



Université 8 Mai 1945 Guelma  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie des Procédés**

**Mémoire de Projet de Fin d'Etude**  
**Master 2**

---

---

*Etude des paramètres de la galvanisation de l'acier A9*  
*Sur les propriétés de la couche galvanisée au niveau de*  
*SIDER EL-HADJAR*

---

---

**Filière** : Génie des Procédés  
**Spécialité** : Génie des Procédés des matériaux

**Présenté par :**

- MAACHI Rahil
- KRALLAF Houria

**Sous la direction de :**

**Dr. BENGOURNA.Nadjette**

# Remerciements

*Avant tout, nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage.*

*Nous tenons particulièrement à remercier madame BENGOURNA. N Docteur à l'Université de Guelma, pour la confiance qu'elle a bien voulu nous accorder, d'avoir dirigé ce mémoire et le temps qu'elle nous a consacré, nous lui exprimons notre profonde gratitude.*

*Nous remercions très sincèrement Monsieur BOUTAGHANE Mohamed Directeur général du laboratoire de l'unité LAF, pour ses conseils, son aide pour avoir dirigé ce travail avec patience et efficacité, au niveau du complexe sidérurgique SIDER-EL HADJAR,*

*Nous voudrions adresser un remerciement particulier à Dr NACEF. M du laboratoire L.A.I.G.M pour son aide et ces conseils précieux,*

*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.*

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

*Je tiens également à remercier tous les enseignants du département de Génie des Procédés de l'université 08 MAI 1945 de Guelma pour les connaissances acquises et les conseils prodigués au cours de ces années.*

# *Dédicace*

*À mes chers parents.*

*À mes chers frères.*

*À ma chère sœur.*

*À toute ma grande famille.*

*À tous mes chers amis*

*À tous ceux qui me sont chère.*

*MAACHI RAHIL*

# *Dédicace*

*À mes chers parents.*

*À mes chers frères.*

*À ma chère sœur.*

*À toute ma grande famille.*

*À tous mes chers amis*

*À tous ceux qui me sont chère.*

*KRALLAF HOURIA*





# *Sommaire*

# Sommaire

Liste des figures .....	I
Liste des tableaux .....	III
Abréviation.....	IV
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Notions théoriques sur la corrosion</b>	
Introduction.....	2
I. Généralités sur la corrosion .....	2
I.1.Définition de la corrosion.....	2
I.2.Les facteurs de corrosion .....	2
I.3.Processus corrosion .....	3
I.3.1.Corrosion chimique (sèche) .....	3
I.3.2.Corrosion biochimique (bactérienne) .....	3
I.4.Les Formes de la corrosion .....	3
I.4.1.Corrosion uniforme (généralisée) .....	4
I.4.2.Corrosion localisée .....	4
I.4.2.1.Corrosion par piqûres.....	4
I.4.2.2.Corrosion par crevasses (caverneuse) .....	5
I.4.2.3.Corrosion sous contrainte.....	6
I.4.2.4.La Corrosion intergranulaire.....	6
I.4.2.5.Corrosion avec érosion.....	7
I.4.2.6.Corrosion sélective.....	7
I.4.2.7.La corrosion galvanique (bimétallique).....	7
I.5.Différents techniques de protection contre la corrosion.....	8
I.5.1.Mécanismes de prévention et de lutte contre la corrosion.....	8
I.5.1.1.Mesures préventives .....	8
A. Prévention par un choix judicieux des matériaux .....	9
B. Protection par une forme adaptée des pièces.....	9
I.5.2.Moyens de protection .....	9
I.5.2.1.Protection électrochimique.....	9
A. Protection cathodique.....	10
B. Protection anodique.....	10
I.5.2.3.Protection par revêtements.....	10
A. Revêtements métalliques.....	10
B. Revêtements non métalliques.....	11
I.6.Conclusion.....	12
<b>Chapitre II : procédé de galvanisation</b>	
Introduction.....	13
II. Généralités sur le zinc.....	13

II.1.Préparation des surfaces.....	13
II.2.définition d'un traitement de surface.....	14
II.3.Préparation de surface d'un matériau nu avant traitement de surface.....	14
II.3.1Le dégraissage.....	14
A. Dégraissage alcalin.....	15
B .Dégraissage acide.....	15
II.3.2.Décapage.....	15
A. Décapage par voie sèche.....	15
B. Décapage par voie humide.....	15
II.3.3.Fluxage.....	16
II.4.La galvanisation .....	16
II.4.1.Histoire de la galvanisation.....	16
II.4.2.Définition de la galvanisation.....	17
II.4.3.Le principe de la galvanisation.....	17
II.5.Galvanisation à chaud.....	18
II.5.1.Définition de la galvanisation à chaud.....	18
II.5.2.Principe générale de la galvanisation à chaud.....	18
II.5.3.Influence des déférents facteurs en galvanisation à chaud .....	19
II.5.3.1Qualité de l'acier.....	19
II.5.3.2Le bain de galvanisation.....	20
II.5.3.3Influence de température de galvanisation à chaud (température de bain de zinc).....	22
II.5.3.4.Durée d'immersion.....	23
II.5.3.5.Influence de la vitesse d'immersion et d'émersion.....	24
A. La vitesse d'immersion.....	24
B. La vitesse d'émersion.....	24
II.5.3.6.La condition de refroidissement.....	25
II.6.Equilibre Fe-Zn.....	25
II.6.1.Présentation de système.....	25
II.6.2.Les composés intermétalliques Fe-Zn.....	25
II.6.2.1.La phase zêta $\zeta$ .....	26
II.6.2.2.La phase delta $\delta$ .....	26
II.6.2.3.La phase $\Gamma_1$ .....	27
II.6.2.4.La phase $\Gamma_2$ .....	27
II.6.3.Formation des phases Fe-Zn.....	27
II.7.Principe d'équipement de la ligne de galvanisation en continue.....	28
II.7.1.Section d'entrer.....	28
II.7.2.Section de traitement thermique.....	29
II.7.3.Section bain de zinc.....	30
II.7.4.Section refroidissement.....	30
II.7.5.Section planage.....	31
II.7.6.Section de traitement chimique.....	31

II.7.7.Section sortie.....	31
II.8.Les avantages et les domaines d'application de la galvanisation à chaud.....	32
II.9.Conclusion.....	33

### **Chapitre III : technique expérimentale**

Introduction.....	34
III. Echantillons utilisés.....	34
III.1.Caractérisations.....	35
III.1.1.Analyses chimiques et physiques.....	35
III.1.1.1.Essai de la voie humide par décapage.....	35
III.1.1.2.Analyse par spectrométrie à émission optique (OES).....	36
III.1.1.3.Test de corrosion.....	37
III.1.1.4.Mesure de la brillance.....	38
III.1.2.Analyse mécanique.....	38
III.1.2.1.Essais de traction.....	38
III.1.2.2.Essais de la dureté.....	41
III.1.2.3.Essais d'emboutissage.....	42
III.1.3.Analyse optique.....	43
III.1.3.1.Analyse de surface par microscope optique.....	43
III.2.Conclusion.....	44

### **Chapitre IV: résultats et discussions**

Introduction.....	45
IV.1.Caractérisation du support (acier A9).....	45
IV.1.1.Analyse chimique.....	45
IV.1.2.Analyse micrographique.....	46
IV.2.Caractérisation de l'acier galvanisé.....	47
IV.2.1Analyse physicochimique.....	47
IV.2.1.1Aspect micrographique de la coche galvanisé.....	47
IV.2.1.2Résultat d'essai de la voie humide par décapage.....	47
IV.2.1.3.Résultat de test de corrosion.....	53
IV.2.1.4Résultat de la brillance.....	53
IV.3.Résultat et discussion d'analyse mécanique.....	55
IV.3.1.Résultat d'essai de l'emboutissage.....	55
IV.3.2 Résultat d'essais de traction.....	56
IV.3.3 Résultat d'essai de la dureté.....	57
IV.4.Conclusion.....	58
Conclusion générale.....	59
Références bibliographie.....	61
Annexes.....	
Résumé.....	

# Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b>	a) Piqûres de corrosion sur un couteau en acier inoxydable (12% Cr). b) Coupe métallographique de piqûres (plan de coupe perpendiculaire à la lame).....	04
<b>Figure I.2 :</b>	Représentation schématique du mécanisme de progression d'une piqûre dans un acier inoxydable.....	05
<b>Figure I.3 :</b>	Représentation schématique du mécanisme de corrosion caverneuse.....	05
<b>Figure I.4 :</b>	Corrosion sous contrainte dans le chlorure de magnésium d'un acier inoxydable.....	06
<b>Figure I.5 :</b>	Représentation schématique de particules des carbures de chrome qui ont précipité le Long de joints de grains d'un acier inoxydable.....	06
<b>Figure I.6 :</b>	Corrosion-érosion dans une zone turbulente.....	07
<b>Figure I.7 :</b>	Cas de corrosion galvanique d'un revêtement de zinc sur acier. Le métal le plus actif (ou Anodique) va se corroder rapidement tandis que le métal en contact le moins actif (ou cathodique, qui Est l'acier dans notre exemple) sera préservé.....	08
<b>Figure I.8 :</b>	Principe de la protection cathodique.....	10
<b>Figure I.9 :</b>	(a) Protection active ou sacrificielle ; (b) couplage galvanique entre deux métaux dissimilaires, le zinc et l'acier.....	11
<b>Figure II.1 :</b>	Représentation schématique d'une surface métallique industrielle.....	14
<b>Figure II.2 :</b>	Revêtement de zinc endommagé.....	16
<b>Figure II.3 :</b>	schéma d'une ligne de galvanisation.....	18
<b>Figure II.4 :</b>	Vue en coupe transverse de phases formées après la galvanisation de l'acier.....	20
<b>Figure II.5 :</b>	Bain de zinc.....	20
<b>Figure II.6 :</b>	Schéma d'un bain de galvanisation.....	21
<b>Figure II.7 :</b>	Influence de la température du zinc sur la vitesse de réaction Fe-Zn.....	23
<b>Figure II.8 :</b>	Influence de la durée d'immersion dans un bain sur l'épaisseur du Revêtement.....	24
<b>Figure II.9 :</b>	Influence de la vitesse d'émersion sur la masse de revêtement déposée.....	24
<b>Figure II.10 :</b>	Diagramme de phases du système Fe-Zn.....	25
<b>Figure II.11 :</b>	Diagramme d'équilibre Fe-Zn dans le côté riche en zinc.....	26
<b>Figure II.12 :</b>	Représentation schématique des couches des composés intermétalliques Fe-Zn dans le bain de zinc pur.....	28
<b>Figure II.13 :</b>	Schéma de processus de galvanisation.....	32
<b>Figure III.1 :</b>	Acier Galvanisée de différentes épaisseurs.....	34
<b>Figure III.2 :</b>	Spectromètre ARL 3460 au niveau de de l'unité Sider el hadjar section LAF.....	36
<b>Figure III.3 :</b>	test de corrosion par immersion au niveau de laboratoire de l'unité Sider el hadjar.....	37
<b>Figure III.4 :</b>	Brillance-mètre GLOSS CHECKER IG-331 (HORIBA).....	38
<b>Figure III.5 :</b>	schéma d'une éprouvette de traction plaque.....	40
<b>Figure III.6 :</b>	Machine d'essai de traction universelle Mohs & Federhaff Losenhausen..	40
<b>Figure III.7 :</b>	Diagramme charge d'allongement.....	40
<b>Figure III.8 :</b>	Duromètre HR-150A.....	42
<b>Figure III.9 :</b>	principe de l'emboutissage.....	43
<b>Figure III.10 :</b>	Microscopie optique de type NIKON.....	44
<b>Figure IV.1 :</b>	Microstructure de l'acier de type A9.....	46

# Liste des figures

---

<b>Figure IV.2 :</b>	Microstructure de l'acier galvanisé.....	47
<b>Figure IV.3 :</b>	Echantillons avant décapage.....	47
<b>Figure IV.4 :</b>	Echantillons après décapage.....	48
<b>Figure IV.5 :</b>	Histogramme des masses de revêtement des trois tôles galvanisées.....	50
<b>Figure IV.6 :</b>	Variation de l'épaisseur de zinc en fonction de l'épaisseur de la tôle.....	51
<b>Figure IV.7 :</b>	Micrographies optiques montrant les coupes transversales des tôles galvanisées:(1) tôle galvanisée d'une épaisseur 0,36 mm; (2)tôle galvanisée d'une épaisseur 0,8 mm,(3)tôle galvanisée d'une épaisseur 2,18 mm.....	52
<b>Figure IV.8 :</b>	Histogramme de la vitesse de corrosion des trois tôles galvanisées.....	53
<b>Figure IV.9 :</b>	Histogramme de la brillance des trois tôles galvanisées pour l'angle60°...	54
<b>Figure IV.10 :</b>	Histogramme de la largeur de déformation des trois tôles galvanisées...	55
<b>Figure IV.11 :</b>	Histogramme de l'allongement ultime des trois tôles galvanisées.....	56
<b>Figure IV.12 :</b>	Histogramme de l'essai de traction des trois tôles galvanisées.....	57
<b>Figure IV.13 :</b>	Histogramme de la dureté des trois tôles galvanisées.....	57

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau I.1 :</b>	Les principaux facteurs de corrosion.....	02
<b>Tableau II.1 :</b>	Caractéristiques de zinc.....	13
<b>Tableau II.2 :</b>	Classification des aciers suivant leur teneur en silicium et en phosphore...	20
<b>Tableau II.3 :</b>	Compositions des bains de zinc.....	21
<b>Tableau II.4</b>	Composition chimique du bain de galvanisation.....	22
<b>Tableau II.5 :</b>	Composition chimique du zinc.....	22
<b>Tableau II.6 :</b>	Caractéristiques des différentes phases du système Fe-Zn.....	26
<b>Tableau II.7 :</b>	La micro dureté des phases Fe-Zn.....	26
<b>Tableau III.1:</b>	Composition chimique en pourcent de l'acier A9 .....	34
<b>Tableau III.2 :</b>	Epaisseurs des échantillons étudiés .....	34
<b>Tableau III.3 :</b>	Caractéristiques de l'appareille Duromètre HR-150A.....	42
<b>Tableau IV.1 :</b>	Compositions chimiques des tôles d'acier à différentes épaisseurs (OES)...	46
<b>Tableau IV.2 :</b>	Masse du revêtement d'échantillon 1 pour les trois cotés.....	49
<b>Tableau IV.3 :</b>	Masse du revêtement d'échantillon 2 pour les trois cotés.....	49
<b>Tableau IV.4 :</b>	Masse du revêtement de l'échantillon 3 pour les trois cotés.....	50
<b>Tableau IV.5</b>	Masse moyenne et épaisseur du zinc déposé.....	51
<b>Tableau IV.6 :</b>	Vitesse de corrosion.....	53
<b>Tableau IV.7 :</b>	Évaluation de la brillance des revêtements Pour Angle 60°.....	54
<b>Tableau IV.8 :</b>	Largeur limité d'emboutissage.....	55
<b>Tableau IV.9 :</b>	Allongement ultime persistant $\Delta Lu = Lu - L_0$ .....	56
<b>Tableau IV.10 :</b>	Essai de traction de tôle galvanisé.....	56
<b>Tableau IV.11 :</b>	Dureté des trois échantillons.....	57

# Liste des abréviations

---

$E_{\text{corr}}$  : Potentiel de corrosion

$E_{\text{passif}}$  : Potentiel de passivité

RPA : Laminoir à froid avec parachèvement et revêtement .

LAF: Laminage à Froid

LAC: Laminage à Chaud

CM : Coté Mécanique

M : Milieu

CO : Coté opérateur

HNX : mélanges azote hydrogène

HRA: Rockwell Hardness à l'échelle A

HRB: Rockwell Hardness à l'échelle B

HRC: Rockwell Hardness à l'échelle C

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

NF EN : la normalisation en France (européenne)

ISO : Organisation internationale de normalisation





*Introduction générale*

## *Introduction Générale*

Aujourd'hui l'acier a pris une place prépondérante dans notre vie. En effet, 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...

L'acier est sujet au problème de corrosion qui est un problème industriel important : le coût de la corrosion, qui recouvre l'ensemble des moyens de lutte contre la corrosion, le remplacement des pièces ou ouvrages corrodés et les conséquences directes et indirectes des accidents dus à la corrosion, est estimé à 2 % du produit brut mondial.

Donc l'acier peut être protégé contre la corrosion par différents procédés, sans altérer leurs propriétés mécaniques, 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 (intérieur et extérieur)

Le procédé de galvanisation à chaud consiste à immerger des pièces en acier dans un bain de zinc fondu (450 °C – 460 °C) afin de produire sur l'acier un revêtement protecteur anti corrosion. La galvanisation à chaud assure à la fois une protection par écran (le zinc en surface protège l'acier qu'il recouvre) et une protection sacrificielle (le zinc se sacrifie pour protéger l'acier)

Dans ce contexte, voici notre travail qui consiste à l'étude des paramètres de la galvanisation à chaud de l'acier A9, produit au niveau de SIDER EL-HADJAR.

Le présent mémoire se structure en quatre chapitres et se présente comme suit :

**Chapitre 01 :** Comporte des généralités sur le phénomène de corrosion et les différentes méthodes de protection contre ce phénomène.

**Chapitre 02 :** Contient des notions théoriques sur le procédé de galvanisation à chaud et son rôle dans la protection anti corrosion.

**Chapitre 03 :** Présente les matières premières et les techniques expérimentales utilisées pour caractériser les différents échantillons.

**Chapitre 04 :** Comporte les résultats expérimentaux et leurs discussions.

Enfin se mémoire se termine par une conclusion générale qui résume les renseignements de base contenue dans cette étude.

*Chapitre I : Notions générales  
sur la corrosion*

## Introduction

L'importance considérable de la corrosion dans la vie quotidienne (domestique ou industrielle) n'est plus à démontrer. En effet, ce phénomène touche pratiquement toutes les réalisations de l'ingénieur, des plus grandes au plus petites : production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc. Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion ne résident pas seulement dans les accidents que peut provoquer (sécurité public en jeu) ainsi que le mauvais impact sur l'environnement [Bensabra.H ; 2016].

## I. Généralités sur la corrosion

### I.1. Définition de la corrosion

La corrosion est définie comme une « interaction physico- chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie» [Duan.C et al ; 2002].

Une autre définition, considère que ce phénomène n'est autre que le retour des métaux et alliage à leurs états naturels de minerais. En tous cas quelle que soit la définition adoptée, la corrosion est une dégradation. 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 [Bardal.E ; 2004], [Normad.B et al ; 2004].

### I.2. Les facteurs de corrosion

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs peuvent être classés en quatre groupes principaux (Tableau I.1).

**Tableau I.1** : les principaux facteurs de corrosion [Lefevre.B ; 2014].

Milieu d'attaque	Nature du métal	Conditions d'emploi	Influence du temps
- Concentration du réactif	- Composition du métal ou l'alliage	- État de surface	- métaux ne subissant pas de Vieillessement
- Teneur en oxygène	- Procédés d'élaboration	- Forme des pièces	- Tensions mécaniques
- résistivité du milieu	- Impuretés	- Emploi d'inhibiteur	- Modification des revêtements
- l'acidité du milieu	- Traitement thermique	- Procédés d'assemblage	protecteurs
- Température	- Traitement mécanique		
- Pression			

### ***1.3. Processus corrosion***

#### ***1.3.1. Corrosion chimique (sèche)***

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non électrolyte ou sur action des gazeux (d'O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>). Lorsque le réactif est gazeux ou cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée : Corrosion sèche ou corrosion à haute température [Mehibil. R ; 2008].

La réaction qui se produit est de la forme :



L'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution non aqueuse (Al dans CCl<sub>4</sub>) peut être considérée comme une corrosion chimique. Elle est généralement rencontrée dans les industries produisant ou utilisant les acides [Habchi.A;2013].

#### ***1.3.2. Corrosion biochimique (bactérienne)***

La corrosion bactérienne est due à la présence de colonies importantes de bactéries dites anaérobies qui se développent dans les eaux contenant des sulfates. La lutte contre cette forme de corrosion est à l'heure actuelle essentiellement d'ordre Biologique, elle est réalisée par injection de produits bactéricides dans les milieux corrosifs [Lefevre.B ; 2014].

#### ***1.3.3. Corrosion électrochimique***

La corrosion électrochimique est essentiellement l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes. Elle se produit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique). Elle nécessite la présence d'un réducteur ; H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>... . Sans celui-ci, la corrosion du métal (réaction anodique) ne peut se produire dans la corrosion électrochimique la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables [Mehibil.M ; 2008].

