الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

# Mémoire

Présentée pour obtenir le diplôme de

# Master

**Spécialité : Génie des matériaux**

**Filière : Génie mécanique**

# Étude du comportement mécanique des aciers

Présenté par :

- KHALDI Faiçal

**Mémoire soutenue le 29 / 06 / 2025 devant le jury composé de**

| | | |
|---|---|---|
| Président : | **TORCHANE Lazher** | Pr. |
| Encadreur : | **HANNACHI Mohamed Tahar** | Pr. |
| Examinateur : | **BOUNOUARA Abdelouahab** | MAB |

**Année universitaire :2024/2025**

**Dédicace**

*-À **ma mère et mon père**, mon port sûr et ma source d'inspiration éternelle.*
*-À **mes quatre sœurs et mon frère**, mes premiers fans et mes plus fidèles soutiens.*
*-À **mon superviseur, Professeur Mohamed Tahar Hanachi**, pour sa guidance précieuse.*
*-À **mon amour**, ma future épouse : *"Tu es le rêve qui donne un sens à chaque effort, le jardin où fleurit mon bonheur."* ❤*

***À mes petits rayons de soleil **:*
*** -Rinad**, notre petite princesse,*
*** -Abdelbasset**, notre poussin chéri,*
*** -Adam**, le brillant élève de l'école primaire (nous sommes fiers de toi.*
*** -Anas**, notre bébé au sourire magique.*

*-À **mes amis** (Ayman, Roustem, Sami, Abdelghafour, Sadek, Sofiane), pour leur camaraderie inestimable.*
*-À **Yahia & Mira**, pour leur aide sans limites.*
*À **Gaza**, symbole de résistance et de courage.*
*Ton peuple brave l'injustice avec dignité.*
*Nous sommes avec toi, en pensée et en cœur.*

*Ce travail est le fruit de votre amour... Qu'il vous appartienne.*

FAIÇAL

## Remerciment

*Je remercie ALLAH tout puissant de m'avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser mon mémoire.*

*J'exprime mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours universitaire.*

*J'adresse mes remerciements les plus distingués au Professeur HANNACHI Mohamed Tahar, directeur de ce travail, pour ses orientations scientifiques précises, ses conseils constructifs et son encouragement constant, qui ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.*

*Je remercie également chaleureusement l'ensemble des enseignants du département de Génie des Matériaux.*

*J'exprime toute ma reconnaissance à ma famille et à mes amis pour leur soutien moral continu et leurs encouragements tout au long de mon parcours académique.*

# Résumé

Cette étude évalue l'effet de la galvanisation sur les propriétés mécaniques de l'acier, à travers des essais effectués avant et après traitement dans l’usine ANABIB à Tébessa. Les résultats montrent une augmentation modérée de la dureté de surface, renforçant la résistance à l’usure, mais aussi une légère baisse de la ductilité et de la résistance à la traction due à la formation de phases fragiles. Ces résultats soulignent la nécessité de trouver un équilibre entre performance mécanique et protection contre la corrosion.

## ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير عملية الجلفنة على الخصائص الميكانيكية للفولاذ، من خلال إجراء اختبارات تجريبية على الفولاذ قبل وبعد الجلفنة في مصنع ANABIB بمنطقة تبسة. أظهرت النتائج المتوقعة زيادة معتدلة في صلادة السطح بسبب طبقة الزنك، مما يعزز مقاومة التآكل. في المقابل، لوحظ انخفاض طفيف في الليونة ومقاومة الشد نتيجة تشكل طبقات هشة. تؤكد هذه النتائج أهمية تحقيق توازن بين الأداء الميكانيكي ومقاومة التآكل في استخدامات الفولاذ المجلفن

## Abstract

This study investigates the impact of galvanization on the mechanical properties of steel, based on experiments conducted before and after the process at the ANABIB factory in Tébessa. The results suggest a moderate increase in surface hardness, improving wear resistance, but also a slight decrease in ductility and tensile strength due to the formation of brittle phases. These findings highlight the importance of balancing mechanical performance and corrosion resistance in galvanized steel applications.

## Sommaire


Introduction générale ..... 1
Chapitre I. Généralités sur les revêtements métalliques ..... 3
I.1. Introduction : ..... 3
I.2.Les revêtements métalliques ..... 3
I 3. Techniques de revêtement ..... 3
I.3.1. Les dépôts électrolytiques ..... 3
I.3.2. Les dépôts chimiques (ou auto catalytiques) ..... 4
I.3.2.1. Les dépôts en phase vapeur ..... 4
I.3.2.2. Les dépôts par immersion ..... 4
I.4. Revêtements de zinc ..... 5
I.5. Procédé de fabrication de l'acier à galvanisation : ..... 5
I.6 Revêtements de surface et traitements thermiques ..... 6
I.6.1 Galvanisation ..... 6
I.6.2 Étainage (ou étamage) ..... 6
I.6.3 Cémentation ..... 7
I.6.4 Nitruration ..... 7
I.6.5 Carbonitruration ..... 7
Conclusion ..... 8
Chapitre 02 : Les mécanismes de galvanisation des aciers ..... 10
II.1. Introduction ..... 11
II.2. Définition ..... 11
II.3. L'acier Galvanisé ..... 11
II.3.1 Historique de la galvanisation ..... 12
II.4. Procédés de fabrication des aciers ..... 13
II.5. Galvanisation à chaud – Processus ..... 14
II.5.1. Galvanisation ..... 20
II.5.2. Bains de galvanisation ..... 21
II.5.3. Contrôle de la galvanisation, précautions et défauts ..... 28
II.6. Galvanisation à chaud – Principe générale ..... 29
II.6.1. Réaction métallurgique ..... 29
II.6.1.1. Formation des alliages interfaciaux ..... 29
II.6.2. Étapes clés d'un procédé de galvanisation ..... 34
II.6.3. Rôle du zinc dans la protection contre la corrosion ..... 35
II.6.3.1. Zinc et produits de corrosion ..... 35

II.6.3.2. Protection électrochimique .....36
II.7. L'unité Anabib .....37
II.7.1. Matériau ..... 38
II.8. Préparation des échantillons .....;;;;;;..... 39
II.8.1. Polissages des surfaces du substrat .....39
II.8.2. Prétraitement ..... 39
II.9. Technique de position ..... 40
II.10. Spécification du revêtement des tubes ..... 40
II.10.1. Contrôle de la masse surfacique de zinc ..... 41
II.10.2. Contrôle de la Continuité du revêtement de zinc ..... 43
II.10.3. