

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Mémoire du Projet de fin d'étude

2^{ème} Année Master



Département: Génie des Procédés
Spécialité :Génie des procédés des matériaux

Présenté par :

HACHACHNIA Feriel

BENTABANE Billel Abderraouf

*Étude des caractéristiques des couches
galvanisées à chaud au niveau de
SIDER EL-HADJAR*

Sous la direction de :

Dr. BELBAH Hayet

Juillet 2020

Résumé

Le travail que nous avons réalisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude «Étude des caractéristiques des couches galvanisées à chaud au niveau de SIDER EL-HADJAR»; nous a permis de mieux comprendre le processus technologique de galvanisation, les mécanismes qui se déroulent lors du passage de la tôle dans le bain de zinc. Trois types de tôles de différentes épaisseurs (0,5mm, 0,87mm et 0,95mm) ont été étudiées après galvanisation.

Les résultats de cette étude ont montré que la tôle d'épaisseur 0,5mm présente une masse et épaisseur du zinc déposé la plus élevée ce qui a augmenté sa vitesse de corrosion et sa résistance à la traction mais a diminué sa dureté et son allongement à la rupture par rapport aux deux autres épaisseurs (0,87 et 0,95mm).

Alors que pour les analyses morphologiques la tôle à épaisseur faible (0,5mm) présente une brillance maximale et une surface relativement lisse par rapport à celle des deux autres

Mots clés : galvanisation, corrosion, analyses morphologiques, brillance,

Abstract

The work we carried out as part of this final thesis "Study of the characteristics of hot-dip galvanized layers at SIDER EL-HADJAR"; allowed us to better understand the technological process of galvanization, the mechanisms that take place during the passage of the sheet in the zinc bath. Three types of sheets of different thickness (0.5mm, 0.87mm and 0.95mm) were studied after galvanization. The results of this study showed that the 0.5mm thick sheet exhibits the highest mass and thickness of the deposited zinc, which increased its corrosion rate and tensile strength but reduced its hardness and elongation at breaking by contribution to the two other thicknesses (0.87 and 0.95mm). While for morphological analyzes the thin sheet (0.5mm) exhibits maximum gloss and a relatively smooth surface compared to that of the other two

Key words: galvanization, corrosion, morphological analyzes, gloss,

ملخص

العمل الذي قمنا به كجزء من هذه الأطروحة النهائية "دراسة خصائص الطبقات المجلفنة بالغمس على الساخن في سيدر الحجار" سمح لنا بفهم أفضل للعملية التكنولوجية للجلفنة، الآليات التي تحدث أثناء مرور الصفيحة في حمام الزنك. تمت دراسة ثلاثة أنواع من الألواح بسماكات مختلفة (0.5مم، 0.87مم، 0.95مم) بعد الجلفنة. أظهرت نتائج هذه الدراسة أن الصفيحة ذات السماكة 0.5مم تظهر أعلى كتلة وسمك من الزنك المترسب، مما زاد من معدل التآكل وقوة الشد ولكنه قلل من صلابته واستطالته عند الانكسار مقارنة بالسماكتين (0.87مم و0.95مم). بينما في التحليلات المورفولوجية، تظهر الصفيحة الرقيقة (0.5مم) أقصى لمعان و سطح أملس نسبيا وبطور أقل ظلما مقارنة بالسماكتين (0.87مم و0.95مم).

الكلمات المفتاحية: الجلفنة، التآكل، التحليلات الشكلية، اللمعان،

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage.

Nous remercions chaleureusement nos parents qui nous ont soutenus tout au long de nos études, parfois au prix de quelques sacrifices et sans qui nous n'aurons pas pu atteindre ce niveau

Nous exprimons nos profondes gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur Dr. Hayet BELBAH., maître de conférence B au département de génie des procédés de la faculté ST à l'université 8 Mai 1945 de Guelma, pour ses conseils scientifiques et ses précieuses orientations qu'elle n'a cessé de nous apporter tout le long de la préparation de notre mémoire.

Nos remerciements s'adressent à Mr Berehaïl Boudjemaa pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de juger ce travail.

Nos sincères remerciements vont à tous les enseignants et le personnel du département génie des procédés faculté ST de l'Université 8 mai 1945 Guelma.

Enfin nous remercions gracieusement toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

À ma très chère mère

À mon cher père

À mes sœurs, À mes frères

À toute ma famille et à tous mes amis.

Hachachnia feriel.

Dédicace

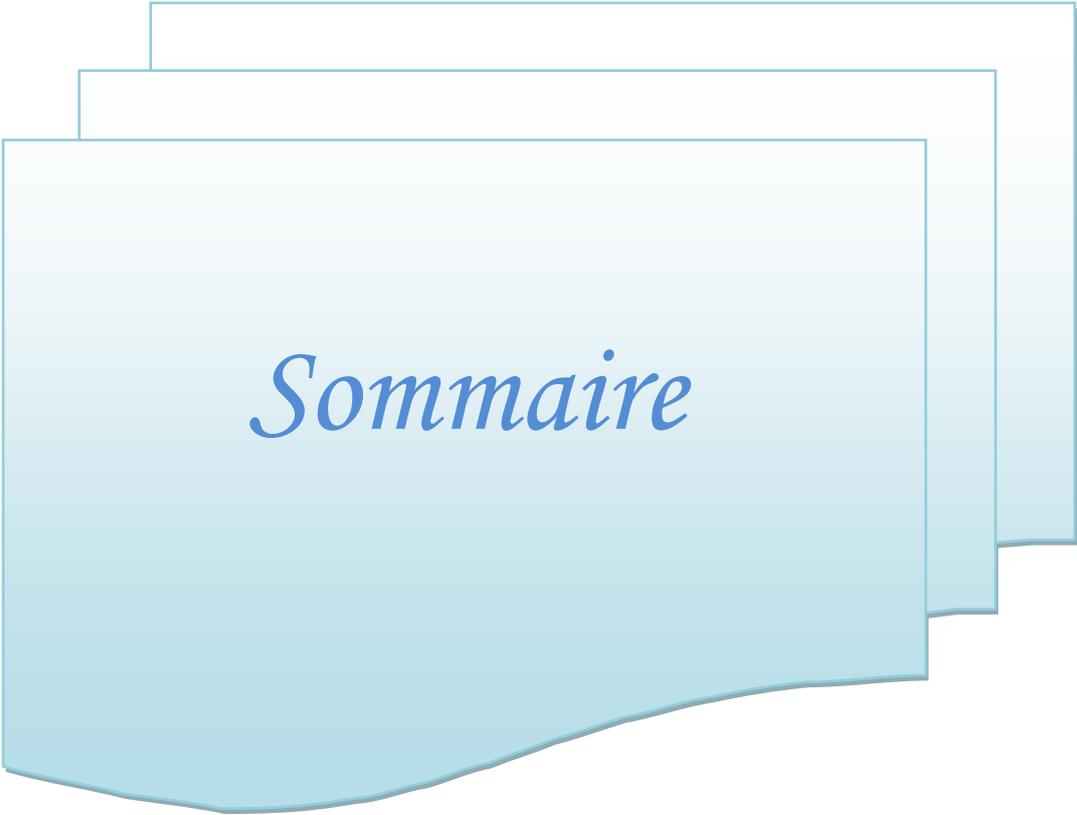
À ma très chère mère

À mon cher père

À ma grande mère et mon oncle

À tous mes amis.

Bentabane Billel Abderraouf.



Sommaire

Sommaire

Résumé.....	IV
Liste des abréviations.....	V
Liste des tableaux	VI
Liste des figures	1
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Synthèses bibliographique	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Aciers destinés à la galvanisation.....	3
I.3. Protection anticorrosion des aciers par le zinc.....	4
I.3.1. Caractéristiques du zinc.....	4
I.3.2. Phénomène de corrosion	5
I.3.3. Types de protection	5
I.3.3.1. Protection par barrière	5
I.3.3.2. Protection cathodique par le zinc.....	6
I.4. Galvanisation a chaud.....	8
I.4.1. Principe général de la galvanisation.....	8
I.4.2. Équilibre Fe-Zn.....	9
I.5. Influence des différents facteurs en galvanisation.....	10
I.5.1. Qualité de l'acier.....	10
I.5.2. Qualité du bain	11
I.5.3. Température du bain.....	12
I.5.4. Durée d'immersion.....	12
I.5.5. Refroidissement.....	12
I.5.6. Autres paramètres importants.....	13
I.6. Caractéristiques d'une tôle galvanisée de qualité.....	13
I.6.1. Épaisseur du dépôt.....	13
I.6.2. Adhérence.....	14
I.6.3. L'aspect extérieur.....	14
I.6.4. Tenue à la corrosion.....	14
I.7. Avantages de la galvanisation	14
I.7.1. Résistance aux chocs remarquable	14
I.7.2. Protection totale.....	15
I.7.3. Fiabilité.....	15
I.7.4. Bonne compatibilité.....	15

I.7.5. Esthétique et durabilité.....	15
I.7.6. Protection très économique	15

Chapitre II: Procédé de galvanisation

II.1. Introduction.....	16
II.2. Description de l'entreprise (sider el-hadjar).....	16
II.3. Principales activités de sider el hadjar.....	16
II.3.1. Unité de production.....	16
II.3.2. Processus de production.....	17
II.3.3. Produits et rôle de chaque unité.....	18
II.4. Procédé de galvanisation a chaud en continue	18
II.4.1 paramètres importants.....	19
II.4.2. Structure d'une ligne de galvanisation.....	20
II.4.2.1 section d'entrée.....	21
II.4.2.2 section de traitement thermique.....	21
II.4.2.3 section du bain de galvanisation.....	22
II.4.2.4 section sortie.....	26

Chapitre III : Matériels et techniques expérimentales

III.1. Introduction.....	28
III.2. Techniques de caractérisations	28
III.2.1. Echantillons étudiés	28
III.2.2. Essai de la voie humide par décapage.....	28
III.3.3. Essai de la résistance a la traction.....	29
III.3.4.Essais de la dureté.....	31
III.3.5. Essai de l'emboutissage	32
III.3.6. Analyse de surface par microscope optique	33
III.3.7. Analyse par Spectrométrie à Émission Optique (OES).....	34
III.3.8. Mesure de la brillance.....	35
III.3.9. Test de corrosion.....	36

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	38
IV.2. Analyse par Spectrométrie à Émission Optique (OES).....	38
IV.3. Essai de la voie humide par décapage.....	39
IV.4. Essais mécaniques des tôles galvanisées.....	42
IV.4.1. Essai d'emboutissage.....	42

IV.4.2.Essai de la dureté	42
IV.4.3.Essai de la résistance à la traction	43
IV.5. Test de corrosion.....	45
IV.6. La brillance.....	47
IV.7.. Analyse par Microscope Optique.....	48
IV.7.1. Aspect micrographique des surfaces galvanisées.....	48
IV.7.2. Interfaces et microstructures des couches galvanisées.....	49
IV.8. Conclusion.....	50
Conclusion générale.....	51
Référence bibliographies.....	52
Annexe.....	

Liste des abréviations

COX : Centrale à Oxygène

PDE : Post de Distribution Electrique

AMM : Atelier de Montage Mécanique.

ATC : Ateliers de construction.

MCM : Maintenance Centrale Mécanique

LAF: Laminage a Froid

LAC: Laminage a Chaud

CM : Coté Mécanique

M : Milieu

CO : Coté opérateur

HRA: Rockwell Hardness à l'échèle A

HRB: Rockwell Hardness à l'échèle B

HRC: Rockwell Hardness à l'échèle C

HR-150A: Rockwell Hardness de 150 Kgf à l'échèle A

ASTM: American society for testing and materials

NF EN : la normalisation en France (européenne)

ISO : Organisation internationale de normalisation

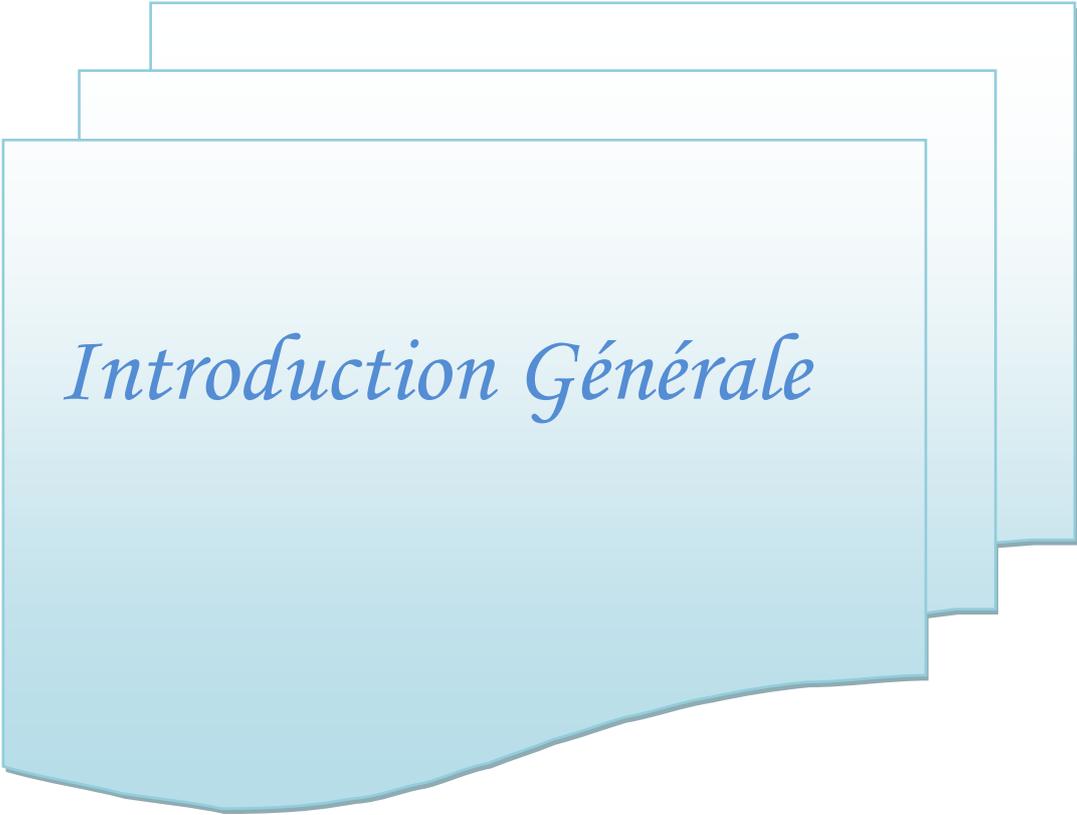
FLUIDES : La division fluide s'occupe principalement de la distribution des différents fluides à travers le complexe et d'assurer la protection à partir d'un réseau de conduite (le rack) tout diamètre confondu qui s'étends à plus de 25 Km

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des aciers suivant leur teneur en silicium et en phosphore.....	3
Tableau I.2 : Classification des aciers suivant leur propriété.....	4
Tableau I.3 : principales caractéristiques physiques du zinc.....	4
Tableau I.4 : Série galvanique et potentiels électrochimiques.....	7
Tableau I.5 : Caractéristiques des différentes phases du système Fe-Zn.....	10
Tableau II.1 : Produit du complexe.....	18
Tableau II.2 : Composition chimique en pourcent de l'acier A9.....	19
Tableau II.3 : Composition chimique du lingot en pourcent poids.....	23
Tableau II.4 : Composition chimique du bain de Zinc.....	23
Tableau II.5 : Caractéristiques des bobines laminées à froid.....	26
Tableau II.6 : Caractéristiques mécaniques des tôles galvanisé.....	27
Tableau III.1 : Caractéristique de l'appareille Duromètre HR-150A.....	31
Tableau IV.1 : Analyses chimiques des tôles d'acier à différentes épaisseurs (OES)...	38
Tableau IV.2 : Masse du revêtement de l'échantillon 1 pour les trois cotés.....	40
Tableau IV.3 : Masse du revêtement d'échantillon 2 pour les trois cotés.....	40
Tableau IV.4 : Masse du revêtement d'échantillon 3 pour les trois cotés.....	40
Tableau IV.5 : Masse moyenne et épaisseur du zinc déposé.....	41
Tableau IV.6 : Largeur limité d'emboutissage.....	42
Tableau IV.7: Dureté des trois échantillons.....	43
Tableau IV.8 : Allongement ultime persistant ΔLu (Lu-L0).....	43
Tableau IV.9 : Essai de traction de tôle galvanisée.....	44
Tableau IV.10 : Vitesse de corrosion.....	45
Tableau IV.11 : Évaluation de la brillance des revêtements.....	47

Liste des figures

Figure I.1 : Protection par effet barrière.....	6
Figure I.2 : (a) Protection active ou sacrificielle ; (b) couplage galvanique entre deux dissimilaires, le zinc et l'acier.....	6
Figure I.3 : Coupe micrographique d'un revêtement galvanisé.....	9
Figure II.1 : Organisation d'installations et produits du complexe.....	17
Figure II.2 : Étapes principales pour arriver à une tôle galvanisée.....	19
Figure II.3 : Schéma d'une ligne de galvanisation en continu.....	20
Figure II.4 : lingots du zinc et Bain de galvanisation.....	23
Figure II.5 : Schéma de l'essorage.....	24
Figure II.6 : Schéma du laminage qui représente aussi celui du skin-pass	25
Figure II.7 : Bobines Galvanisée.....	27
Figure III.1 : (a) :Machine d'essai de traction, (b) Schéma d'une éprouvette de traction	30
Figure III.2 : Duromètre HR-150A.....	31
Figure III.3 : principe de l'emboutissage.....	33
Figure III.4 : Microscope optique de mesure BX53M.....	34
Figure III.5 : Spectromètre ARL 3460	35
Figure III.6 : Brillance-mètre GLOSS CHECKER IG-331 (HORIBA).....	36
Figure III.7 : Protocole du test de corrosion.....	37
Figure IV.1 : Echantillons avant décapage.....	39
Figure IV.2 : Echantillons après décapage.....	39
Figure IV.3 : Histogramme des masses de revêtement des trois tôles galvanisées.....	41
Figure IV.4 : Histogramme de la largeur de déformation des trois tôles galvanisées.....	42
Figure IV.5 : Histogramme de la dureté des trois tôles galvanisées.....	43
Figure IV.6 : Histogramme de l'allongement ultime des trois tôles galvanisées.....	44
Figure IV.7 : Histogramme de l'essai de traction des trois tôles galvanisées.....	44
Figure IV.8 : Histogramme de la vitesse de corrosion des trois tôles galvanisées.....	46
Figure IV.9 : Echantillons après immersion dans le milieu corrosif (48h).....	46
Figure IV.10 : Histogramme de la brillance des trois tôles galvanisées.....	47
Figure IV.11 : Micrographies optiques	49
Figure IV.12 : Micrographies optiques montrant les coupes transversales des tôles galvanisées.....	50



Introduction Générale

Introduction générale

L'acier est le plus connu et le plus utilisé des métaux depuis la révolution industrielle, grâce à son bas coût de fabrication, ses bonnes propriétés mécaniques et thermiques, ce matériau se trouve sous différentes formes et tailles, pour des applications nombreuses et variées : bâtiment, industrie automobile, appareils électriques.

Toutefois, tous les métaux et l'acier en particulier, ont un point faible ; ils se corrodent, ce qui va entraîner un aspect inesthétique de rouille à la surface, mais surtout la formation d'entailles qui vont fortement altérer leurs propriétés mécaniques et doivent donc être protégés contre les agressions de l'environnement. (*Darsouni, 2018*)

La lutte contre la corrosion des métaux peut être envisagée de plusieurs manières, soit par l'emploi d'alliage passivable, soit par l'emploi d'un inhibiteur par l'ajout à faible concentration d'un composé chimique soit par l'application de revêtements métalliques ou non métalliques. La protection de l'acier par galvanisation à chaud s'est imposée comme la solution la plus efficace et la plus économique des systèmes de protection anti corrosion.

La galvanisation à chaud est une opération qui a pour but de former des couches intermétalliques fer/zinc par immersion dans un bain de zinc en fusion à une température se situant entre 450°C et 460°C. Lorsqu'un acier zingué est soumis à la corrosion, le zinc protège l'acier grâce à deux mécanismes: (*Tourqui, 2018*)

- ✓ Protection sacrificielle de l'acier par le zinc aux endroits où le fer est mis à nu .
- ✓ Effet barrière aux milieux corrosifs

Un revêtement par galvanisation à chaud assure, grâce au recouvrement de l'acier par le zinc, une double protection, d'une part physico-chimique et décoratif en raison de l'effet barrière isolant l'acier de l'atmosphère.

Le revêtement galvanisé n'est pas un simple dépôt de zinc à la surface de l'acier. Il se produit une réaction métallurgique de double diffusion entre le zinc et le fer qui conduit à la formation de couches d'alliages Fe-Zn, composés intermétalliques, liées à la fois aux caractéristiques des aciers à galvaniser mais aussi aux conditions opératoires.

Plusieurs études ayant déjà été menées sur la tenue à la corrosion d'aciers galvanisés, l'objectif principal de ce travail se focalise sur l'effet de l'épaisseur de tôles galvanisées sur les caractéristiques des couches galvanisées à chaud au niveau de SIDER EL-HADJAR.

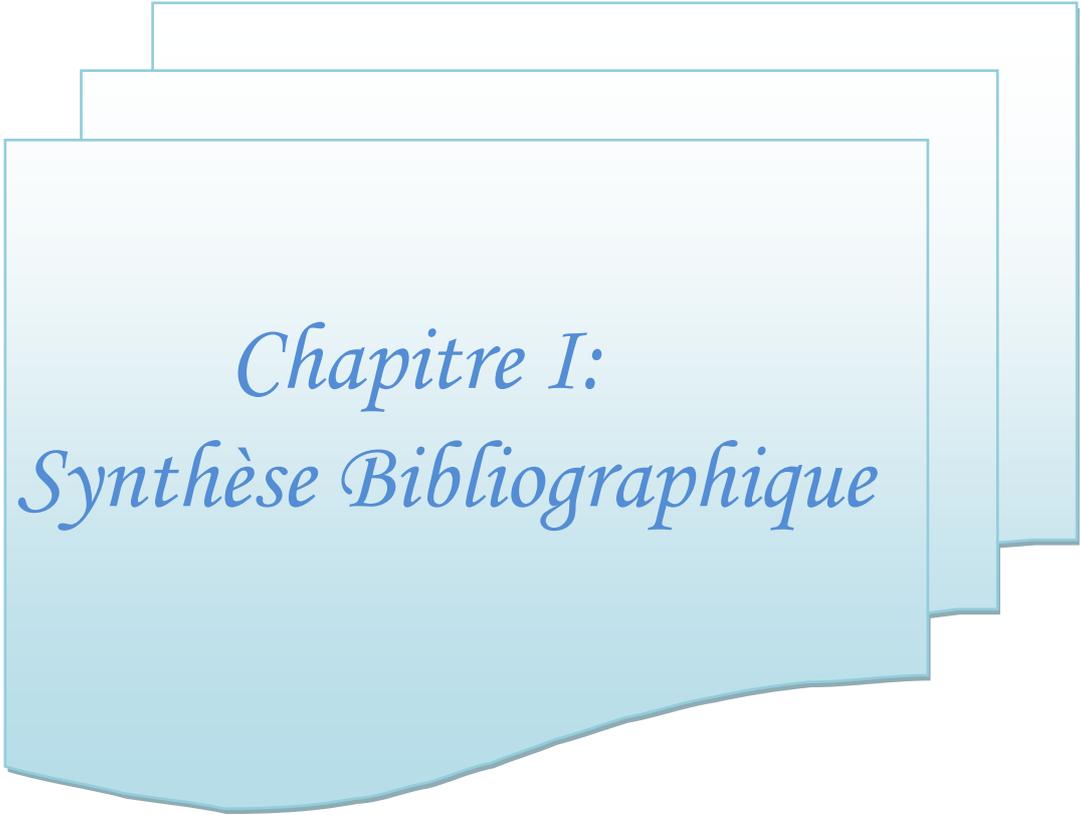
Pour cela nous avons choisi d'articuler ce travail en quatre chapitres.

Nous avons jugé utile de rappeler dans le premier chapitre quelques généralités sur le phénomène de corrosion, la galvanisation comme type de protection, les facteurs influençant sur la galvanisation et les avantages de ce moyen de protection anti- corrosion .

Le deuxième chapitre présent la description de l'entreprise (Sider el-Hadjar) et le procédé de galvanisation à chaud en continue.

Le troisième chapitre concerne les méthodes et les protocoles utilisés pour caractériser les différents échantillons.

Le chapitre quatre rassemble les résultats expérimentaux et leurs discussions . Et enfin on va clôturés par une conclusion générale



*Chapitre I:
Synthèse Bibliographique*

I.1. Introduction

Fondamentalement, la corrosion est un processus électrochimique, qui dans le cas de l'acier, va consommer le fer en l'oxydant. Cette oxydation provient de la réaction chimique entre l'acier et l'oxygène présent dans l'atmosphère, provoquant une détérioration de l'acier. Celle-ci va se traduire par l'apparition "d'entailles" à l'origine de pertes importantes des propriétés mécaniques de l'acier ainsi corrodé. (*Fourmentin, 2004*)

Tous les systèmes de protection anticorrosion sont fondés soit sur un effet barrière soit sur la création d'une cellule galvanique sacrificielle. La galvanisation à chaud offre ces deux avantages pour un coût compétitif et une facilité d'application. (*Buscarlet, 2003*)

L'objectif de ce chapitre est une synthèse bibliographique sur le phénomène de corrosion, puis quelques notions sur les types de protection, la galvanisation et les facteurs influençant ce type de protection, les caractéristiques d'une tôle galvanisée de qualité et enfin les principaux avantages de la galvanisation à chaud.

I.2. Aciers destinés à la galvanisation

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2,14 % en masse pour le carbone).

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés de l'acier. Il existe d'autres alliages à base de fer qui ne sont pas des aciers, comme les fontes et les ferroalliages. (*Azaizia, 2020*)

Tous les aciers réagissent avec le zinc pour former un revêtement composé d'alliage fer-zinc. La qualité du revêtement obtenu dépend de la composition de l'acier.

La vitesse de formation et la structure du revêtement sont fonction du silicium et phosphore (Tab.I.1). Ces deux éléments, contenus dans l'acier, accélèrent la croissance des couches d'alliages zinc-fer et peuvent contrarier les résultats de la galvanisation. Il est nécessaire d'imposer des spécifications pour le respect de ces deux éléments. (*Darsouni, 2018 ; Tourqui, 2018*)

Tableau I.1 : Classification des aciers suivant leur teneur en silicium et en phosphore.

Élément %	Classe I	Classe II	Classe III
Si	< 0,03	< 0,04	0,15 < Si < 0,25
Si + 2,5 P	< 0,09	< 0,11	< 0,325
P	---	---	< 0,04

La norme NF A 35-503 (1994) définit trois classes d'aciers aptes à la galvanisation, suivant la teneur de ces deux éléments (Tab. I.1).

Les aciers de classe I et classe II sont normalement réactifs. Après galvanisation, ils ont un bel aspect uniforme avec une épaisseur au moins conformes à la norme NF EN ISO 1461. Les aciers

de classe III sont réactifs. Leur aspect après galvanisation est plus mat, avec possibilité de zones grisées marbrées ou rugueuses sans conséquence sur la tenue à la corrosion (Tab.I.2).

Tableau I.2: Classification des aciers suivant leur propriété

	Aspet	Resistance mécanique de revêtement	Masse de revêtement	Utilisations
Classe I	Excellent	Excellente	Standard conforme au minimum de la norme	Recherche esthétique et anticorrosion
Classe II	Bon	Bonne	Standard généralement supérieur au minimum de la norme	Recherche anticorrosion et aspect correct
Classe III	Moyen	Moyenne	Plus forte	Recherche optimum de protection pour milieux agressifs

I.3. Protection anticorrosion des aciers par le zinc

I.3.1. Caractéristiques du zinc

Le zinc est le quatrième métal produit au monde après le fer, l'aluminium et le cuivre. Commercialement, le zinc est obtenu à partir de minéraux de sulfure de zinc. (*Darsouni, 2018*)

Les principales caractéristiques physiques du zinc sont données dans le tableau. I.3.

Tableau I .3: Principales caractéristiques physiques du zinc.

Symbole	Zn
Numéro atomique	30
Masse atomique (g.mol ⁻¹)	65,37
Masse volumique (g.cm ⁻³) à 20°C	7,14
Température de fusion (°C)	419
Température d'ébullition (°C)	907

Le zinc est un métal utilisé pour lutter contre la corrosion, l'oxydation, et l'usure. L'une des propriétés les plus intéressantes du zinc est son potentiel électrochimique ($E^\circ = -0,76$ V) qui est inférieur à celui du fer ($E^\circ = -0,45$ V). Quand il est au contact avec de l'acier, il a donc tendance à s'oxyder plus facilement que le fer et en se corrodant il forme des oxydes (ZnO) ou des hydroxyde (Zn(OH)₂) et avec l'action complémentaire du gaz carbonique il forme un hydroxy-carbonate insoluble (2ZnCO₃, 3Zn(OH)₂) très stable qui protège l'acier même si localement le revêtement est endommagé.

Les produits de corrosion du zinc, oxydes et hydroxydes, sont blancs. Pour cette raison et par analogie avec la rouille provenant de la corrosion du fer, ils sont généralement appelés rouille blanche.

Les trois procédés les plus utilisés pour appliquer un revêtement de zinc sur une pièce en acier sont la galvanisation, la métallisation et l'électro-zingage. (*Darsouni, 2018*)

I.3.2. Phénomène de corrosion

La corrosion est une réaction interrassiale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement.

La corrosion de l'acier désigne communément l'oxydation du fer métallique au degré zéro d'oxydation par l'environnement. Les oxydants de l'environnement sont entre autre le dioxygène de l'air, l'eau et d'autres acides présents selon le degré de pollution. (*Landolt, 1997*)

Selon le milieu, la corrosion est dite sèche quand elle apparaît dans les environnements gazeux, et humide lorsqu'elle a lieu dans les électrolytes liquides.

On distingue sur le plan pratique plusieurs types de corrosion à savoir:

- ✓ La corrosion généralisée (uniforme) ;
- ✓ La corrosion localisée ;
- ✓ La corrosion par piqûres ;
- ✓ La corrosion caverneuse ;
- ✓ La corrosion inter granulaire ;
- ✓ La corrosion sélective ;
- ✓ La corrosion bactérienne ;
- ✓ La corrosion sous contrainte mécanique ;
- ✓ La corrosion galvanique ;
- ✓ La corrosion érosion ;
- ✓ Fatigue due à la corrosion ;
- ✓ Corrosion liée à des effets mécaniques

I.3.3. Types de protection

I.3.3.1. Protection par barrière

La protection par barrière (fig.I.1) est sans doute la méthode la plus ancienne et la plus largement répandue pour lutter contre la corrosion. Le revêtement de zinc appliqué permet d'isoler physiquement l'acier de l'action corrodant de l'atmosphère. Mais la protection par barrière se fait également grâce aux produits de corrosion du zinc, qui forment à leur tour une couche protégeant le substrat en acier de la corrosion.

En effet le zinc possède la particularité de s'oxyder rapidement en présence d'agents oxydants et de former ainsi des ions Zn^{++} ($Zn \rightarrow 2e^- + Zn^{++}$).

Ces ions émis vont ensuite réagir avec les différents éléments présents dans l'atmosphère environnante pour former une série de produits de corrosion peu solubles et jouant un rôle protecteur.

Le zinc forme alors :

- ✓ Avec l'oxygène, une fine couche d'oxyde de zinc, ZnO ;

- ✓ En présence d'humidité, un hydroxyde de zinc, $Zn(OH)_2$;
- ✓ Avec le dioxyde de carbone, une couche de carbonate de zinc compact, $ZnCO_3$;
- ✓ De l'hydroxycarbonate, $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$.

La formation de ces produits va avoir pour conséquence de diminuer la vitesse de corrosion du substrat, ce dernier n'étant plus en contact direct avec l'atmosphère. La vitesse de corrosion dépend alors de la vitesse de diffusion de l'oxygène au travers des couches des produits de corrosion précédemment cités. L'ajout d'éléments comme l'aluminium, le magnésium le cobalt ou le chrome au bain de zinc permet d'améliorer la protection à la corrosion. En effet, ces éléments conduisent à une stabilisation de l'hydroxyde de zinc aux dépens de l'oxyde de zinc réputé moins protecteur vis-à-vis de l'oxydation du fait de sa plus grande conductivité électronique. (*Shigeyoshi, 1996*)

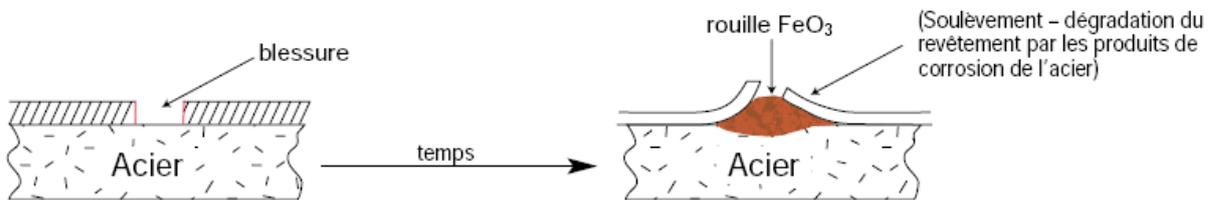


Figure I.1 : Protection par effet barrière

L'effet barrière offre une protection anti-corrosion dont la longévité est proportionnelle à l'épaisseur du revêtement en zinc. Les deux principales qualités demandées à ce type de protection sont une bonne adhésion au substrat en acier et une bonne résistance à l'abrasion (*Fourmentin, 2004*)

I.3.3.2. Protection cathodique par le zinc

Grâce à son rôle sacrificiel, le zinc permet également une protection cathodique contre la corrosion (fig.I.2). (*Yadav, 2007 ; Bermad, 2012*)

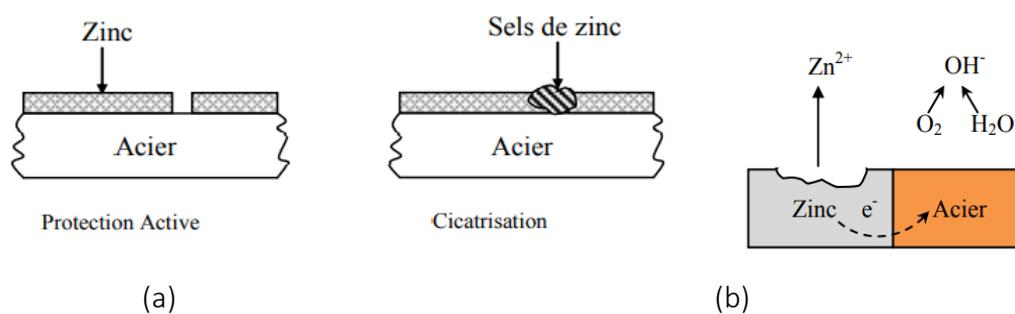


Figure I.2: (a) Protection active ou sacrificielle ; (b) couplage galvanique entre deux métaux dissimilaires, le zinc et l'acier

Le principe de la protection cathodique est fondé sur l'apport d'un nouvel élément plus électronégatif que l'acier dans la série galvanique avec des potentiels électrochimiques des métaux mesurés par rapport à l'électrode normale à hydrogène; valeurs en volts (Tab.I.4). (*Azaizia, 2020*)

Tableau I.4: Série galvanique et potentiels électrochimiques.

Métaux anodiques (électronégative -)		
Elément	Couple	Potentiel (volts)
Or	Au ⁻³ /Au	+1,498
Platine	Pt ²⁺ /Pt	+1,200
Argent	Ag ⁺ /Ag	+0,799
Cuivre	Cu ⁺ /Cu	+0,337
Hydrogène	H ²⁺ /H ₂	0,00
Plomb	Pb ²⁺ /Pb	-0,126
Etain	Sn ²⁺ /Sn	-0,136
Nikel	Ni ²⁺ /Ni	-0,250
Cobalt	Co ²⁺ /Co	-0,277
Cadmium	Cd ²⁺ /Cd	-0,402
Fer	Fe ²⁺ /Fe	-0,44
Chrome	Cr ²⁺ /Cr	-0,71
Zinc	Zn ²⁺ /Zn	-0,762
Manganèse	Mn ²⁺ /Mn	-1,05
Aluminium	Al ³⁺ /Al	-1,67
Béryllium	Be ²⁺ /Be	-1,70
Titan	Ti ⁴⁺ /Ti	-1,75
Magnésium	Mg ²⁺ /Mg	-2,34
Sodium	Na ²⁺ /Na	-2,712
Métaux cathodiques (électropositive +)		

Plus noble



Moins noble

L'acier va alors tenir le rôle de la cathode (gain d'électrons) et le zinc de l'anode (perte d'électrons). Le revêtement en zinc est donc oxydé préférentiellement par rapport au substrat en acier. Le zinc est appelé dans ces conditions l'anode sacrificielle.

Cette protection cathodique présente également l'avantage de lutter contre la corrosion, aux endroits où le revêtement de zinc a subi des dommages (fissures, entailles) ou présente des défauts de discontinuités. Ainsi la présence d'humidité à proximité d'une entaille dans le revêtement, permet la formation d'une pile, pour laquelle l'acier joue le rôle de la cathode et le zinc de l'anode. Le zinc est alors oxydé selon la cinétique de la réaction cathodique; cette cinétique définira la durée de la protection galvanique. Différents produits de corrosion issus de l'oxydation du zinc peuvent se former suivant les conditions environnantes : oxydes, hydroxydes, hydrocarbonates. Ces produits auront dans un premier temps un effet "protecteur", mais mèneront à terme à une détérioration du revêtement (Fig. I.2)

L'efficacité de la protection galvanique dépend de :

- ✓ La nature de l'environnement dans lequel l'assemblage est exposé;
- ✓ L'état de polarisation de chacun des métaux;
- ✓ La géométrie des sites anodiques et cathodiques (formes, aires relatives des surfaces, etc...).

I.4. Galvanisation à chaud

La galvanisation à chaud répond de façon rigoureuse à la recherche de robustesse, de performance technique et mécanique, de durabilité et d'économies. C'est pourquoi elle est utilisée dans des domaines aussi variés que les télécommunications, l'industrie, la marine, les équipements publics; dont les points communs sont l'exposition à l'eau, à l'air et aux chocs.

La galvanisation correspond à la pratique d'immerger le fer ou l'acier dans un bain de zinc en fusion à une température de 450- 460 °C. Cette opération a pour but de former des couches intermétalliques fer/zinc provenant de l'inter diffusion mutuelle du fer de la tôle d'acier, et du zinc du bain de galvanisation. L'immersion à chaud vient former une couche de zinc recelant un lien métallurgique à la surface du matériel, protégeant ainsi le fer et l'acier contre la corrosion. (Iwww, 2021)

La galvanisation à chaud concerne les pièces finies, les tôles et les fils revêtus par procédé continu. Derrière le nom générique de galvanisation à chaud, une grande variété de produits de composition et de structure très différentes existent actuellement, soit à cause du procédé lui-même (trempé de pièces finies ou procédé continu), soit à cause de la composition du bain (aluminium de 0,05 à 55 %, silicium, magnésium, etc.) ou du post-traitement (palliation, minimisation du fleurage, etc.). Il y a donc des galvanisations à chaud et des produits galvanisés. (Quantin, 2003),

I.4.1. Principe général de la galvanisation

Le principe de la galvanisation à chaud par immersion est basé sur l'affinité réciproque du zinc pour le fer. Le revêtement galvanisé n'est pas un simple dépôt de zinc à la surface de l'acier comme pourrait l'être par exemple une peinture. Il s'agit réellement d'une réaction métallurgique de double diffusion entre le zinc et le fer. Cette diffusion conduit à la formation de couches d'alliages Fe-Zn composés intermétalliques. Ce revêtement est obtenu par immersion de courte durée de l'acier dans un bain de zinc liquide dont la température, généralement comprise entre 450 et 460°C. Lorsqu'on retire l'acier du bain, il entraîne avec lui les composés solides fer-zinc, formés à sa surface, ainsi qu'un film de zinc liquide.

La réaction de diffusion se poursuit encore quelques instants hors du bain, pendant la période de refroidissement tant que la température reste supérieure à environ 300°C.

L'aspect de surface des revêtements des tôles galvanisées à chaud se caractérise par la formation de très larges grains appelés "*fleurage*" ou "*spangles*" provenant de la fine couche d'inhibition suivie d'une couche de dendrites de zinc pur.

Les dimensions du fleurage dépendent des conditions de refroidissement lors de la solidification. La minimisation du fleurage est obtenue par le contrôle de la vitesse de refroidissement.

Le fleurage c'est la cristallisation du zinc sous forme de gros grains réfléchissant la lumière dans différentes directions, il n'a aucune influence sur la tenue à la corrosion mais juste un aspect esthétique. (*Fourmentin, 2004*)

La taille des fleurs peut être classée en différentes catégories :

- Grandes fleurs > 3 mm
- Fleurs normales : 1 - 3 mm
- Petites fleurs : 0,5 - 1 mm
- Mini-fleurs : < 0,5 mm

I.4.2. Équilibre Fe-Zn

Le fer et le zinc représentent tous deux les éléments majeurs de la galvanisation de tôles en acier. Il est donc primordial d'énumérer, grâce à la description du diagramme Fe-Zn, les différents composés intermétalliques constituant le revêtement de galvanisation.

Lors de la galvanisation d'une pièce de fer pur dans un bain de zinc pur, la diffusion conjointe entre le fer et le zinc permet la formation de couches de composés intermétalliques fer-zinc. C'est cette succession de composés intermétalliques qui va constituer la couche de galvanisation (Fig.I.3)

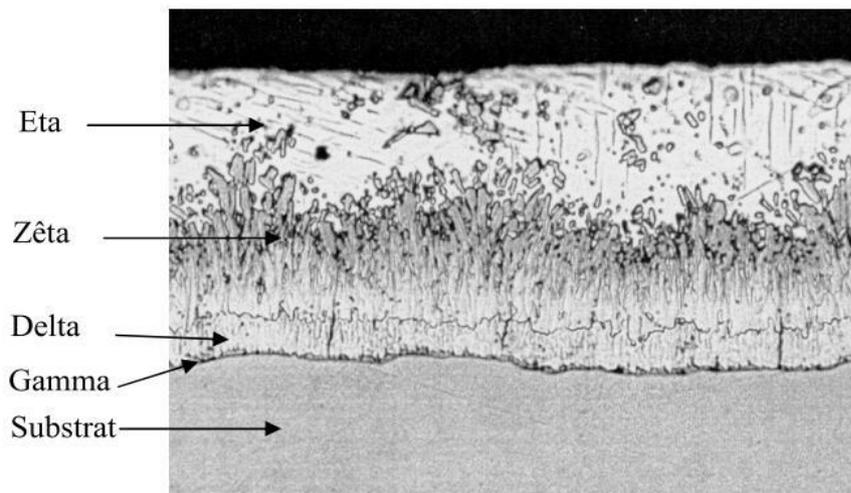


Figure I.3: Coupe micrographique d'un revêtement galvanisé

Les propriétés mécaniques de cette couche découlent donc directement des propriétés mécaniques et de la proportion de chaque composé intermétallique Fe-Zn ces composés sont au nombre de quatre : $\Gamma_1, \Gamma_2, \delta, \zeta$ et η (Gamma, Delta, Zêta, Eta) avec une teneur en zinc croissante. Les caractéristiques de chacun de ces intermétalliques sont énoncées dans le tableau I.5. (*Hertveldt, 2000; Tourqui, 2018*)

Tableau I. 5: Caractéristiques des différentes phases du système Fe-Zn (*Tourqui, 2018*)

Phase Fe-Zn	Symbole	Structure	Formule stoechiométrique	Dureté (Hv)	Épaisseur du dépôt (%)
Fer	A	CC	Fe	150	/
Gamma	Γ_1 Γ_2	CC CFC	$Fe Zn_{10}$ ($FeZn_3, Fe_5Zn_{21}$)	326-496 505	1-2
Delta	δ	Hexagonal	$FeZn_7$	340	20 – 30
Zêta	ζ	Monoclinique	$FeZn_{13}$	112	50
Eta	η	Hexagonal	Zn	70	20 – 30

CC: Cubique Centré

CFC: Cubique à Faces centrées

I.5. Influence des différents facteurs en galvanisation

Un assez grand nombre de facteurs interviennent dans l'exécution correcte de la galvanisation, ceci indépendamment ou presque de la tenue à la corrosion qu'elle procure. Les différents facteurs que nous nous proposons d'examiner sont : (*Tourqui, 2018*)

- ✓ La qualité de l'acier (substrat).
- ✓ La qualité du bain de galvanisation.
- ✓ La température du bain de zinc.
- ✓ La durée d'immersion.
- ✓ Le refroidissement.

I.5.1. Qualité de l'acier

Le revêtement d'une pièce galvanisée à chaud (épaisseur, structure et aspect) varie principalement suivant la composition de l'acier.

Influence du silicium

La galvanisation des aciers contenant du silicium se traduit par l'obtention de revêtement d'épaisseur exagéré d'aspect pâle et d'adhérence moyenne et cela dès que la teneur en silicium dépasse 0,1% . (*Bretez, 1986*)

Influence du phosphore

Cette impureté néfaste à l'acier a une influence non négligeable sur la réaction Fe-Zn même si sa teneur est très faible. Le phosphore s'accumule à l'interface δ / ζ en créant des fissures dans le composé δ . La couche ζ initialement formée, peut donc jouer un rôle d'écran, isolant le zinc liquide et imposant par sa présence, un processus de réaction entre phases solides dans l'espace compris entre cette couche et le métal à galvaniser. (*Caceres, 1986*)

+ Influence du Carbone

La présence du carbone dans l'acier augmente la réactivité de l'acier vis-à-vis du zinc, ce qui peut conduire à une augmentation importante de l'épaisseur du revêtement d'alliage Fe-Zn. Les autres impuretés présentes dans l'acier comme le manganèse, l'aluminium, le cuivre, le soufre et l'azote n'ont pas d'influence marquée sur la formation des composés Fe-Zn. (*Quantin, 2003 ; Azaizia, 2020 ; Darsouni, 2018*)

I.5.2 Qualité du bain

Pour certains usages particuliers, des additions ou ajouts complémentaires de métaux peuvent être demandés, tels que Al, Mg, Ni, Pb... etc. Ceci fera l'objet d'une modalité spéciale à la commande et leur pourcentage ne sera pas inclus dans le total des matières étrangères.

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

+ Influence de l'aluminium

L'aluminium est comme il a été montré précédemment est un 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 phases intermétalliques assurant ainsi une bonne cohésion du revêtement. (*Yoshitaka, 1998*)

+ 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. (*Nishimoto, 1986*)

+ Influence du cadmium

En raison de la formation d'une couche discontinue gamma, des additions de 0,5 à 1% 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 ζ disparaît et seul de gros cristaux de δ subsistent dans le dépôt.

+ 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 emmené à une augmentation de la viscosité du bain et aussi à la mouillabilité de l'acier.

Influence d'autres éléments

- ✓ Le magnésium jusqu'à 0,6% accroît la vitesse de réaction, au delà de cette teneur, son effet 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, et Zr sont des inhibiteurs efficaces de la réaction Fe-Zn. Ces derniers éléments ont tendance à former des composés ternaires à l'interface ζ/η et à réduire l'épaisseur de la phase ζ . (*Azaizia, 2020; Tourqui, 2018*)

I.5.3. Température du bain

La plupart des réactions chimiques mises en cause lors de la galvanisation (réactivité Fe-Zn, formation des cendres, etc.) sont thermiquement activées. Pour réduire la formation des mattes, des oxydes, on a donc intérêt à travailler à la température la plus basse possible compatible avec une fluidité correcte du bain. La fourchette classique est 450 à 460°C et celle dangereuse se situe entre 490°C et 530°C où la réaction fer-zinc est très intense avec formation de mattes importante et d'un revêtement épais et fragile. Aux températures supérieures, la tenue des creusets (métalliques) est fortement réduite. (*El Sebakhy, 1991; Darsouni, 2018*)

I.5.4. Durée d'immersion

En pratique la durée d'immersion d'une pièce à galvaniser doit être fonction de sa forme et surtout de l'épaisseur de l'acier utilisé. Elle doit être suffisamment longue pour que l'échange thermique complet puisse se faire entre la pièce à galvaniser et le bain de zinc fondu.

Lorsque cette durée est très courte, mais suffisante pour que la prise de zinc puisse se faire, un poids de zinc sera retiré par la pièce qui sera supérieure au poids courant retiré par cette même pièce avec une durée d'immersion plus grande permettant l'échange thermique complet.

Si l'immersion de la pièce est prolongée au-delà de la durée nécessaire pour l'échange thermique total, un abaissement de poids se produit du fait qu'une partie de l'alliage fer-zinc se formant pendant l'immersion par diffusion, peut, surtout dans le cas de températures de galvanisation élevées. (*Tourqui, 2018*)

I.5.5. Refroidissement

Le refroidissement en galvanisation à chaud a des effets visibles sur l'aspect de la galvanisation, et invisibles sur la teneur en fer-zinc déposé. (*Darsouni, 2018*)

I.5.6. Autres paramètres importants

Essorage

La bande sortie du bain de zinc entraîne par capillarité un film de zinc liquide d'autant plus épais que la vitesse de passage est grande et la rugosité forte. La tôle passe donc entre deux courants de gaz (air ou azote) qui essorent le trop-plein de zinc liquide.

Les paramètres pour un bon essorage, c'est-à-dire avoir, une épaisseur de zinc régulière, sans vaguelettes qui ressemblerais à une sortes de coulures de zinc sont :

- ✓ La horizontalité de la tôle à l'aplomb des buses : toute vibration de la bande conduira à un essorage différentiel et à une épaisseur de zinc irrégulière ;
- ✓ Les caractéristiques de la buse ;
- ✓ La température de l'essorage.

Mattes

Des précipités ou mattes ont également été observés dans les bains de galvanisation.

Ces mattes peuvent être classées en deux familles : les oxydes de Zn et/ou d'Al localisés en surface du bain, et les composés intermétalliques Fe-Zn et Fe-Al, saturés en zinc, qui peuvent se situer en surface ou en fond de bain selon leur densité.

Ces mattes se forment dans le bain de galvanisation lorsque les teneurs en fer et en aluminium dépassent les limites de solubilité (0,035 masse % pour le fer).

Même avec une gestion parfaite de la composition du bain, la formation de mattes est malheureusement inévitable en raison de l'addition d'aluminium dans le bain ainsi que de la dissolution du fer provenant des tôles immergées. Les mattes flottantes vont alors être entraînées et se déposées en surface de la tôle en sortie de bain, ce qui va nuire à la qualité et à l'aspect visuel du revêtement). (*Alpas, 2000; Darsouni, 2018*)

I.6. Caractéristiques d'une tôle galvanisée de qualité

I.6.1. Epaisseur du dépôt

L'épaisseur du dépôt doit être comprise entre 70-90 μm . Il existe cinq (05) classes de qualités définies pour la galvanisation d'après la norme NF A32-321 :

- ✓ Classe 1 : masse de zinc de 400 g/m^2 double face ;
- ✓ Classe 2 : masse de zinc de 350 g/cm^2 double face ;
- ✓ Classe 3 : masse de zinc de 275 g/cm^2 double face ;
- ✓ Classes 4 et 5 : masse de zinc de 200 g/m^2 double face et jusqu'à 275 g/cm^2 double face par accord entre les parties (*Galvazinc, 2012*)

I.6.2. Adhérence

Le revêtement doit être adhérent pour supporter une manipulation correspondant à l'emploi normal du produit, sans fissuration ou écaillage. Le revêtement doit satisfaire à l'essai de pliage suivant la norme A-03-158. Après ce test, le revêtement ne doit pas présenter aucun écaillage, ni décollement visible à l'oeil nu sur la face externe du pli.

Pour obtenir ces caractéristiques, il faut assurer :

- ✓ Une température du bain de zinc la plus basse possible (445°C) ;
- ✓ Une teneur en silicium ne dépasse pas 0,04% ;
- ✓ Une teneur en phosphore qui ne doit pas dépasser 0,007% ;
- ✓ Une bonne préparation de surface (*Galvazinc, 2012*)

I.6.3. Aspect extérieur

Le revêtement ne doit montrer aucune discontinuité et doit être homogène. La cristallisation doit être homogène. Pour obtenir ces caractéristiques, il faut assurer :

- ✓ Un bon décapage ;
- ✓ Pas de défaut sur la tôle destinée à être galvanisé ;
- ✓ Avoir dans le bain du zinc, du plomb (environ 0,001%) qui améliore le brillant du revêtement ;
- ✓ Réaliser un Skin-pass qui permet d'obtenir une amélioration de l'aspect de surface, permettant en outre une meilleure aptitude à recevoir une peinture (*Galvazinc, 2012*)

I.6.4. Tenue à la corrosion

Pour éviter la corrosion locale, il ne faut pas utiliser des aciers à fortes teneur en soufre, ceci favorise la formation des inclusions sulfureuses. En effet, ces dernières, agissent lors d'un décapage excessif, en perçant la surface de la tôle provoquant ainsi la création de trous qui sont à l'origine d'une corrosion locale. Pour éviter la rouille blanche en prévenant le stockage prolongé des tôles galvanisées dans les atmosphères humides. (*Darsouni, 2018*)

I.7. Avantages de la galvanisation à chaud

I.7.1. Résistance aux chocs remarquable

Seul ce procédé d'application du zinc confère au revêtement une résistance mécanique, à l'abrasion, supérieure à celle de l'acier lui-même. Les réactions métallurgiques lors de l'immersion des aciers aptes dans un bain de zinc à 450°C provoquent plusieurs couches d'alliages : "composés intermétalliques" zinc-fer, plus durs que l'acier, qui confèrent au revêtement non seulement une parfaite adhérence, mais aussi une résistance exceptionnelle aux chocs et à l'abrasion. (*Tourqui, 2018*)

I.7.2. Protection totale

Les procédés traditionnels d'application d'une protection par projection sur la surface de l'acier ne protègent pas les parties inaccessibles. Seul le procédé par immersion dans un bain liquide constitue une garantie totale de protection complète des pièces extérieure et intérieure, mêmes les moins accessibles (corps creux, tubulaires, etc.).

I.7.3. Fiabilité

La galvanisation à chaud est un concept industriel maîtrisé dans des ateliers spécialisés, un mode opératoire exécuté et contrôlé par des spécialistes en référence à des normes strictes qui apportent la plus grande fiabilité à ce concept de protection. Toute anomalie éventuelle est visible et détectable dès la sortie du bain de zinc, ce qui évite toute surprise a posteriori.

I.7.4. Bonne compatibilité

Son association avec d'autres matériaux est parfaitement possible.

- ✓ La galvanisation peut recevoir plusieurs systèmes de peintures pour satisfaire des effets esthétiques ou accroître la longévité de sa protection dans des environnements particulièrement agressifs.
- ✓ Le zinc peut, dans de nombreux cas, être mis au contact avec d'autres métaux, notamment l'inox, l'aluminium.

I.7.5. Esthétique et durabilité

L'évolution technologique de la galvanisation intervient dans beaucoup de domaines. L'une des plus significatives est sans conteste la duplex galvanisation + peinture laquée ou thermo-laquée. De nombreuses peintures sont aujourd'hui validées pour application sur galvanisation. Cette évolution permet d'allier esthétique et durabilité des aciers galvanisés.

I.7.6. Protection très économique

Sa longévité exceptionnelle et l'absence de maintenance, placent la galvanisation dans la catégorie des protections efficaces les plus économiques. Le meilleur rapport, tant à l'achat que par l'absence d'entretien, constitue une compétitivité exceptionnelle. Choisir la galvanisation à chaud, c'est choisir la qualité et la rentabilité. (*Tourqui, 2018*)



*Chapitre II:
Procédé De Galvanisation*

II.1 Introduction

Avant d'arriver à la chaîne de fabrication des tôles minces, le processus technologique passe, en amont, par une succession d'opérations d'élaboration de la fonte, de l'acier et des brames et enfin par les opérations de laminage à chaud, laminage à froid et la galvanisation.

La protection de l'acier par galvanisation à chaud s'est imposée comme la solution la plus efficace et la plus économique des systèmes de protection anti corrosion. De nos jours, le procédé de galvanisation est le plus fréquemment utilisé pour combattre la corrosion. (*Tourqui, 2018*)

Ce chapitre représente donc la pratique industrielle de la galvanisation en continue au niveau du complexe sidérurgique (Sider El-Hadjar).

II.2. Description de l'entreprise (Sider El-Hadjar)

Le complexe sidérurgique d'El Hadjar est situé à une distance de 15 Km de la ville d'Annaba.

L'usine est alimentée en minerai par voie ferrée à partir des mines de l'Ouenza et Boukhadra (au Sud Est du pays à 15 Km du complexe) et en charbon à partir du port d'Annaba auquel il est relié par une voie ferrée double. Les produits du complexe sont évacués par voie ferrée vers tout le pays et vers le port pour l'exportation.

Le complexe sidérurgique intégré, filiale du groupe IMITAL, placé sous la tutelle du Ministère de l'Industrie et des Mines. .

L'entreprise SIDER d'Annaba constitue une des plus importantes Entreprises d'AFRIQUE dans le secteur de la sidérurgique, au plan national c'est une des entreprises phares de l'est Algérien. (*Benramoul,2018*)

II.3. Principales activités de Sider El Hadjar

II.3.1. Unité de production

Zone Chaude

- ✓ Préparation matières et agglomération (PMA).
- ✓ Haut fourneau (HF) + Coulée pour fonte.
- ✓ Aciérie à oxygène pour brames (ACO1).
- ✓ Aciérie à oxygène pour billettes (ACO2).
- ✓ Coulée en source pour lingots (ACE).

Zone Produits Plats

- ✓ Laminoir à chaud (LAC + ligne de cisailage).
- ✓ Laminoir à froid avec parachèvement et revêtement (LAF/RPA).

Zone Produits Longs

- ✓ Laminoir à rond à béton (LRB)

✚ **Unités support et logistiques**

- ✓ COX, PDE, FLUIDES, AMM, ATC, MCM, GTM, PORT. (Bengacemi, 2018 ; Aouamri, 2020)

II.3.2. Processus de production

L'organigramme ci -dessous représente les différentes installations de Sider El-Hadjar

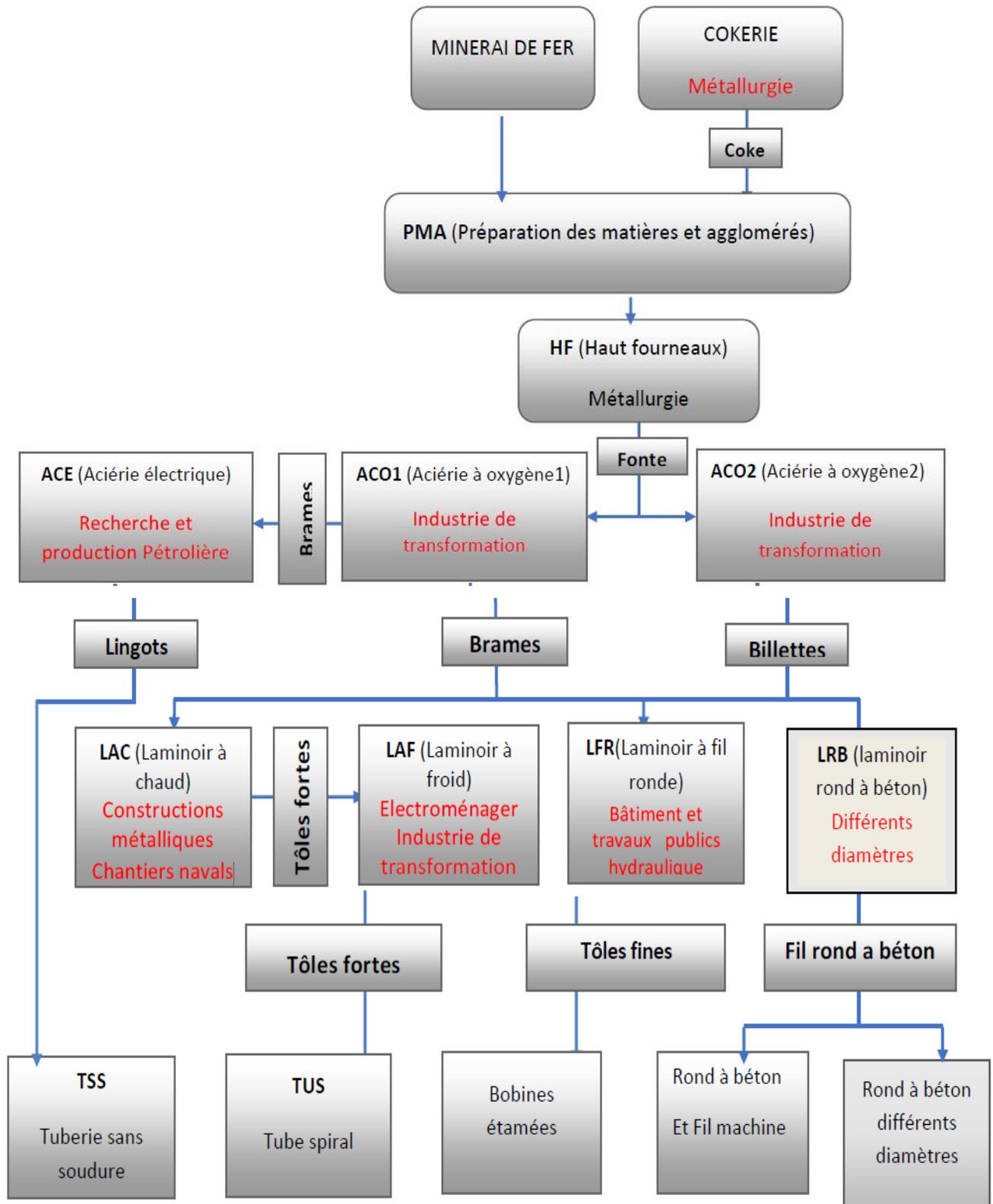


Figure II.1: Organisation d'installations et produits du complexe (Bengacemi, 2018)

II.3.3. Produits et rôle de chaque unité

L'acier peut être confectionné dans deux types d'usines : dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke (du carbone presque pur extrait du charbon), ou dans un four électrique, à partir d'acier de récupération (acier de recyclage).

Tableau II.1 : Produit du complexe

Installation	Produits	Principaux utilisateurs
Cokerie	Coke	Métallurgie
HF 1 et HF 2	Fonte	Métallurgie
ACO 1	Brames	Industrie de transformation
ACO 2	Billetes	Industrie de transformation
Laminoir à chaud (LAC)	Tôles fortes	Construction métallique chantiers navales tube bouteille à gaz
Laminoir à froid (LAF)	Tôles fines	Electroménager mobilier métallique industrie de Transformation
Etamage	Fer blanc	Emballage métallique divers pour les industries alimentaires et chimiques
Galvanisation	Tôles galvanisées	Bâtiments pour l'agronomie industrie et élevage
Aciérie électrique (ACE)	Lingots	Recherche et production pétrolière transport des Hydrocarbures
Laminoir à fil rond (LFR)	Fil rond à béton	Bâtiment et travaux publics hydraulique

L'atelier LAF a été conçu pour répondre efficacement à ces problèmes, son rôle est d'avoir des tôles conformes du point de vue dimensionnelle (largeur et épaisseur) , aspect de surface, caractéristiques mécaniques et nature interne du métal. Le laminoir à froid est équipé pour produire du fer blanc, de la tôle fine et de la tôle galvanisée. Les lignes de galvanisation reçoivent les bobines venant du laminage à et ont pour rôle de revêtir de zinc les surfaces de la bande.(*Kerrouche, 2020*)

II .4. Procédé de galvanisation à chaud en continue

La galvanisation à chaud est un procédé de revêtement qui consiste à recouvrir d'une fine couche de zinc, des bandes d'acier en continu par immersion dans un bain de zinc fondu une température

d'environ 460°C. Cette galvanisation est l'une des méthodes les plus importantes et les plus anciennes pour protéger l'acier contre les fluides corrosifs. Ce procédé de revêtement exige une bonne préparation de l'état de surface de la bande à galvaniser. Pour arriver à une tôle galvanisée, les bandes en acier à bas carbone de type A9 (Tab. II.2) passe par différentes étapes comme le montre le schéma de la figure II.2. (Abdel Hamid, 2010; Darsouni,2018)

Tableau. II. 2: Composition chimique en pourcent de l'acier A9

C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Al (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Fe (%)
0,05	0,23	0,008	0,007	0,008	0,036	0,0		0,024	al.
à	à	à	à	à	à	à	0,018	à	
0,10	0,44	0,028	0,027	0,023	0,062	0,021		0,054	

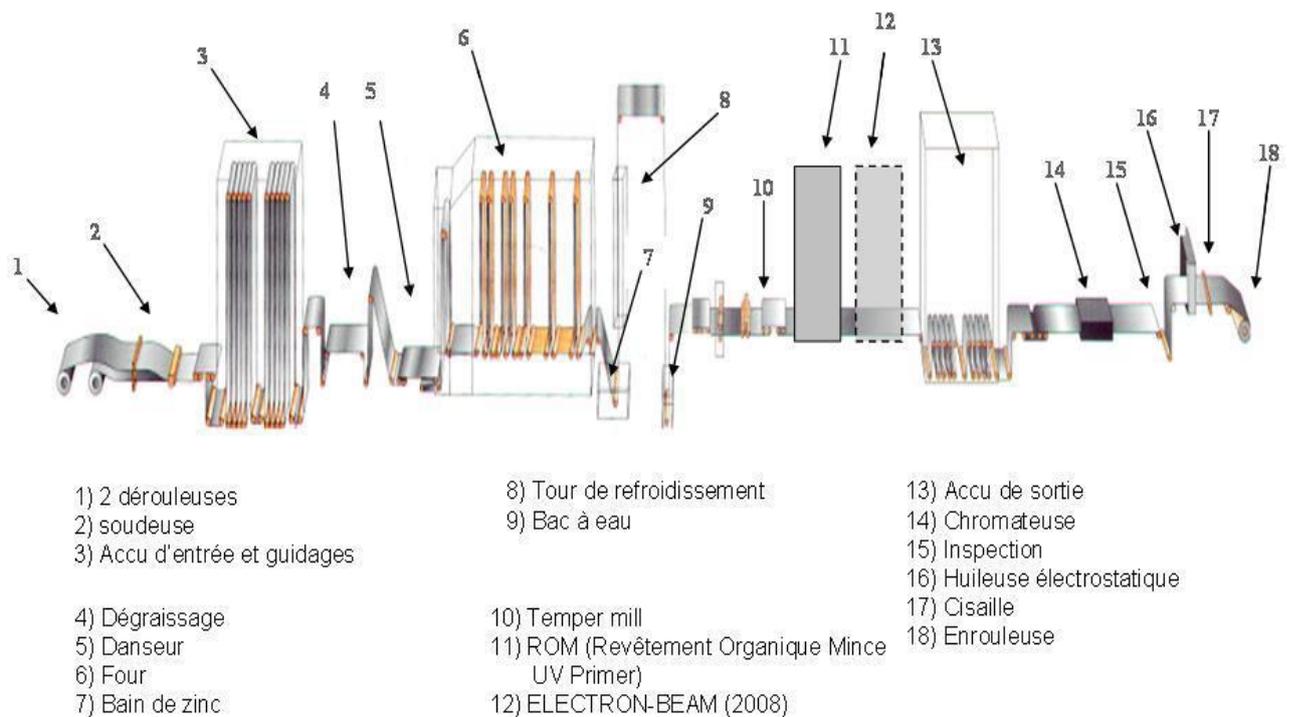


Figure. II.2: Étapes principales pour arriver à une tôle galvanisée (Darsouni, 2018)

II.4.1 Paramètres importants

✚ Métal entrant

--La nature de l'acier, pour ses caractéristiques métallurgiques et le comportement de sa surface lors du traitement de recuit est relié à sa « réactivité » dans le zinc liquide

-- Sa rugosité et sa micro géométrie superficielle ; la structure et l'aspect de la surface de la tôle laminée ont plusieurs rôles :

- Sur la réactivité à la galvanisation ;
- Sur la répartition de l'épaisseur du zinc (la surface retient plus ou moins le métal liquide);

-- Ses pollutions de surface en huile de laminage résiduelle (nature et quantité) et en fines de fer d'abrasion ; en quantité trop importante, elles se collent sur les divers cylindres et gênent le guidage de la tôle ; les fines de fer peuvent aussi polluer le bain de zinc ou créer des défauts sur la tôle. Sur les trains de laminage à froid modernes, les taux de fines peuvent être très bas (40 à 50 mg/m² par face).

✚ Préparation de surface

À l'entrée de la ligne, la bande peut être nettoyée de ses pollutions par un ou plusieurs procédés :

- chimique (lessive alcaline) ou électrochimique ;
- mécanique (brosses en nylon) ;
- thermique ; dans ce cas, on utilise une zone dite de préchauffe du four de recuit (montée en température de la bande jusque 600-650 °C dans une atmosphère de combustion de type (CO₂=12%, -CO = 2 %, H₂ = 3 % qui brûle les huiles superficielles et décolle les fines de fer).

Pour un système couplé de type chimique-mécanique, on élimine environ les deux tiers des fines de fer entrantes. Ce système, étant donné le niveau de pollution bas des trains à froid actuels, a surtout pour mérite d'homogénéiser les bandes à l'entrée de la ligne de galvanisation. (*Delmotte, 1996*)

En fonction du procédé, cette préparation de surface peut se compléter d'une étape de fluxage pour améliorer et régulariser la réactivité acier/zinc.

Ces opérations donnent la qualité de l'interface (régularité, répartition des alliages) et par conséquent concourent à l'adhérence finale du revêtement

II .4.2. Structure d'une ligne de galvanisation

La tôle revêtue à chaud en continu est obtenue à partir des bandes d'acier laminées à froid (pour les faibles épaisseurs) et laminées à chaud (pour les fortes épaisseurs), déroulées sur des lignes qui assurent : le recuit en continu pour les bandes laminées à froid et le chauffage pour les bandes laminées à chaud. La bande passe ensuite dans le bain de zinc puis est refroidie, skin-passée en ligne sur les lignes récentes, et rembobinée, il s'agit donc d'un procédé intégré. (*Babbitt, 1995*)

La ligne de galvanisation en continu au niveau de Sider El Hadjar (fig. II.3) se compose de trois sections principales: l'entrée, la partie centrale appelée aussi section traitement et la sortie.

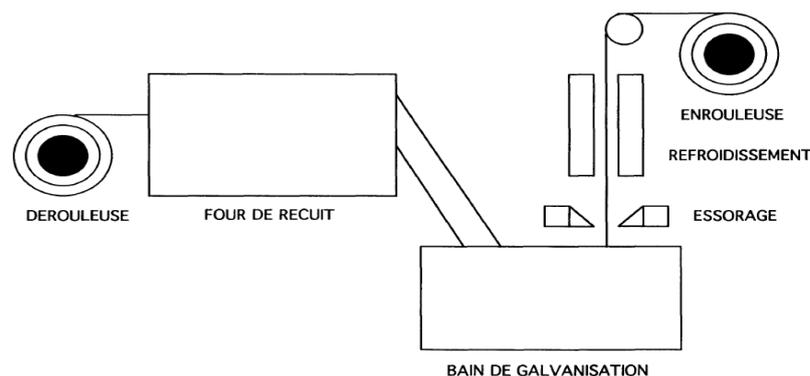


Figure. II.3: Schéma d'une ligne de galvanisation en continu (*Gast-Bray, 1994*)

II.4.2.1. Section d`entrée

Elle comporte deux dérouleuses, pendant qu'une bande se trouve en cours de déroulement, la bobine suivante est placée sur l'autre dérouleuse et la tête de la nouvelle bobine amenée jusqu'à la soudeuse. Ceci permet de réduire à un minimum les temps d'arrêt dans la section entrée et, par suite de limiter la réserve de bande dans l'accumulateur (360m) tout en exploitant à plein la capacité de la ligne. Le rôle de la soudeuse est de souder bout à bout à chaque fois la queue de la bande déroulée et la tête de la bande suivante. les opérations nécessaires à ce soudage s'effectuent en grande partie de façon automatique. (*Quantin, 2004*)

II.4.2.2. Section de traitement thermique

Cette section comprend plusieurs unités consécutives pour le chauffage et le refroidissement de tôle d'acier à bas carbone avant galvanisation ; ces unités sont implantées en ligne droite (four transversal sous forme de tunnel).

Section de préchauffage

Une zone de préchauffage non oxydant à feu direct, dont laquelle la combustion est assurée par un rapport de gaz naturel et d'air de combustion qui sont mélangés en préalable dans un brûleur.

le rapport air/gaz est maintenu automatiquement à une valeur constante pour maintenir une combustion incomplète (environ 6 % de $H_2 + CO$) quel que soit le régime du brûleur. Une injection d'air secondaire est faite à côté de chaque brûleur pour ramener le taux d'imbrulés à 2 %.

Le rôle de la zone de préchauffage est de volatiliser les huiles et les graisses de laminage par les flammes directes et préparer la surface de la bande avant immersion dans le bain de zinc.

Cette section se compose de trois zones de chauffage où le chauffage se fait en cascade.

La température à l'intérieur du four peut atteindre les 1300 °C à l'entrée de cette zone, une section de récupération, assure un meilleur rendement du four. Les fumées s'échappent dans deux sorties latérales qui sont fermées par deux clapets, commandés automatiquement, maintenant une pression constante à l'intérieur du four de préchauffage. en cas d'arrêt de la bande, les clapets viennent en position fermée et la pression de l'atmosphère dans le four de préchauffage est maintenue positive pour empêcher la pénétration de l'air de la porte SAS. (*Quantin, 2004; Tourqui, 2018*)

Section de recuit

Cette section comprend plusieurs zones:

A- Laboratoire

Cette section chauffe la bande jusqu'à la température désirée (selon le type de recuit). La température varie de 800 à 940°C. Le chauffage est assuré par des tubes radiants en forme U chauffés au gaz. Ces tubes sont montés horizontalement en dessous et dessus de la bande.

Cette section dite laboratoire est sous une atmosphère protectrice contenant environ entre (7 -15 %) H_2 et le reste N_2 .

B-Section de maintien et refroidissement contrôlé

Cette section est prévue pour faire un maintien de la bande à haute température et en même temps un refroidissement contrôlé selon la courbe du recuit désiré.

Le chauffage est assuré par des résistances électriques placées en dessous de la bande commandé de façon automatique. Le refroidissement est assuré par de l'air qui circule dans des tubes en forme de U placés en dessous et en dessus de la bande. Cette section est sous une atmosphère protectrice contenant environ entre (7 -15 %) H₂ et le reste N₂. (*Ferté, 2014*)

C- Section de refroidissement forcé par jet

Cette section permet un refroidissement rapide de la bande jusqu'à une température d'environ 500 °C. Le refroidissement est assuré par le gaz d'atmosphère (HNX) en circulation dans le four, ce gaz est aspiré du four par des ventilateurs à travers des échangeurs de chaleurs. puis envoyé à grande vitesse sur la bande. Le débit du gaz de refroidissement est réglé par le ventilateur commandé par servomoteur.

D- Section de refroidissement et de maintien

Cette section permette un refroidissement et maintien de la bande à une température de galvanisation, suivant le cycle de température précédemment décrit.

Le chauffage est assuré par des résistances électriques et des tubes de refroidissement à air aspiré.

E-Chambre de refroidissement forcé final par jet

Cette section a pour rôle de réglé la température de bande à la valeur désirée (température de galvanisation) juste avant le bain de zinc. (*Quantin, 2004; Tourqui, 2018*)

II.4.2.3 Section du bain de galvanisation

Le bac d'immersion est une cuve en céramique, le chauffage est assuré par deux inducteurs (induction stationnaire).

- ✓ longueur= 4270 mm
- ✓ largeur = 3050 mm
- ✓ profondeur du métal = 1850 mm
- ✓ enlèvement du zinc de 5000 kg /heure

****Composé d'une mécanique d'entraînement et de guidage de la bande***

- ✓ Un rouleau de fond en acier inoxydable de diamètre 600mm d'une table rainurée sert au renvoi de la bande dans le bain
- ✓ Un rouleau décombreur de diamètre 200 mm
- ✓ Un dispositif d'essorage de la bande par lame d'air froid , ce dispositif permet le soufflage de l'air froid sur les deux faces de la bandes à travers deux buses disposées de part et d'autre de la bande.et de régler la couche de zinc sur la bande après sa sortie du bain.

Une gauge d'épaisseur de la couche de zinc à rayon GAMMA est placée en aval du bain de zinc et mesure en continu la couche du dépôt de zinc sur les deux faces cotés CM ,M , CO et la

moyenne du revêtement, après elle fait la comparaison entre la valeur du revêtement affichée (programmée) et la valeur réel, puis elle procède au correctives nécessaires en agissant sur les pressions d'air dans les buses pour avoir la valeur programmée. Toutes ces actions sont commandées automatiquement. (*Quantin, 2004; Tourqui, 2018*)

✚ Composition du bain de galvanisation

Le lingot de zinc utilisé est de type Z8 (fig. II.4) selon la norme : NFA 55101 (DIN 1706) dont la composition chimique est donnée dans le tableau II.3

Tableau II.3 : Composition chimique du lingot en pourcent poids.

Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)	Cd (%)	Sn (%)	Cu (%)	Al (%)
99,95	0,02	0,01	0,02	0,001	0,002	0,002



Figure II.4: lingots du zinc et Bain de galvanisation

Les principaux éléments ajoutés ou présents dans le bain de zinc (fig. II.4) sont l'aluminium le plomb et le fer avec faible teneur comparé à celle du Zinc (Tab. II.4) (*Tourqui, 2018*)

Tableau II.4: Composition chimique du bain de Zinc

Eléments	Teneur (%)
Zn	99,76 - 99,52
Al	0,15 - 0,30
Fe	0,04 - 0,06
Pb	0,05 - 0,12

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

✓ **Le plomb** : son rôle théorique est d'améliorer la mouillabilité de la bande, mais surtout de donner une cristallisation à fleurs apparentes.

La limite de solubilité à température ambiante du plomb dans le zinc pur est de l'ordre de 0,0002 % (diagramme) ; dans le zinc faiblement allié de la galvanisation, la limite à partir de laquelle on ne voit plus de plomb ségrégué est de 180 g/t soit 0,018 %. Au-dessus de cette valeur, il se solidifie

sous forme de petits nodules sphériques inférieurs au micromètre répartis en peau du revêtement et en forte densité aux joints de grains.

✓ **L'aluminium** : son rôle est triple :

- au niveau du creuset : les mattes Fe-Zn qui s'accumulent au fond se transforment en mattes flottantes avec incorporation d'aluminium :
- sur la structure du revêtement la formation des alliages mixtes Fe-Zn est inhibée, on a seulement une très fine couche d'alliage Fe-Al ; les alliages Fe-Zn étant très fragiles, on améliore ainsi la ductilité et l'adhérence du revêtement sur l'acier ;
- si la réactivité est forte, des alliages Fe-Zn peuvent se former localement ;
- il agit aussi comme un désoxydant énergique en réduisant, lors de la pénétration de la bande dans le bain, les oxydes superficiels formés lors du recuit.

De façon générale, l'aluminium a une action très significative sur la ductilité du revêtement, l'adhérence, le fleurage, la brillance, la rugosité, la susceptibilité à la rouille blanche.

✓ **Le fer** : il est apporté par la bande. Sa quantité dépend de la réaction fer-zinc, donc de l'état de la bande lors de son entrée dans le bain. (*Quantin, 2004*)

✚ Essorage

La bande sortie du bain de zinc entraîne par capillarité un film de zinc liquide (d'autant plus épais que la vitesse de passage est grande et la rugosité forte). Ce film épais n'a pas une épaisseur contrôlée comme celle visée sur la tôle galvanisée pour l'automobile par exemple (10 à 13 μm).

La tôle passe donc entre deux couteaux de gaz (air ou azote) qui essorent le trop-plein de zinc liquide (fig. II.4) (*Quantin, 2004*)

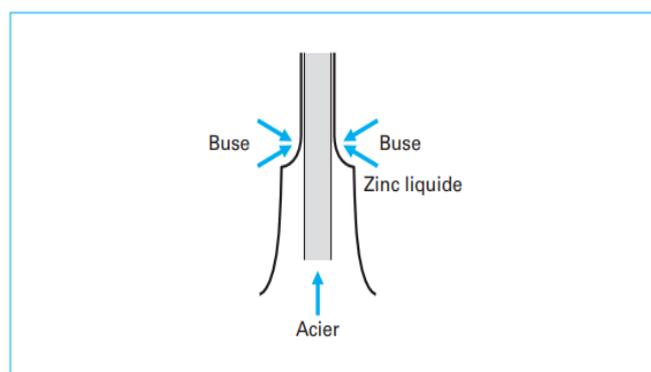


Figure II.5: Schéma de l'essorage

Les paramètres pour un bon essorage (épaisseur de zinc régulière, sans vaguelettes, sortes de coulures de zinc) sont :

- la nature du gaz d'essorage (air ou azote) ;
- la tension de la bande et sa planéité à la stabilité des buses : toute vibration de la bande conduira à un essorage différentiel et à une épaisseur de zinc irrégulière ;
- les caractéristiques de la buse (distance par rapport à la bande, largeur de la fente,etc.)

--la température de l'essorage : si elle est trop élevée, l'aspect du revêtement peut être dégradé par les jets de gaz.

Ces paramètres optimisés permettent d'éviter le splashing, redépôt de gouttelettes de zinc d'essorage sur la tôle donnant des défauts d'aspects.

L'épaisseur du revêtement sur chaque face est mesurée par deux jauges à fluorescence X situées à un niveau tel que le refroidissement de la bande soit suffisant. Ces données servent à une régularisation automatique de la charge de zinc par action sur la pression de gaz des buses, selon un modèle plus ou moins complexe. (*Wehling, 1999*)

✚ Refroidissement

Après la sortie du bain de zinc, la bande subira un premier refroidissement avec de l'air sous pression assuré par des ventilateurs, suivi par un deuxième refroidissement à l'eau avec un débit de 50 m³/h.

✚ Planage

Cette section de planage comporte:

✓ *Un skin-pass*

Après refroidissement final de la bande jusqu'à la température ambiante, on réalise un skin-pass (laminage-planage de faible allongement (fig. II.5).

Ce traitement donne à la bande sa planéité (horizontalité), ses caractéristiques mécaniques et son aspect final. Les paramètres sont la traction, la pression, l'allongement et le type de rugosité des cylindres. L'opération est pratiquée avec un fluide en solution aqueuse pour éviter le marquage de la surface par des particules (mais il faut ensuite sécher soigneusement la bande).

L'allongement donné à l'acier est choisi pour optimiser les caractéristiques mécaniques du produit pression et traction ont un rôle sur le transfert de rugosité du cylindre sur la surface brute de solidification du zinc par indentation. (*Lebon, 1994*)

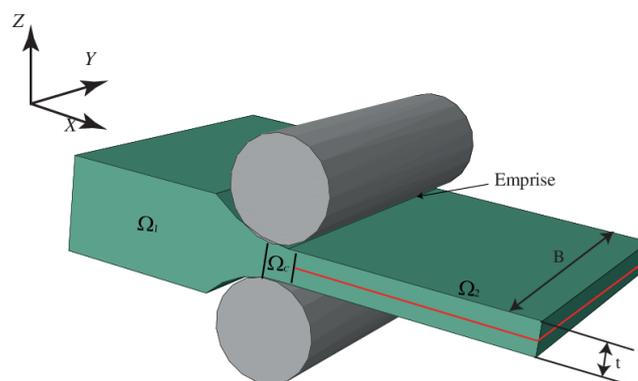


Figure II.5 : Schéma du laminage qui représente aussi celui du skin-pass .

✓ *Une planeuse sous traction*

Le rôle du planage sous traction est d'améliorer la qualité de surface de la bande galvaniser a savoir l'élimination des ondulations dans le centre et sur les rives .Cette amélioration est obtenu par l'allongement de toutes les courtes fibres de la bande sous l'action combinée d'efforts de

traction et de flexion (déformation plastique permanente sous forme d'étirage). La planéité est assurée par la pression exercée de deux cassettes a l'aide des rouleaux planeurs.

✚ Section de traitement chimique (passivation)

Le rôle de cette section est de déposer un film d'une solution à base de chrome (traitement chimique de chromage) sur les deux surfaces de la bande contre la formation de la rouille blanche durant le stockage des bobines

II.4.2.4 Section Sortie

Elle comporte une accumulation semblable a celle de l'entrée mais avec une capacité de 180 mètre, une cisaille double et une bobineuse.

Au moment du cisaillement de la partie de la soudure pour extraction de la bobine prête pour le client, l'accumulation vient de ce remplir pour assurer la continuité de marche en amont.

Un contrôleur de qualité au niveau de cette section assure le contrôle et le mentionnement sur la bobine ce qui suit:

- ✓ Caractéristiques de la bobine (Numéro bobine, numéro de coulée, nuance, poids, dimensions, clients)
- ✓ Prise d'échantillon pour faire les essais des caractéristiques mécaniques
- ✓ Prise d'échantillon pour contrôle de l'adhérence
- ✓ Prise d'échantillon pour faire l'essai de la voie humide (calcul de la masse de zinc déposée en g/m²)
- ✓ Contrôle de l'état final de la bobine (enroulement, rives, aspect des deux faces et contrôle dimensionnel)

✚ Caractéristiques des produits

Bande d'acier laminé à froid dont la résistance à la rupture peut atteindre 45 kg/mm² et limite élastique 35 kg/mm².

Tableau II.5: caractéristiques des bobines laminées a froid. (*Tourqui, 2018*)

	Min	Max
Largeur de bande	900mm	122mm
Epaisseur de bande	0,32mm	2,00mm
Poids de bobine	24000kg	18tonnes

✚ Bobines et tôles Galvanisées

- **Désignation du produit :** produit galvanisé par immersion à chaud.
- **Domaine d'application :** pour formage à froid.
- **Dimensions :**

- ✓ Epaisseur : 0,35 à 2,00 mm
- ✓ Largeur : 600 à 1350 mm
- ✓ Longueur de tôle : 1200 à 3300 mm
 - **Poids unitaire :**
- ✓ Bobines : 24000kg à 18 tonnes max.
- ✓ Paquet de tôles : 1,5 à 4,00 tonnes
- ✓ Poids de revêtement de zinc :
 - 100 g/m² Mini
 - 600 g/m² Maxi



Figure II.7 : Bobines Galvanisées

Tableau II.6: Caractéristiques mécaniques des tôles galvanisé (NF EN 10346, 2015)

Épaisseur (mm)	Résistance à la traction Rm(MPa)	Allongement à la rupture A%
0,35 - 0,50		≥ 18
0,50 - 0,70	270 -450	≥ 20
0,70 - 2,00		≥ 22



*Chapitre III:
Matériels Et Techniques
Expérimentales*

III.1. Introduction

Ce chapitre porte sur la caractérisation des échantillons galvanisés. La mise en œuvre et le contrôle des propriétés des revêtements nécessitent une bonne connaissance de la nature chimique et structurale de la surface. Les différentes techniques de caractérisation du revêtement utilisées au cours de cette étude sont ; les essais mécaniques, l'essai de corrosion, la brillance et la microscopie optique.

III.2. Techniques de caractérisations

III.2.1. Echantillons étudiés

Pour cette étude nous avons utilisé une seule nuance d'acier au carbone, celle de l'acier A9 qui est obtenue à partir de complexe Sider Elhadjar –Annaba - de différentes épaisseurs 0,5 mm, 0,87mm et 0,95 mm.

Les échantillons ont été découpés à partir des trois tôles d'acier déjà galvanisées.

Comme il a été mentionné dans le chapitre II, la galvanisation à chaud en continu des bandes laminées à froid a été effectué dans un bain formé principalement du Zinc, de l'aluminium, du plomb et du fer durant 4sec d'immersion. Après ce temps de diffusion il y'a formation sur les deux faces une couche de revêtement en Zinc.

III.2.2. Essai de la voie humide par décapage

✚ Principe

L'éprouvette doit avoir une superficie au minimum 50 cm², la perte de masse en grammes après dissolution du revêtement, multipliée par 2, représente la masse totale du revêtement en grammes par mètre carré du produit, sur ses deux faces. (*Norme : ASTM A90*)

✚ Préparation de la solution

L'acide chlorhydrique HCl (1,19g/ml) est dilué avec de l'eau déminéralisée ou distillée à raison d'une partie de HCl pur pour une partie d'eau (dilution 50 %). L'hexaméthylène-tétramine est ensuite ajoutée, en remuant, à raison de 3,5 g/l de solution diluée d'acide chlorhydrique.

La solution ainsi préparée permet d'effectuer de nombreuses dissolutions successives dans des conditions d'attaque du revêtement satisfaisantes, tant du point de vue de la rapidité que de l'exactitude. (*NF EN 10139,2016*)

✚ Mode opératoire

A effectuer sur chaque éprouvette les opérations suivantes :

- ✓ Découper trois échantillons de tôle galvanisée de 50cm² de surface (CO, M, CM)
- ✓ Si nécessaire, dégraisser l'éprouvette avec un solvant organique qui n'attaquera pas le revêtement et la sécher soigneusement ;
- ✓ peser l'éprouvette à 0,001 g près (**m₁** masse avant décapage);
- ✓ plonger l'éprouvette dans la solution d'acide chlorhydrique inhibée par de l'hexaméthylène tétramine, à température ambiante (20 °C à 25 °C);

- ✓ Laisser l'éprouvette plongée dans la solution jusqu'à ce que le dégagement d'hydrogène cesse ou que seulement quelques bulles se dégagent;
- ✓ après attaque, laver l'éprouvette et la brosser sous l'eau courante, la sécher au chiffon, puis par chauffage à environ 100 °C et la refroidir par soufflage d'air chaud;
- ✓ peser à nouveau l'éprouvette à 0,001g près (m_2 masse après décapage) déterminer la différence entre la masse de l'éprouvette revêtue et celle de l'éprouvette sans son revêtement cette différence, calculée en grammes, représente la masse m_R du revêtement.

$$m_R = (m_1 - m_2) \times 2$$

Masse totale du revêtement du Zn: $m_{\text{totale}} = [m_R(\text{CO}) + m_R(\text{M}) + m_R(\text{CM})]/3$.

III.3.3. Essai de la résistance à la traction

✚ Principe

Parmi tous les essais mécaniques. L'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité, la résistance à la rupture et l'allongement après rupture.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces.

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale). $\sigma = F/S_0$
De même, la déformation ε se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale). $\varepsilon = \Delta L/L_0$. (Darsouni, 2018)

✚ Mode opératoire

L'essai est pratiqué sur une machine de traction (fig.III.1(a)), une fois l'éprouvette est placé, nous appliquons une légère précharge afin d'être sûr que l'on n'a pas de jeu. Puis, nous effectuons un déplacement de la travée qui a pour effet d'étirer l'éprouvette jusqu'à sa rupture.

Nous avons utilisé dans cet essai des éprouvettes galvanisés de différentes épaisseurs 0,5 mm, 0,87 mm, 0,95 mm et de 250 mm de longueur et 20mm de largeur dans le sens transversal.

Tracer la longueur initiale L_0 à 80 mm en croisant sur le partie calibrée

- ✓ Placer l'éprouvette entre les mors dans l'axe correspondant aux traits de repères sur les mâchoires
- ✓ Remettre les aiguilles du cadran à zéro
- ✓ Afficher la vitesse en fonction de la section
- ✓ Mettre en marche et observer les aiguilles, les forces d'élasticité et résistance R
- ✓ La machine impose un allongement croissant à l'éprouvette, et enregistre simultanément l'effort appliqué F et l'allongement $\Delta L = L - L_i$. Selon l'équipement utilisé, L_i est soit la longueur totale initiale L_c (longueur de la partie calibrée), soit une longueur initiale

déréférence L_0 entre deux repères tracés sur l'éprouvette (figure III.1(b)). L'essai est généralement poursuivi jusqu'à rupture, après quoi on mesure un allongement ultime persistant ΔL_u ($L_u - L_0$) (Norme: ASTM E8 & ASTM A370)

Les valeurs obtenues de cet essai sont décrit comme suit :

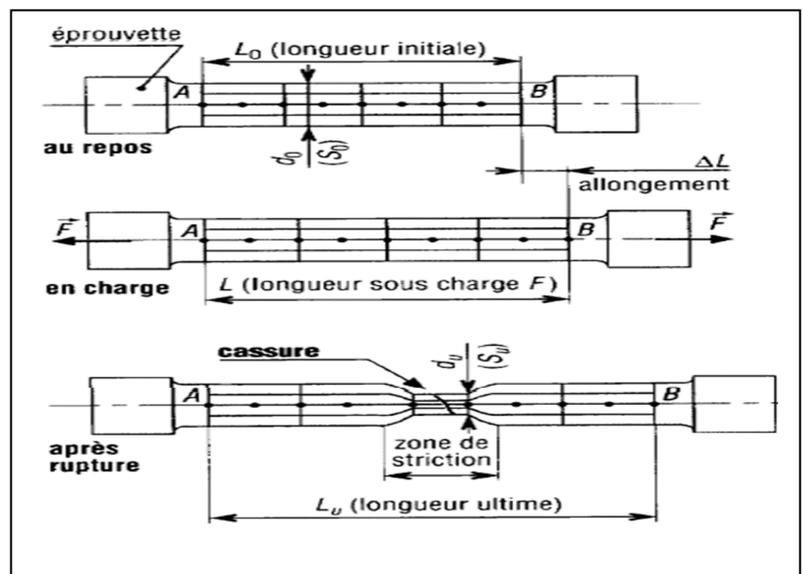
- ✓ Re: Limite d'élasticité (MPa);
- ✓ Rm: Résistance à la traction (MPa);
- ✓ A %: Allongement à la rupture.
- ✓ La limite d'élasticité (ou résistance élastique à la traction): $R_e = F_e / S_0$
- ✓ La charge maximale; il est appelée résistance à la traction ou résistance à la rupture. (bien qu'il n'y ait pas encore rupture): $R_m = F_r / S_0$
- ✓ L'allongement relatif $\Delta L / L_0$ de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure L_0 (L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette): $\epsilon \% = 100 \cdot (\Delta L / L_0)$
- ✓ La charge unitaire, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette S_0 : $\sigma = F / S_0$

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure L_u et S_u respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes. L'allongement relatif total ou A% de l'éprouvette est l'allongement de rupture: $A \% = 100 \cdot (L_u - L_0 / L_0)$

où L_u est la longueur de l'éprouvette après rupture



(a)



(b)

Figure III.1.: (a):Machine d'essai de traction universelle Mohs & Federhaff Losenhausen (LOS)

(b) Schéma d'une éprouvette de traction plaque et de son évolution en cours d'essai.

III.3.4. Essais de la dureté.

✚ Principe

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration ; un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. Bien que la dureté ne soit pas une propriété simple à définir, les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé. (*Norme : ASTM E18 & ASTM A370*)

Le Duromètre HR-150A (fig.III.2) est un testeur de dureté Rockwell manuel, chargement par levier, fiable et durable, pas besoin de puissance, efficacité de test élevée.

Le cadran lit directement la valeur de dureté avec des échelles de HRA, HRB et HRC et peut être équipé en option avec d'autres échelles de Rockwell ; La broche sans frottement est utilisée et la précision de la force d'essai est élevée ;

La précision est conforme à la norme nationale (*Norme : GB / T230.1 / .2, ISO 6508-2 ; ASTM E18*)



Figure III.2: Duromètre HR-150A.

✚ Caractéristiques

Tableau III.1 : Caractéristiques de l'appareille Duromètre HR-150A.

Plage de mesure	20 - 88HRA, 20 - 100HRB, 20 - 70HRC
Charge majeure	588,4, 980,7, 1471N (60, 100, 150 kgf)
Hauteur maximale de test	170 mm
Profondeur de gorge	135 mm
Résolution de dureté	0,5 heure
Dimension	466 x 238 x 630 mm
Poids approximatif	65 kg

✚ Méthode opératoire

Découper une éprouvette carrée de 25cm² du milieu de la longueur de l'échantillon choisir l'échelle convenable à l'essai à l'aide au levier de charge:

F = 60kg HRA pour l'éprouvette de l'épaisseur 0,5mm

R=100kg HRB pour les éprouvettes des épaisseurs 0,87mm, 0.95mm

- ✓ Placer l'éprouvette sur la table ou enclume, monter la table portant éprouvette jusqu'au contact du pénétrateur (bille 1/16 en cône de diamant selon le produit à tester).
- ✓ Une fois touche le pénétrateur, la grande aiguille dérive vers zéro et la petite aiguille vers le repère de précharge. A cet instant, lâcher le bar qui libère à son tour la charge choisir et observer l'aiguille jusqu'à sa stabilité totale.
- ✓ Ramener ensuite le bar doucement a sa position initiale et lire l'indication donnée par l'aiguille sur le cadran.
- ✓ Répéter le teste 03 fois en respectant les distances (longueur entre 2 point 3 fois le diamètre de la bille) et inscrivez la moyenne des résultats. (*Norme : ISO 3815*)
- ✓ Pour convertir les valeurs obtenues par HRA vers les HRB il se référer au fichier correspondant pour cette conversion; Annexe 1.

III.3.5. Essai de l'emboutissage

✚ Principe

L'emboutissage est un procédé de mise en forme qui consiste à venir déformer plastiquement une tôle métallique mince (en général d'épaisseur inférieure à 3 mm) pour générer, à partir d'une surface souvent plane, une forme complexe de géométrie non développable. Ce procédé est l'un des seuls à pouvoir tenir des cadences de production élevées tout en respectant les tolérances géométriques exigées. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie automobile pour fabriquer les ouvrants des véhicules (portières, capot, coffre, toit ...) mais également dans les industries aéronautique, de l'électroménager, de l'emballage alimentaire, etc (*Coer, 2014*)

✚ Mode opératoire

- ✓ Le poinçon et serre-flan sont relevés; la tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice.
- ✓ Le serre-flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir la tôle tout en lui permettant de glisser.
- ✓ Le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique en l'appliquant contre le fond de la matrice.
- ✓ Le poinçon et le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).

- ✓ On procède au " détournage " de la pièce, c'est-à-dire à l'élimination des parties devenues inutiles. (Essentiellement les parties saisies par le serre-flan).

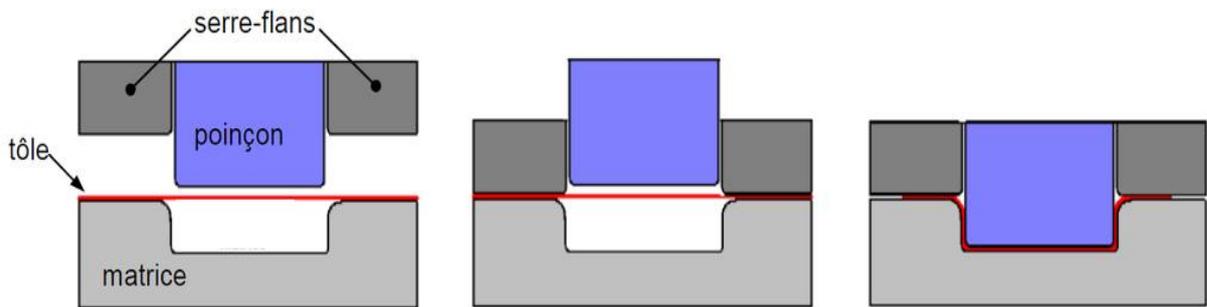


Figure III.3 : principe de l'emboutissage

- ✓ Pour définir la longueur limitée d'emboutissage en appliquant la loi suivante :

Largeur limitée d'emboutissage = longueur de déformation – épaisseur de la tôle

L'essai d'emboutissage des échantillons de l'acier galvanisé à différentes épaisseurs (0,5mm, 0,87mm et 0,95mm) préparés lors de cette étude, a été effectué au niveau de l'unité Sider El Hadjar section LAF

III.3.6. Analyse de surface par microscope optique

La microscopie optique permet d'obtenir des informations sur les éléments constitutifs des microstructures telles que la texture, la dimension des grains et les différentes phases présentes. Afin de rendre ces éléments visibles à partir d'une surface polie.

Par opposition, la macroscopie consiste à examiner un échantillon à l'œil nu.

L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. (2www, 2021)

✚ Mode opératoire

*Préparation de l'échantillon

- ✓ *Enrobage d'échantillons*

Dégraissant l'échantillon à l'acétone avant l'enrobé, en employant l'enrobage à chaud et à froid

Enrobage à froid : jusqu'à environ 100 °C, pression atmosphérique ou sous vide

Enrobage à chaud : à 350 bars et 180 °C max

- ✓ *Prépolissage et polissage*

Bien que les différents revêtements de zinc varient en matière de dureté, il est possible de prépolir et de les polir automatiquement avec la même méthode de préparation. Lorsque l'on utilise un équipement de prépolissage/polissage sans utiliser de système de dosage automatique, le spray diamanté donne d'excellents résultats, car il ne contient pas d'eau. Pour les systèmes de dosage automatique, des suspensions diamantées et lubrifiants exempts d'eau sont nécessaires afin d'éviter de tacher les revêtements. Les draps en soie gardent les échantillons plats, mais toutefois

pas complètement sans rayures. Un polissage sur draps doux avec des poils devra être évité, car cela pourrait créer un certain relief. L'emploi d'un équipement de prépolissage/polissage automatique avec dosage automatique, tel que Roto System, comporte l'avantage de donner des résultats fiables, très bons et reproductibles.

L'analyse par microscope optique des échantillons de l'acier galvanisé a différentes épaisseur (0,5, 0,87 et 0,95mm) préparés lors de cette étude, a été effectué au niveau de l'unité Sider El Hadjar section LAF

****Utilisation du microscope optique***

- ✓ Vous placez le microscope (fig.III.4) face à vous, bien droit;
- ✓ Vous sélectionnez le plus petit objectif ;
- ✓ Vous éclairez la lampe ;
- ✓ Vous placez la lame à observer au centre de la platine ;
- ✓ Vous fixez la lame ;
- ✓ Vous mettez au point au faible grossissement ;
- ✓ Vous explorez la préparation et vous choisissez le meilleur endroit que vous centrez ;
- ✓ Vous mettez en place l'objectif moyen ;
- ✓ Vous faite la mise au point au moyen grossissement en remontant l'objectif ;
- ✓ Vous passez au fort grossissement et recommencez la mise au point ;
- ✓ Vous sélectionnez le meilleur grossissement pour réaliser un dessin d'observation ;

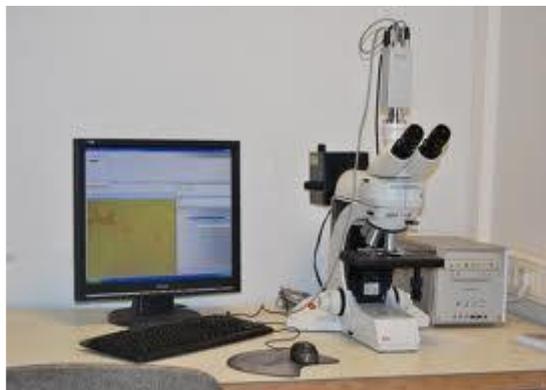


Figure III. 4: *Microscope optique de mesure BX53M*

III.3.7. Analyse par Spectrométrie à Émission Optique (OES)

La spectrométrie par émission optique avec excitation par étincelle (OES) est la technique d'analyse la plus fiable et la plus établie pour déterminer la fraction massique ou l'identification des métaux et de leurs alliages. Les spectromètres d'émissions optiques répondent aux exigences les plus élevées de l'industrie métallurgique, du contrôle de la production à la recherche et au développement, de l'inspection des matériaux entrants ou sortants et au sélection de la ferraille.(3www, 2021)

Principe

Le rayonnement émis est guidé dans un système optique, où il est décomposé en composantes spectrales individuelles. Chaque élément contenu dans l'échantillon émet à plusieurs longueurs d'onde et peut donc être converti en valeurs numériques mesurées par l'intermédiaire de détecteurs sensibles à la lumière. L'intensité de rayonnement mesurée de cette façon est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon. Sur la base de matériaux de référence certifiés ayant des valeurs de concentration et des compositions d'alliage différentes, l'intensité et la concentration de rayonnement mesurées sont converties en fonction mathématique. La relation mathématique ainsi déterminée permet la conversion de l'énergie d'émission des échantillons inconnus en concentrations d'éléments. . (4www, 2021)

Le spectromètre ARL 3460 Advantage (fig.III.5) est l'un des instruments de la spectrométrie à émission optique les plus établis dans l'industrie des métaux. Cet instrument offre une solution idéale pour les fonderies et les producteurs de métaux. (4www, 2021)

L'examen par OES de nos échantillons (acier galvanisé a différentes épaisseur (0,5mm, 0,87mm et , 0,95mm) a été effectué au niveau de l'unité Sider el hadjar section LAF



Figure III.5: Spectromètre ARL 3460

III.3.8. Mesure de la brillance

La brillance est une perception visuelle d'une surface. C'est un élément important de l'apparence de cette surface; elle modifie notre perception des couleurs et des formes et influence notre vision. La brillance altère les objets par l'interaction entre la lumière incidente, la surface et l'observateur et dépend de variables telles que l'angle d'illumination, la structure de la surface, les caractéristiques physiques et les conditions d'observation. La brillance joue un rôle important dans l'acceptabilité visuelle de nombreux produits. Elle devrait, à des fins de qualité, être contrôlée à l'aide d'un instrument de précision, surtout lorsqu'elle varie au cours du processus de production. L'apparence visuelle d'une surface, se quantifie suivant différents critères optiques, tels que la brillance, la couleur et la structure. (Belbah, 2018)

La brillance de revêtement galvanique de l'acier, dans notre étude a été mesurée par l'usage d'un brillance-mètre GLOSS CHECKER IG-331 (HORIBA) au niveau du laboratoire LAIGM

Université 8 Mai 1945 Guelma, avec un faisceau de lumière blanche étendue et un angle de mesure de 60° (fig.III.6). L'étalonnage a été réalisé automatiquement au moyen d'un étalon noir hautement poli, intégré dans l'appareil de mesure de la brillance. La valeur finale de la brillance est la moyenne de trois mesures effectuées pour chaque revêtement.



Figure III.6: Brillance-mètre GLOSS CHECKER IG-331 (HORIBA)

III.3.9. Test de corrosion

✚ Préparation des échantillons

Le test de corrosion est effectué sur des tôles en acier A9 galvanisés à différentes (0,5mm , 0,87mm et 0,95mm). Pour une préparation préliminaire des surfaces, les échantillons galvanisés sont nettoyés à l'aide de l'acétone ou bien avec de l'eau distillée et on termine par un séchage à l'air afin d'éviter la formation immédiate des produits de corrosion. les échantillons avec le revêtement galvanique ont été préparés au niveau du complexe Sider El-Hadjar.

✚ Étude gravimétrique

Cette technique a été utilisée pour étudier l'efficacité de l'épaisseur de revêtement galvanique pour l'inhibition de corrosion. Cette méthode consiste à peser les échantillons galvanisés ensuite les immerger dans des béchers contenant une solution corrosive NaCl 3% (fig.III.7). Après une durée de 48h, les échantillons sont retirés de la solution, rincés avec l'acétone et l'eau distillée puis séchés et pesés.

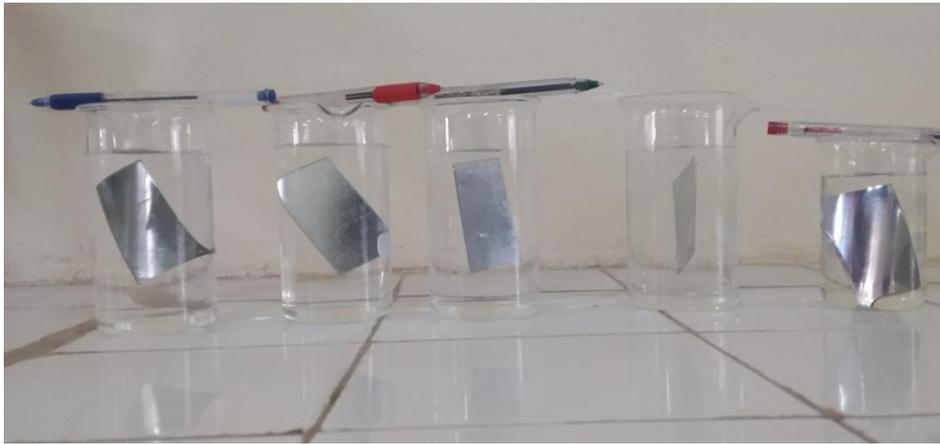


Figure III.7: Protocole du test de corrosion

La vitesse de corrosion est calculée à partir de la relation : (*Hanachi, 2018; Belgharbi, 2020*)

$$V_{\text{corr}} = \Delta m / S t$$

V_{corr} : Vitesse de corrosion en (g/cm².h).

S : Surface de l'échantillon en (cm²).

t : temps de l'expérience en (h).

Δm : différence de masse en (g).

$$\Delta m = m_i - m_f$$

m_i : la masse de l'échantillon avant l'immersion.

m_f : la masse de l'échantillon après l'immersion



*Chapitre IV:
Résultats Et discussions*

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents résultats expérimentaux obtenus lors des différents essais réalisés sur les tôles galvanisées au niveau du complexe Sider El-Hadjar

IV.2. Analyse par Spectrométrie à Émission Optique (OES)

Le tableau IV.1 présente la compositions chimiques des tôles d'acier avant galvanisation à différentes épaisseurs obtenus avec une analyse par spectromètre d'émission optique

- **Echantillon 1** ↔ Nombre de bobine 16531 ↔ épaisseur 0,5 mm

- **Echantillon 2** ↔ Nombre de bobine 16497 ↔ épaisseur 0,87mm

- **Echantillon 3** ↔ Nombre de bobine 16595 ↔ épaisseur 0,95mm

Tableau IV.1 : Analyses chimiques des tôles d'acier à différentes épaisseurs (OES)

N° de coulée	16531	16595	16497
épaisseur	0,5mm	0,95mm	0,87mm
C %	0,10	0,11	0,08
Mn %	0,28	0,36	0,45
Si %	0 ,01	0,03	0,01
P %	0,012	0,01	0,02
S %	0,008	0,004	0,001
Cu %	0,046	0,04	0,059
Al %	0,036	0,05	0,037
Ti %	0,001	0,001	0,001
Nb %	0,003	0,001	0,006
Ni %	0,009	0 ,004	0,022
Cr %	0,009	0,015	0,063
Mo %	0,006	0,004	0,012
V %	0,003	0,001	0,004
Sn %	0,002	0,001	0,003

D'après les résultats de l'analyse chimique par OES des tôles d'acier avant galvanisation on ne voit pas une grande différence entre les pourcentages massiques des éléments chimiques. La faible différence de ces pourcentages est peut être due à la variation de l'épaisseur.

IV.3. Essai de la voie humide par décapage

La perte de masse en grammes après dissolution du revêtement (fig.IV.2) dans la solution d'acide chlorhydrique inhibée par de l'hexaméthylène tétramine, à température ambiante (20 °C à 25 °C); représente la masse totale du revêtement en grammes par mètre carré du produit, sur ses deux faces. La masse de la couche du revêtement (Fig.IV .1) formé est mesurée sur la surface de l'acier selon la voie humide (en prenant la valeur moyenne).Les résultats obtenus sont consignés dans des tableaux et traduits par des figures(IV.2- IV.4 et fig.IV.3

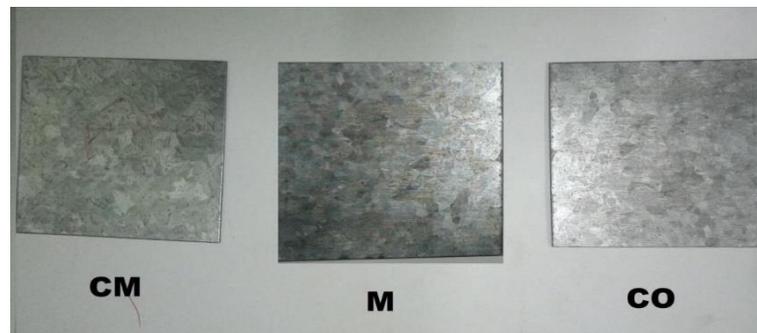
$$m_R = (m_1 - m_2) \times 2$$

m_R : masse du revêtement

m_1 : masse décapage

m_2 :masse après décapage

Masse totale du revêtement du Zn: $m_{\text{totale}} = [m_R (\text{CM}) + m_R (\text{M}) + m_R (\text{CO})]/3$.



-Coté Mécanique (CM) - Milieu (M) - Coté Opérateur (CO)

Figure IV.1: Echantillons avant décapage

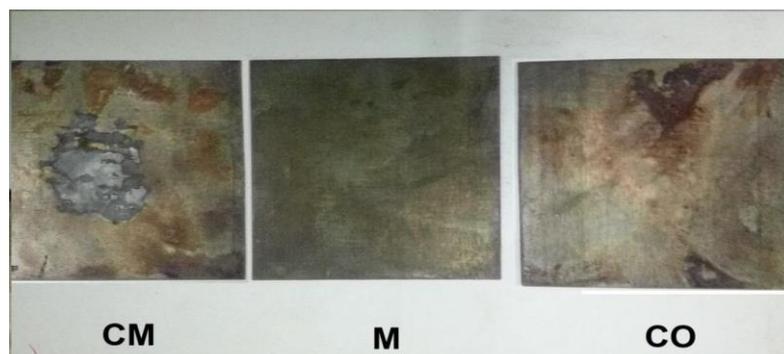


Figure IV.2 : Echantillons après décapage

✚ Résultats des essais de la voie humide

On prend trois échantillons de différentes épaisseurs (0,5mm, 0,8mm et 0,95mm) à partir des bobines galvanisées de revêtement du type Z140 qui était programmé selon la Norme ASTM A90 : pour un revêtement 140 la masse de revêtement du zinc doit être supérieure ou égale 140g/m².

les résultats de calcul de la voie humide des ces trois échantillons sont présentés respectivement sur les tableaux (Tab. IV.2 , Tab. IV.3 et Tab. IV.4)

Tableau IV.2 : Masse du revêtement de l'échantillon 1 pour les trois cotés

Epaisseur = 0,50 mm	CM	M	CO
Masse avant décapage (g)	1947	2005	1976
Masse après décapage (g)	1847	1909	1891
Masse de revêtement (g/m ²)	200	192	170

Tableau IV.3 : Masse du revêtement d'échantillon 2 pour les trois cotés

Epaisseur = 0,87mm	CM	M	CO
Masse avant décapage (g)	3801	3798	3775
Masse après décapage (g)	3726	3725	3697
Masse de revêtement (g/m ²)	150	146	156

Tableau IV.4 : Masse du revêtement d'échantillon 3 pour les trois cotés

Epaisseur = 0,95mm	CM	M	CO
Masse avant décapage (g)	3987	4109	4019
Masse après décapage (g)	3906	4030	3934
Masse de revêtement (g/m ²)	162	158	170

Les résultats de l'essai de la voie humide par décapage présentés dans les tableaux allant de tableau IV.2 jusqu'au tableau IV.4 ; montre qu'il y a une différence significative de la masse du revêtement au niveau de trois points prélevés CM, M et CO pour les trois échantillons, cette différence de masse de revêtement pour les trois points reflète la non uniformité des couches galvanisées ceci est peut être due à un mauvais essorage ou laminage et planage.

Tableau IV.5 : Masse moyenne et épaisseur du zinc déposé

Épaisseur de tôle galvanisée (mm)	CM (g/m ²)	M (g/m ²)	CO (g/m ²)	Moyenne (g/m ²)	Masse programmée (g/m ²)	Épaisseur Zn déposé (µm)
0,50	200	192	170	187	≥140	13,16
0,87	150	146	156	150	≥140	10,56
0,95	162	158	170	163	≥140	11,47

L'épaisseur du zinc déposé sur la tôle en acier peut être calculée à partir des masses de revêtement ; une masse de revêtement de zinc de 100 g/m² sur les deux faces correspond à une épaisseur de revêtement de zinc d'environ 7,1 µm par face.

épaisseur de revêtement de zinc (µm par face)

$$= \frac{\text{Masse de revêtement de zinc, g/m}^2 \text{ (deux faces)}}{2 \times 7,1 \text{ g/cm}^3 \text{ (= masse volumique du zinc)}}$$

Les résultats du tableau IV.5 montrent l'épaisseur de la couche du Zn déposée en µm pour les trois échantillons étudiés (tôles galvanisées de 0,5mm, 0,87mm, 0,95mm) varient respectivement de 13,16 , 10,56 et 11,47 µm (Tab.IV.5). Cette différence d'épaisseur est expliquée par la différence dans le temps d'immersion, la vitesse de défilement des bandes, la température et la composition chimique du bain, et bien évidemment par les exigences techniques demandées par la bande

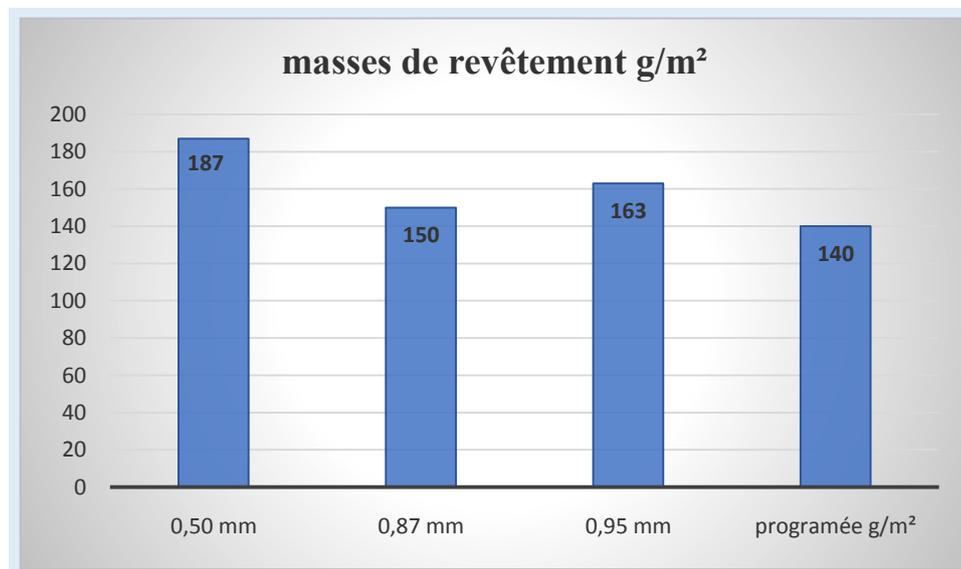


Figure IV.3 : : Histogramme des masses de revêtement des trois tôles galvanisées

L'historgramme de la figure IV.3 représente une comparaison entre les masses moyennes de revêtement obtenues pour différents point des tôles revêtus (CM, M, CO) pour les trois épaisseurs choisies pour cette étude. La lecture de l'historgramme montre que la masse moyenne du

revêtement de la tôle avec l'épaisseur 0,5mm est plus élevée que celle des épaisseurs 0,95mm et 0,87mm respectivement néanmoins la masse la tôle de 0,87mm et proche de la masse programmée alors que les deux autres sont vraiment supérieure à (140g/m^2).

IV.4. Essais mécaniques des tôles galvanisées

IV.4.1. Essai d'emboutissage

L'emboutissage est un procédé de mise en forme qui consiste à déformer plastiquement une tôle métallique mince (en général d'épaisseur inférieure à 3 mm) pour générer, à partir d'une surface souvent plane, une forme complexe.

Tableau IV.6 : Largeur limitée d'emboutissage

Epaisseur de tôle galvanisée (mm)	Largeur de déformation (mm)
0,50	10,1
0,87	11,8
0,95	12,2



Figure IV.4 : : Histogramme de la largeur de déformation des trois tôles galvanisées

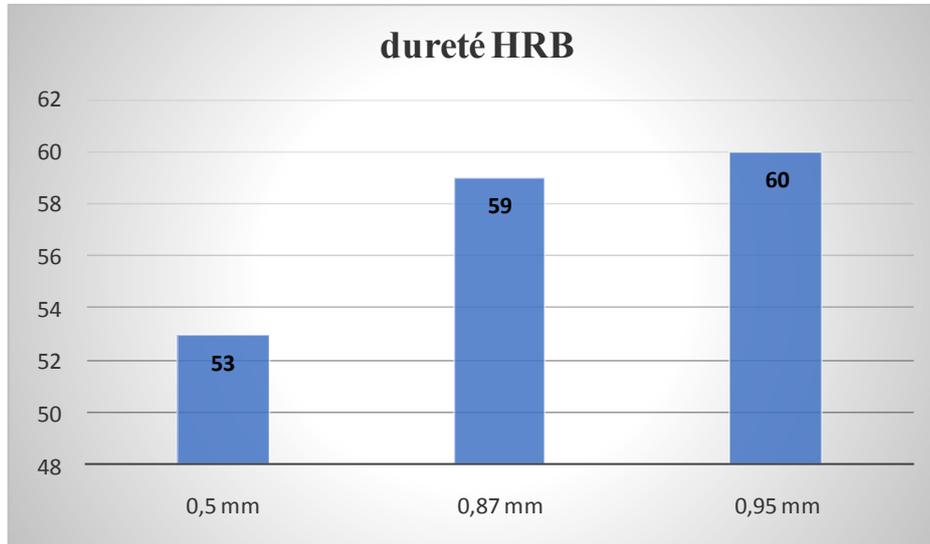
D'après l'histogramme illustré sur la fig.IV.4 la largeur de déformation (emboutissage) augmente en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de la tôle en acier

IV.4.2. Essai de la dureté

Afin de mieux illustrer les résultats des expériences de dureté pour les trois échantillons de tôle revêtue de 0,5mm, 0,87mm et 0,95mm d'épaisseurs, toutes les mesures obtenues lors cet essai sont regroupées dans le tableau IV.7:

Tableau IV.7: Dureté des trois échantillons

N° d'essai Epaisseur(mm)	Essais 1 HRB	Essais 2 HRB	Essais 3 HRB	Moyenne HRB
0,50	53	53	53	53
0,87	60	58	59	59
0,95	60	60	60	60

**Figure IV.5 :** : Histogramme de la dureté des trois tôles galvanisées

Les résultats de dureté présentés sur la figure IV.5 montrent que la dureté des tôles revêtue est proportionnelle à l'épaisseur de la tôle galvanisée.

IV.4.3.Essai de la résistance à la traction

L'essai de traction sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que , la limite d'élasticité, la résistance à la rupture et l'allongement après rupture.

L'essai de traction est généralement poursuivi jusqu'à rupture, après quoi on mesure un allongement ultime persistant $\Delta L_u = L_u - L_0$ avec (L_u : largeur jusqu'à la rupture et $L_0=80$ mm). les résultats de cette mesure sont regroupés dans le tableau IV.8

Tableau IV.8 : Allongement ultime persistant $\Delta L_u = L_u - L_0$

Epaisseur de tôle galvanisée (mm)	L_u (mm)	ΔL_u (mm)
0,50	104	24
0,87	106	26
0,95	107	27

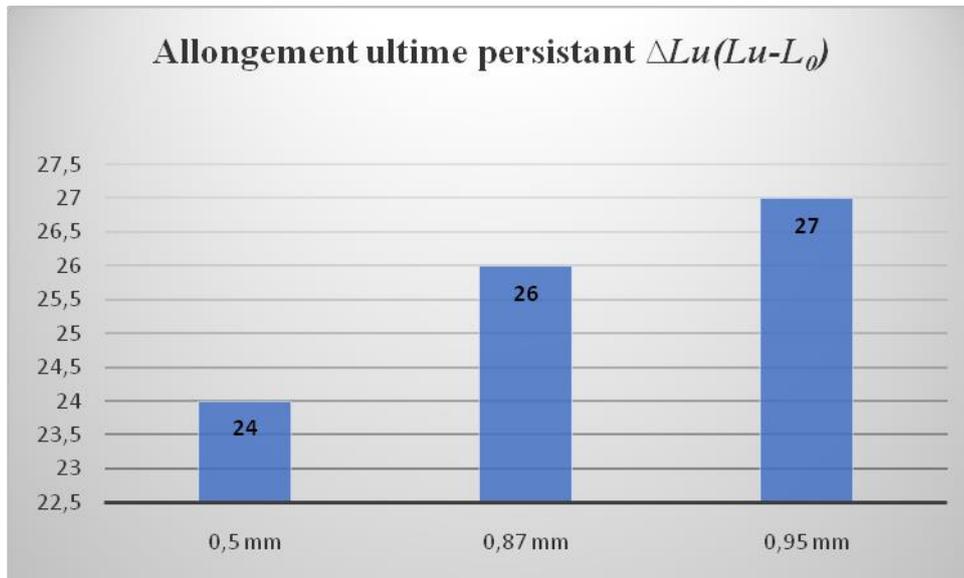


Figure IV.6 : : Histogramme de l'allongement ultime des trois tôles galvanisées

D'après l' histogramme illustré sur la figure IV.6 l'allongement ultime varie proportionnellement avec l'augmentation de l'épaisseur de la tôle en acier galvanisée.

Tableau IV.9 : Essai de traction de tôle galvanisée

Propriétés mécaniques Epaisseur(mm)	Limite d'élasticité Re(MPa)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Allongement à la rupture A(%)= $\Delta L_u/L_0$
0,5	339	400	30,0
0,87	330	375	32,5
0,95	322	368	33,7
Norme (NF EN 10346, 2015)	300-350	270 -450	20-22

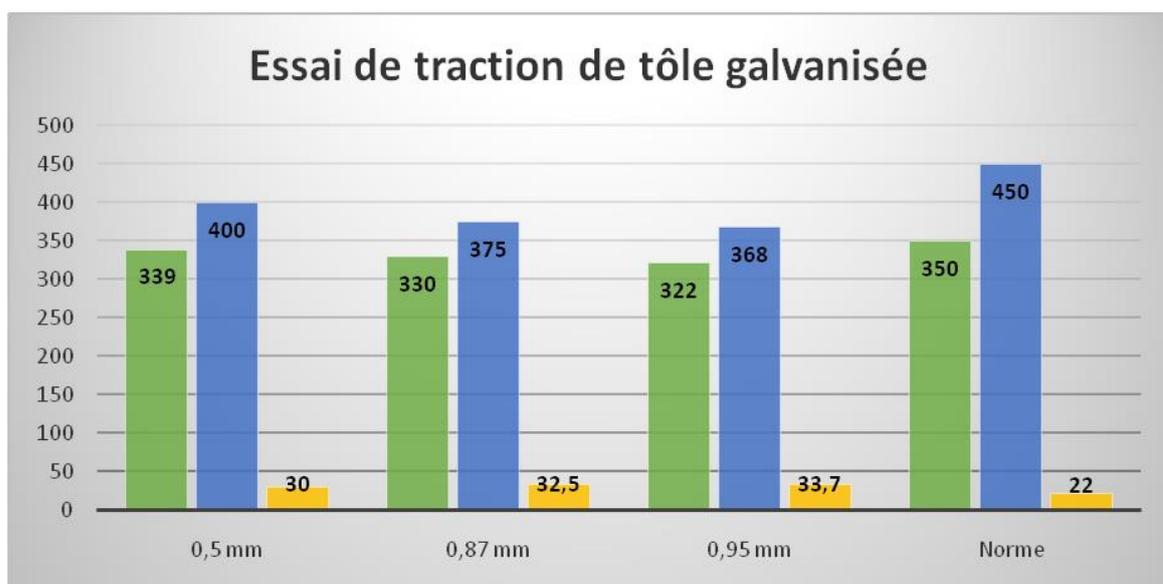


Figure IV.7 : Histogramme de l'essai de traction des trois tôles galvanisées

Les résultats de la figure IV.7 représentent une comparaison entre les propriétés mécaniques obtenues par l'essai de traction pour différentes épaisseurs de tôle galvanisées.

la lecture de ces résultats montre que la limite d'élasticité (R_e) et la résistance à la traction (R_m) varie d'une manière décroissante c.a.d inversement proportionnelle par rapport à l'augmentation de l'épaisseur des trois tôles ; alors que l'allongement à la rupture ($A\%$) varie d'une façon croissante par rapport à l'épaisseur (0,5mm , 0,87mm et 0,95mm). Les trois propriétés mécaniques présentent alors des valeurs conformes aux normes.

IV.5. Test de corrosion

Les tests de corrosion sont effectués sur des tôles en acier A9 galvanisées. Les échantillons avec le revêtement galvanique ont été préparés au niveau du complexe Sider El-Hadjar.

Dans cette partie de l'étude nous avons calculé la vitesse de corrosion V_{corr} ; de l'acier galvanisé (0,5mm,0,87mm,0,95mm) après un temps d'immersion de 48 heures, dans un milieu corrosif (NaCl 3%) à une température ambiante. La valeur finale de vitesse de corrosion calculée à partir de la formule ci-dessous est la moyenne de deux essais effectués pour chaque échantillon

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S t}$$

S : Surface de l'échantillon immergé en (cm^2).

t : temps de l'expérience en (h).

$\Delta m(m_i - m_f)$: différence de masse en (g)

m_i :masse initiale avant corrosion

m_f : masse finale après corrosion

Les résultats obtenus après ce test de corrosion sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.10 : Vitesse de corrosion

Epaisseur (mm)	m_i (g)	m_f (g)	$\Delta m(g)$	Surface S (cm^2)	$V_{corr} 10^{-5}$ ($g/cm^2.h$)	$V_{corr} 10^{-5}$ ($g/cm^2.h$) Moyenne	
0,50	Ech1	7,1438	7,1305	0,0133	31,992	0,8661	0,7435
	Ech2	7,2618	7,2523	0,0095	31,875	0,6209	
0,87	Ech1	14,1680	14,1578	0,0102	38,764	0,5482	0,5517
	Ech2	14,0220	14,0120	0,0100	37,517	0,5553	
0,95	Ech1	13,3828	13,3709	0,0119	38,737	0,6399	0,6292
	Ech2	13,4289	13,4174	0,0115	38,737	0,6185	

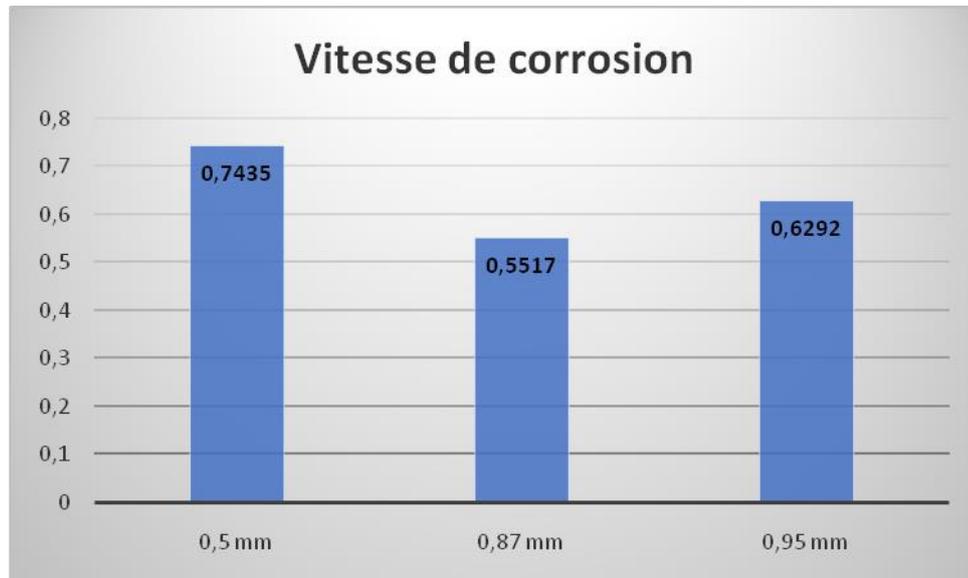


Figure IV.8 : Histogramme de la vitesse de corrosion des trois tôles galvanisées

L'histogramme de la figure IV.8, montre que la tôle galvanisée à épaisseur 0,87 mm représente une vitesse de corrosion faible comparé avec la tôle 0,95mm alors que la tôle de 0,5mm présente une vitesse plus élevée. D'après ces résultats et par comparaison avec les résultats du tableau IV.5 (masse et épaisseur du zinc déposé pour les trois tôles galvanisées 0,5mm, 0,87mm,0,95mm) on peut conclure que la vitesse de corrosion est élevée pour le cas où la masse et l'épaisseur du zinc déposé est élevée ceci est probablement due:

- Au phénomène d'adhérence du dépôt du zinc avec le fer de l'acier ce qui a peut être favorisé facilement une perte de masse déposée et par la suite une élévation de la vitesse de corrosion comme le montre la figure .IV.8.
- A l'augmentation de la rugosité du dépôt qui a peut être induit une augmentation systématique de la vitesse de corrosion. Une surface rugueuse (dépôts de produits corrosifs plus favorisés) possède une plus grande susceptibilité à la corrosion par piqûres qu'une surface polie.

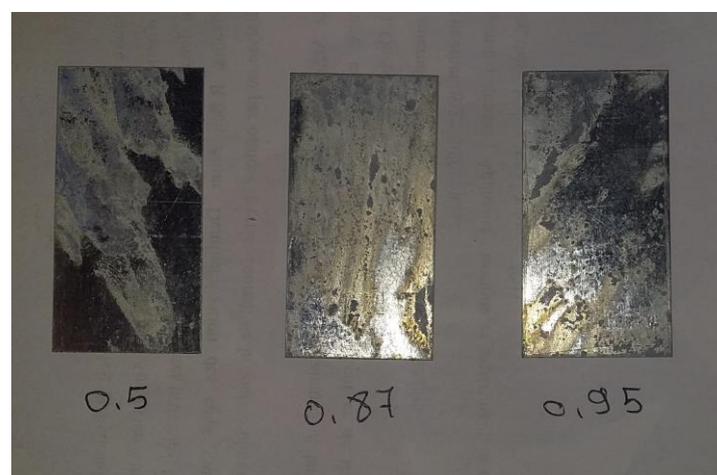


Fig. IV.9 : Echantillons après immersion dans le milieu corrosif (48h)

IV.6. La brillance

La brillance de revêtement galvanique de l'acier, dans notre étude a été mesurée par l'usage d'un brillance-mètre GLOSS CHECKER IG-331 (HORIBA) (avec valeur de mesure maximale 199GU) au niveau du laboratoire LAIGM.

La mesure de la brillance est la moyenne de trois mesures des dépôts de zinc pour les trois tôles étudiées (0,5mm, 0,87mm et 0,9mm) obtenue avec a un angle 60°. Les résultats sont représentés dans le tableau IV.11 avec une unité de mesure de brillance Gloss Unite (GU)

Tableau IV.11 : Évaluation de la brillance des revêtements

Epaisseur (mm)	Essai 1			Essai 2			Essai 3			Moyenne (GU)
0,50	199	199	198	199	198	199	194	198	167	194,55
	198,66			198,66			186,33			
0,87	181	169	176	183	189	199	181	199	197	185,99
	175,33			190,33			192,33			
0,95	168	184	178	187	193	172	162	174	171	176,55
	176,66			184			169			
Norme	199			199			199			199

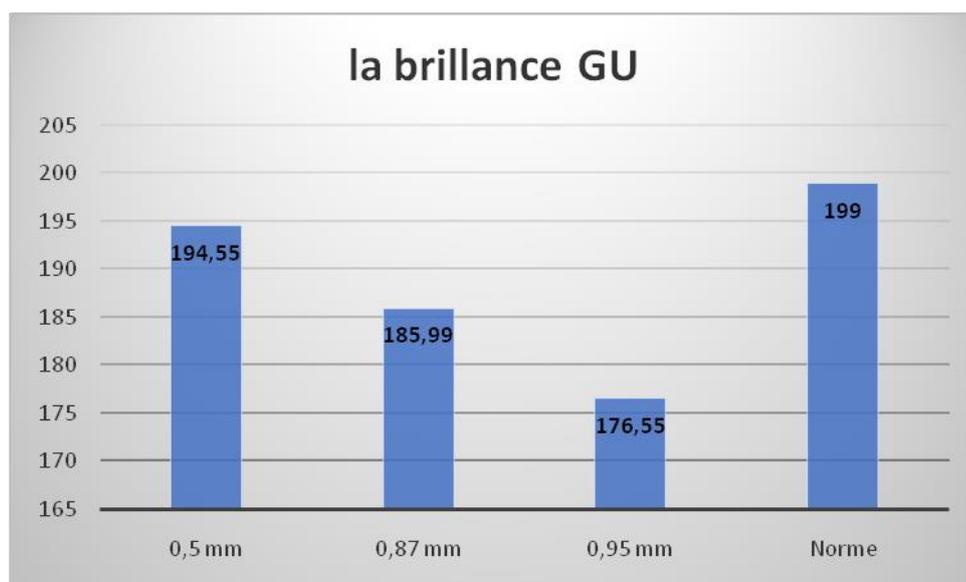


Figure IV.10 : Histogramme de la brillance des trois tôles galvanisées

D'après les résultats de mesure de la brillance figurant sur la figure IV.10, on peut constater que la brillance augmente avec la diminution de l'épaisseur des tôles galvanisées.

la tôle à faible épaisseur (0,5mm) montre une brillance 194,55 meilleur par rapport aux deux autres (0,87 et 0,95 mm) ceci est peut être due:

- Au phénomène d'essorage où la tôle sortie du bain de zinc entraîne par capillarité un film de zinc liquide (d'autant plus épais que la vitesse de passage est grande et la rugosité forte).

-Au planage ce traitement donne à la tôle son horizontalité, et son aspect final. Les paramètres sont la traction, la pression, l'allongement et le type de rugosité des cylindres

Le rôle du planage sous traction est d'améliorer la qualité de surface de la tôle galvaniser.

IV.7. Analyse par Microscope Optique

IV.7.1. Aspect micrographique des surfaces galvanisées

L'observation métallographique de l'acier sans revêtement montre une structure à dominance ferritique (phase claire) et une fraction non négligeable du constituant perlitique (phase sombre) ((fig. IV.11(A)). Les constatations qu'on peut tirer à partir des résultats expérimentaux et que le matériau après laminage à chaud présente une structure fortement forger formée de grains allongés de ferrite et une quantité très faible de perlite

Les micrographies optiques des couches galvanisées d'épaisseurs 0,5, 0,87 et 0,95mm de la figure IV.11.(B,C,D). montrent que le recuit de recristallisation appliqué aux couches a entraîné une recristallisation non complète des grains, où on enregistre une petite fraction des grains de ferrite et de perlite non recristallisés, ceci est dû probablement à l'insuffisance du temps de recuit.

La comparaison des micrographes de la figure .IV.11 montre que la tôle revêtue de l'épaisseur 0,5mm présentent une surface relativement lisse et avec moins de phase sombre par rapport à celle des épaisseurs 0,87mm et 0,95mm

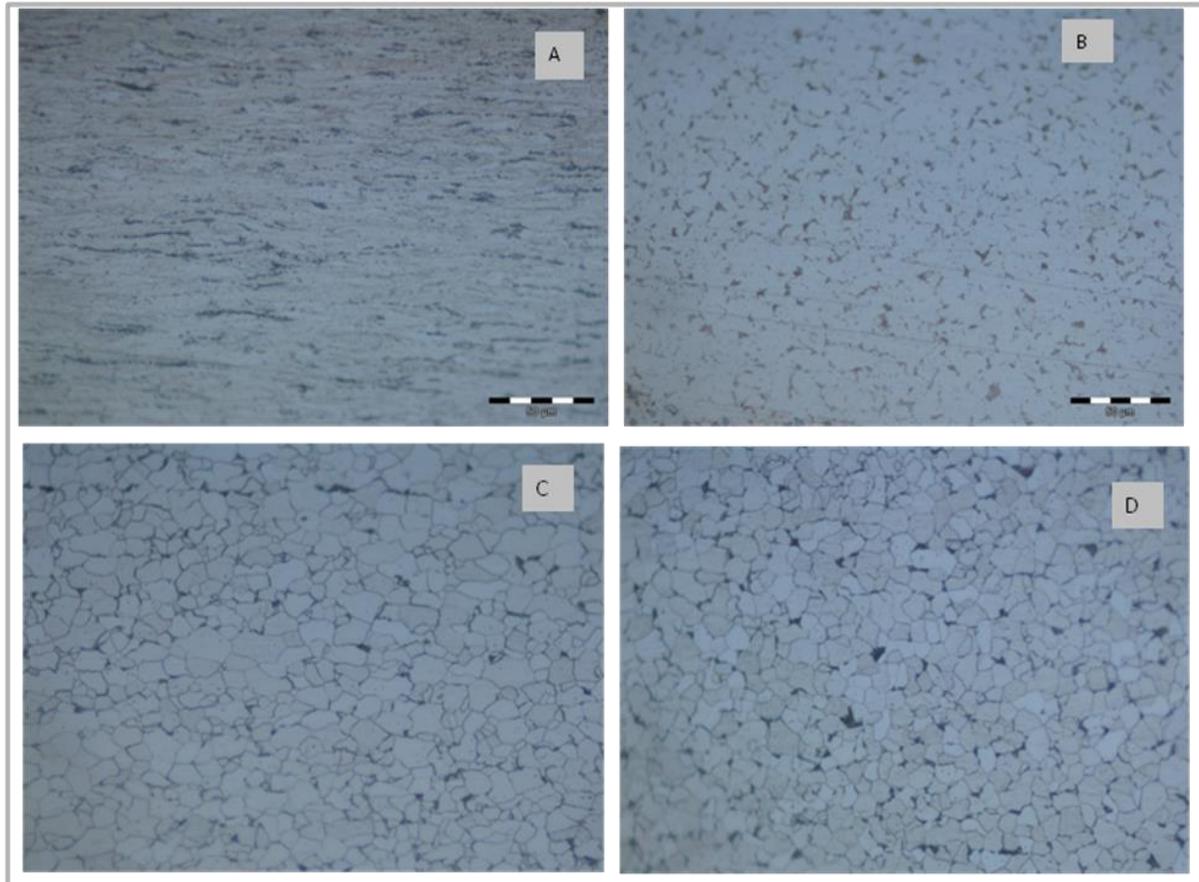


Figure IV.11 : Micrographies optiques d'un : (A) Acier (A9) non galvanisé
 (B) Acier galvanisé d'épaisseur 0,5mm, (C) Acier galvanisé d'épaisseur 0,87mm
 (D) Acier galvanisé d'épaisseur 0,95mm

IV.7.2. Interfaces et microstructures des couches galvanisées

L'étude micrographique des coupes transversales des tôles galvanisées de différentes épaisseurs (Fig.III.12.(a, b, c)) montrent clairement dans la partie zoomée, les interfaces, les couches galvanisées (Fe-Zn) et le substrat d'acier ce qui concorde presque à la coupe micrographique d'un revêtement galvanisé évoqué dans le chapitre I (Fig III.12(d)). (Hertveldt, 2000; Tourqui, 2018).

Lors de la galvanisation d'une pièce de fer pur dans un bain de zinc pur, la diffusion conjointe entre le fer et le zinc permet la formation de couches de composés intermétalliques fer-zinc. C'est cette succession de composés intermétalliques qui va constituer la couche de galvanisation.

Les caractéristiques importantes de la couche de galvanisation qui déterminent les propriétés mécaniques et électrochimiques et finales sont extrêmement importantes.

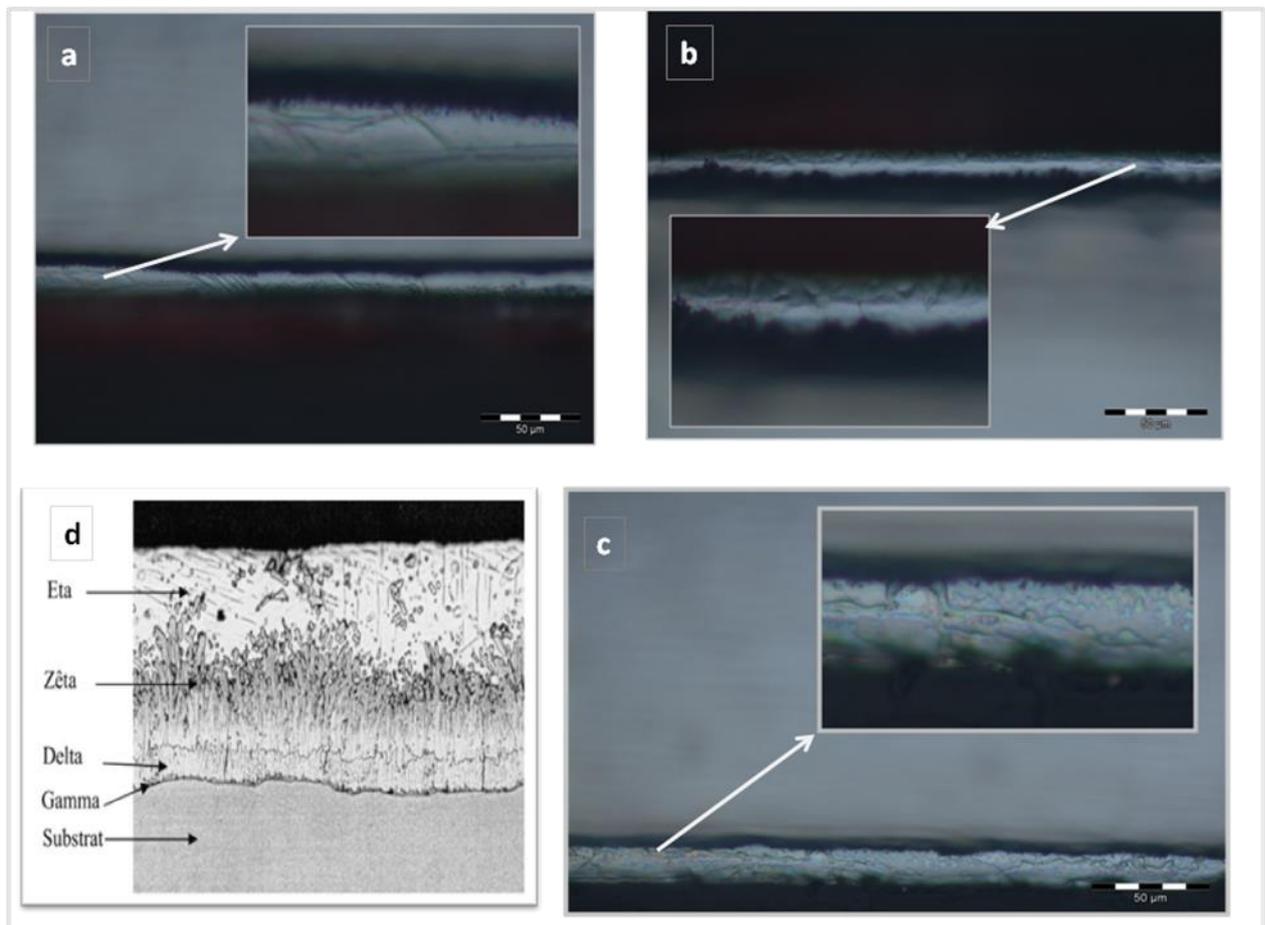


Figure IV.12: Micrographies optiques montrant les coupes transversales des tôles galvanisées: (a) tôle galvanisée d'une épaisseur 0,5 mm; (b) tôle galvanisée d'une épaisseur 0,87 mm, (c) tôle galvanisée d'une épaisseur 0,95 mm, (d) coupe micrographique d'un revêtement galvanisé

IV.8 Conclusion

Finalement, d'après ses résultats on trouve que la tôle d'épaisseur 0,5mm présente une masse et épaisseur du zinc déposé la plus élevée ce qui a augmenté sa vitesse de corrosion et sa résistance à la traction mais a diminué sa dureté et son allongement à la rupture par rapport aux deux autres épaisseurs (0,87 et 0,95mm)

Alors que pour les analyses morphologiques, la tôle à épaisseur faible (0,5mm) présente une brillance maximale et une surface relativement lisse et avec moins de phase sombre par rapport à celle des épaisseurs 0,87mm et 0,95mm.



Conclusion Générale

Conclusion générale

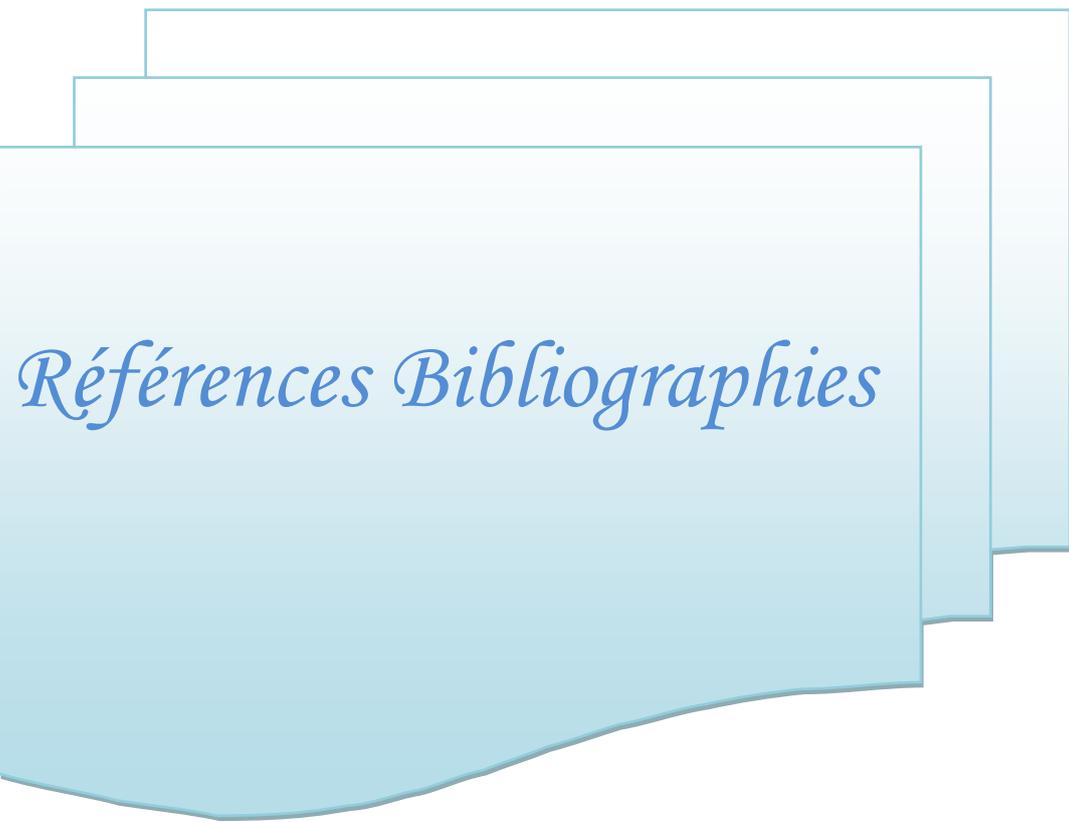
Cette étude d'initiation à la recherche dans le domaine des matériaux nous a permis de voir pour la première fois, le « comment » de la recherche.

Dans la partie bibliographique nous avons défini la corrosion qui pose problème à l'environnement. Différents types de protection ont été mentionnés. L'étude de galvanisation à chaud en continu nous a permis de comprendre le processus technologique de la formation de la couche galvanisée.

Dans la partie expérimentale nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de tôle sur la couche galvanisée. Le travail que nous avons réalisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude «Étude des caractéristiques des couches galvanisées à chaud au niveau de SIDER EL-HADJAR»; nous a permis de mieux comprendre le processus technologique de galvanisation, les mécanismes qui se déroulent lors du passage de la tôle dans le bain de zinc ainsi que les facteurs qui sont responsables de la mauvaise homogénéité de la couche de zinc sur les tôles galvanisées. Trois types de tôles de différentes épaisseurs (0,5, 0,87, 0,95mm) prélevées au niveau de la section LAF Sider el Hadjar, ont été étudiées après galvanisation. Pour cela, plusieurs méthodes d'investigation ont été réalisées en utilisant la microscopie optique pour l'observation de la surface et l'épaisseur de la couche de revêtement, l'essai de la voie humide par décapage, les essais mécaniques (l'élasticité, résistance, l'allongement, la dureté, l'emboutissage), la brillance et le teste de corrosion.

Les résultats de cette étude ont montré que la tôle d'épaisseur 0,5mm présente une masse et épaisseur du zinc déposée la plus élevée ce qui a augmenté sa vitesse de corrosion et sa résistance à la traction mais a diminué sa dureté et son allongement à la rupture par rapport aux deux autres épaisseurs (0,87 et 0,95mm).

Alors que pour les analyses morphologiques, la tôle à épaisseur faible (0,5mm) présente une brillance maximale et une surface relativement lisse et avec moins de phase sombre par rapport à celle des épaisseurs 0,87mm et 0,95mm.



Références Bibliographies

Références bibliographiques

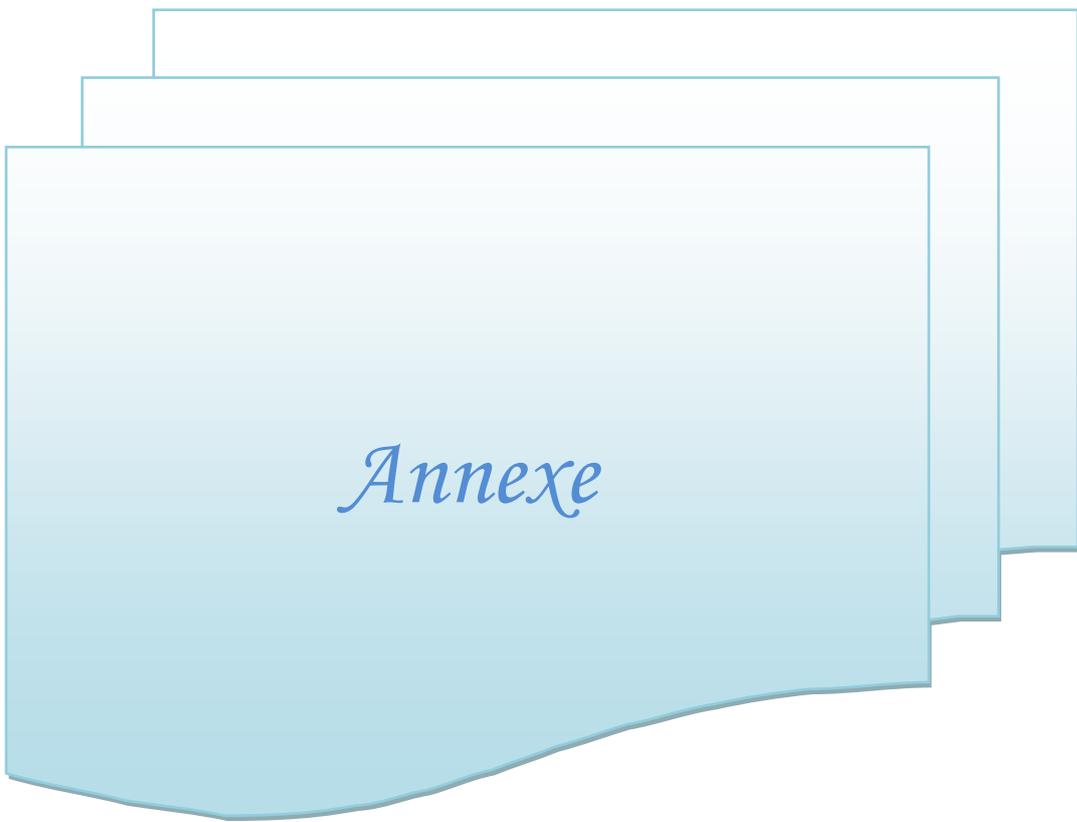
- ✚ ABDEL HAMID, Z. ABDEL AAL, A. HASSAN, A.H. SHAABAN, A. (2010), "Processus de science de la surface appliquée et performance des revêtements de zinc par immersion à chaud contenant du ZnO et du Ni-P comme couche de protection Appliquée", Science de surface, Vol 256, pp.4166–4170.
- ✚ ALPAS, A.T. (2000), " Effet de la microstructure sur les mécanismes de fracture dans les revêtements galvanisés ", ISIJ International, Vol. 40, N°2, pp. 172-181.
- ✚ AOUMRI, A. (2020), Contribution à l'étude des causes de l'apparition de l'empreinte de collage des produits laminés à froid (Sider Annaba). Mémoire de Master; Université Badji Mokhtar Annaba.
- ✚ ASTM. (2021). A90-21 méthode d'essai standard pour le poids (masse) du revêtement sur les articles en fer et acier avec des revêtements en zinc ou en alliage de zinc. ASTM Internationale.
- ✚ ASTM E8/ E8M- méthodes d'essai pour les essais de tension des matériaux métalliques. ASTM Internationale.
- ✚ ASTM A370-20 méthodes d'essai et définitions pour les essais mécaniques des produits en acier. ASTM Internationale.
- ✚ ASTM E18-20 méthodes d'essai pour la dureté Rockwell Hardness des matériaux métalliques. ASTM Internationale. ASTM Internationale.
- ✚ ASTM E8 & ASTM A370 la limite d'élasticité, la résistance a la traction et le pourcentage d'allongement des tôles d'acier galvanisé sont mesurés. ASTM Internationale.
- ✚ ASTM E18 & ASTM A370 la dureté de l'acier galvanisé est mesurée a l'échelle standard et a l'échelle superficielle, duromètre Rockwell. ASTM Internationale.
- ✚ AZAIZIA, A. (2020), Étude de l'adhérence d'une couche galvanisée a chaud au niveau du complexe d'el hadjar (arcelormittal). Mémoire de License en Métallurgie; Université Badji Mokhtar Annaba
- ✚ BABBIT, M. (1995) «Les produits revêtus à chaud», La chimie des matériaux, ENS Cachan.
- ✚ BELBAH, H. (2018), Étude de l'effet des polyphénols du Daphne gnidium L. sur les propriétés des dépôts électrolytiques de nickel, Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma.
- ✚ BELGHARBI, H. (2020), Étude de l'effet inhibiteur de corrosion de l'huile essentielle de Cyprès : Extraction, caractérisation et application. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma.
- ✚ BENGACEMI, I. (2018) Laminage à chaud. mémoire de Master; Université Badji Mokhtar Annaba.
- ✚ BENRAMOUL, Z. (2018).Étude comparative du Fer, Chaux et silice dans les minerais par voie humide et voie spectrale. License professionnel; Université Akli Mohand Oulhadj Bouira.

-
- ✚ BERMAD, KHADOUDJ, G. (2012), Nouveaux alliages zinc-terres rares pour des applications anticorrosion: élaboration, propriétés et traitements de surfaces. Diss. Université de Lorraine.
 - ✚ BRETEZ, M. (1986), "Rôle du silicium et de l'aluminium dans la réaction Fe-Zn application à la galvanisation des aciers", Thèse Université de Lille.
 - ✚ BUSCARLET, E. (2003), Galvanisation et aluminage en continu. Technique de l'ingénieur M1536.
 - ✚ CACERES, P.G. (1986), "Mécanismes de formation et de croissance de la couche intermétallique pendant le trempage à chaud du fer dans les bains Zn-3 Al et Zn-6 Al", Mat. Sci. Technol, pp. 871 -877.
 - ✚ Coer, J. (2014), Mise en forme par emboutissage en température d'un alliage d'aluminium AA5754-O. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Bretagne Sud, 2013. Français.
 - ✚ DARSOUNI, L. (2018), Étude de l'adhérence par indentation interfaciale et du comportement électrochimique des couches galvanisées Fer-Zinc de l'acier de type A9. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba.
 - ✚ DELMOTTE, C.; DERULE, H.(1996), Préparation de surface avant revêtement. Revue de Métallurgie, 1996, vol. 93, no 7-8, p. 935-946.
 - ✚ EL SEBAKHY, S. MALIK, D.J. (1991), "Effet de la galvanisation après immersion à chaud sur la structure de carrosserie automobile", publ. SIRPE.
 - ✚ FERTÉ, M. (2014) , Étude et analyse de couches minces par techniques multi-spectroscopiques pour une application sur une ligne de galvanisation. Diss. Université de Lorraine.
 - ✚ FOURMENTIN, R. (2004), Modélisation thermodynamique du système Fe-Zn-Al-Cr A 460°C et son impact sur les procédés de galvanisation.
 - ✚ GALVAZINC (13/09/2012) "Recommandation sur le choix des aciers".
 - ✚ GAST-BRAY, A. (1994) «relations entre les mattes flottantes et la Qualité du revêtement en galvanisation continue». Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
 - ✚ GB / T230.1 / .2, ISO 6508-2, matériaux métalliques, essai de la dureté Rockwelle hardness. partie 1 : méthode d'essai à échelles A,B,C,D,E,F,G,H,K,N,T). partie 2 : vérification et étalonnage des machines d'essai et des pénétrateurs.
 - ✚ HANACHI, L. DAFRI,W. (2018) , Les liquide ioniques inhibiteurs de corrosion efficace sur l'acier A9 dans un milieu acide : Une approche écologique. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma.
 - ✚ HERTVELDT (2000), "Hot-dip galvanizing and galvannealing of Ti and Nb stabilized interstitial free high strength steels". Thèse, Universities of Gent.
 - ✚ ISO 3815-2005 méthodes d'analyse par spectrométrie d'émission optique pour la détermination de la composition du zinc et des alliages de zinc, et des recommandations pour la préparation des échantillons pour essai, en zinc et en alliages de zinc.
-

- ✚ KERROUCHE, A. (2020), Etude des évolutions des pressions sur la base de l'exploitation de résultats expérimentaux lors du laminage à froid, Mémoire de Master; Université Badji Mokhtar Annaba.
- ✚ LANDOLT, T. (1997), Corrosion et chimie de surfaces des métaux, Traité des matériaux n°12, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- ✚ LEBON, A. HUG, P. (1994) Le livre de l'acier, chap. 59, pp1282-1325 .
- ✚ NF EN 10346, (octobre 2015), produits plats en acier revêtus en continu par immersion à chaud pour formage à froid, SIDER EL-HADJAR.
- ✚ NF EN 10139. (2016), feuillard non revêtus laminés à froid en aciers à base carbone pour formage a froid, feuillards non revêtus laminés a froid en aciers doux pour formage a froid.
- ✚ NISHIMOTO. (1986), "Effets de la microstructure de surface et des compositions chimiques des aciers sur la formation de composés Fe-Zn lors de la galvanisation continue", Itans ISIJ, Vol 26, pp. 807- 813.
- ✚ QUANTIN, D. (2003), "Galvanisation à chaud", Technique de l'ingénieur, M1534, 1-28.
- ✚ QUANTIN, D. (2004) «Galvanisation à chaud», Techniques de l'Ingénieur.
- ✚ ROCDACIER, "Cours de soudage, chaudronnerie, découpe, tôlerie, tuyauteri", (2017).
- ✚ SHIGEYOSHI, M. (1996), "Surface chemistry of galvanized steel sheets relavant to adhesion performance", Progress in Organic Coating, 227-238.
- ✚ TOURQUI, M. (2018), Étude des facteurs qui influent sur l'homogénéité de l'épaisseur de la couche galvanisée au niveau de SIDER EL-HADJA. Mémoire de master; Université Badji Mokhtar- Annaba.
- ✚ WEHLING, B. R. HÜTTNER, AND A. ANGERBAUER. (1999) "La conception, la mise en route et les performances de la ligne de galvanisation de bandes laminées à chaud chez Wuppermann Bandstahl en Autriche." Revue de Métallurgie 96.1: 57-66.
- ✚ YADAV, A.P. KATAYAMA, H. NODA, K. MASUDA, H. NISHIKATA, A. TSURU, T. (2007), " Effet de la couche d'alliage Fe-Zn sur la résistance à la corrosion de l'acier galvanisé dans contenant du chlorure environnements ", Corrosion Science, Vol. 49, pp. 3716–3731.
- ✚ YOSHITAKA, A. MASAHIRO (1998), "Transformation de la phase Fe-Al en phase Fe-Zn sur fer pur pendant la galvanisation", Materials Science and Engineering A254, pp. 305–310.

Biblionet

- ✚ (1^{www}, 2021): <http://leadersoft.dz/sitewebclient/Site-ACG/process.html>
- ✚ (2^{www}, 2021): <https://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Microscopy#>
- ✚ (3^{www}, 2021): <https://www.elementar.com/fr/produits/spectrometres-emissions-optiques>.
- ✚ (4^{www}, 2021): <https://www.selectscience.net/products/thermo-scientific-ar1-3460-advantage-metals-analyzer/?prodID=84574#t>



Annexe

Annexe 1

Dureté Rockwell

Les essais de **dureté Rockwell** sont des essais de pénétration en mécanique. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge.

Principe

L'essai se déroule en trois phases :

- ✓ application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0 = 98 \text{ N}$ (soit 10 kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I . Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell ;
- ✓ application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P ;
- ✓ relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

La valeur de r étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force F_1 .

La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

- ✓ **Échelle B, E et F**

- ✓ $\text{HRB} = 130 - r$

- ✓ **Échelle C**

$\text{HRC} = 100 - r$

Une unité de dureté Rockwell correspondant à une pénétration de $0,002 \text{ mm}$. Plus la valeur de dureté est importante, plus le matériau est dur.

Pour les articles homonymes, voir HRA, HRB, HRC, HRD et HRE.

Pour les articles homonymes, voir HRF et HRG.

Échelle	Symbole	Pénétrateur	Valeur de la force totale $F_0 + F_1$ (N)	Application
A	HRA	Cône de <u>diamant</u> de section circulaire à pointe arrondie sphérique de $0,2 \text{ mm}$	588,6	Carbure, acier et en épaisseur mince
B	HRB	Bille en <u>carbure de tungstène</u> de $1,5875 \text{ mm}$ ($\frac{1}{16}$ pouce) de diamètre	981	<u>Alliage de cuivre, acier doux, alliage d'aluminium</u> Matériaux ayant une résistance à la rupture comprise entre 340 et $1\ 000 \text{ MPa}$
C	HRC	Cône de <u>diamant</u> de section circulaire à pointe arrondie sphérique de $0,2 \text{ mm}$	1 471,5	Acier, <u>fonte, titane</u> Matériau ayant une dureté résistance à la rupture supérieure à $1\ 000 \text{ MPa}$
D	HRD	Cône de <u>diamant</u> de section circulaire à pointe arrondie sphérique de $0,2 \text{ mm}$	981	
E	HRE	Bille en <u>carbure de tungstène</u> de $3,175 \text{ mm}$ ($\frac{1}{8}$ pouce) de diamètre	981	Fonte, alliage d'aluminium et de fonte
F	HRF	Bille en <u>carbure de tungstène</u> de $1,5875 \text{ mm}$ de diamètre	588,6	Alliage de cuivre recuit, fine tôle de métal.
G	HRG	Bille en <u>carbure de tungstène</u> de $1,5875 \text{ mm}$ de diamètre	1 471,5	Cupro-nickel, alliage cuivre-nickel-zinc

Les deux échelles les plus utilisées sont les *échelles B et C*.

Normes

L'utilisation de l'échelle de Rockwell est normalisée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et le Comité européen de normalisation (CEN) :

- EN ISO 2039-2 : Plastiques - Détermination de la dureté - Partie 2 : dureté Rockwell
- EN ISO 6508-1 : Matériaux métalliques : essai de dureté Rockwell - Partie 1 : méthode d'essai (échelles A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

Et l'ASTM International :

- ASTM E18 : *Standard methods for rockwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials*
-

<u>Essais mécaniques</u>	
Essais instantanés à vitesse de sollicitation lente	<p style="text-align: center;"><u>Dureté par macroindentation, microindentation et nanoindentation</u></p> <p style="text-align: center;"><u>Tribologie, usure des surfaces, rayage</u></p> <p style="text-align: center;">Dureté par oscillations de pendules (pendulaire)</p> <p style="text-align: center;">Essais uniaxiaux et multiaxiaux</p> <p style="text-align: right;"> <u>Dureté Vickers (HV)</u> <u>Dureté Brinell (HB)</u> <u>Dureté Knoop (HK)</u> <u>Dureté Janka</u> Dureté Rockwell (HR) <u>Dureté Shore</u> <u>Dureté Barcol</u> <u>Échelle de Mohs</u> <u>Scratch test</u> <u>Scéléromètre</u> <u>Tribomètre</u> <u>Méthode Martindale</u> <u>Dureté Persoz</u> <u>Essai de traction</u> <u>Essai de compression</u> <u>Essai de cisaillement</u> <u>Essai de flexion</u> <u>Essai de torsion</u> </p>
Essais instantanés à vitesse de sollicitation élevée : <u>essais de résilience</u>	<u>Essai de flexion par choc sur éprouvette entaillée Charpy</u> <u>Essai de résistance au choc Izod</u>
Essais à long terme à sollicitation constante	<u>Essai de fluage</u> <u>Essai de relaxation</u>
Essais à long terme à sollicitation répétée	<u>Essai de fatigue</u>