### ***1.4. Les Formes de la corrosion***

Il existe plusieurs formes de corrosion des métaux que l'on peut classer selon deux formes :

- ✓ corrosion uniforme (généralisée)
- ✓ corrosion localisée

#### ***1.4.1. Corrosion uniforme (généralisée)***

La corrosion uniforme ou généralisée est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface [Serghini Idrissi.M ; 2016]. Elle se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif [Kherraf.S ; 2008].

Cette forme de corrosion est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles périodiques.

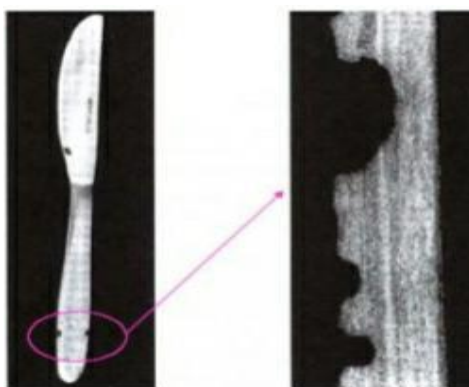
Les concepteurs d'appareillages peuvent en tenir compte en prévoyant des surépaisseurs consommables par la corrosion. Ce type de corrosion est donc souvent peu dangereux même s'il peut être très coûteux [Philibert.J et al ; 2002].

#### ***1.4.2. Corrosion localisée***

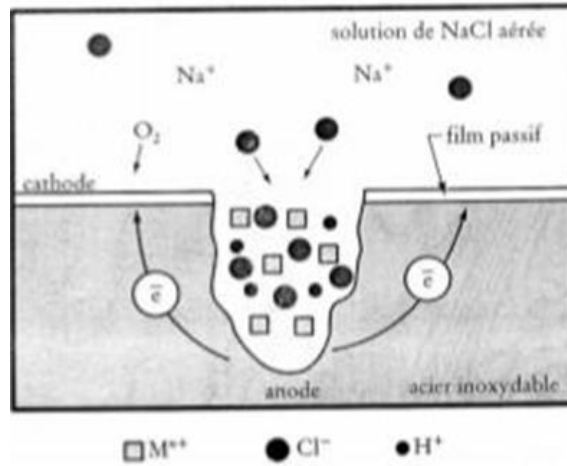
Elle peut être induite par des hétérogénéités de microstructure du matériau, par certaines espèces agressives présentes dans le milieu électrolytique ou encore par des phénomènes de dépôts ou de confinement de l'électrolyte à la surface du matériau. La pénétration de la corrosion est d'autant plus rapide que le rapport de la surface anodique sur la surface cathodique est faible. Les principales formes de corrosion localisée, sont exposées si- dessous [Comité des techniciens ; 1986], [Reboul.M ; 2005].

##### ***1.4.2.1. Corrosion par piqûres***

Il s'agit d'attaques très ponctuelles généralement liées à la création d'anodes peu étendues à côté d'une large cathode, en une dissolution rapide du métal sur des sites discrets de la surface, alors que le reste de cette surface n'est pas attaquée [Mankowski.G et al ;1994].

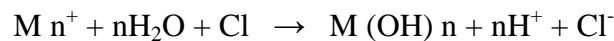


**Figure I.1 :** a) Piqûres de corrosion sur un couteau en acier inoxydable (12 % Cr).b) Coupe métallographique de piqûres (plan de coupe perpendiculaire à la lame) [Baïlon.J.P et al ; 2000].



**Figure I.2 :** Représentation schématique du mécanisme de progression d'une piqûre dans un acier inoxydable.

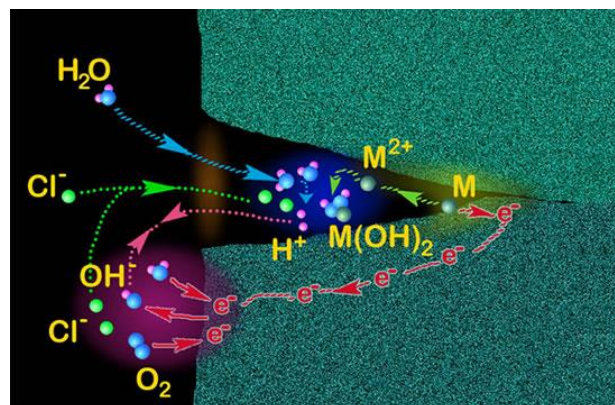
Le fond de la piqûre constitue la zone anodique ; la réaction cathodique se produit à la surface passivée, autour de la piqûre [Baïlon.J.P et al ; 2000].



#### ***1.4.2.2. Corrosion par crevasses (caverneuse)***

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène (Figure I.3) [Nouicer.E ; 2009].

Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse) n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend sur la largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres. La corrosion par crevasses peut prendre un caractère dangereux, notamment dans l'eau de mer. [Ketcham.S.J et al ; 1972].



**Figure I.3 :** Représentation schématique du mécanisme de corrosion caverneuse [W1].

### ***1.4.2.3. Corrosion sous contrainte***

La corrosion sous contraintes est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique [Serghini Idriss.M ; 2016]. Ce phénomène, particulièrement dangereux, se produit par effets combinés de trois paramètres :

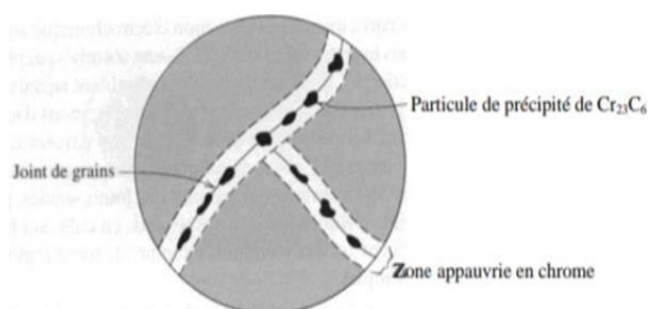
- La température: la corrosion sous contrainte se développant rarement en dessous de 50 °C ;
- Les contraintes appliquées ou résiduelles subies localement par la pièce ;
- La corrosivité du milieu : présence de Cl<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>S ou milieux caustiques NaOH, les milieux chlorurés et meilleurs même dans les milieux H<sub>2</sub>S [Bentiss.F ; 2006].



**Figure I.4 :** Corrosion sous contrainte dans le chlorure de magnésium d'un acier inoxydable [Benard.J, et al ; 1969].

### ***1.4.2.4. La Corrosion intergranulaire***

Ce type de corrosion se manifeste aux joints de grains. Ce phénomène peut provoquer des fissures qui affaiblissent les caractéristiques mécaniques du métal (Figure I.5). Certains aciers inoxydables et alliages (fer, chrome, nickel) sont très affectés par ce mode de corrosion qui réduit de façon catastrophique leur résistance mécanique. Ce type de corrosion est un phénomène microscopique (invisible dans les étapes initiales) [Oulabbas.A ; 2013].



**Figure I.5 :** Représentation schématique de particules des carbures de chrome qui ont précipité le long de joints de grains d'un acier inoxydable [William.D, et al ; 2001].



#### ***1.4.2.5. Corrosion avec érosion***

Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface du métal, ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même, ou bien à celui des particules solides qu'il contient. Il y'a alors accélération de la corrosion [Saghi. L ; 2010].



**Figure I.6 :** Corrosion-érosion dans une zone turbulente [Kherraf.S ; 2008].

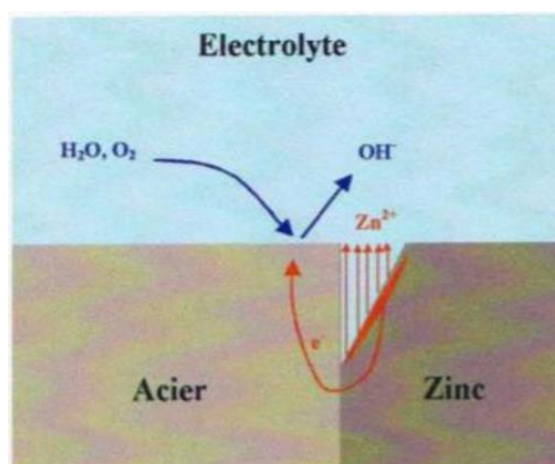
#### ***1.4.2.6. Corrosion sélective***

Dans les structures multi phases, ce même type de corrosion galvanique, peut dissoudre sélectivement l'une des phases. (La corrosion feuilletante est une forme de corrosion sélective qui se propage suivant une multitude de plans parallèles à la direction du laminage ou du filage [Ketcham.S.J et al ; 1972], [Vargel.C ; 2002].

#### ***1.4.2.7. La corrosion galvanique (bimétallique)***

Ce type de corrosion résulte du couplage électrique de deux métaux différents et immergés dans la même solution. Le moins noble (l'anode) se corrode et le plus noble (la cathode) est protégé. Elle résulte de la formation d'une pile électrochimique [Rozenfeld.I.L ; 1981].

C'est une forme de corrosion localisée dans la zone de contact entre deux matériaux de potentiels électrochimiques différents. Ce phénomène, pour survenir, nécessite outre un contact électrique entre les deux matériaux (courant électronique), un contact électrolytique (courant ionique). Ceci peut être observé par mise en contact de l'aluminium avec un métal plus noble comme l'acier par exemple, au sein d'un électrolyte ou atmosphère humide. C'est aussi le cas en général des alliages, contenant des phases intermétalliques de potentiel électrochimique différent de celui de la matrice. On parle alors de phénomènes de micro-couplage galvanique. La corrosion galvanique provoque la dissolution accélérée de l'élément le moins noble du couple, par polarisation anodique de ce dernier [Reboul.M ; 2005].



**Figure I.7 :** Cas de corrosion galvanique d'un revêtement de zinc sur acier.

Le métal le plus actif (ou Anodique) va se corroder rapidement tandis que le métal en contact le moins actif (ou cathodique, qui est l'acier dans notre exemple) sera préservé [Lefevre.B ; 2004]

## ***1.5. Différents techniques de protection contre la corrosion***

### ***1.5.1. Mécanismes de prévention et de lutte contre la corrosion***

Le coût occasionné par la dégradation annuelle des matériaux, a provoqué la mise en œuvre de méthodes de protection. Ces derniers visent une économie de matière et d'énergie auxquelles s'ajoutent de nombreuses contraintes. Toute solution efficace et durable ne peut-être qu'un compromis tenant compte de l'ensemble de ces facteurs, notamment des contraintes économiques et scientifiques. La prévention de la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception.

En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, notamment pour des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique, aéronautique ou le biomédical, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves pour les personnes et l'environnement [W 2].

#### ***1.5.1.1. Mesures préventives***

Des mesures préventives prises au bon moment, permettant d'éviter de nombreux problèmes de corrosion et cela sans frais supplémentaires [Uhlig.H et al ; 1970].

- 1) Par un choix judicieux des matériaux;
- 2) Par une forme adaptée des pièces.

### ***A. Prévention par un choix judicieux des matériaux***

Il sera possible de lutter contre les risques de corrosion en agissant sur le choix judicieux du Matériau. Le choix des matériaux prend en compte les facteurs suivants : **[Anoun.I ; 2014]**

- Domaine d'utilisation
- Nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques
- Traitements sélectionnés
- Prix et disponibilité des matériaux.

### ***B. Protection par une forme adaptée des pièces***

#### ***a. Protection par la géométrie des pièces***

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Nous aborderons ici quelques solutions types couramment employées pour limiter les risques en fonction du type de corrosion à redouter **[Khoukhi.F ; 2008]**.

#### ***b. Elimination des zones humides***

De façon générale, la corrosion atmosphérique ne se produit qu'en présence d'humidité. En Prévoyant un drainage plus ou moins parfait, on évite une accumulation d'humidité d'où le Risque de corrosion **[Anoun.I ; 2014]**.

### ***1.5.2. Moyens de protection***

Etant donné que la corrosion résulte de l'action de deux partenaires, le métal ou l'alliage d'une part, la solution d'autre part, il sera possible de lutter contre ces effets par **[Anoun.I ; 2014]**:

- protection électrochimique
- protection par revêtements

#### ***1.5.2.1. Protection électrochimique***

Parmi les moyens employés pour lutter contre la corrosion, la protection électrochimique doit son originalité au fait qu'elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. **[Skerray E.W et al ; 1976]**.

- Protection cathodique
- Protection anodique

### A. Protection cathodique

La Protection cathodique d'un ouvrage métallique en contact avec un électrolyte consiste à placer cet ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne Thermodynamiquement impossible. Comme valeur de potentiel, au-dessous duquel l'acier ne peut se corroder dans un milieu ayant un pH compris entre 4 et 9, on admet Mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution saturée [Ghellai.M ; 2013].

Le principe de la protection cathodique trouve son application dans la pile élémentaire ou l'une Des électrodes (anode) est toujours corrodée alors que l'autre ne l'est pas.

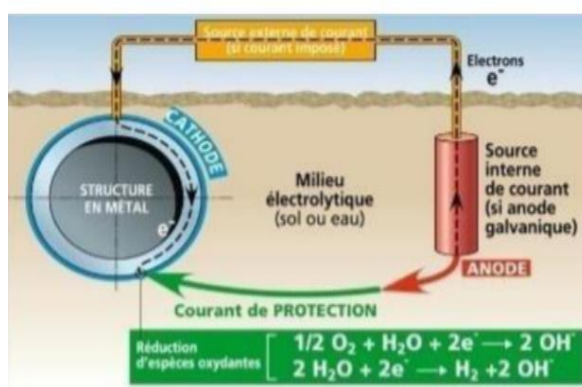


Figure I.8 : Principe de la protection cathodique.

### B. Protection anodique

Elle est réservée aux métaux passivables dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif ( $E_{\text{corr}} < E_{\text{passif}}$ ). Une polarisation anodique permet de déplacer le potentiel dans le domaine passif. La densité du courant nécessaire pour maintenir le métal à l'état passif est très faible (équivalente à  $i_{\text{passif}}$ ). Le maintien d'une protection anodique ne nécessite que peu de courant. Par contre, la densité de courant appliquée est nettement plus élevée car elle doit être supérieure à la densité de courant de passivation [Landolt.D ; 1993].

#### I.5.2.3. Protection par revêtements

##### A. Revêtements métalliques

Une autre approche générale est de séparer le métal de son environnement corrosif en utilisant un revêtement. Tout métal immergé dans une solution électrolytique quelconque, prend un potentiel de dissolution (corrosion naturelle) que l'on peut mesurer expérimentalement. Pour une solution donnée, il est possible d'établir la série galvanique correspondante, c'est à dire un classement des différents métaux et alliages en fonction de ce potentiel. Selon la place relative occupée par le

métal protecteur par rapport au métal à protéger, nous distinguons deux types de revêtements [Bouamama.N ; 2015].

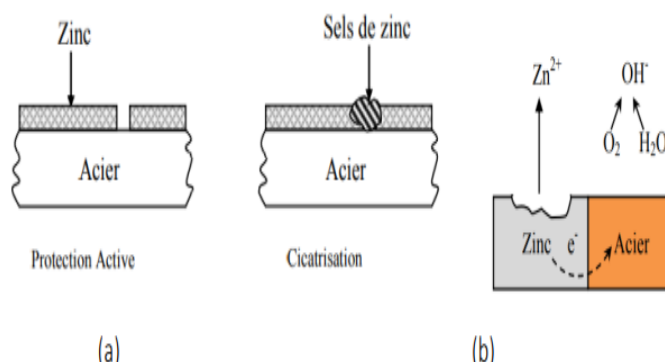
- Ceux plus nobles que le substrat cathodique,
- Ceux moins nobles que le substrat anodique.

#### a. Revêtements anodiques

Le zinc, le cadmium et l'aluminium forment des revêtements moins nobles que l'acier (. Dans le cas d'un revêtement, l'acier constitue la cathode de la pile et c'est donc le zinc qui sera attaqué. L'acier est protégé cathodiquement par le zinc qui est moins noble que lui et on parle alors de protection cathodique [Bensaada.B ; 2016].

#### b. Revêtements cathodique par le zinc

Grâce à son rôle sacrificiel, le zinc permet également une protection cathodique contre la corrosion (Figure I.9). [Yadav. A.P et al ; 2007], [Guessoum.B;2012].



**Figure I.9.:** (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 [Azaizia.A;2020].

### B. Revêtements non métalliques

#### a. Revêtements organiques

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, ils se divisent en trois familles : [Campa. A ; 1971]

- Les revêtements en bitume
- Les revêtements polymériques
- Les peintures et les vernis

***b. Revêtements inorganiques***

- Les couches de conversion
- Les couches étrangères aux substrats

**I.6. Conclusion**

Après présentation de problèmes causés par la corrosion et les propositions des moyen pouvant éviter ou réduire ce fléau économique notre choix s'est basé sur la protection contre la corrosion par un revêtement de Zinc (galvanisation) qui sera détaillée dans le chapitre suivant.

*Chapitre II : Généralités  
sur galvanisation*

## Introduction

La galvanisation de l'acier est un moyen très couru et efficace pour protéger l'acier contre la corrosion. L'acier revêtu de sa couche galvanisée protectrice est utilisé pour de nombreuses applications telles que la construction de bâtiments, l'électroménager et l'automobile.

Le procédé de galvanisation consiste à enduire d'une couche mince de zinc des matériaux d'acier. Il existe plusieurs méthodes pour enduire l'acier de zinc, par exemple, on peut mentionner la galvanisation à chaud par immersion et la déposition électrolytique de zinc. Dans ce chapitre, la galvanisation par trempage des tôles d'acier dans un bain de zinc liquide est considérée.

## II. Généralités sur le zinc

Le zinc est un élément chimique métallique blanc légèrement bleuâtre et brillant, appartenant au sous-groupe II de la classification périodique. Il est cassant à froid mais devient malléable et ductile entre 100 et 150°C. Dans un environnement humide, il se couvre d'une mince couche d'hydrocarbonate qui le patine et le protège contre l'oxydation. Le zinc se différencie sensiblement des autres métaux industriels, notamment par point de fusion relativement bas et par sa structure cristalline, c'est en effet, un des rares métaux cristallisant dans le système hexagonal compact. Le zinc est principalement utilisé comme revêtement protecteur du fer et de l'acier. Il se prête facilement à cet usage étant donné sa parfaite adhérence sur le métal de base. En outre, le zinc étant nettement moins noble que le fer, il offre une résistance cathodique à la corrosion. En effet, l'attaque par les agents corrosifs a lieu préférentiellement sur le zinc et non sur le fer, même si ce dernier n'est que partiellement recouvert. Ces caractéristiques sont présentées sur le tableau suivant [Saghi.L ; 2010].

**Tableau II.1** : Caractéristiques du zinc [Saghi.L ; 2010].

Numéro atomique	Masse atomique g/mole	Densité g/cm <sup>3</sup>	Température de fusion (°C)	Etat d'oxydation	Température d'ébullition (°C)
30	65,37	7,134	419	2	906,9

### II.1. Préparation des surfaces

La qualité et l'adhérence de la couche galvanisée, dépend en grande partie de l'état de surface de l'acier. Ce dernier est généralement oxydé et couvert d'huile ou de graisses, donc nécessite une préparation rigoureuse en nettoyant préalablement et soigner la surface avant l'immersion dans le bain de zinc [Saghi .L ; 2010].



## II.2. Définition d'un traitement de surface

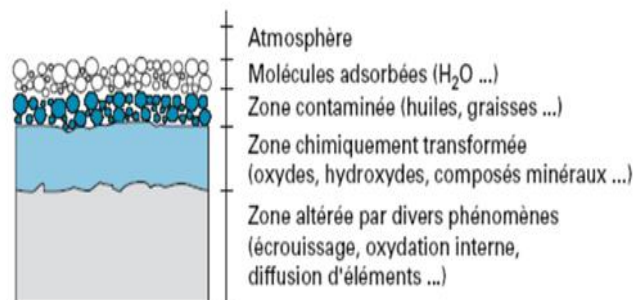
Un traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie [Ammiche.M ; 2021].

## II.3 Préparation de surface d'un matériau nu avant traitement de surface

La surface d'une pièce industrielle (Figure II.1) est toujours souillée par différents polluants les pollutions organiques (huiles, graisses...) et les composés métalliques (oxydes, nitrure, carbures...). Il s'agira donc de passer d'une surface métallique polluée à une surface physiquement et chimiquement propre en éliminant la couche souillure

Le processus de préparation comporte les opérations suivantes : [Saghi.L ; 2010]

- Dégraissage
- Décapage
- Fluxage



**Figure II.1** : Représentation schématique d'une surface métallique industrielle [Wery.M ; 1998].

### II.3.1. Le dégraissage

Il a pour but d'enlever toutes les salissures et graisses qui empêcheraient la dissolution des oxydes de fer superficiels. Le dégraissage est effectué dans des bains contenant du carbonate de sodium ou de la soude avec addition de détergents et de tensioactifs. Parfois, des dégraissants acides peuvent être utilisés [W 3].

Cette étape est capitale pour la suite. En effet, les traitements se faisant dans des milieux aqueux, il convient d'éliminer toute trace de corps gras susceptible d'empêcher la mouillabilité des pièces par les liquides de traitement et de polluer les bains (décapage, fluxage).

Plusieurs moyens existent pour dégraisser les pièces [Quantin.D ; 2003].

### **A. Dégraissage alcalin**

C'est la méthode la plus utilisée. Le dégraissage se fait dans des bains contenant du carbonate de sodium ou de la soude caustique additionnée de détergents (poly phosphates ou silicates de sodium) et de tensioactifs à une température comprise entre 60 et 80 °C (il existe de nombreux bains commerciaux efficaces). Il doit être suivi d'un rinçage en eau de ville pour éliminer toute trace de produit ainsi que les corps gras surnageant qui auraient pu être entraînés lors de la sortie des pièces du bain de dégraissage [**Bentaleb.F.Z ; 2014**].

### **B. Dégraissage acide**

Dans ce cas, on utilise des savons agissant en milieu acide. Ils ont l'avantage de ne pas perturber le décapage en cas de mauvais rinçage et de plus, d'initier le décapage. Il est conseillé, après le dégraissage acide, d'opérer un rinçage efficace afin d'éliminer les traces de corps gras [**Bentaleb.F.Z ; 2014**].

## **II.3.2. Décapage**

Il a pour but d'enlever la calamine et les autres oxydes présents à la surface de l'acier. Ces oxydes peuvent provenir des traitements métallurgiques à chaud (calamine), des conditions de stockage de l'acier ou des pièces (rouille) ou de la mise en forme à chaud ainsi que des assemblages par soudure. Il est réalisé soit par voie sèche, par sablage ou grenailage, soit par voie humide en milieu acide chlorhydrique ou acide sulfurique en présence d'inhibiteurs de corrosion [**W 3**].

### **A. Décapage par voie sèche**

Il est réalisé généralement par grenailage. Il consiste à projeter de la grenaille métallique sur les pièces en acier ou en fonte. L'action est purement mécanique et permet d'éliminer toutes traces de peinture, de sable de coulée sur les pièces de fonderie ou les restants de laitier sur les cordons de soudure. Il est utilisé pour éliminer les pollutions de surface qui ne peuvent être éliminées par voie chimique [**Quantin.D ; 2004**].

### **B. Décapage par voie humide**

Il se fait par immersion des pièces dans un bain d'acide. Le plus utilisé est l'acide chlorhydrique dilué (concentration de 120 à 210 g/L). On l'emploie à température ambiante ou légèrement tiédie. Il a l'avantage de donner des chlorures de fer très solubles, un bon aspect de surface satiné et de ne provoquer qu'un faible risque de fragilisation du métal. On peut utiliser l'acide sulfurique, mais celui-ci nécessite une température d'environ 70 °C et une extraction rigoureuse de fumées [**Quantin.D ; 2004**].

### ***II.3.3.Fluxage***

Le fluxage consiste à déposer sur la surface des pièces un mélange de chlorure de Zinc et de chlorure d'ammonium. Le bain est préparé à partir de sel double  $ZnCl_2, 2(NH_4Cl)$  ou de sel triple  $ZnCl_2, 3(NH_4Cl)$ . Le flux agit en fournissant une atmosphère décapante de gaz chlorhydrique par décomposition du chlorure d'ammonium lors de l'immersion dans le bain de zinc. L'opération de fluxage a trois objectifs :

- Parfaire la préparation de surface (dissolution des oxydes de fer reformés à la surface au cours de l'opération de rinçage) ;
- Protéger la surface de toute oxydation avant immersion dans le bain de zinc ;
- Assurer une bonne mouillabilité de la surface des pièces par le zinc fondu [**Quantin.D ; 2004**].

## **II.4. La galvanisation**

### ***II.4.1. Histoire de la galvanisation***

C'est en 1741 que J. Malouin, chimiste français, découvrit l'action protectrice du revêtement de zinc sur les aciers contre la corrosion environnante, sans toutefois en comprendre le mécanisme. Il faut attendre 1837 pour qu'un ingénieur français du nom de Sorel dépose le brevet de la galvanisation à chaud. Il utilise alors le terme de « galvanisation » en référence au courant galvanique qui protégé l'acier lorsque le revêtement en zinc est interrompu.

C'est en 1847 que la première usine est construite en Allemagne à Solingen. A cette époque les tôles d'acier sont au préalable nettoyées avec du sel afin d'éliminer les oxydes de fer formés en surface, et ainsi améliorer l'adhérence du zinc sur la tôle. Cette dernière est ensuite immergée dans un bain de zinc à la température de 460°C. Bien que cette technique soit en perpétuelle évolution, elle reste à l'origine de la galvanisation à chaud en continu que l'on connaît aujourd'hui [**Quantin.D ; 2004**].

Depuis ces dernières décennies, les améliorations et les nouvelles applications de ce procédé se sont multipliées devant l'intérêt de nouveaux investisseurs dont l'industrie automobile. Cette dernière fut en effet très intéressée par l'utilisation de la galvanisation à chaud pour la protection des carrosseries de voitures contre la corrosion.

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.R ; 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.E ; 1987].

#### II.4.2. Définition de la galvanisation

Galvanisation, procédé consistant à recouvrir une pièce en acier ou en fonte d'une couche de zinc, assurant ainsi la protection anticorrosion la plus économique et la plus respectueuse de l'environnement qui soit. Le zinc est un élément essentiel et indispensable pour la santé de l'être humain et pour l'ensemble des organismes vivants, d'où l'interaction relativement complexe entre cet élément et l'environnement [W 3].

#### II.4.3. Le principe de la galvanisation

La corrosion est certainement le pire ennemi des biens d'équipement et des infrastructures. Elle est considérée comme la principale cause de panne, de dysfonctionnement et de défauts prématurés des composants et systèmes. La protection de l'acier contre la corrosion était habituellement assurée par la galvanisation qui constitue une défense dans la plupart des milieux en consommant sa couche de zinc au profit de l'acier.

Lorsque deux métaux sont en contact, un courant électrique est généré. Lorsque le courant passe, l'un des métaux se corrode plutôt que l'autre. Ce comportement est dû aux propriétés atomiques des métaux, qui ne peuvent pas être modifiées, de telle sorte que ces effets sont déterministes. En ce qui concerne l'acier, composé en majorité de fer, le zinc est un métal protecteur électrochimique [W 4].

La galvanisation assure, par le recouvrement de l'acier par le Zinc une double protection (Figure II.2) :

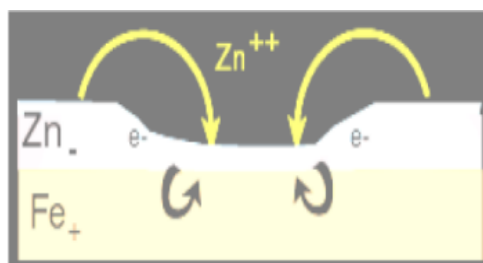


Figure II.2 : Revêtement de zinc endommagé [W 4].

## II.5. Galvanisation à chaud

### II.5.1. Définition de la galvanisation à chaud

La galvanisation à chaud est un procédé très ancien qui consiste à revêtir et à lier de l'acier avec du zinc, en immergeant l'acier dans le bain de zinc en fusion à 450C°.

Actuellement, la galvanisation à chaud est pratiquée selon deux voies :

- La galvanisation au trempé de produits finis.
- La galvanisation en continu de demi-produits sidérurgiques (tôles, tubes, fils) [Vignes.J et al ; 1997]

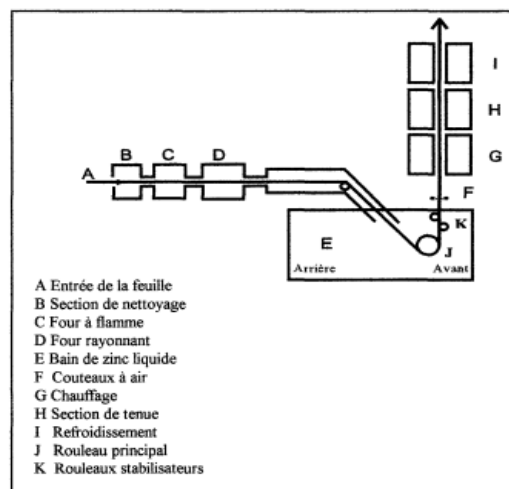


Figure II.3 : Schéma d'une ligne de galvanisation [Tourqui. M.H ; 2018].

### II.5.2. Principe général de la galvanisation à chaud

Le procédé de galvanisation à chaud consiste à recouvrir le fer par le zinc fondu à une température de 450 C°. Le zinc a un potentiel électrochimique plus négatif que celui du fer. Dans la pile fer-zinc, il constitue l'anode (zinc) qui est attaquée et se dissout, alors que le fer qui constitue la cathode qui reste inattaquée. Ce qui lui donne un pouvoir « sacrificiel » puisqu'il protège celui-ci électro chimiquement en se consommant à son profit, le protégeant ainsi contre toute attaque par corrosion et lui évitant sa transformation en oxyde de fer (ou rouille  $Fe_2O_3$ ). Cette protection est efficace même si le revêtement de zinc est rendu discontinu par rayures aux cassures et se prolonge jusqu'à complète disparition du zinc. Le revêtement ne sera correctement réalisé que si un bon mouillage a été obtenu entre le métal à revêtir et le métal fondu à déposer. Le mouillage est toujours réactif, en ce sens que des composés intermétalliques précipitent à l'interface entre l'acier et le métal liquide durant l'immersion. La réactivité de l'acier vis-à-vis du bain de métal fondu est gouvernée par quatre familles de facteurs : la composition chimique du bain de métal fondu, les facteurs déterminant l'état de surface de l'acier à l'immersion, la

température à laquelle se déroule la réaction avec le métal liquide et sa durée. Le zinc en tant que revêtement anticorrosion, reste encore actuellement d'un rapport performance, coût inégalé. Cela explique l'utilisation de tels produits dans les différents domaines de l'industrie, surtout à l'état de tôles zinguées pour l'automobile, l'électroménager [Saghi.L ; 2010].

Donc le principe de la galvanisation à chaud est basé sur l'affinité réciproque du zinc pour le fer. Au cours du traitement, la réaction entre ces deux éléments entraîne la formation d'un revêtement constitué de plusieurs composés fer-zinc qui lui confèrent ses qualités d'utilisation [Buscarlet.E ; 1987].

### III.5.3. Influence des différents facteurs en galvanisation à chaud

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 :

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

#### II.5.3.1 Qualité de l'acier

Le procédé de galvanisation en continu consiste à recouvrir de zinc un métal ferreux, par immersion dans un bain de zinc fondu à 450°C environ. Au cours de l'immersion, il se produit entre les deux métaux une réaction conduisant à une diffusion du zinc dans le fer. Il en résulte la formation de composés intermétalliques d'alliage Fe-Zn, entre sa couche interne (fer) et externe (zinc), avec des compositions différentes en fonction de la distance à l'acier (Figure II.4) et (Tableau II.1). Cette couche a une épaisseur courante de 55 µm. En réalité ces composés intermétalliques vont dépendre de la composition exacte du bain et de l'acier. L'acier ainsi revêtu est alors refroidi ce qui permet au revêtement riche en zinc de se solidifier.

Bien que la galvanisation à chaud soit généralement classée dans les revêtements de zinc pur, une faible quantité d'aluminium est ajoutée au bain de zinc fondu. Le bain de zinc contient ainsi de 0,1 à 0,3% en masse d'aluminium afin d'inhiber la croissance des alliages FeZn fragiles. Une couche d'inhibition Fe-Al est ainsi formée à l'interface revêtement zinc/acier [Vignes.J.L et al ; 1997].



**Figure II. 4 :** Vue en coupe transverse de phases formées après la galvanisation de l'acier.

La norme NF A 35-503 (1994) définit trois classes d'aciers aptes à la galvanisation, suivant la teneur de ces deux éléments (Tableau II.2).

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 [Giraud.A ; 2003].

**Tableau II.2 :** Classification des aciers suivant leur teneur en silicium et en phosphore.

Elément %	Classe I	Classe II	Classe III
Si	< 0,03	< 0,04	0,15 < Si < 0,25
Si +2,5P	< 0,090	< 0,110	< 0,325
P	-	-	< 0,040

### II.5.3.2 Le bain de galvanisation

Le bain de galvanisation est un réservoir dont les parois sont soit d'acier ou de céramique réfractaire, qui contient le zinc liquide dans lequel la feuille est immergée (Figure II.5).



**Figure II.5 :** Bain de zinc.

La capacité de ces cuves peut varier de 60 à 265 tonnes de zinc. Le bain est maintenu à une température variant, en général, de 450 à 480°C. Cette température est maintenue constante soit à l'aide 10 d'inducteurs, soit à l'aide d'un chauffage par résistance électrique. La température de la feuille qui entre dans le bain est habituellement plus élevée que celle à l'intérieur du bain, contribuant ainsi au chauffage du métal liquide [Chantal.B ; 2000].

Dans l'ordre chronologique nous trouvons le Polygalva, qui n'est plus utilisé aujourd'hui, le Technigalva largement utilisé, et le tout récent Galveco. D'autres bains ont été proposés, mais n'ont pas donné lieu à des développements industriels. Le tableau II.3, regroupe les compositions de ces différents bains [Bentaleb .F.Z ; 2014].

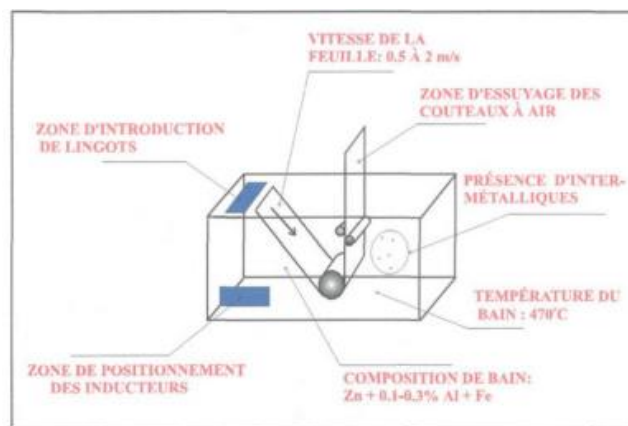


Figure II .6 : Schéma d'un bain de galvanisation.

Tableau II.3: Compositions des bains de zinc [Quantin. D ; 2004].

Type de bain	Teneur minimale en zinc (%)	Pb (%)	Al (%)	Mg (%)	Sn (%)	Ni (%)	Bi (%)
Zinc classique	99,5	0,1 à 1	0,001 à 0,01				
Polygalva	98,5	0,1 à 1	0,035 à 0,04	0,002 à 0,005		0,03 à 0,06	
Technigalva	98,5	0,1 à 1	0,001 à 0,01		1 à 1,8	0,05 à 0,06	
Galveco		0 Visé 0%	0,001 à 0,01				0,2 à 0,5

Dans notre étude les bains de zinc utilisé pour l'opération de galvanisation ont été prélevés au niveau de la section RPA pour analyse. La composition chimique obtenue au laboratoire centrale a donné le résultat suivant :



**Tableau II.4** : Composition chimique du bain de galvanisation.

Elément	Al	Pb	Fe	Zn
Bain de zinc %	0,17	0,088	0,047	99,695

Un zinc extra pur (99,99%Zn) ne permet pas une galvanisation convenable, faute du pouvoir mouillant. Le zinc utilisé dans le bain de galvanisation est de la classe Z7 ou Z8 suivant la norme NF A 55-101. La composition chimique de ce type est donnée dans le tableau II .5 [Saghi .L ; 2010].

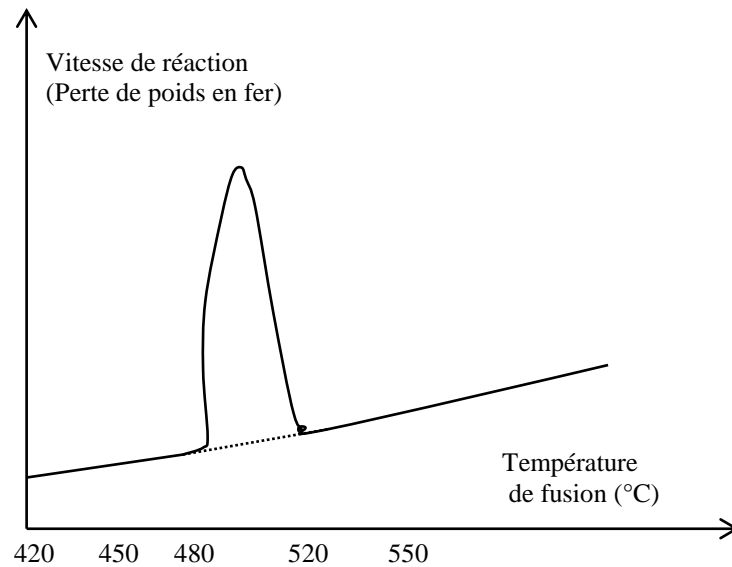
**Tableau II .5** : Composition chimique du zinc (Norme NF A 55-101).

Désignation des types normaux	Teneur minimale En zinc %en masse	Matières étrangères(%)						
		Pb	Cd	Fe	Sn	Cu	Al	Totale
<b>Z9</b>	99,995	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,005	0,005
<b>Z8</b>	99,95	0,03	0,02	0,02	0,001	0,002	0,005	0,05
<b>Z7</b>	99,50	0,45	0,15	0,05	-	0,005	0,01 à 0,02	0,50
<b>Z6</b>	98,50	1,4	0,20	0,05	0,5	0,03	-	1,52
<b>Z5</b>	98	1,4	0,25	0,08	0,5	-	-	2,25
<b>Z4</b>	97,75	1,25	0,25	0,10	-	-	-	

### II.5.3.3. Influence de température de galvanisation à chaud (température de bain de zinc)

La température du bain de zinc sera définie en prenant en compte les différents paramètres de la galvanisation. Le zinc fondu doit avoir une fluidité suffisante pour mouiller correctement les pièces immergées et s'écouler facilement lors de leur sortie du bain pour éviter des épaisseurs de revêtement trop importantes. La fluidité dépend des éléments ajoutés au zinc. Les réactions mises en jeu au cours de la galvanisation sont thermiquement activées (réactions Fe-Zn, décomposition du flux, formation de cendres, etc.).

Dans le domaine compris entre 490 et 530 °C, les réactions Fe-Zn sont très intenses avec formation de mattes importante et donnent un revêtement épais et fragile. Si on augmente encore la température, on diminue la durée de vie des creusets en fer. Le meilleur compromis actuel se situe entre 445 et 460 °C pour un bain de zinc classique, ou Technigalva, et entre 430 et 440 °C pour le Galveco [Marder . A .R ;2000].

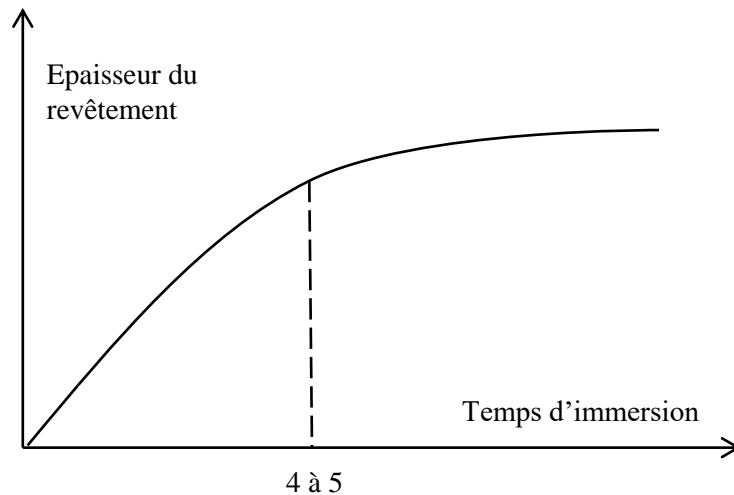


**Figure II.7 :** Influence de la température du zinc sur la vitesse de réaction Fe-Zn [Baticim ; 1982].

#### II.5.3.4. Durée d'immersion

La durée d'immersion varie, en général, entre 4 et 10 min. Elle va dépendre de trois points principaux :

- La masse et l'épaisseur des pièces. Leur mise en température se fait par transfert d'énergie à partir du bain de zinc liquide
- la position des pièces sur les balancelles. Les systèmes de manutention font que les dernières pièces entrées dans le bain sont les premières sorties. Les pièces situées en haut resteront moins longtemps dans le bain de zinc que celles situées dans le bas
- la taille des pièces. Celle-ci a une grande importance, surtout dans le cas de la galvanisation de pièces de charpentes. La grande taille des pièces combinée à une faible vitesse de sortie pour assurer l'écoulement du zinc peut conduire à des écarts de durée d'immersion de l'ordre d'une dizaine de minutes entre les extrémités [Quantin.D ; 2004].



**Figure II .8 :** Influence de la durée d’immersion dans un bain sur l’épaisseur du revêtement.  
[Saghi.L ; 2010].

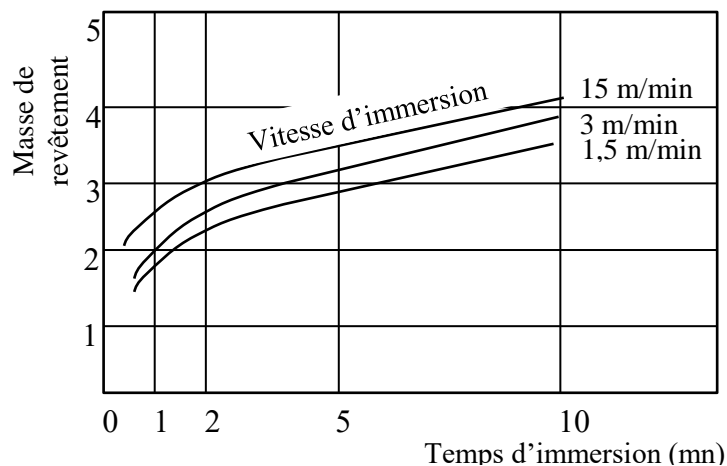
### II.5.3.5. Influence de la vitesse d’immersion et d’émersion

#### A. La vitesse d’immersion

L’immersion des pièces dans le bain de zinc déclenche les réactions de galvanisation. La vitesse, avec laquelle celle-ci a lieu, a donc une influence sur la qualité du revêtement final. Au cours de l’immersion, les pièces commencent à monter en température, le flux fond et commence à se décomposer et les réactions Fe-Zn s’initient [Quantin .D ; 2004].

#### B. La vitesse d’émersion

La vitesse d’émersion a une influence sur l’épaisseur finale du revêtement obtenu. Elle conditionne essentiellement l’épaisseur de la couche de zinc ( $\eta$ ) liée à l’écoulement du zinc et à la vitesse de solidification (Figure II.9) [Quantin.D ; 2004].



**Figure II .9:** Influence de la vitesse d’émersion sur la masse de revêtement déposée  
[Quantin.D ; 2004].

### II.5.3.6. La condition de refroidissement

Après la sortie de bain de zinc, la bande subira un refroidissement lent qui se fait généralement par l'air ambiant selon le procédé de la galvanisation à chaud.

## II.6. Equilibre Fe-Zn

### II.6.1. Présentation de système

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 [Saghi.L ; 2010].

Le diagramme binaire Fe-Zn, (Figure II.10), a connu de nombreuses modifications depuis sa première version en 1938 [Schramm. J et al ; 1938]. Cependant aujourd'hui, la référence reste le diagramme binaire proposé par Kubaschewski en 1982 [Kubaschewski. O et al ; 1982]. Et sa partie riche en zinc (Figure II.10), les composés intermétalliques Fe-Zn y sont au nombre de quatre :  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\delta$  et  $\zeta$  avec une teneur en zinc croissante [Foct.J ; 1993].

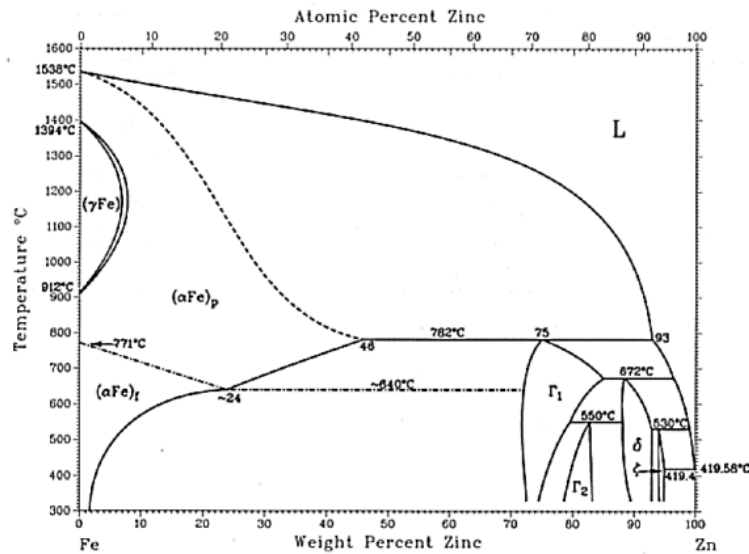


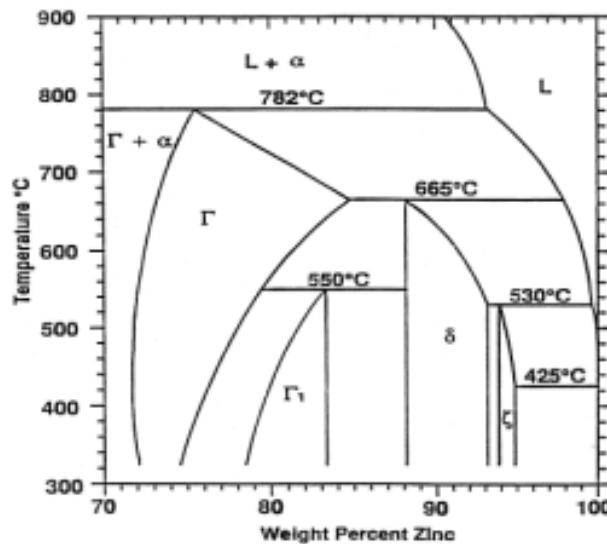
Figure II .10 : Diagramme de phases du système Fe-Zn [Moncel.M ; 1991].

### II.6.2. Les composés intermétalliques Fe-Zn

Une brève description de chaque phase intermétallique Fe-Zn (Tableau II.6), trouvée dans les couches formées sont décrites ci-dessous :

**Tableau II.6** : Caractéristiques des différentes phases du système Fe-Zn [Saghi.L ; 2010].

Phase Fe-Zn	Symbole	Structure	Formule stoechiométrique	Dureté (Hv)	Epaisseur Approximative (% de celle du dépôt)
Fer	A	CC	Fe	150	
Gamma	$\Gamma_1$	CC	$\text{FeZn}_{10}$	326-496	1-2
	$\Gamma_2$	CFC	$(\text{FeZn}_3, \text{FeZn}_{21})$	505	
Delta	$\delta$	Hexagonal	$\text{FeZn}_7$	340	20-30
Zéta	$\zeta$	Monoclinique	$\text{FeZn}_{13}$	112	50
Eta	$\eta$	Hexagonal	Zn	70	20-30

**Figure II.11** : Diagramme d'équilibre Fe-Zn dans le côté riche en zinc [Marder.A.R ; 2000].

### II.6.2.1. La phase zéta $\zeta$

La phase zéta ( $\text{FeZn}_{13}$ ) contient approximativement de 5 à 6% en fer, de structure monoclinique, se forme à partir de la réaction péritectique entre la phase  $\delta$  et le zinc liquide à 530°C,  $\zeta$  se forme entre les phases  $\delta$  et  $\eta$  [Saghi.L ; 2010].

### II.6.2.2. La phase delta $\delta$

Est également non stœchiométrique avec une composition en fer variant entre 7 et 12% masse, possède une structure hexagonale. Cette phase se forme à partir d'une réaction péritectique entre  $\Gamma_1$  et le liquide à 665°C [Fourmentin.R ; 2004].

Auparavant cette phase était séparée en deux morphologies :  $\delta_{IK}$  compacte, côté ( $\Gamma$ ) (trouvée du côté riche en fer), l'autre  $\delta_{IP}$  palissade, côté ( $\zeta$ ) (trouvée du côté riche en zinc). Toutefois, en raison d'une similitude dans leur structure cristallographique [Buscarlet.E ; 1987].

### II.6.2.3. La phase $\Gamma 1$

La structure cristallographique de la phase  $\Gamma 1$  ( $Fe_3Zn_{10}$ ) est cubique centré et a une composition en fer variant entre 23,5 et 28% masse à 450°C. Elle est issue de la réaction péritectique à 782°C entre le fer  $\alpha$  et le liquide [Fourmentin.R ; 2004].

### II.6.2.4. La phase $\Gamma 2$

La phase gamma 2 ( $\Gamma 2$ ),  $Fe_5Zn_{21}$ , possède une structure cubique à face centrée avec une composition en fer comprise entre 17 et 19,5% en points à 450 C°, Cette phase est le résultat d'une réaction péritectoïde entre les phases ( $\Gamma 1$ ) et ( $\delta$ ) à 550°C La phase gamma 2 ( $\Gamma 2$ ) a une valeur de microdureté plus élevée [Saghi.L ; 2010].

**Tableau II.7** : La micro dureté des phases Fe-Zn [Marder .A.R ; 2000].

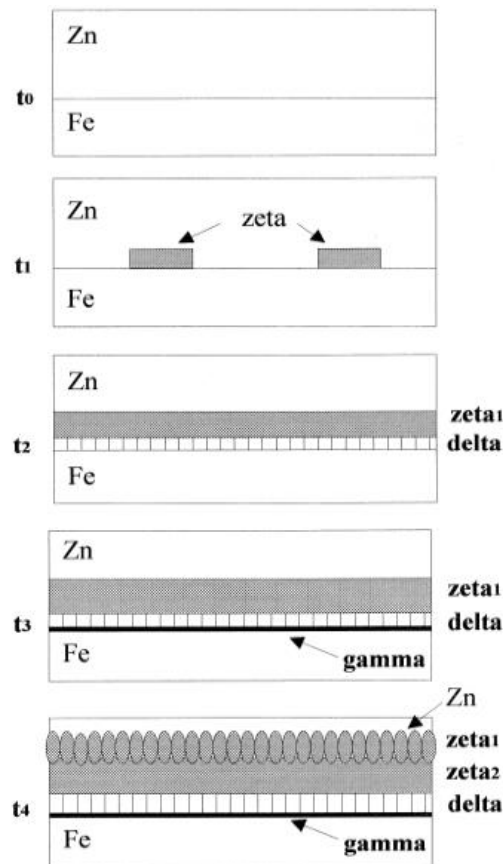
Phases	Microdureté Vickers (20mg)
Fe	104
$\Gamma$	326
$\Gamma 1$	505
$\delta$	358
$\zeta$	208
$\eta$ Zn	50

### II.6.3. Formation des phases Fe-Zn

Lorsque du fer pur est immergé dans un bain de zinc liquide à une température comprise entre 450 et 490°C, le revêtement est composé d'une suite de sous-couches :  $\Gamma$ ,  $\delta$ ,  $\zeta$ , et  $\eta$ .

C'est par la nucléation de la phase  $\delta$  que débute la formation du revêtement de galvanisation , (Figure II.12), suivie par la phase  $\delta$  et après un temps d'incubation par la phase  $\Gamma$ , Cette figure montre ainsi la chronologie du développement des composés intermétalliques formant les sous-couches du revêtement avec  $t_0$  le temps correspondant à l'immersion de la tôle dans le bain de galvanisation et  $t_0 < t_2 < t_3 < t_4$ . Au temps  $t_1$  la phase  $\zeta$  se forme au niveau du substrat en fer, suivie juste après, à  $t_2$ , par la formation de la phase  $\delta$  à l'interface fer  $\alpha$  /  $\zeta$ . Ces deux phases  $\zeta$  et

$\delta$ , forment alors une couche continue après seulement 5 secondes d'immersion. Ensuite, après un temps de 30 secondes, une fine couche de  $\Gamma$  se forme à l'interface  $\delta$ /fer  $\alpha$  [Fourmentin.R ; 2004], [Jordan. C .E et al ; 1997], [Buscarlet .E ; 1987].



**Figure II.12** : Représentation schématique des couches des composés intermétalliques Fe-Zn dans le bain de zinc pur [Jordan.C.E et al ; 1997].

## II.7. Principe d'équipement de la ligne de galvanisation en continue

### II.7.1. Section d'entrer

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 (360 m) 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.D ; 2004].

### ***II.7.2. Section de traitement thermique***

Cette section a pour rôle :

- De nettoyer et dégraisser la bande par chauffage.
- D'assurer les qualités de dureté de la bande par l'un des traitements thermiques.
- D'assurer la protection de la bande jusqu'à l'immersion dans le bain.

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).

#### **Première section (Section de préchauffage) : (Longueur 22,6 mètre)**

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 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 %.

En cas d'arrêt de la ligne, un by-pass assurera l'alimentation des brûleurs en faible débit d'air et gaz de façon à maintenir une atmosphère très réductrice dans le four (10 - 15 % d'imbrulés) et évite l'élévation de température.

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 [Tourqui.M.H ;2018].

#### **Deuxième section ou section de recuit : (longueur 110 mètre)**

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  $N_2$  [Bantaban.B ; 2020].

##### **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 %) H<sub>2</sub> et le reste N<sub>2</sub> [Ferté.M ; 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 [Tourqui.M.H ; 2018].

#### **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. Lorsque le chauffage est assuré au moyen des tubes de refroidissement et des résistances électriques. [Bantaban.B ; 2020].

#### **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. [Tourqui.M.H ; 2018].

### ***II.7.3. Section bain de zinc***

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

Le bac est composé d'une mécanique d'entraînement et de guidage de la bande :

- Un rouleau de fond en acier inoxydable de diamètre 600 mm 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. [Quantin.D;2004], [Tourqui.M.H ; 2018].

### ***II.7.4. Section refroidissement***

La bande est refroidie par l'air soufflé sous pression. Le refroidissement s'achève dans un système de refroidissement par l'eau froide sous un débit de 50 m<sup>3</sup> /h est envoyée sur la bande.

### ***II.7.5. Section planage***

Cette section comporte :

- Une jauge de mesure de l'épaisseur du revêtement.
- Un skin-pass.
- Une planeuse sous traction

### ***II.7.6. Section de traitement chimique***

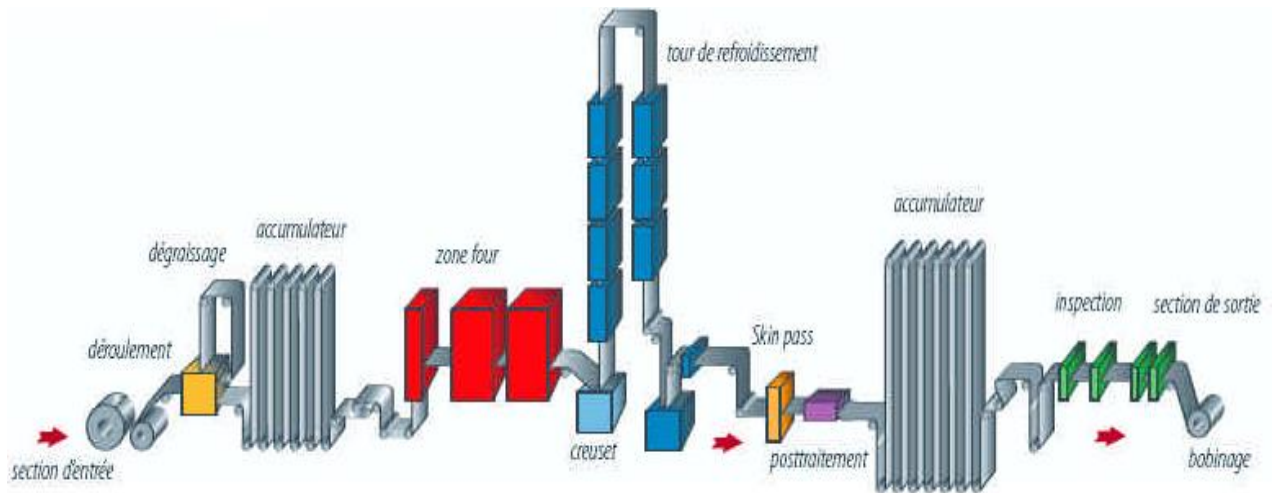
Le rôle de cette section est de déposer un film d'une solution à base de chrome (traitement chimique de chromage) sur les deux surfaces de la bande contre la formation de la rouille blanche durant le stockage des bobines [Bantaban.B ; 2020].

### ***II.7.7. Section sortie***

Un accumulateur de sortie permet le fonctionnement en continu de la section centrale lors du skin pass. Cette technique consiste à donner à la pièce la rugosité de surface et la planéité et d'éliminer les contraintes qui apparaissent lorsqu'un acier non "skin passé" est vieilli. La bande est ensuite ajustée suivant les dimensions désirées.

Certaines applications post galvanisation demandent un traitement d'acide chromique, consistant en un dépôt sur la surface de la pièce d'une fine couche de chromate de zinc, particulièrement résistant à la rouille blanche ZnO.

L'application d'un film d'huile assure une protection temporaire contre la corrosion et facilite l'emboutissage des tôles. Celles-ci sont, à la fin du processus, rebobinées en coli. En sortie de bain, la bande peut également subir un nouveau traitement thermique qui consiste à maintenir la température autour de 500 °C pendant quelques secondes afin de favoriser la formation de composés intermétalliques Fe-Zn en lieu et place du revêtement de zinc du galvanizing. Ce procédé est appelé galvannealing, qui est la contraction de galvanizing et deannealing. Après ces deux types de procédés, la bande est refroidie en passant à travers des jets d'air à température ambiante. Une jauge d'épaisseur permet de suivre les dimensions du revêtement des deux côtés de la bande [Tourqui.M.H ; 2018].



**Figure II.13:** Schéma de processus de galvanisation

## II.8. Les avantages et les domaines d'application de la galvanisation à chaud

### ❖ *Les avantages*

La galvanisation à chaud est un processus de revêtement métallique efficace et économique pour protéger les surfaces en acier contre la corrosion, il offre de nombreux avantages par rapport à d'autres méthodes de revêtement :

- ✓ Une durée de vie exceptionnelle souvent supérieure à 50 ans.
- ✓ Une protection totale intérieure et extérieure du fait de l'immersion intégrale des réservoirs dans le zinc en fusion.
- ✓ Une protection sacrificielle en cas de blessure du revêtement, grâce à l'effet de pile produit entre l'acier et le zinc.
- ✓ Une résistance unique aux chocs et à l'abrasion car le zinc est lié métallurgiquement à l'acier.
- ✓ durée de vie avant premier entretien inégalée grâce à la très faible vitesse de corrosion du zinc.

### ❖ *Les domaines d'application*

#### ✓ *Construction*

Dans le domaine de la construction, la galvanisation à chaud est largement utilisée pour protéger les éléments en acier des bâtiments tels que les poutres, les colonnes et les charpentes. Ces éléments sont souvent exposés aux intempéries et à l'humidité, ce qui peut causer de la corrosion et affaiblir leur structure.

✓ ***Industrie automobile***

Dans l'industrie automobile, la galvanisation à chaud est utilisée pour protéger les composants en acier tels que les châssis, les suspensions et les échappements. Ces composants sont soumis à des conditions difficiles telles que l'exposition aux intempéries, aux produits chimiques et aux impacts.

✓ ***Infrastructures publiques***

La galvanisation à chaud est largement utilisée dans la construction d'infrastructures publiques telles que les ponts, les tunnels et les barrières de sécurité. Ces éléments sont souvent exposés aux intempéries et à l'humidité, ainsi qu'à des conditions environnementales extrêmes..

✓ ***Équipements de loisirs***

La galvanisation à chaud est également utilisée dans la fabrication d'équipements de loisirs tels que les toboggans, les balançoires et les structures de jeux pour enfants. Ces équipements sont souvent installés en extérieur et exposés aux intempéries et à l'usure.

## ***II.9 Conclusion***

Au vu des avantages que peut offrir la galvanisation cette dernière peut être considéré comme étant l'une des meilleurs méthodes de protection des aciers.

*Chapitre III : Techniques  
expérimentales*

## Introduction

L'objectif de ce chapitre est de définir les moyens matériels et méthodes pour la préparation des échantillons et les différentes techniques de caractérisation du revêtement utilisés pour la réalisation du présent travail.

### III. Echantillons utilisés

L'étude de l'effet de la galvanisation de l'acier a été réalisée, au niveau du complexe sidérurgique SIDER EL-HADJAR. Notre étude s'est basée sur l'utilisation l'acier au carbone A9 dont la composition chimique est donnée dans le tableau III.1.

Les échantillons ont été découpés à partir de trois tôles d'acier déjà galvanisées (Figure III.1), on prenant en considération trois différentes épaisseurs (Tableau III.2).

**Tableau III.1 :** Composition chimique en pourcent de l'acier A9.

éléments	C	Mn	Si	S	P	Al	Cr	Ni	Cu	Fe
<b>Pourcentages</b>	0,05	0,23	0,008	0,007	0,008	0,036	0		0,024	99,61
<b>En</b>	à	à	à	à	à	à	à	0,018	à	à
<b>(%)</b>	0.44	0,44	0,028	0,027	0.023	0.062	0.021		0,054	99,85

**Tableaux III.2 :** épaisseurs des échantillons étudiés.

Echantillons	Epaisseur (mm)
<b>1</b>	0,36 mm
<b>2</b>	0,8 mm
<b>3</b>	2,18 mm



**Figure III.1 :** Acier galvanisé de différentes épaisseurs.

### **III.1. Caractérisations**

#### **III.1.1. Analyses chimiques et physiques**

##### **III.1.1.1. Essai de la voie humide par décapage**

###### **❖ Principe**

L'éprouvette doit avoir une surface d'au moins 50 cm<sup>2</sup>, 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. (NF EN 10346 ,2015) (ANNEX A).

###### **❖ Préparation de la solution**

L'acide chlorhydrique HCl (1,19 g/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 10346 ,2015).

###### **❖ Mode opératoire**

A effectuer sur chaque éprouvette les opérations suivantes :

- Découper trois échantillons de tôle galvanisée de 50 cm<sup>2</sup> de surface (CO, M, CM).  
Tel que : coté mécanique (CM), milieu (M) et coté opérateur (CO).
- 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 ( $m_1$  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.

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

Masse totale du revêtement du Zn:

$$m_{\text{totale}} = [m_R(\text{CO}) + m_R(\text{M}) + m_R(\text{CM})]/3$$

### III.1.1.2. Analyse par spectrométrie à émission optique (OES)

#### ❖ 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 déterminée permet la conversion de l'énergie d'émission des échantillons inconnus en concentrations d'éléments (NF EN ISO 14707:2021) , [W5]

Le spectromètre ARL 3460 Advantage (Figure III.2) 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. (NF EN ISO 14707:2021) , [W5]

#### Préparations des échantillons

Après avoir préparé nos échantillons des aciers galvanisés a différentes épaisseur (0.36mm, 0.8mm, 2.18mm), C'est en enlevant la couche de zinc par s la solution d'acide chlorhydrique Inhibée. On fait L'examen par OES au niveau de l'unité Sider el hadjar section LAF.



**Figure III.2 :** Spectromètre ARL 3460 au niveau de de l'unité Sider el hadjar section LAF.



### III.1.1.3. Test de corrosion

#### ❖ Principe

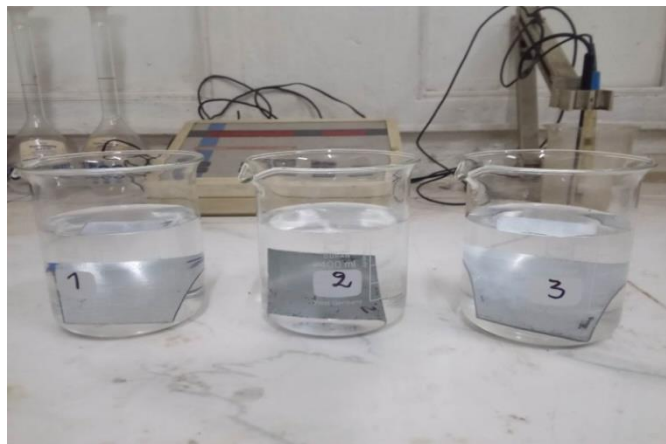
Les tests de corrosion par immersion sont utilisés pour déterminer la résistance d'un matériau à un environnement aqueux agressif. Des coupons de corrosion de laboratoire standard sont utilisés pour déterminer la perte de poids due à la corrosion.

#### ❖ Préparations des échantillons

Pour effectuer le test de corrosion on a découpé trois échantillons des tôles galvanisées d'acier A9 à différentes épaisseurs (0,36 mm, 0,8 mm, 2,18 mm), ces échantillons sont préparés au niveau du complexe Sider El-Hadjar. Les échantillons galvanisés sont nettoyés à l'aide de l'eau distillée et on termine par un séchage à l'air afin d'éviter la formation immédiate des produits de corrosion.

#### ❖ L'analyse gravimétrique

C'est l'une des méthodes les plus anciennes utilisées pour étudier la vitesse et le taux de corrosion, même l'efficacité inhibitrice d'inhibiteur. Dans cette méthode on a pèse les échantillons avant et après immersion dans des béchers contenant une solution corrosive NaCl 3% pour une durée de 48h, ensuite les échantillons sont lavés avec l'acétone et l'eau distillé puis séchés.



**Figure.III.3** : Test de corrosion par immersion au niveau de laboratoire de l'unité  
LAF SIDER EL HADJAR

La vitesse de corrosion est calculée à partir de la relation : [Hanachi.L ; 2018]

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

$V_{corr}$  : Vitesse de corrosion en (g/cm<sup>2</sup>.h).

S : Surface de l'échantillon en (cm<sup>2</sup>).

t : Temps de l'immersion en (h).

$\Delta m$  : Différence de masse en (g). ( $\Delta m = m_i - m_f$ )

$m_i$  : Masse de l'échantillon avant l'immersion.

$m_f$  : Masse de l'échantillon après l'immersion.

#### **III.1.1.4. 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.H ; 2018].

La brillance du revêtement galvanique de l'acier, dans notre étude a été mesurée à l'aide d'un brillance-mètre GLOSS CHECKER IG-331 (HORIBA) au niveau du laboratoire d'analyse industrielle et génie de matériaux (LAIGM).



**Figure III.4 :** Brillance-mètre GLOSS CHECKER IG-331 (HORIBA).

### **III.1.2. Analyse mécanique**

#### **III.1.2.1. Essais de 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  $\Delta L$ , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte  $\sigma$ , 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  $\varepsilon$  se réfère à la longueur initiale  $L_0$  de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale).  $\varepsilon = \Delta L/L_0$ .

#### ❖ Mode opératoire

De l'échantillon livré, découper une éprouvette rectangulaire de 20 mm de largeur et 250 mm de longueur dans le sens transversal (éprouvette prismatique).

- Tracer la longueur initiale  $L_0$  à 80 mm en croisé sur la partie calibrée  $L_c$
- Prendre les dimensions réelles (épaisseur et largeur)
- Calculer la section  $S_0$  de l'éprouvette.
- Placer l'éprouvette entre les mors dans l'axe correspondant aux traits de repères sur les mâchoires.
- Remettre les aiguilles du cadran au zéro.
- Afficher la vitesse (en fonction de la section et du type d'acier de l'éprouvette, en principe elle ne doit pas dépasser les 30 N.mm<sup>2</sup>.s ; ou : 1N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa = 0.102 kgf/mm<sup>2</sup>)
- Mettre en marche et observer les aiguilles, les forces d'élasticités  $F_e$  et la résistance  $R$  sont données par l'aiguille de contrôle marquant spontanément des arrêts.

$$\text{Elasticity } E = (\text{charge } (F_e \text{ kgf})) / (\text{section } (\text{mm}^2))$$

$$\text{Resistance } R = (\text{charge } (R(\text{kgf})) / (\text{section } (\text{mm}^2))$$

- Après rupture, retirer les deux bouts de l'éprouvette, joindre bout à bout les deux morceaux dans le même axe et mesurer la longueur ultime entre repère «  $L_u$  » du côté cassure **Norme : (NF- EN ISO 6892-1)**

Les valeurs obtenues de cet essai sont décrites comme suit :

- ✓ Allongement  $A\% = (L_u - L_0) / (L_0) \times 100\%$
- ✓ Pour la détermination du coefficient de l'allongement de striction (sur demande du client), mesurer les dimensions après rupture et calculer la section  $S_u$ .
- ✓ Coefficient de striction :  $Z\% = (S_0 - S_u) / S_0 \times 100\%$
- ✓ Allongement de striction :  $Z_u\% = (S_0 - S_u) / S_u \times 100\%$
- ✓  $L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$  ou  $k = 5,65$

- ✓  $L_c = L_0 + 3b_0 = 140 \text{ mm}$
- ✓  $S_0 = a_0 \cdot b_0$  (ou  $\pi \cdot D^2/4$  pour les éprouvettes cylindriques).

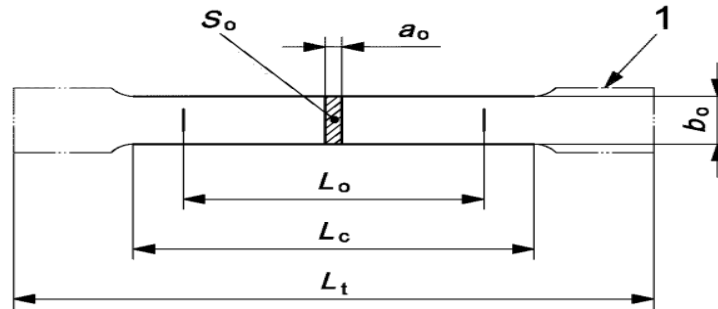


Figure III.5 : schéma d'une éprouvette de traction plaque



Figure III.6 : Machine d'essai de traction universelle Mohs & Federhaff Losenhausen

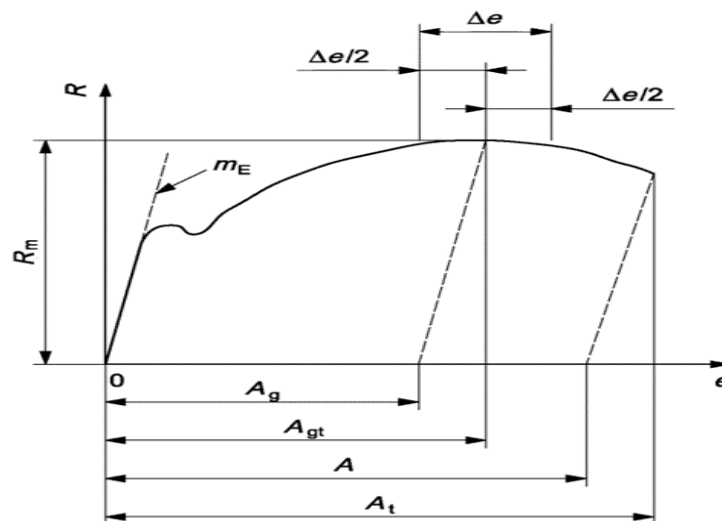


Figure III.7 : Diagramme charge d'allongement

### III.1.2.2. 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.

#### ❖ Mode opératoire

- Découper une éprouvette carrée de 25 cm<sup>2</sup> (ayant une bonne planéité et propre) du milieu de la longueur de l'échantillon livré.
- Choisir l'échelle convenable à l'essai à l'aide du levier de charge (F = 60 kg donnant HRA, B=100 kg donnant HRB et C =150 kg donnant HRC\*).

\*HRC se fait avec pénétrateur en cône diamanté sur produit traité ou allié.

- Placer l'éprouvette sur la table ou enclume (selon le produit : Fer Blanc sur enclume et tôle noire sur table) et à l'aide du volant, monter la table portant l'éprouvette jusqu'au contact du pénétrateur (bille 1/16 « ou cône en diamant selon le produit à tester)
- Une fois touché le pénétrateur, la grande aiguille dévie vers zéro et la petite aiguille vers le repère de recharge, à cette instant lâcher le bras qui libère à son tour la charge choisie et observer l'aiguille jusqu'à sa stabilité totale. ramener ensuite le bras doucement a sa position initiale et lire l'indication donnée par l'aiguille sur le cadran.
- Répéter les tests trois fois on respectant les distances (longueur entre deux points = 3 fois le diamètre de la bille) et inscrivez la moyenne des résultats.

Pour l'étalonnage, remplacer l'échantillon par un bloc étalon. (Norme NF EN ISO 6508).

Le Duromètre HR-150A (Figure.III.8) 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.



**Figure III.8 :** Duromètre HR-150A.

❖ **Caractéristique**

**Tableau III.3 :** 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
Dimensions	466 x 238 x 630 mm
Poids approximatif	65 kg

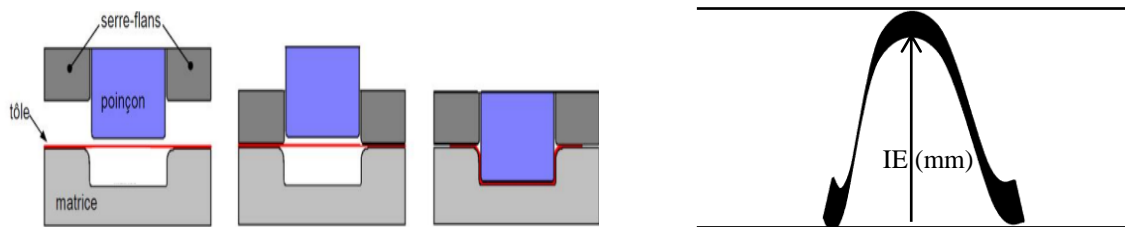
**III.1.2.3.Essais d'emboutissage**

❖ **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.

❖ **Mode opératoire**

- Découper un échantillon de 100 x 150 mm, le placer dans la matrice de la machine, serrer le couvercle et mettre en marche. Le poinçon monte jusqu'à apparition de fissure sur la calotte sphérique formée sur la tôle.
- Ensuite desserrer le couvercle, retirer l'échantillon et lire l'indication sur le compteur qui signifie l'indice d'emboutissage (IE) ou la profondeur de la calotte.
- Pour l'indice d'emboutissage obtenu manuellement, mesurer à l'aide des pieds à coulisse la profondeur de la calotte en déduisant l'épaisseur de la tôle.
- Faites trois tests et noter la moyenne sur le bulletin d'essai (**Norme NF EN ISO 20482**).



$$IE = (\text{profondeur de la calotte} - \text{Epaisseur})$$

**Figure III.9** : principe de l'emboutissage

### III.1.3 Analyse optique

#### III .1.3.1 . Analyse de surface par microscope optique

Nous avons utilisé une technique de microscopie optique dans notre étude pour caractériser le type, la morphologie de microstructure, cette observation microscopique nécessite un polissage fin de la surface ou de la coupe des échantillons à observer. L'appareillage utilisé est une microscopie optique de type NIKON aux niveaux des laboratoires centraux du complexe sidérurgique SIDER d' EL-HADJAR. (Figure.III.10) permet d'examiner la microstructure de nos échantillons.



**Figure III.10** : Microscopie optique de type NIKON.

L'avantage du microscope 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.

Les échantillons destinés à l'observation métallographique doivent subir une attaque chimique au Nital qui est composé de 3% acide nitrique et 97% alcool éthylique pour révéler leurs microstructures.

### ***III.2. Conclusion***

Les techniques citées dans ce chapitre seront utilisées dans le chapitre IV en vue de la caractérisation et l'étude des paramètres imposés à la chaîne de galvanisation sur les caractéristiques de la couche galvanisée.



*Chapitre IV : résultats et  
discussions*

## Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats des différentes expériences utilisées dans le cadre de cette étude.

Dans un premier temps nous avons présenté les caractéristiques de l'acier A9 avant galvanisation suivi de la caractérisation et l'efficacité de la couche galvanisé.

### IV.1. Caractérisation du support (Acier A9)

#### IV.1.1. Analyse chimique

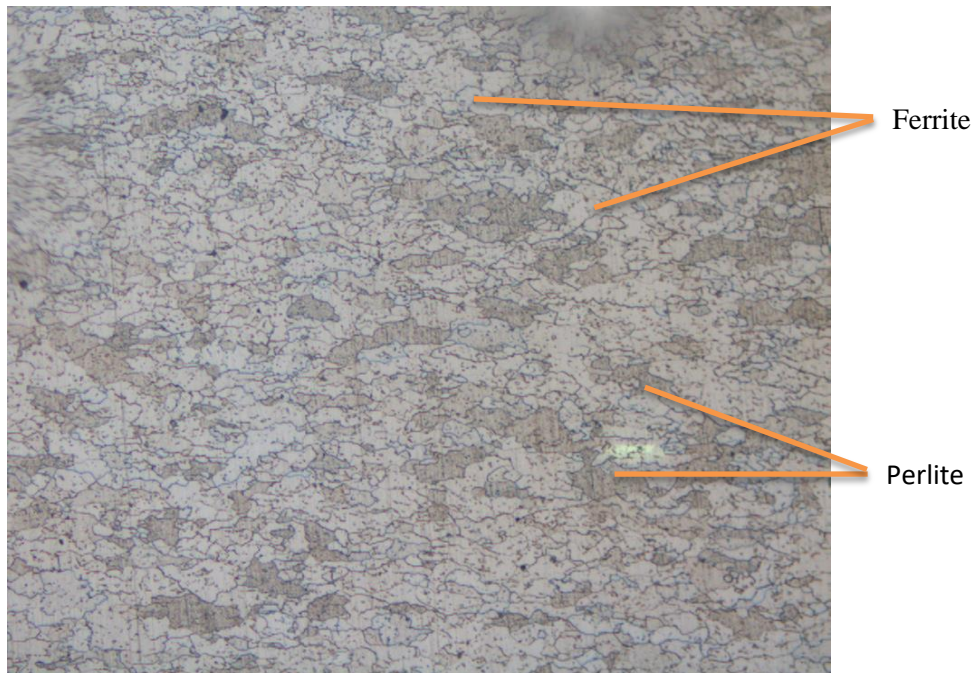
La composition chimique de l'acier (substrat) obtenue par spectrométrie à émission optique (OES) est représentée dans le tableau suivant :

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

N° de bobines (Epaisseur) Compositions Chimiques(%)	<b>663379</b> (0,36mm)	<b>664255</b> (0,8mm)	<b>497842</b> (2,18mm)
C %	0,11	0,05	0,05
Mn %	0,264	0,370	0,202
Si %	0,033	0,024	0,027
P %	0,007	0,010	0,009
S %	0,003	0,006	0,006
Cu %	0,045	0,035	0,023
Al %	0,082	0,040	0,027
Ti %	0,002	0,001	0,001
Nb %	0,002	0,001	0,000
Ni %	0,007	0,008	0,009
Cr %	0,013	0,012	0,016
Mo %	0,002	0,002	0,002
V %	0,003	0,002	0,002
Sn %	0,001	0,001	0,001
Fe %	98,33	98,32	98,54
Ce%	0,156	0,1150	0,080
N %	0,0100	0,01086	0,0086

D'après les résultats de l'analyse chimique (Tableau IV.1), on constate que les éléments d'additions tels que l'aluminium, le cobalt, le nickel..., se présentent à l'état de trace. La faible teneur en carbone et la forte teneur en fer prouvent que l'acier A9 se classe dans la famille des aciers ferriques.

#### *IV.1.2. Analyse micrographique*



**Figure IV.1** : Microstructure de l'acier de type A9

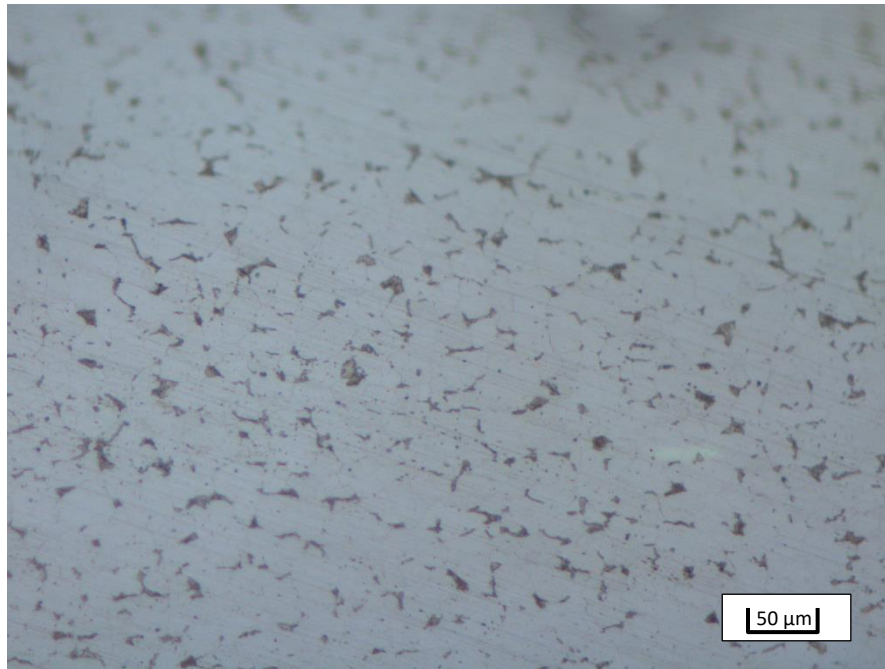
L'observation microstructurale au microscope optique de l'échantillon en acier de type A9 poli et attaqué chimiquement nous a permis de mettre en évidence (Figure IV.1), la présence de la ferrite (phase claire) et d'une quantité relativement faible de perlite (phase sombre).

En générale, le recuit de recristallisation entraîne une recristallisation non complète des grains, où on enregistre une petite fraction des grains perlite (point noir) non recristallisés, ceci est dû probablement à l'insuffisance du temps de recuit.

## IV.2. Caractérisation de l'acier galvanisé

### IV.2.1. Analyses physicochimiques

#### IV.2.1.1. Aspect micrographique de la couche galvanisée.

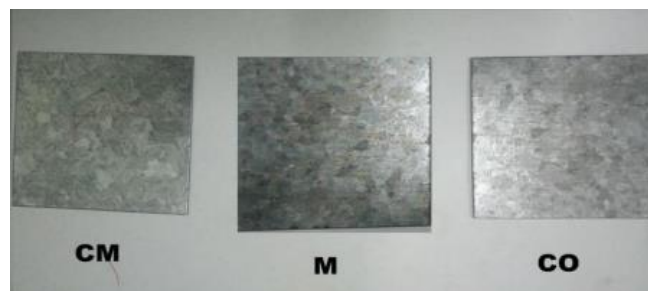


**Figure IV.2 :** Microstructure de l'acier galvanisée.

La micrographie présentée dans la figure ci-dessus correspondante à la couche de revêtement galvanisé de l'acier A9.

L'observation macrographique effectuée sur la surface de l'échantillon galvanisé (Fig. IV.2) montre un fleurage régulier (apparition des cristaux de zinc).

#### IV.2.1.2. Essai de la voie humide par décapage



CM : Coté Mécanique, M : Milieu, CO : Coté Opérateur.

**Figure IV.3:** Echantillons avant décapage

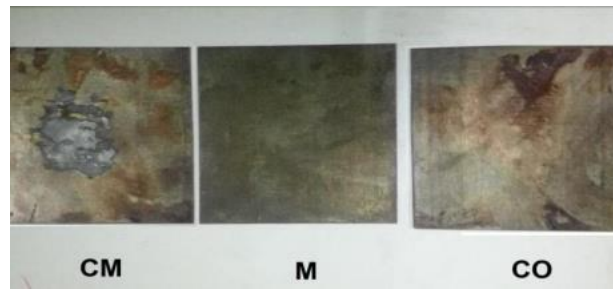
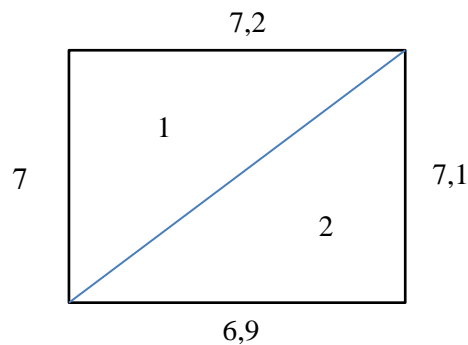


Figure IV.4 : Echantillons après décapage

### Exemple de calcul du poids de revêtement de zinc

Pour calculer la surface exacte d'un échantillon galvanisé non standard de forme carré on doit :

- Mesurer la longueur des quatre cotés.
- Calculer et additionner les surfaces des deux triangles du carré formés par la médiane (M).



Surface triangle 1 :  $(7 \times 7,2)/2 = 25,2 \text{ cm}^2$ .

Surface triangle 2 :  $(6,9 \times 7,1)/2 = 24,49 \text{ cm}^2$ .

Calculer la somme des surfaces des deux triangles qui sont en même temps la surface réelle du carré.

Soit :  $25,2 + 24,49 = 49,69 \text{ cm}^2$ .

Calculer le poids du revêtement de l'échantillon comme suit :

$$\frac{SV \times (P1 - P2) \times k}{SR} = \text{Revt/Zinc par m}^2$$

Ou :  $k = 400$  pour un échantillon de  $25 \text{ cm}^2$ .

$k = 200$  pour un échantillon de  $50 \text{ cm}^2$ .

SR = surface réelle mesurée

SV = surface visée

P1 = poids de l'échantillon avant dissolution du zinc

P2 = poids de l'échantillon après dissolution du zinc.

**1<sup>er</sup> Méthode :**

Exemple de calcul [EP : 0,36 (CO)] :

Triangle 1:  $7,0 \times 7,2 / 2 = 25,20 \text{ cm}^2$

Triangle 2:  $7,1 \times 6,9 / 2 = 24,49 \text{ cm}^2$

Somme des triangles 1 et 2 ou surface du carré :  $25,2 + 24,49 = 49,7 \text{ cm}^2$ .

Poids de l'échantillon avant de zincage : P1=17,87g

Poids de l'échantillon après de zincage : P2 =16,61g

Poids du zinc :  $[50 \times (17,87 - 16,61) \times 200] / 49,7 = 254 \text{ g/m}^2$

**2<sup>eme</sup> méthode selon recommandation iso R1460 :**

La perte de la masse  $\Delta m$  est donnée par la formule suivante :

$\Delta m = m_1 - m_2$

Ou :  $m_1$  = masse de l'échantillon avant dissolution

$M_2$  = masse de l'échantillon après dissolution

1) calculer la surface S comme indiqué en 1<sup>er</sup> méthode.

2) calculer ensuite le poids de revêtement comme suit :

$M_s = \frac{\Delta m \times 10000}{S}$  (en  $\text{g/m}^2$ )

$M_s = \frac{1,26 \times 10000}{49,7} = 254 \text{ g/m}^2$

**Tableau IV.2 :** Masse du revêtement de l'échantillon 1 pour les points de mesure.

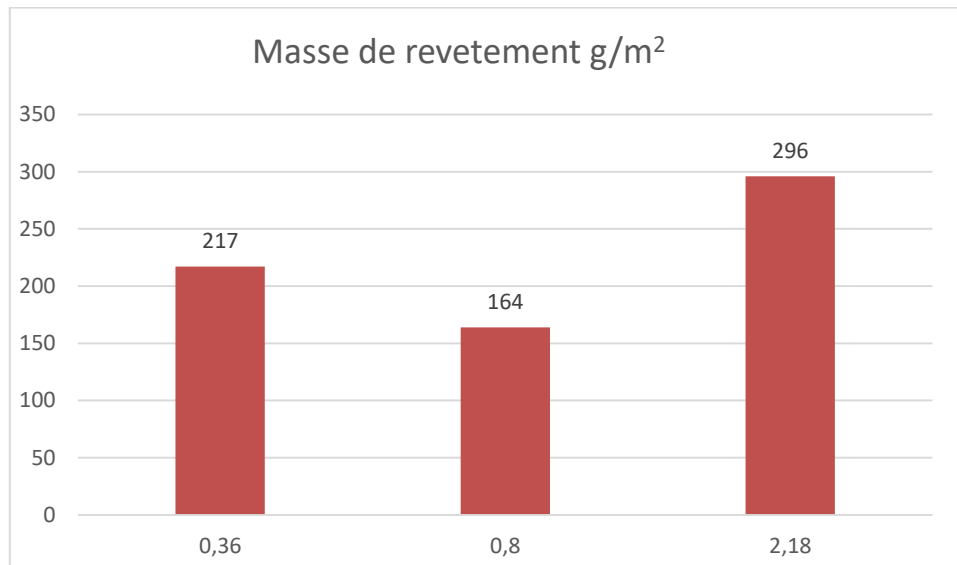
<b>Epaisseur = 0,36 mm</b>	<b>CO</b>	<b>M</b>	<b>CM</b>
m avant décapage (g)	17,87	18,43	17,95
m après décapage(g)	16,61	17,49	16,92
masse de revêtement $\text{g/m}^2$	254	190	207

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

<b>Epaisseur = 0,8 mm</b>	<b>CO</b>	<b>M</b>	<b>CM</b>
m avant décapage (g)	42,49	44,30	43,00
m après décapage (g)	40,99	42,90	41,58
masse de revêtement ( $\text{g/m}^2$ )	154	170	168

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

Epaisseur = 2,18mm	CO	M	CM
m avant décapage(g)	27,35	26,46	26,01
m après décapage (g)	26,59	25,56	25,18
masse de revêtement (g)	320	282	286



**Figure IV.5:** Histogramme des masses de revêtement des trois tôles galvanisées.

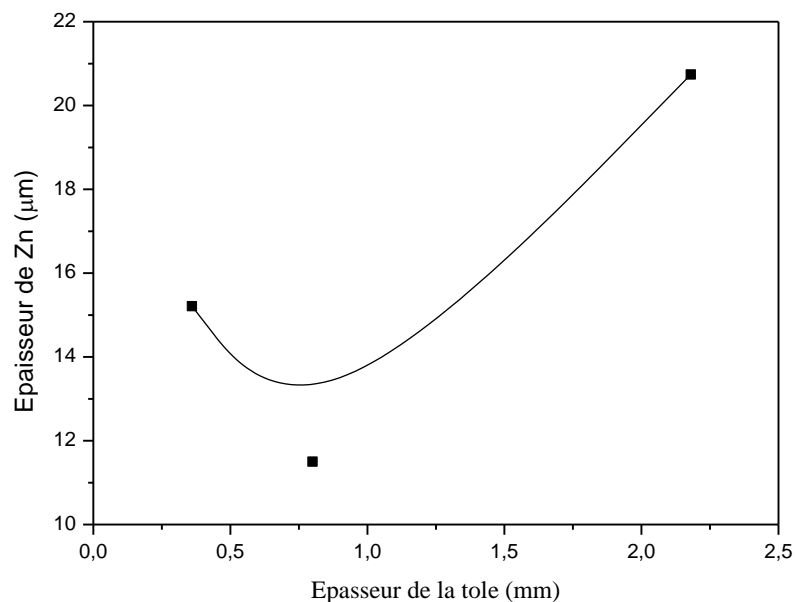
Les résultats de l'essai de la voie humide par décapage présentés dans les tableaux IV.2, IV.3 et IV.4 montrent une différence significative de la masse du revêtement au niveau des trois points prélevés CM, M et CO. Cet essai nous a permis de confirmer le non uniformité des couches galvanisées comme indiqué dans le tableau IV.5.

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

Epaisseur de tôle galvanisée		Masse (g/m <sup>2</sup> )	Epaisseur (µm)	Moyenne (g/m <sup>2</sup> )	Epaisseur Zn déposé(µm)
0,36 mm	CO	254	17,80	217	15,21
	M	190	13,32		
	CM	207	14,51		
0,8 mm	CO	154	10,79	164	11,50
	M	170	11,91		
	CM	164	11,49		
2,18 mm	CO	320	22,43	296	20,74
	M	282	19,76		
	CM	286	20,04		

Epaisseur de revêtement de zinc déposé : ( µm par face ).

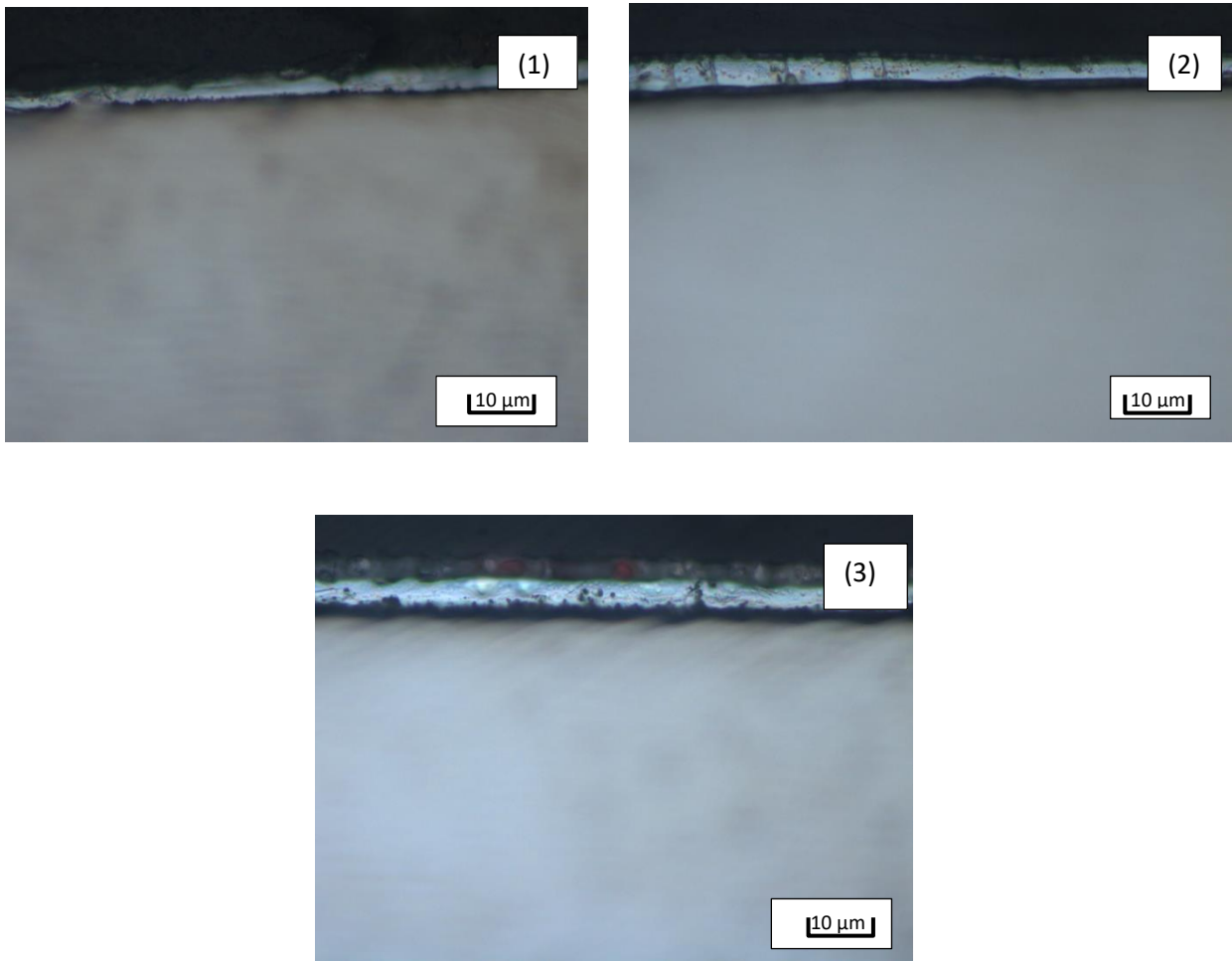
$$E = \frac{1}{2} \frac{\text{Masse de revetement de Zinc}}{\text{masse volumique du Zinc}} \text{ (}\mu\text{m/face)}$$



**Figure IV.6 :** Variation de l'épaisseur de Zinc en fonction de l'épaisseur de la tôle

L'irrégularité de la couche de Zinc formé (figure IV.6, figure IV.7) et tableau IV.5 peut être attribué à plusieurs facteurs parmi ceux-ci on peut citer :





**Figure IV.7 :** Micrographies optiques montrant les coupes transversales des tôles galvanisées: (1) tôle galvanisée d'une épaisseur 0,36 mm; (2) tôle galvanisée d'une épaisseur 0,8 mm, (3) tôle galvanisée d'une épaisseur 2,18 mm

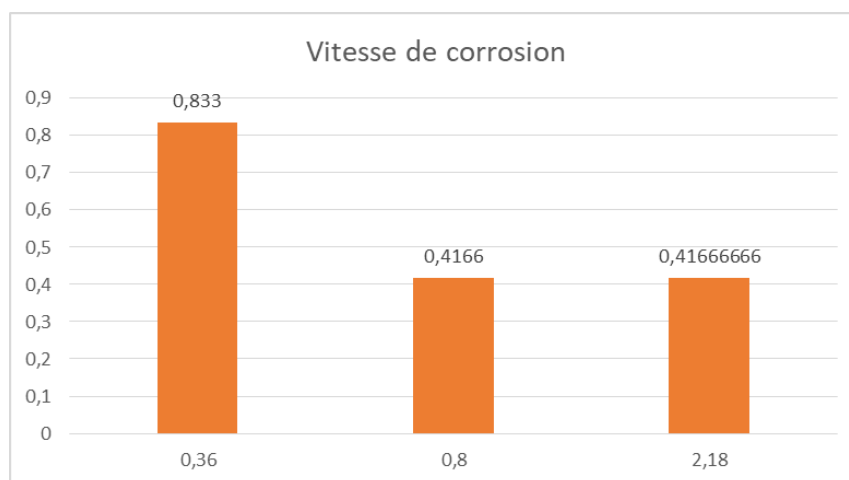
- La rugosité en provenance du laminage à froid ;
- L'absence de refroidissement des rouleaux de la zone de préchauffage a un impact direct sur leur fléchissement des tôles.
- L'usure des calottes et des coussinets du rouleau de fond provoqué par le frottement et par l'action de l'aluminium présent dans le bain de zinc.
- Problème de rotation du rouleau décambreur.
- Mauvais contrôle et réglage des pressions de buses d'essorage et enfin difficultés de contrôle des défauts dus aux oxydes.

Tous ces facteurs ont un impact direct sur la couche de zinc formée le long de la chaîne de galvanisation.

**IV.2.1.3. Résultats de test de corrosion**

**Tableau IV.6 :** Vitesse de corrosion.

Epaisseur (mm)	m avant (g)	m après (g)	$\Delta m$ (g)	S (cm <sup>2</sup> )	$V_{corr} 10^{-5}$ (g/cm <sup>2</sup> .h)
0,36	9,45	9,43	0,02	50	0,833
0,8	57,78	57,77	0,01	50	0,41666
2,18	17,37	17,36	0,01	50	0,4166



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

D’après le tableau IV.6 et la figure IV.8 On remarque que la vitesse de corrosion diminue avec l’augmentation de l’épaisseur de la tôle et qu’elle est quasiment identique pour l’épaisseur 0,8 et 2,18 mm, donc plus en s’éloigne du substrat plus la protection est meilleure.

Les faibles valeurs de la vitesse de corrosion prouvent que le revêtement de galvanisation résiste parfaitement au milieu imposé pour une durée de contact de 48 heures.

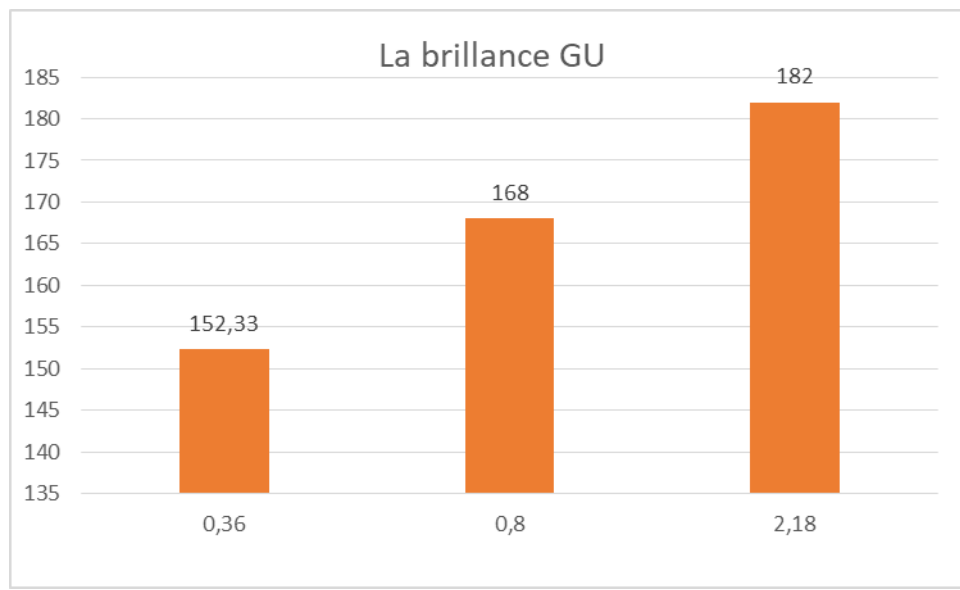
**IV .2.1.4. Résultat de la mesure de La brillance**

La brillance du revêtement galvanique est mesurée par un brillance-mètre GLOSS CHECKER IG-331 (HORIBA) (avec une 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 épaisseurs considérées obtenue avec a un angle 60°. Les résultats sont représentés dans le tableau IV.7 avec une unité de mesure de brillance Gloss Unite (GU)

**Tableau IV.7 :** Évaluation de la brillance des revêtements Pour Angle 60°

Epaisseur (mm) Nombre des essais	Echantillon 1 0,36 mm			Echantillon 2 0,8 mm			Echantillon 3 2,18 mm		
	Essai 1	170	172	170	162	199	88	172	176
	170,66			149,66			175		
Essai 2	127	135	140	184	180	195	172	176	177
	134			186,33			189		
Moyenne (GU)	152,33			168			182		



**Figure IV.9 :** Histogramme de la brillance des trois tôles galvanisées pour l'angle 60°

Les observations des tôles galvanisées montrent que ces dernières sont :

- Constitué d'une seule couche brillante ;
- La couche est uniforme ;
- Cette couche est adhérente (absence de l'interface entre l'acier et la couche) ;
- Une couche à faible rugosité.

D'après les résultats de la brillance (figure IV.9 et tableau IV.7), la tôle d'épaisseur 2,18 mm est la plus brillante tout fois les valeurs de la brillance se rapproche pour le reste des tôles.

Le problème de la brillance pour les tôles galvanisées est principalement dû aux paramètres mécaniques tels que la traction, la pression, l'allongement et le type de rugosité des cylindres

### IV.3. Résultats et discussion des analyses mécaniques

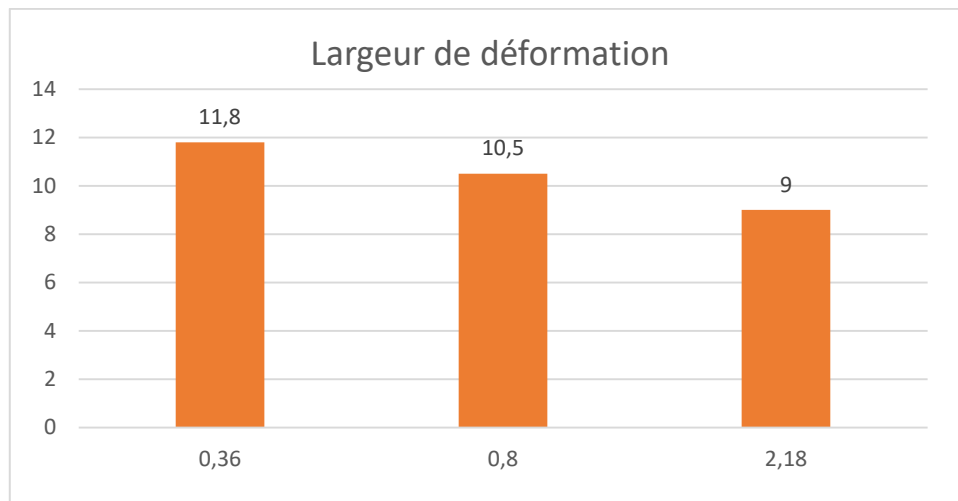
#### IV.3.1. Essai d'emboutissage

L'essai d'emboutissage est une méthode d'essais utilisée dans le traitement des métaux; cet essai sert à déterminer la formabilité des tôles et bandes.

Pour la réalisation de l'essai d'emboutissage sur tôles, une calotte est enfoncée dans une feuille métallique contrainte, jusqu'à apparition d'une fissure. L'essai d'emboutissage sert à déterminer la résistance à emboutissage.

**Tableau IV.8 :** Largeur limitée d'emboutissage

Epaisseur des tôles (mm)	Largeur de déformation (mm)
0,36	11,8
0,8	10,5
2,18	9



**Figure IV.10 :** Histogramme de la largeur de déformation des trois tôles galvanisées

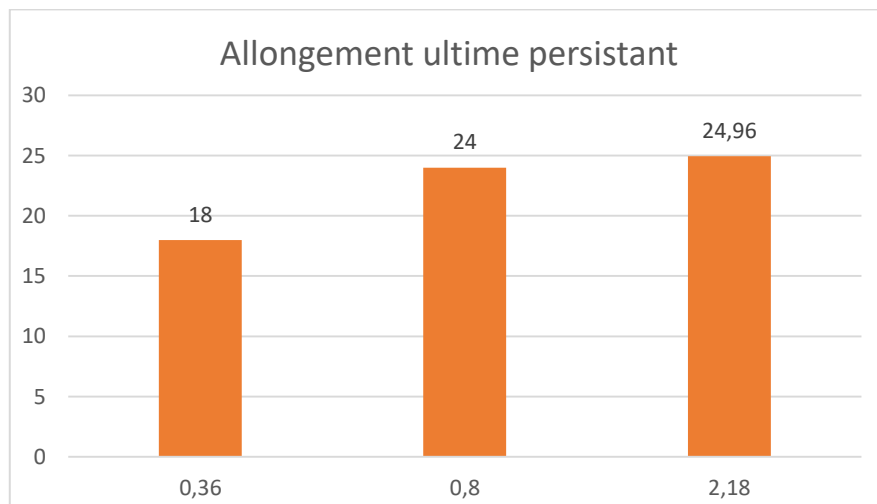
D'après l'histogramme illustré sur la figure.IV.10 la largeur de l'empreinte due à la déformation (emboutissage) diminue en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de la tôle en acier. Cette résistance à la déformation peut être justifiée par la formation de phase cristalline de Zinc

**IV.3.2. Essai de la traction**

L'essai de traction est une méthode d'essai mécanique des matériaux permettant de déterminer les grandeurs caractéristiques des matériaux. Il est utilisé en fonction du matériau - comme méthode standard correspondant à une norme définie pour la détermination de la limite d'élasticité, de la résistance à la traction de l'allongement à la rupture et d'autres caractéristiques du matériau.

**Tableau IV.9 :** Allongement ultime persistant ( $L_0 = 80$  mm)

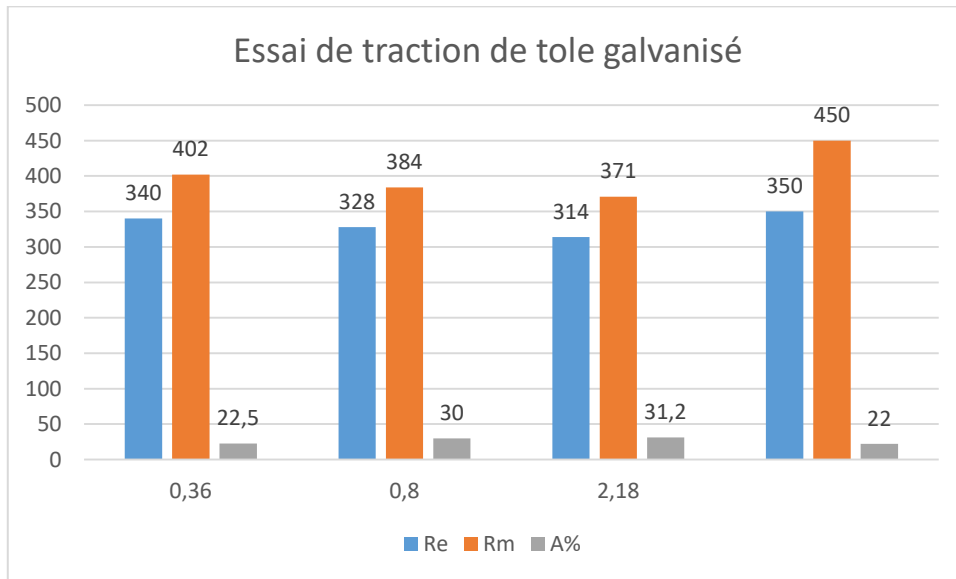
Epaisseur de tôle galvanisée (mm)	Lu (mm)	$\Delta Lu$ (mm)
<b>0,36</b>	98	18
<b>0,8</b>	104	24
<b>2,18</b>	104,96	24,96



**Figure IV.11 :** Histogramme de l'allongement ultime des trois tôles galvanisées

**Tableau IV.10 :** Essai de traction de tôle galvanisé

Epaisseur (mm)	Limite d'élasticité $R_e$ (MPa)	Résistance à la traction $R_m$ (MPa)	Allongement à la rupture $A(\%) = \Delta Lu / L_0$
0,36	340	402	22,5
0,8	328	384	30
2,18	314	371	31,2
Norme (NF EN 10346, 2015)	300-350	270-450	20-22



**Figure IV.12** : Histogramme de l'essai de traction des trois tôles galvanisées

D'après la figure IV.12 et le tableau IV.10 on remarque que les caractéristiques mécanique de traction tel que la limite élastique et la résistance à la traction (Re et Rm) ont tendance à diminuer avec l'augmentation de l'épaisseur cette évolution est inversement proportionnelle par rapport à l'allongement (A%).

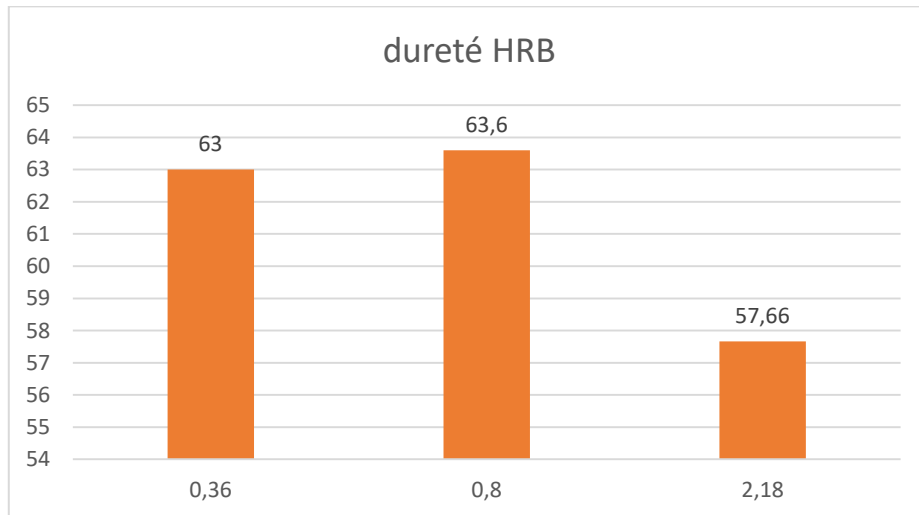
Les trois propriétés mécaniques sont conformes aux normes.

### IV.3.3. Résultat de l'essai de la dureté

Le Duromètre utilisé est de marque KARL KOLB HR-150A, avec une dureté Rockwell « HRB », pénétrateur « Bille».

**Tableau IV.11** : Dureté des trois échantillons.

Épaisseur (mm)	Essais 1 HRB	Essais 2 HRB	Essais 03 HRB	Moyenne HRB
0,36	63	65	61	63
0,8	63	64	64	63,66
2,18	56	58	59	57,66



**Figure IV.13** : Histogramme de la dureté des trois tôles galvanisées.

Cet histogramme montre l'évolution de la dureté en fonction de trois épaisseurs. Nous avons observé une diminution de la dureté avec l'augmentation de l'épaisseur galvanisée et varie de 63 HRB pour une épaisseur de 0,36 mm à 57,77 HRB pour une épaisseur de 2,18 mm, cette évolution est expliquée par le fait que la dureté du substrat (acier A9) est supérieure à celle du Zinc, donc plus on se rapproche du substrat la dureté a tendance à augmenter.

Selon les normes, la dureté est exprimée comme un nombre sans dimension.

#### **IV.4 Conclusion**

A part les problèmes rencontrés dans l'hétérogénéité de l'épaisseur de la couche galvanisée le revêtement réalisé au niveau du complexe sidérurgique SIDER EL-HADJAR. Présente une bonne résistance à la corrosion et des bonnes caractéristiques mécaniques.

*Conclusion générale*



## Conclusion générale

La protection anticorrosion des structures en acier par galvanisation à chaud présente de nombreux atouts dont celui, non négligeable, de ne pas requérir un entretien périodique du revêtement, ce qui a une influence importante sur le coût de la protection à long terme.

Un autre des atouts de la galvanisation à chaud au trempé est son intégration parfaite dans le processus de recyclage des aciers. En effet, au moment du recyclage des structures en acier galvanisées, le zinc et l'acier sont aisément séparables et ils peuvent être retraités dans les filières prévues à cet effet.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à étudier les paramètres intervenant dans le processus de la galvanisation d'un acier de nuance A9 à trois épaisseurs différentes (0,36 mm, 0,8 mm et 2,18 mm), prélevées au niveau de la section LAF Sider el Hadjar.

L'étude a été entreprise avec une multitude de techniques de caractérisations physico-chimiques, mécaniques, optique et morphologique.

## Analyse physico-chimique

- D'après les résultats de l'analyse chimique de l'acier tous les éléments sont présents à l'état de trace avec une forte teneur en fer prouvant ainsi que l'acier A9 est un acier ferrique.
- Les faibles valeurs de la vitesse de corrosion (0,83 à 0,42 g /cm<sup>2</sup>.h), prouvent que le revêtement de galvanisation résiste parfaitement au milieu imposé pour une durée de contact de 48 heures.

## Analyse optique

- L'observation au microscope optique de l'échantillon en acier a mis en évidence la présence de ferrite et d'une quantité faible de perlite, on enregistre aussi une petite fraction des grains de perlite non recristallisés, dû au temps de recuit insuffisant.
- L'observation micrographique de l'échantillon galvanisé montre un fleurage régulier.
- L'irrégularité de la couche de zinc formé peut être attribuée à plusieurs facteurs au niveau de la chaîne de galvanisation.
- L'épaisseur de la couche galvanisée est maximale pour la tôle d'épaisseur 2,18 mm soit 20,74 µm.

## Analyse Mécanique

La limite élastique et la résistance à la traction ( $R_e$  et  $R_m$ ) ont tendance à diminuer avec l'augmentation de l'épaisseur cette évolution est inversement proportionnelle à l'allongement ( $A\%$ ).

Les trois propriétés mécaniques sont conformes aux normes.

La dureté diminue avec l'augmentation de l'épaisseur galvanisé et varie de 63 HRB pour une épaisseur de 0,36 mm à 57,77 HRB pour une épaisseur de 2,18 mm.

### **Test morphologique**

Pour les analyses morphologiques, la tôle à 2,18 mm d'épaisseur présente une brillance maximale et une surface relativement lisse par rapport à celle des épaisseurs 0,36 mm et 0,8 mm.

La formation d'une couche constituée d'une suite de phases et de composés intermétalliques à la surface de l'acier, lui confèrent une bonne protection.



*Références  
bibliographiques*

## Références bibliographiques

- [Ammiche.M, 2021] Ammiche.M, mémoire de master « Etude et choix des revêtements zincage nickelage et phosphatation pour les tôles DC01 DC03 ET DC04 » ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2021.
- [Announ.I, 2013] Announ.I, mémoire de magister « Résistance à la corrosion des revêtements composites nickel-alumine sur différents substrats », Université hadj Lakhdar Batna Algérie, 2013.
- [Azaizia.A, 2020] Azaizia.A, Mémoire de License en Métallurgie « Étude de l'adhérence d'une couche galvanisée à chaud au niveau du complexe d'el hadjar (arcelormittal) », Université Badji Mokhtar Annaba 2020.
- [Baïlon.J.P, 2000] Baïlon.J.P, Dorlot.J.M, « Des matériaux », École Polytechnique de Montréal, 3<sup>ème</sup> ÉDITION, 2000.
- [Bardal.E, 2004] Bardal.E, cours « Corrosion and protection » 2004.
- [Baticim, 1982] Baticim, « La préparation de surface », Galvan Consiel 1982.
- [Benard.J ,1969] Benard.J, Michel.A, Philibert.J, Talbot.J, « Métallurgie Générale », MASSON, Et Cie, Editions, 1969.
- [Bantaleb.F.Z, 2014] Bantaleb.F.Z, mémoire de master « Comportement de l'acier galvanisé dans les solutions : Eau de robinet (Biskra), 3.5 % NaCl et 3.21% NH<sub>4</sub>Cl », Université Med Khider Biskra 2014.
- [Bermad.G, 2012] Bermad khadoudj.G « Nouveaux alliages zinc-terres rares pour des applications anticorrosion: élaboration, propriétés et traitements de surfaces », Diss Université de Lorraine 2012.
- [Bensabra.H, 2016] Bensabra.H Cours de « Corrosion et protection des métaux » Université de Jijel 2016.
- [Belbah.H, 2018] Belbah.H, Thèse de doctorat « Étude de l'effet des polyphénols du Daphne gnidium L. sur les propriétés des dépôts électrolytiques de nickel », Université 8 Mai 1945 Guelma 2018.
- [Bentiss.F, 2006] Bentiss.F, Habilitation à diriger des recherches (HDR). « hétérocycles penta atomiques : synthèses organiques, études des propriétés inhibitrice de la corrosion et des propriétés complexantes », Université de Lille, 2006.
- [Bantaban.B ,2020] Bantaban.B, Hachachnia.F Mémoire de master, « Étude des caractéristiques des couches galvanisées à chaud au niveau de SIDER EL- HADJAR », Université 08 mai Guelma 2020.
- [Bouamama.N ,2015] Bouamama.N, Madene.S Mémoire de master « Elaboration d'un revêtement à base d'oxyde de cérium destiné à la protection de la corrosion de l'acier en milieu marin », Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.
- [Buscarlet.E, 2003] Buscarlet.E « Galvanisation et aluminage en continu » Technique de l'ingénieur M1536 2003.
- [Campa.A, 1971] Campa.A, « Protection des Surfaces Métalliques Contre la Corrosion », Technologie Professionnelle pour les Mécaniciens, Tome 2, Paris, les Editions Foucher, 1971.
- [Chantal.B, 2000] Chantal.B, thèse présentée à l'université du québec à chicoutimi comme exigence partielle du doctorat en ingénierie « modélisation numérique, modélisation physique et validation de l'écoulement de cuves de galvanisation », 2000.
- [Comité des techniciens ; 1986] La protection cathodique .guide pratique ; Editions Technip ; Paris, 1986.
- [Duan.C, 2002] Duan.C, Karolin.Y.V, « Erosion and corrosion of hydraulic », 2002.

- [Ferté.M , 2014] Ferté.M, « Étude et analyse de couches minces par techniques multi-spectroscopiques pour une application sur une ligne de galvanisation », Université de Lorraine 2014.
- [Fourmentin.R, 2004] Fourmentin.R, «Modélisation thermodynamique du système Fe-Zn-Al-Cr A 460°C et son impact sur les procédés de galvanisation » 2004.
- [Foct.J, 1993] Foct.J, Iost.A, Reumont.G, «Mechanical behaviour of zinc » The Physical Metallurgy of Zinc Coated Steel edited by A. R. Marder, 21-30,1993.
- [Ghellai.M, 2013] Ghellai.M, mémoire master« Etude sur le système de protection Cathodique PC et Maintenance de la Canalisation Multi produit ASR/ NAFTAL», université de Tlemcen 2013.
- [Giraud.A, 2003] Giraud.A, Hamy .J.P «produits et procédés destinés au traitement des eaux sanitaires et de chauffage» Cfp chaud froid plomberie 2003.
- [Habchi.A, 2013] Habchi.A Mémoire de Master académique ; « Etude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier XC52 en présence du sulfarlem et leur sel correspondent dans un milieu H2SO4 20%»Université Kasdi Merbah Ouargla 2013.
- [Hannachi.L ,2018] Hannachi.L, Dafri.W, Mémoire de Master, «Les liquide ioniques inhibiteurs de corrosion efficace sur l'acier A9 dans un milieu acide : Une approche écologique», Université 8 Mai 1945 Guelma. 2018.
- [Jordan.C.E, 1997] Jordan.C.E, Marder.A.R, « Fe-Zn phase formation in interstitial-free steels hot-dip galvanized at 450°C », Al-Zn baths, J Mater Sci, 32, 5593, 1997.
- [Ketcham.S.J, 1972] Ketcham.S.J, Shaffer.I.S, « Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys », ASTM, STP, 516, pp.3-16, 1972.
- [Kherraf.S, 2008] Kherraf.S, Mémoire de Magister « Comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux, Influence de quelques inhibiteurs », Université de Skikda, 2008.
- [Khoukhi.F, 2008] Khoukhi.F, Mémoire de magister « Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (eau, huile et gaz) », Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2008.
- [Kubaschewski.O, 1982] Kubaschewski.O, « Iron based Binary Diagrams », Springer Verlag Ed., Berlin, 1982.
- [Landolt.D, 1997] Landolt.D, « Corrosion et chimie de surfaces des métaux », Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1997.
- [Lefevre.B, 2014] Lefèvre. B, Thèse de doctorat « Corrosion des aciers revêtues de Zinc dans les zones confinées des carrosseries automobiles », Université de Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2014.
- [Mankowski.G, 1994] Mankowski.G, Lemaitre.C et Strehblow .H, « corrosion localisée», éditions de physique, 1994.
- [Marder.A.R, 2000] Marder.A.R, « The metallurgy of zinc-coated steel», progress in materials science 45, 2000.
- [Mehibil.R, 2008] Mehibil.R. Mémoire de Magister ; « Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium », Université de Skikda 2008.
- [Moncel.M, 1991] Moncel.M, « Méthodes physiques d'analyse en métallurgie », Technique de l'ingénieur M260, 1991.
- [Normad.B, 2004] Normad.B, Balland.B, « prévention et lutte contre la corrosion une approche scientifique et technique», presses polytechniques, 2004.

- [Nouicer.E, 2009] Nouicer.E, Thèse de Doctorat «Comportement électrochimique et propriétés mécaniques de l'alliage deTitane Ti6Al14V. Effet des traitements de surface » , Université Constantine, 2009.
- [Oulabbas.A, 2013] Oulabbas.A, Mémoire de magister « nouvelles voies d'inhibition de la corrosion des aciers plus respectueuses de l'environnement », université de Souk-ahras, 2013.
- [Philibert.J, 2002] Philibert.J, Vignes .A, Bréchet .Y, Combrade. P, « Métallurgie. Du minerai au matériau », Edition Dunod, Paris, p. 959,2002.
- [Quantin.D ,2003] Quantin .D, « Galvanisation à chaud», Technique de l'ingénieur, M1534, 1-28, 2003.
- [Quantin.D ,2004] Quantin.D, «Galvanisation à chaud», Techniques de l'Ingénieur2004.
- [Reboul.M, 2005] Reboul.M, « Corrosion des alliages d'aluminium», Rapport technique, techniques de l'ingénieur, cor 325, 2005.
- [Rozenfeld.I.L, 1981] Rozenfeld .I.L, « corrosion inhibitors», sssmcgraw-hill 1981.
- [Saghi.L, 2010] Saghi.L mémoire de magister, « étude des paramètres de revêtement des aciers à chaud par le zinc» ; Universite mouloud mammeri de tizi-ouzou 2010.
- [Schramm.J, 1938] Schramm.J, Metallkde.Z, 30, 122, 1938
- [Serghini. I, 2016] Serghini Idriss.M, Thèse de Doctorat« Étude du comportement électrochimique de l'acier C38 et l'acier inoxydable UR45N dans différents milieux » ; Université de Mohammed V Rabat, Maroc, 2016.
- [Skerray.E.W, 1976] Skerray.E.W, Shreir. I.L, « corrosion, newnes butterworth», london, 1976.
- [Tourqui.M.H, 2018] Tourqui.M.H, mémoire de master« Etude des facteurs qui influent sur l'homogénéité de l'épaisseur de la couche galvanisée au niveau de SIDER EL-HADJAR» ; Université Badji Mokhtar Annaba 2018.
- [Uhlig.H, 1970] Uhlig. H, « Corrosion et Protection», DUNOD, Paris France 1970.
- [Vargel.C, 2002] Vargel.C, « Corrosion de l'aluminium», 2d. Dunod, ISBN 2-10-006569-6, 2002.
- [Vignes. J.L, 1997] Vignes J.L, Manef. A, Philippe .P, Babbit.M, « une vie d'acier zingué», bup n°790-91, janvier-février 1997.
- [Wery.M, 1998] Wery.M, « Dégraissage ». Technique de l'ingénieur, M1450.1998.
- [William.D, 2001] William.D, Callister.J.R, « Science et génie des matériaux», École 'ingénieurs, 5e ÉDITION, 2001.
- [Yadav.A.P, 2007] Yadav.A.P, katayama nodah.H, masuda.K, nishikata.H, tsuru.A, « 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 2007.

### Site web

- [W 1] [https://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/corrosion\\_caverneuse.htm](https://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_caverneuse.htm) Consulté le 10/04/23
- [W 2] [https://www.academia.edu/10047360/moyensde\\_luttecontre\\_la\\_corrosion](https://www.academia.edu/10047360/moyensde_luttecontre_la_corrosion) Consulté le 5/5/2023
- [W 3] [www.Galvazinc.Com](http://www.Galvazinc.Com) Consulté le 12/5/2023
- [W 4] [www.zinkinfobenelux.com\\_fiche Technique N°20](http://www.zinkinfobenelux.com_fiche_Technique_N°20), « La galvanisation à chaud et la protection cathodique ». 2 Consulté le15/04/2023
- [W 5] [https://www.selectscience.net/products/thermo-scientific-ar1-3460-advantagemetals\\_analyzer\\_/?ProdID=84574](https://www.selectscience.net/products/thermo-scientific-ar1-3460-advantagemetals_analyzer_/?ProdID=84574). Consulté le 2/06/2023

## Normes

**Norme NF EN ISO 10346 : 2015** ISO 10346 :2015 traite les meilleures procédures et spécifications requises pour effectuer le revêtement par immersion à chaud.

**Norme NF EN ISO 14707 : 2021** ISO 14707 : 2021 fournit des lignes directrices applicables à des analyses en masse ou de profilage en profondeur par spectrométrie d'émission optique (OES).

**Norme NF EN ISO 6892-1 2019** : ISO 6892-1 :2019 mesure les propriétés de traction des matériaux métalliques sous toutes leurs formes à température ambiante.

**Norme NF EN ISO 6508 2016** : ISO 6508-1 :2016 spécifie la méthode d'essai de dureté Rockwell normale et de dureté superficielle Rockwell.

**Norme NF EN ISO 20482 2003** : ISO 20482:2003 spécifie une méthode d'essai pour déterminer l'aptitude à la déformation plastique par emboutissage des tôles et bandes métalliques.



*ANNEXES*



## Annexe A (normative)

### Méthode de référence pour la détermination de la masse de revêtement de zinc, zinc-fer, zinc-aluminium et aluminium-zinc

#### A.1 Principe

L'éprouvette doit avoir une superficie au minimum de 5 000 mm<sup>2</sup>. En utilisant une éprouvette d'une superficie de 5 000 mm<sup>2</sup>, la perte de masse en grammes après dissolution du revêtement, multipliée par 200, représente la masse totale du revêtement en grammes par mètre carré du produit, sur ses deux faces.

#### A.2 Réactifs et préparation de la solution

##### A.2.1 Réactifs.

A.2.1.1 Acide chlorhydrique (HCl  $\rho_{20} = 1,19$  g/ml).

A.2.1.2 Hexaméthylène-tétramine (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>N<sub>4</sub>).

##### A.2.2 Préparation de la solution :

L'acide chlorhydrique 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.

#### A.3 Appareillage

Balance permettant la pesée des échantillons à 0,001 g près. Pour l'essai, utiliser un dispositif verseur.

#### A.4 Mode opératoire

A effectuer sur chaque éprouvette les opérations suivantes :

- a) si nécessaire, dégraisser l'éprouvette avec un solvant organique qui n'attaquera pas le revêtement et la sécher soigneusement ;
- b) peser l'éprouvette à 0,001 g près ;
- c) plonger l'éprouvette dans la solution d'acide chlorhydrique inhibée par de l'hexaméthylène-tétramine (voir A.2), 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 ;
- d) 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 ;
- e) peser à nouveau l'éprouvette à 0,001g près ; 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  $m$  du revêtement.

## Annexe B (normative)

### Types d'éprouvettes à utiliser dans le cas de produits minces: tôles, bandes et plats d'épaisseur comprise entre 0,1 mm et 3 mm

#### B.1 Généralités

Pour les produits d'épaisseur inférieure à 0,5 mm, des précautions spéciales peuvent être nécessaires.

#### B.2 Forme de l'éprouvette

L'éprouvette présente, en général, des têtes d'amarrage plus larges que la partie calibrée. La longueur calibrée,  $L_c$ , doit être raccordée à ces têtes par des congés de raccordement de rayon au moins égal à 20 mm. Il convient que la largeur de ces têtes soit  $\geq 1,2b_0$ , où  $b_0$  est la largeur initiale.

Par accord, l'éprouvette peut aussi consister en une bande à côtés parallèles (éprouvette à faces parallèles). Pour les produits ayant une largeur inférieure ou égale à 20 mm, la largeur de l'éprouvette peut être la même que celle du produit.

#### B.3 Dimensions de l'éprouvette

Trois géométries différentes d'éprouvettes non proportionnelles sont largement utilisées (voir [Tableau B.1](#)).

La longueur de la partie calibrée doit être au moins égale à  $L_0 + b_0/2$ .

En cas de litige, il convient d'utiliser la longueur  $L_0 + 2b_0$ , sauf manque de matière.

Dans le cas d'éprouvettes à faces parallèles de largeur inférieure à 20 mm, et sauf spécification contraire dans la norme de produit, la longueur initiale entre repères,  $L_0$ , doit être égale à 50 mm. Pour ce type d'éprouvette, la longueur libre entre les mâchoires est égale  $L_0 + 3b_0$ .

Lorsqu'on mesure les dimensions de chaque éprouvette, les tolérances de forme du [Tableau B.2](#) doivent être appliquées.

Dans le cas d'éprouvettes dont la largeur est la même que celle du produit, on doit calculer l'aire initiale de la section transversale,  $S_0$ , à partir des dimensions mesurées de l'éprouvette.

La largeur nominale de l'éprouvette peut être utilisée pour autant que les tolérances d'usinage et de forme données dans le [Tableau B.2](#) aient été respectées pour éviter de mesurer la largeur de l'éprouvette avant l'essai.

**Tableau B.1 — Dimensions des éprouvettes**

Dimensions en millimètres

Type d'éprouvette	Largeur $b_0$	Longueur initiale entre repères $L_0$	Longueur calibrée $L_c$		Longueur libre entre mâchoires pour les éprouvettes à faces parallèles
			Minimum	Recommandée	
1	12,5 ± 1	50	57	75	87,5
2	20 ± 1	80	90	120	140
3	25 ± 1	50 <sup>a</sup>	60 <sup>a</sup>	—	Non définie

<sup>a</sup> Les rapports  $L_0/b_0$  et  $L_c/b_0$  d'une éprouvette de type 3 en comparaison des éprouvettes de types 1 et 2 sont très faibles. Il en résultera des caractéristiques, en particulier l'allongement après rupture (valeur absolue et l'allongement de dispersion), mesurées avec cette éprouvette, différentes de celles obtenues avec les autres types d'éprouvette.

**Tableau B.2 — Tolérances sur la largeur de l'éprouvette**

Dimensions et tolérances en millimètres

Largeur nominale de l'éprouvette	Tolérance d'usage <sup>a</sup>	Tolérance de forme <sup>b</sup>
12,5	±0,05	0,06
20	±0,10	0,12
25	±0,10	0,12

<sup>a</sup> Ces tolérances sont applicables lorsqu'on désire faire intervenir dans le calcul la valeur nominale de l'aire initiale de la section transversale,  $S_0$ , sans avoir à mesurer cette section.

<sup>b</sup> Écart maximal entre les mesures de la largeur déterminées tout au long de la partie calibrée,  $L_c$ , de l'éprouvette.

## B.4 Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes doit être réalisée de manière à ne pas porter atteinte aux caractéristiques de l'échantillon. Les zones éventuellement écrouies par découpage à la cisaille ou par poinçonnage doivent être enlevées par usinage, si les propriétés sont affectées. Ces éprouvettes sont préparées de manière prédominante à partir de tôles ou de bandes. Si possible, il convient de ne pas éliminer les surfaces brutes de laminage.

La préparation de ces éprouvettes par emboutissage peut entraîner des modifications significatives des caractéristiques du matériau, en particulier la limite apparente ou conventionnelle d'élasticité (du fait de l'écrouissage). Généralement, il convient de préparer les matériaux fortement écrouis par fraisage, meulage, etc.

Pour les matériaux de très faible épaisseur, il est recommandé que des bandes de même largeur soient coupées et regroupées en un paquet avec des couches intermédiaires en papier résistant à l'huile de coupe. Il convient d'assembler chaque petit paquet de bandes à l'aide d'une bande plus épaisse de chaque côté avant de l'usiner à la dimension définitive de l'éprouvette.

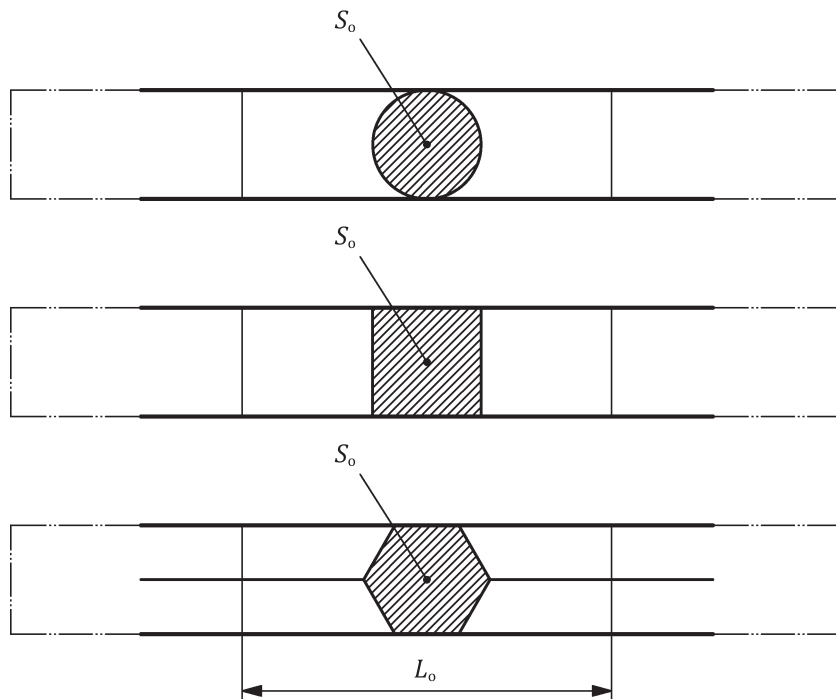
La tolérance donnée dans le [Tableau B.2](#), par exemple ± 0,05 mm pour une largeur nominale de 12,5 mm signifie qu'aucune éprouvette ne doit comporter une largeur en dehors des deux valeurs ci-après lorsqu'on désire faire intervenir dans le calcul la valeur nominale de l'aire initiale de la section transversale,  $S_0$ , sans avoir à mesurer cette section.

— 12,5 mm + 0,05 mm = 12,55 mm

— 12,5 mm - 0,05 mm = 12,45 mm

## B.5 Détermination de l'aire initiale de la section transversale

L'aire de la section initiale,  $S_0$ , doit être calculée à partir des mesures des dimensions de l'éprouvette (voir la note de bas de tableau a du [Tableau B.2](#)).



**Légende**

- $L_0$  longueur initiale entre repères
- $S_0$  aire initiale de la section transversale

**Figure 12 — Éprouvettes comportant une partie non usinée du produit (voir [Annexe C](#))**

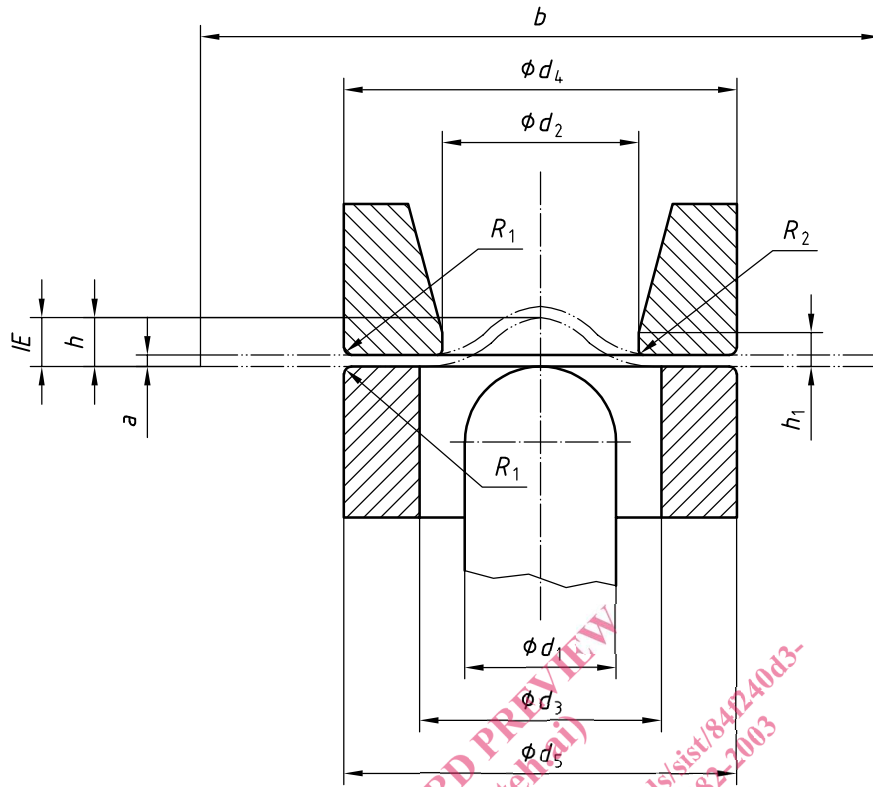


Figure 1 — Représentation schématique — Indice d'emboutissage Erichsen

Tableau 1 — Symboles et désignations

Dimensions en millimètres

Symbole	Désignation	Dimensions de l'éprouvette et de l'outil et indices d'emboutissage Erichsen			
		Essai courant	Essais avec tôles plus épaisses ou plus étroites		
$a$	Épaisseur de l'éprouvette	$0,1 \leq a \leq 2$	$2 < a \leq 3$	$0,1 \leq a \leq 2$	$0,1 \leq a \leq 1$
$b$	Largeur ou diamètre de l'éprouvette	$\geq 90$	$\geq 90$	$55 \leq b < 90$	$30 \leq b < 55$
$d_1$	Diamètre de la calotte sphérique du poinçon	$20 \pm 0,05$	$20 \pm 0,05$	$15 \pm 0,02$	$8 \pm 0,02$
$d_2$	Diamètre d'alésage de la matrice	$27 \pm 0,05$	$40 \pm 0,05$	$21 \pm 0,02$	$11 \pm 0,02$
$d_3$	Diamètre d'alésage du serre-flan	$33 \pm 0,1$	$33 \pm 0,1$	$18 \pm 0,1$	$10 \pm 0,1$
$d_4$	Diamètre extérieur de la matrice	$55 \pm 0,1$	$70 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$
$d_5$	Diamètre extérieur du serre-flan	$55 \pm 0,1$	$70 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$
$R_1$	Rayon du congé extérieur de la matrice Rayon du congé extérieur du serre-flan	$0,75 \pm 0,1$	$1 \pm 0,1$	$0,75 \pm 0,1$	$0,75 \pm 0,1$
$R_2$	Rayon du congé intérieur de la matrice	$0,75 \pm 0,05$	$2 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$
$h_1$	Hauteur de la partie interne arrondie de la matrice	$3 \pm 0,1$	$6 \pm 0,1$	$3 \pm 0,1$	$3 \pm 0,1$
$h$	Profondeur d'emboutissage pendant l'essai	—	—	—	—
$IE^a$	Indice d'emboutissage Erichsen	$IE$	$IE_{40}$	$IE_{21}$	$IE_{11}$

<sup>a</sup> L'indice d'emboutissage Erichsen correspondant est utilisé pour l'essai courant. Pour des matériaux plus épais et des éprouvettes plus étroites de matériaux moins épais, la dimension  $d_2$  est ajoutée à l'indice.

## ***Résumé***

L'objectif de notre travail est la protection contre la corrosion par galvanisation de l'acier A9 à différentes épaisseurs, en se basant sur les essais physico-chimiques, mécaniques (traction, dureté et emboutissage), micrographique et optique.

Les résultats prouvent que l'épaisseur de l'acier A9 influence énormément les propriétés de la couche galvanisée.

Mots clés : Corrosion, Galvanisation à chaud, Caractéristiques d'acier.

## ***Abstract***

The objective of our work is the protection against corrosion by galvanization of A9 steel at different thicknesses, based on physico-chemical, mechanical (tensile, hardness and drawing), micrographic and optical tests.

The results prove that the thickness of the A9 steel greatly influences the properties of the galvanized layer.

Key words: Corrosion, Hot dip galvanizing, Steel characteristics.

## **ملخص**

الهدف من عملنا هو الحماية من الصدأ بواسطة جلفنة فولاذ A9 بسماكات مختلفة ، بناءً على الاختبارات الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية (الشد والصلابة والرسم) والميكروغرافية والضوئية. أثبتت النتائج أن سمك الفولاذ A9 يؤثر بشكل كبير على خصائص الطبقة المجلفة. الكلمات المفتاحية: الصدأ، الجلفنة على الساخن ، خصائص الفولاذ .