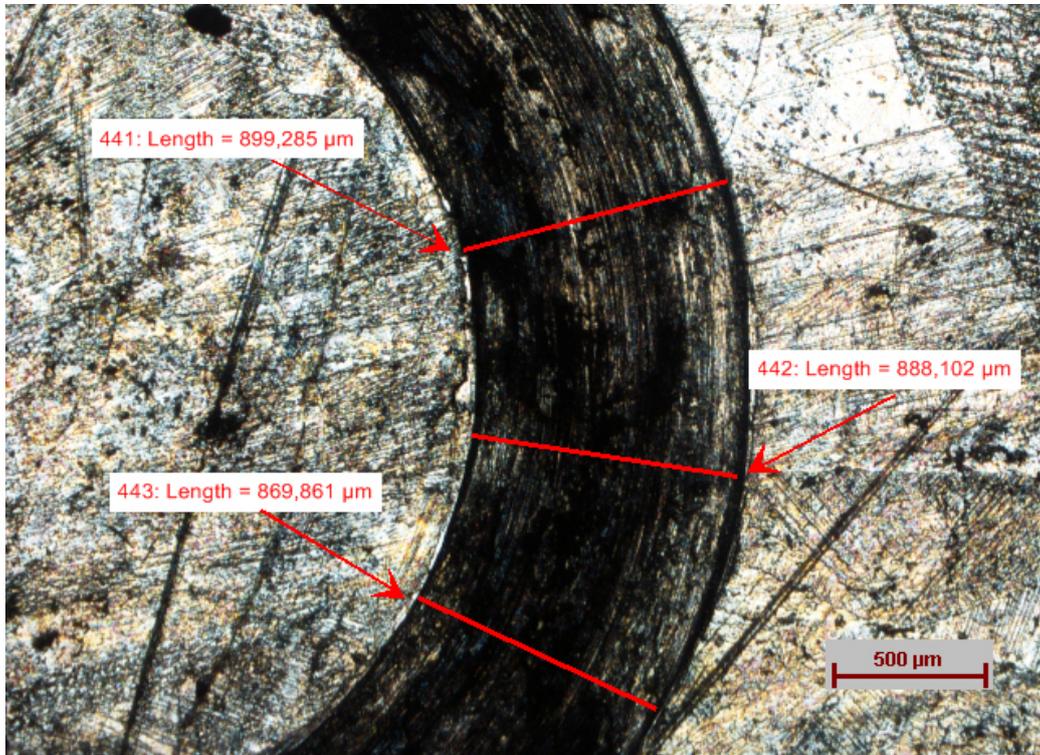


Figure III.9.a) : L'usure de surface observée par microscope optique X25.

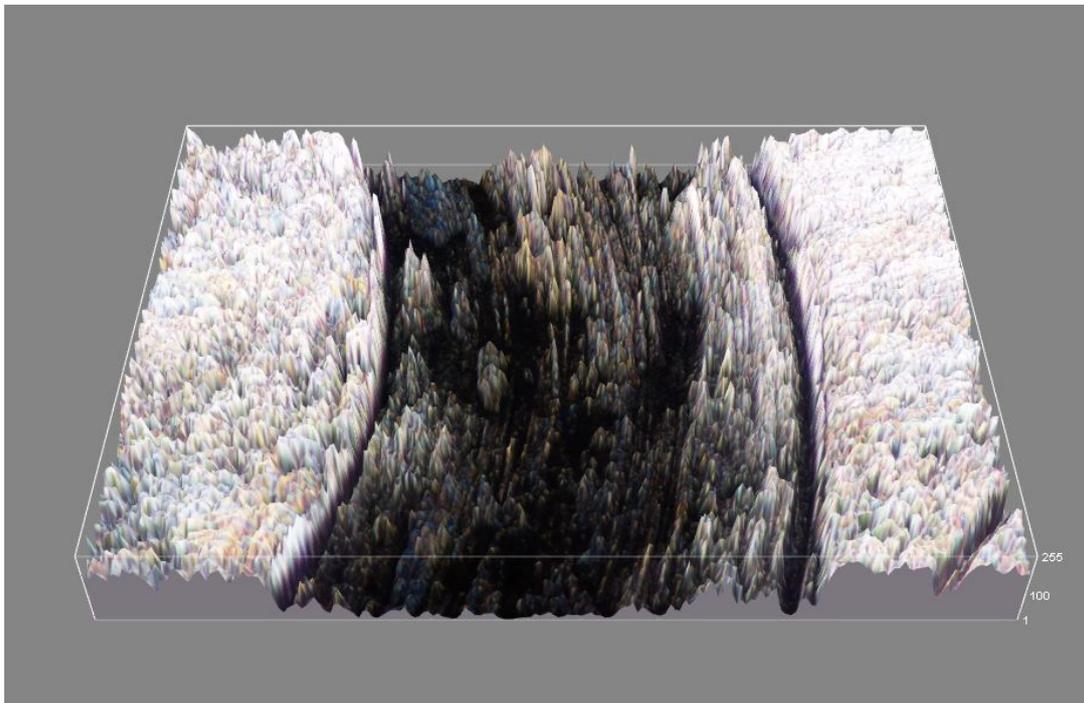


Figure III.9.b) : L'usure de surface observée par microscope optique X50 3D.

- Echantillon 1 (Ep : 0,75mm) :
- -Pour 1N :

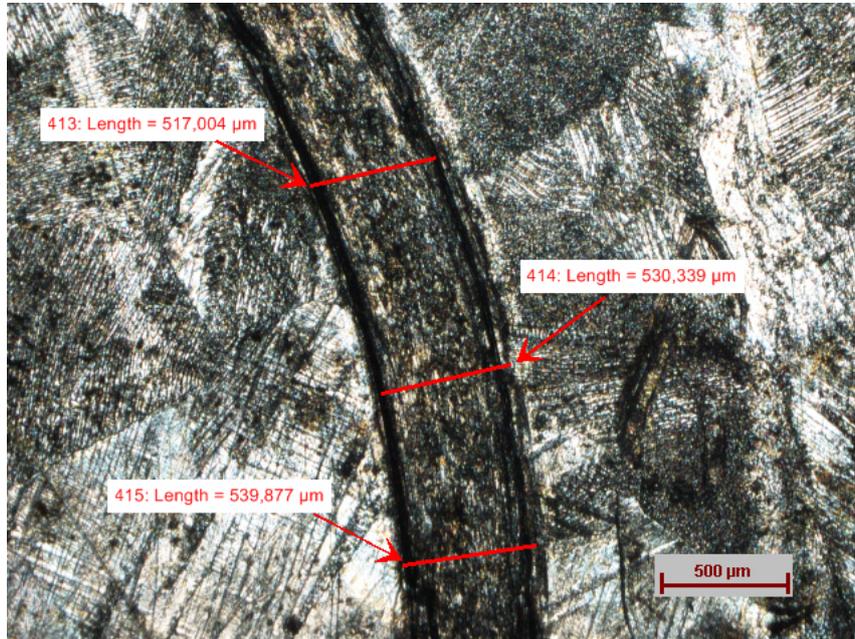


Figure III.10.a) : L'usure de surface observée par microscope optique X25.

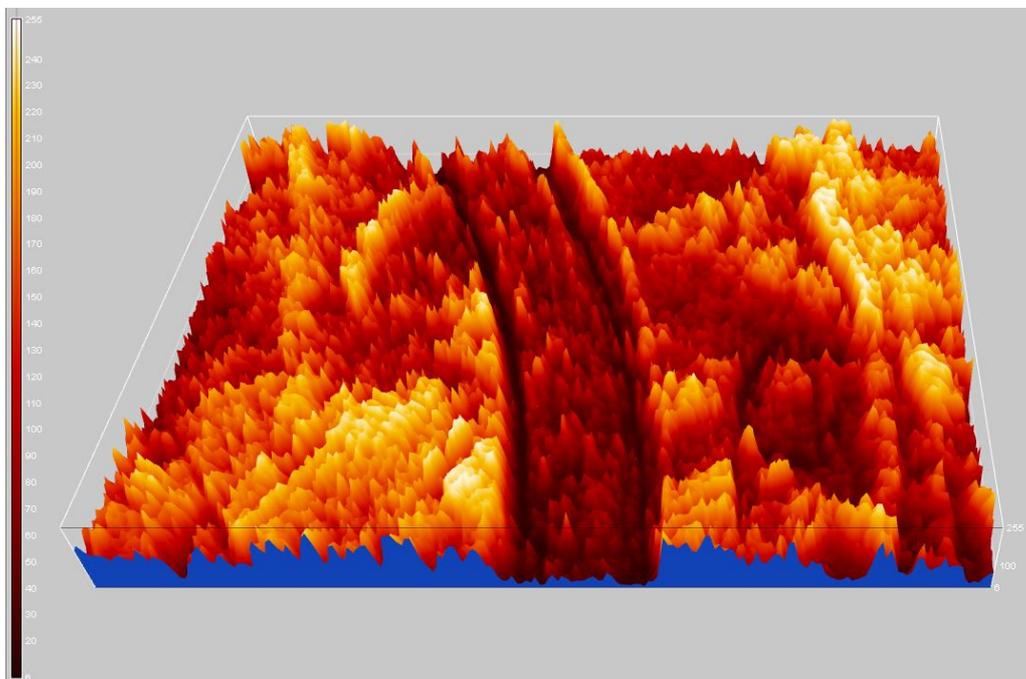


Figure III.10.b) : L'usure de surface observée par microscope optique X25 3D.

- -Pour 3N :

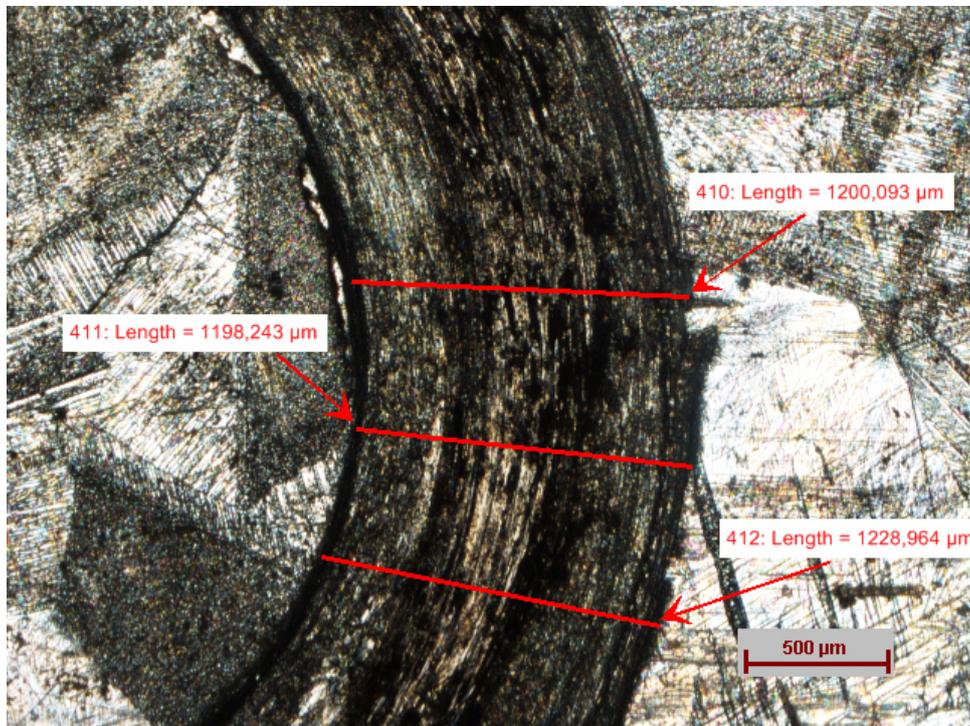


Figure III.11.a) : L'usure de surface observée par microscope optique X25.

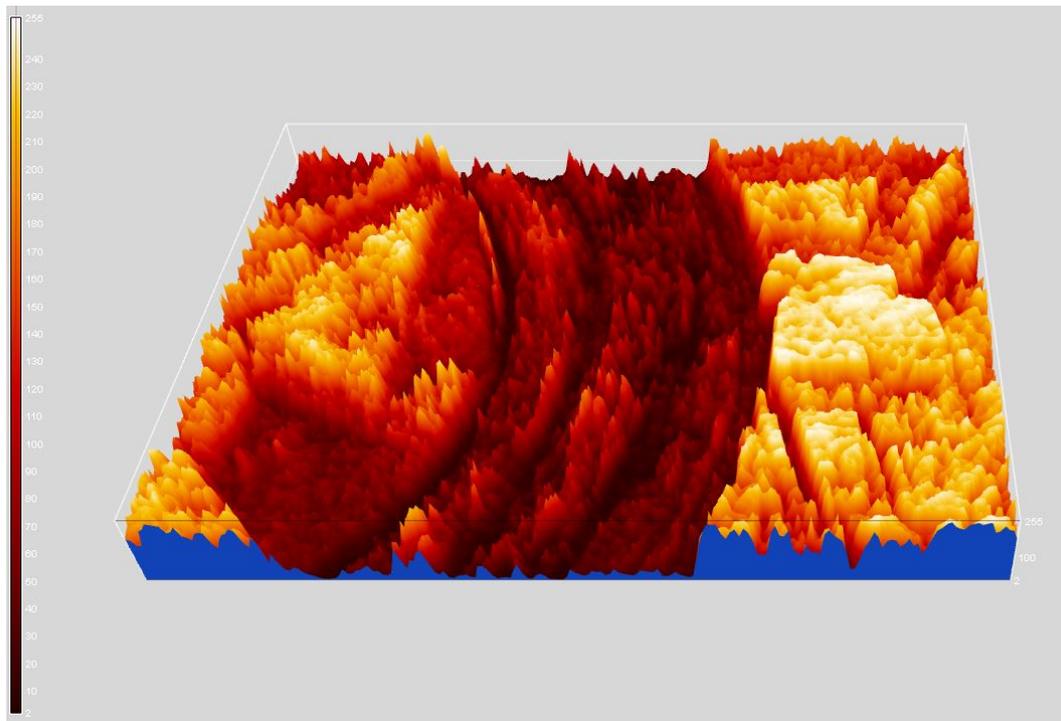


Figure III.11.b) : L'usure de surface observée par microscope optique X25 3D.

- -Pour 5N :

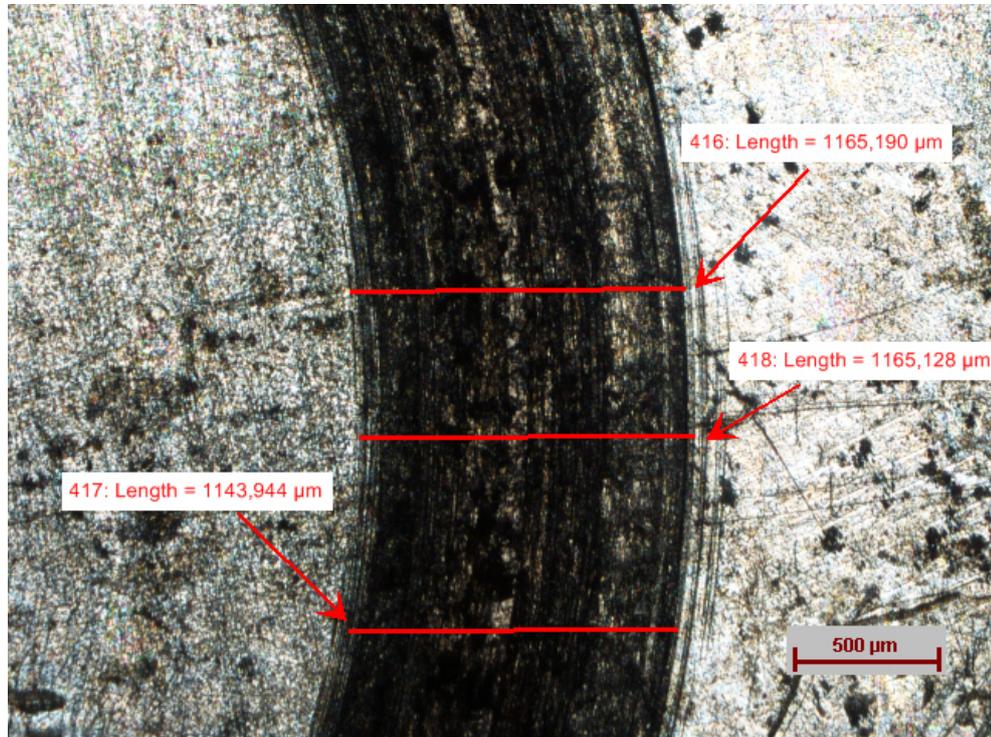


Figure III.12.a) : L'usure de surface observée par microscope optique X25.

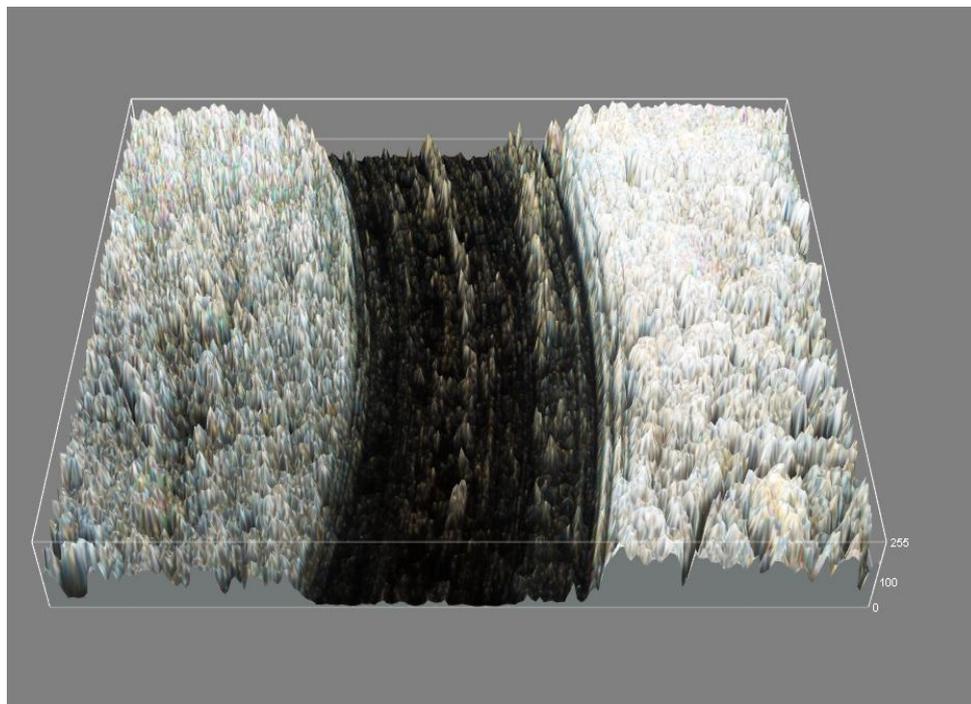


Figure III.12.b) : L'usure de surface observée par microscope optique X25 3D.

III.5. Etude électrochimique du revêtement galvanisé

III.5.1 Courbes de polarisation des deux aciers galvanisés dans NaCl à 10 g/l :

Les tracés de Tafel nous permettent d'accéder directement aux valeurs des densités de courant, comme on peut les déduire à partir de l'équation de Stern et Geary :

$$I_{corr} = \frac{1}{2.3 R_p} \frac{(\beta a \cdot \beta c)}{(\beta a + \beta c)}$$

Dans notre cas, les conditions de travail sont présentées dans le tableau suivant :

Les paramètres	Choix
Equivalent gramme de zinc	32g
Equivalent gramme de fer	28g
Domaine de balayage	-0.5.....2v
Vitesse de balayage	1mv/s
Milieu	Nacl (0.5, 1, 3)
Intervalle	-1500...1000
Surface	1cm ²
Les épaisseurs	1mm ,1.45mm
Temps d'immersion	1h

Tableau III.5.1 : Paramètres de l'essai de corrosion.

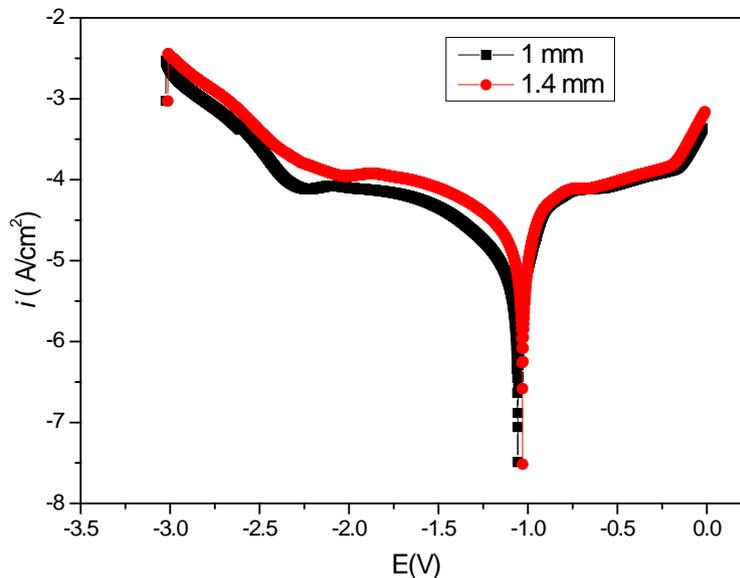


Figure III.5.1 : Courbes de polarisation des deux aciers galvanisés dans 10 g/l NaCl.

L'examen des courbes de polarisations dans 10 g/l NaCl obtenues, montre que les potentiels de corrosion de l'acier galvanisé à épaisseur de 1.45 mm, tendent vers des valeurs plus cathodiques comparées au potentiel de l'électrode à épaisseur de 1 mm. Les branches cathodiques des courbes de polarisation dans les deux cas montrent un plateau de diffusion du courant, l'épaississement du revêtement de Zn de 1mm à 1.45 mm ne semble pas conduire à une diminution du courant cathodique ce qui signifie que le processus cathodique est représenté par le processus de diffusion de l'oxygène. On peut également observer la même allure des tracés des branches anodique et cathodique avec un domaine assez grand de passivation anodique. Les densités de courant ont été déterminées par interaction des tangentes des courbes anodique et cathodique au niveau du potentiel de corrosion.

D'après les courbes de polarisation tracées dans la figure III.5.1, on déduit les paramètres électrochimiques regroupés dans le tableau III.5.2 :

Tafel	I_{corr} (A/cm ²)	β_a (v/dec)	β_c (v/dec)	E_{corr} (V)	V_{corr} (mm/année)	R_p (Ω)
Acier1 (1mm)	$4,612 \cdot 10^{-6}$	0,2883	0,159	-1,057	0,053	9076,6
Acier2 (1,45mm)	$3,947 \cdot 10^{-5}$	23,471	0,342	-1,0302	0,458	3711,2

III.5.2 Spectroscopie d'impédances électrochimiques EIS 10 g/l NaCl :

Des mesures d'impédances ont été réalisées dans les mêmes conditions pour deux épaisseurs d'acier revêtu de zinc.

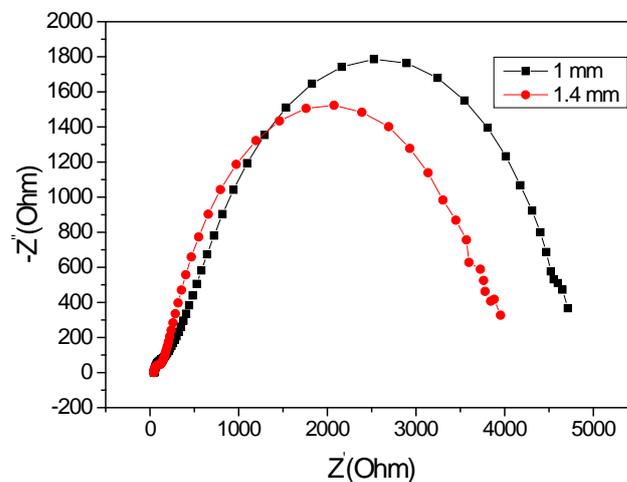


Figure III.5.2 : Diagrammes d'impédances électrochimiques représentation de Nyquist des deux acier galvanisés dans 10 g/l NaCl .

Les diagrammes SIE obtenus sur les deux aciers dans NaCl à 10g/l ont montré une boucle capacitive avec au moins la présence de deux constantes de temps, la première due à la double couche électrique qui se forme dès l'immersion de l'acier revêtu, et la seconde

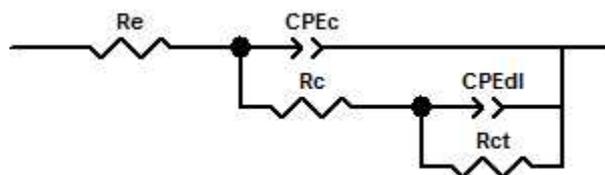
représente le revêtement de Zn à la surface de l'acier. On remarque que la boucle capacitive de l'acier avec 1mm d'épaisseur de revêtement est plus grande comparée à celle à 1.45 mm,

Cela est confirmé par les valeurs de résistance de transfert de charge représentées dans le tableau III.5.2, qui s'explique par soit à la présence de fissuration au sein du revêtement, soit à la non homogénéité de la disposition du revêtement à la surface métallique. Sachant que la couche de zinc anodique fournit une protection même si un petit pourcentage de la surface totale de la couche de zinc est enlevé ou se corrode, le zinc étant anodique par rapport à l'acier.

D'après les diagrammes de Nyquist représentés dans la figure III.5.2, on déduit les paramètres électrochimiques regroupés dans le tableau III.5.3 :

Element	R1	Q1	R2	Q2	R3	χ^2
Acier1 (1mm)	36.165	0.00036289	4925.6	0.00016026	4227.8	0.26351
Acier2 (1,45mm)	31.313	0.00016529	4012.2	0.00091834	3693.1	0.29051

Une interface électrochimique peut être simulée par un circuit électrique avec des éléments passifs tel que des résistances, des capacitances et des inductances. Ainsi le circuit équivalent donnant la réponse de l'interface électrochimique relatif aux deux substrats galvanisés immergé dans NaCl à 10 g/l qui présentent le même comportement électrochimique, est schématisé dans la figure qui suit :



III.5.3 Courbes de polarisation des deux aciers galvanisés dans NaCl à 30 g/l :

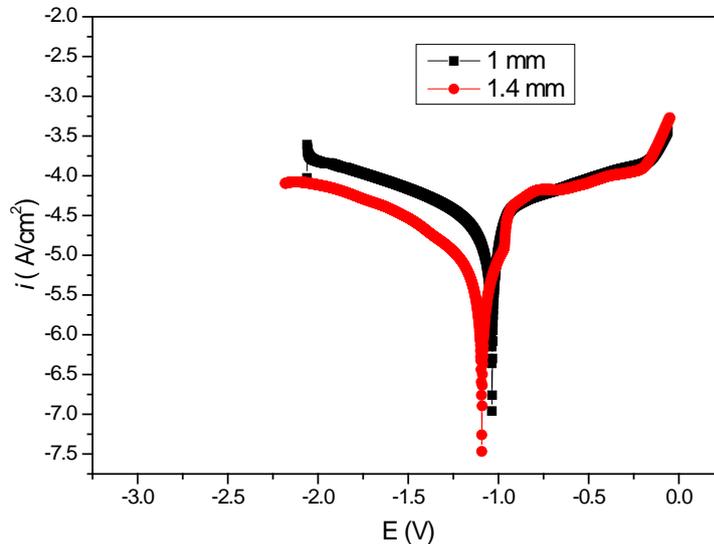


Figure III.5.3 : Courbes de polarisation des deux aciers galvanisés dans 30 g/l NaCl.

Contrairement aux aciers immergés dans 10 g/l NaCl, le comportement électrochimique est opposé. Avec la densité de courant de l'acier à épaisseur de 1.45mm qui diminue comparées à celle de 1mm, pour les branches anodiques stimulant une meilleure protection et un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs plutôt anodique traduisant une bonne couverture de la surface. Les valeurs de la résistance de polarisations représentées dans le tableau III.5.4, confirment la bonne protection de l'acier à 1.45 mm par rapport à celui de 1mm dans 30 g/l NaCl

D'après les courbes de polarisation tracées dans la figure III.5.3, on déduit les paramètres électrochimiques regroupés dans le tableau III.5.4 :

Tafel	I_{corr} (A/cm ²)	β_a (v/dec)	β_c (v/dec)	E_{corr} (V)	V_{corr} (mm/année)	R_p (Ω)
Acier1 (1mm)	8,937.10 ⁻⁵	-2,574	0,571	-1,035	1,038	3573,1
Acier2 (1,45mm)	5,062.10 ⁻⁵	-9,126	1,174	-1,091	0,588	11561

III.5.4 spectroscopie d'impédances électrochimiques EIS dans 30 g/l NaCl :

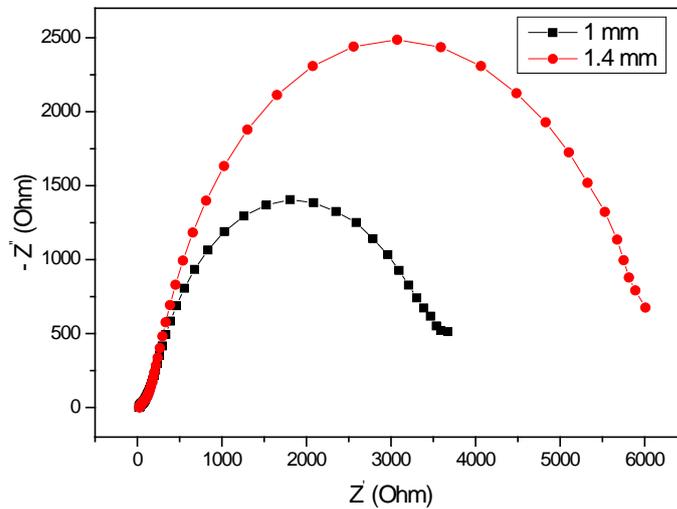


Figure III.5.4 : Diagrammes d'impédances électrochimiques représentation de Nyquist des deux aciers galvanisés dans 30 g/l NaCl.

L'acier revêtu à 1.45mm présente une boucle capacitive de grandeur plus importante comparée à celle d'épaisseur de 1mm, avec une résistance de polarisation égale à 6241 ohm, ce qui traduit le bon recouvrement de la surface de l'acier par la couche de zinc qui protège donc le substrat en acier en formant une barrière au milieu chloruré et en jouant un rôle d'anode sacrificielle.

D'après les diagrammes de Nyquist représentés dans la figure III.5.4, on déduit les paramètres électrochimiques regroupés dans le tableau III.5.5 :

Elément	R1	Q1	R2	Q2	R3	χ^2
Acier1 (1mm)	22.45	0.000171	3951	0.00010366	3837	0.14122
Acier2 (1,45mm)	20.427	0.00094068	6241	0.00018041	5563.7	0.27383

Le circuit équivalent donnant la réponse de l'interface immergée dans 30 g/l de NaCl est schématisé comme suit :

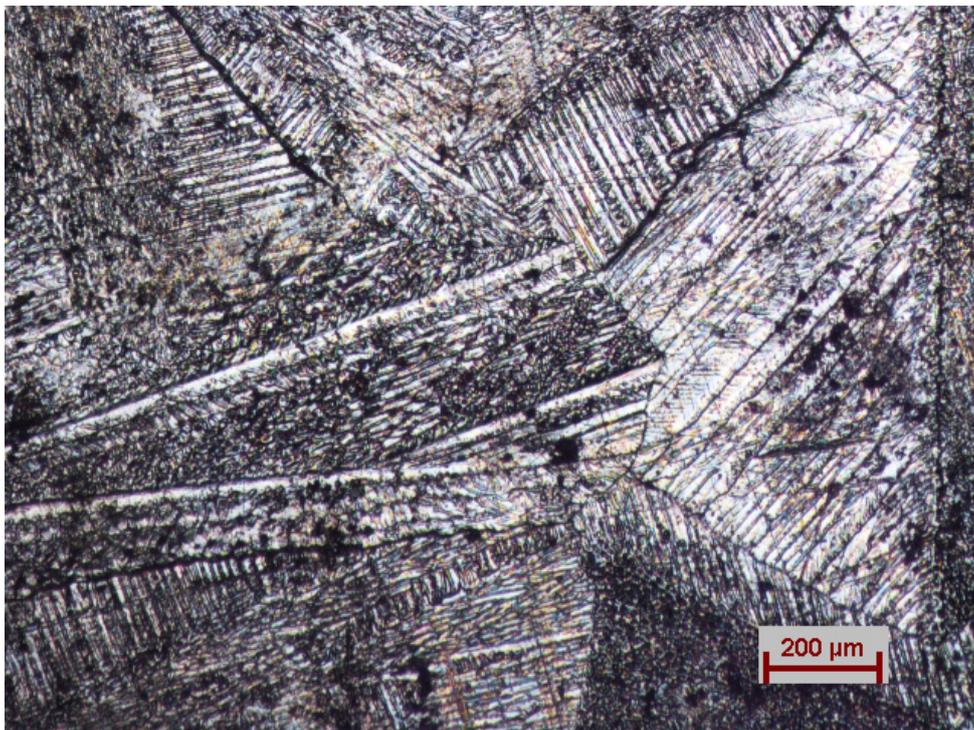
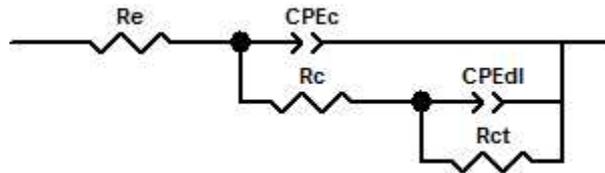


Figure III.5.5 : L'état de surface avant l'essai de corrosion X50.

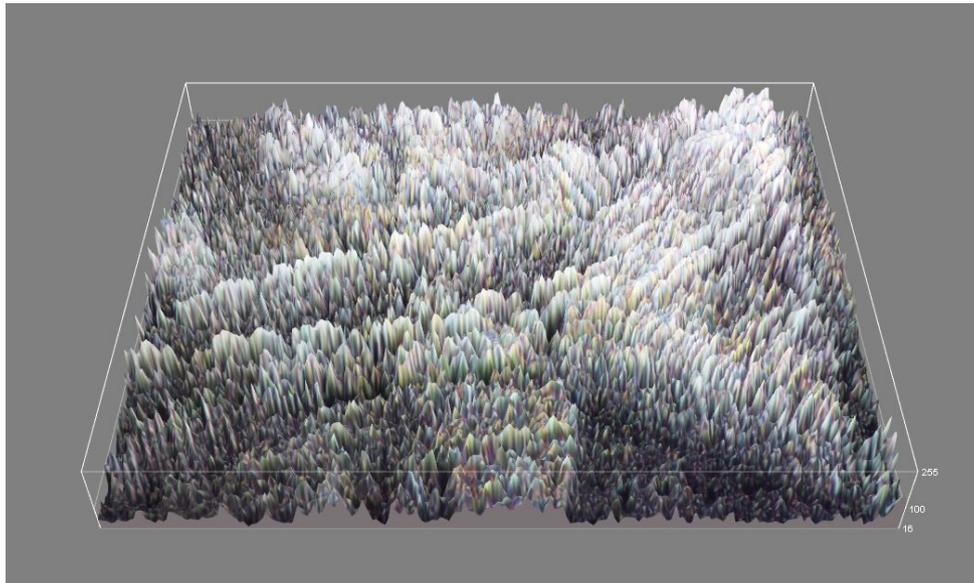


Figure III.5.6: L'état de surface avant l'essai de corrosion X50 3D

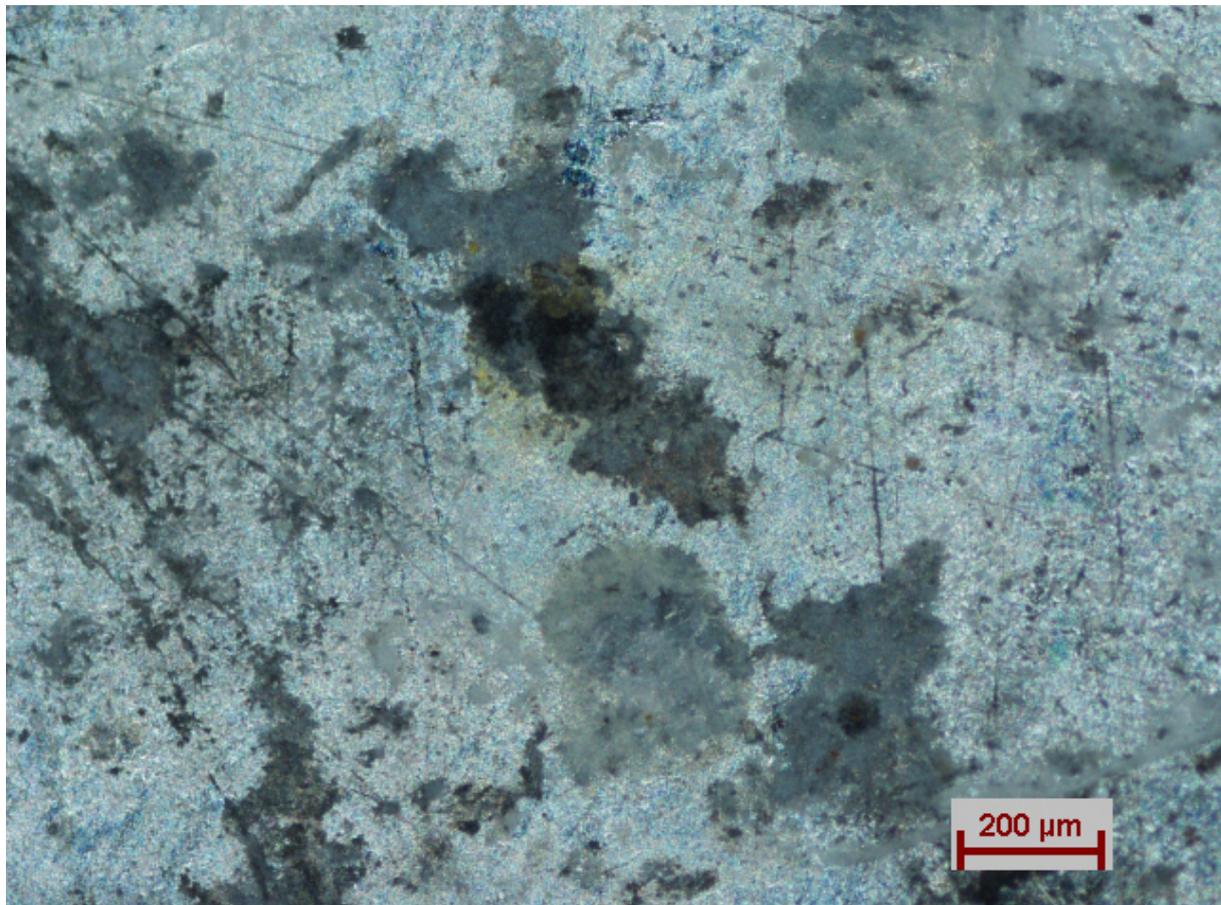


Figure III.5.7: L'état de surface après l'essai de corrosion x50.



Figure III.5.8: L'état de surface après l'essai de corrosion x50 3D.

Conclusion :

Les objectifs généraux de ce travail ont été la caractérisation d'un revêtement de galvanisation industrielle à chaud en continu sous différents aspects (mécanique, tribologique et électrochimique), afin de comparer les résultats obtenus.

Les résultats relatifs aux performances vis-à-vis la rugosité de l'acier montrent que l'aspect topographique de la surface a une influence primordiale sur les autres propriétés telles que la tribologie et la corrosion.

Les résultats enregistrés lors des essais d'usure montrent clairement que les charges et l'épaisseur progressives ont un impact sur l'évolution du coefficient de frottement.

On remarque que le coefficient de frottement et l'usure augmentent avec la charge, ce qui est conforme aux lois de frottement.

Les résultats de corrosion montrent la bonne protection de l'acier à 1.45 mm par rapport à celui de 1mm dans le milieu NaCl .

CONCLUSION GÉNÉRALE

Actuellement, beaucoup de travaux et de nouvelles méthodes ont été développés afin de comprendre le mécanisme de corrosion, et de déterminer les techniques appropriées pour lutter contre ce phénomène. En effet, les couches superficielles des surfaces des pièces réalisées influent considérablement sur le mécanisme de revêtement car l'état de surface contribue à augmenter l'aire de contact entre le substrat et revêtement.

Les travaux de ce mémoire ont été orientés vers l'étude du comportement des tôles galvanisées à la corrosion et aux frottements. Dans ce contexte, notre travail a été mené en s'appuyant sur une recherche bibliographique qui met en évidence, l'impact de la corrosion sur la sécurité des systèmes fonctionnels ainsi que l'influence des frottements sur la tenue à l'usure des surfaces fonctionnelles. Les résultats obtenus dans ce travail expérimental reposent sur des essais qui ont été réalisés sur des échantillons des épaisseurs 0,57. 0,75. 1,00. 1,45(mm).

Toutefois, les conclusions qui peuvent être tirées se résument en ce qui suit :

- L'évolution du coefficient de frottement est proportionnelle à la charge appliquée, quand la charge appliquée augmente le coefficient de frottement augmente.
- L'évolution du coefficient de frottement est proportionnelle à l'épaisseur, quand elle augmente le coefficient de frottement augmente aussi.
- La longueur de trace d'usure est proportionnelle à la charge appliquée, c'est-à-dire la longueur de la trace d'usure augmente lorsque la charge appliquée augmente.
- L'observation par microscopie optique montre des sillons d'usure abrasive orientés dans le sens du parcours et montre aussi des zones sombres qui correspondent à un arrachement de matière.
- Nous remarquons qu'il y a une différence claire entre le potentiel de corrosion et la résistance de polarisation de l'acier 1,45mm et de l'acier 1mm, ce qui traduit le bon recouvrement de la surface de l'acier 1,45 mm par la couche de zinc qui protège donc le substrat en acier en formant une barrière au milieu chloruré et en jouant un rôle d'anode sacrificielle. Ça confirme la bonne protection de l'acier à 1.45 mm par rapport à celui de 1mm dans le milieu.

Comme perspective et compléments à ce travail, il serait intéressant de faire des analyses EDS sur les traces d'usure et sur les surfaces corrodées. Enfin on pourrait calculer l'usure volumétrique ou le taux d'usure en utilisant un rugosimètre pour déterminer la profondeur de

l’empreinte et la largeur de l’empreinte avec précision, puis calculer le volume d’usure pour chaque empreinte.

Références Bibliographies

- [1] Jean-Jacques Lamoureux, précis de corrosion, édition beau chemin, 1994, page 10, 11, 37, 93.
- [2] K. Claude, W. Fridli, chimie générale pour ingénieur, p 379.
- [3] Robert Perrin, Jean-Pierre Scharff, chimie industrielle, 2^e édition, (1999), p 239.
- [4] J. Bernard, métallurgie générale, 2^e édition (Masson), 1997, pp 87, 584, 585, 606-608.
- [5] Mémoire de fin d'étude en Master, Intitulé : Comportement de l'acier galvanisé dans les solutions : Eau de robinet (Biskra), 3.5 % NaCl et 3.21% NH₄Cl. Présenté par: BEN TALEB FATIMA ZOHRA (2013-2014).
- [6] B. Lefevre, thèse de doctorat « corrosion des aciers revêtus de zinc dans les zones confinées des carrossiers », métallurgie et matériaux, laboratoire de physico-chimie des surfaces, ENSCP. Paris VI, 2004 .
- [7] J-P Bailon, J-M. Dorlot, « des matériaux », école polytechnique de Montréal, 3^e édition. 2000.
- [8] Cours de corrosion <http://www.cdcorrosion.com/index.htm>
- [9] Etudes technique / qualité de la société Faynot.
- [10] E. Felder, C. Angelelis, M. Ducarroire, M. Ignat, P. Mazot, « propriétés mécaniques des films minces », sciences des matériaux, volume 23, issues (1998).
- [11] K.L. Mittal, « adhesion measurement of films and coatings: a commentary, adhesion measurement of films and coatings », 1995.
- [12] D. Quantin, technique de l'ingénieur « traitements de surface des métaux - galvanisation à chaud » (n° 1 534 - 2) (2003).
- [13] R. Fourmentin, « modélisation thermodynamique du système Fe-Zn-Al-Cr à 460°C et son impact sur les procédés de galvanisation » (2004)

- [14] L.DARSOUNI, mémoire de master2.
- [15] Gérald Zambelli, Léo Vincent, Matériaux et contacts, presse polytechniques et universitaire romandes CH-1015 lausanne, 1998.
- [16] Kane Malal, contribution à l'étude de l'influence de la rugosité et des effets non newtoniens dans les contacts sévères lubrifiés, institut national des sciences appliquées de Lyon 2003.
- [17] M. Bourebia (2010). Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, mémoire de magistère, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- [18] Lacheze Vladimir, DAS, Noël, (2015). Les Frottements secs et visqueux.
- [19] Gérald Zambelli, Léo Vencent (1998).Matériaux et contact, Une approche tribologique, Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes.
- [20] J. Blouet, Usure, Techniques de l'Ingénieur (1978), B585, p 1 – 34.
- [21] Claudiu Constantin Ionescu (2013).Caractérisation des mécanismes d'usure par tribo- corrosion d'alliages modèles Ni-Cr. Ecole Centrale Paris.
- [22] Notions de tribologie, http://58consmecha.free.fr/Cours%20a%20Pdf/contact_tribologie.pdf.
- [23] René Gras (2008). Tribologie principes et solution industrielles » l'usine nouvelle, Duno, Paris.
- [24] pierre. S (2009), Influence de la rugosité en fatigue de contact – rôle du rodage, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique, INSA Lyon, France, p33.
- [25] Martin Benjamin, publié sur <http://www.iFrance.com/espace-prepa/>
- [26] [www.technique-ingenieur.fr/.../Introduction aux traitements de surface par impact](http://www.technique-ingenieur.fr/.../Introduction%20aux%20traitements%20de%20surface%20par%20impact). Référence M1640 publié décembre 2000.
- [27] Etude des produits et des outillages STS IPM, 2009-jgb-états-de surface. odt.

- [28] All Cut instruments, principe de la mesure, www.mesures.com www.allcut.biz.
- [29] Marie-Line Zani, Mesure de la rugosité, www.Mesures.com/archives/758 rugosité publié octobre 2003.
- [30] Hef.Groupr sous la direction de Michel Cartier. « guide d'emploi des traitements de surface appliques aux problèmes de frottement ».
- [31] J.Schramm, Z .Mettallkde, 30,122, (1938).
- [32] P. contribution à l'étude de la réaction fe-zn dans le cas de la galvanisation d'aciers effervescents, semi-calmes et calmes au silicium dans des bains de zinc avec et sans ajout d'aluminium. thèse université de Lille (1983).
- [33] Nishimoto.A, Inagaki.J, Etnakaoka.K.influnce de la composition de l'acier sur l'adhérence et la vitesse d'alliage en galvanisation à chaud. testu to hagane, vol65, 9, p1404 a 1410(1982).
- [34] C.E.Jordan, A. R. Marder, "fe-zn phase formation in interstitial-freee steels hot-dip galvanized at 450⁰c", parti 0.00 wt% al-zn baths, j mater sci, 32, 5593, (1997).
- [35] G.Reumont, T.Gloriant, P.Perrot, J.FOCT, 'diagnostic d'un mécanisme de réaction solide-liquide par une réaction solide-vapeur. Application à la galvanisation des aciers', c.r.acad.sci.paris, 319, ii, 1299-1305, (1994).
- [36] G.F.Bastin, F. J. J. VAN LOO, G.D.Rieck," a new compound in the iron-zinc system", z. metallkd, 65,656-660, (1974).
- [37] Mahmoudi Sana; Etude comparative entre deux métaux passifs en milieux neutre, alcalin et acide: un acier inoxydable 304L et un alliage de titane Ti6Al4V.
- [38] Brahim Tlili ; Caractérisation de films durs multicouches élaborés par pulvérisation magnétron. Influence des conditions d'élaboration sur leurs propriétés ; 6 Mar 2011.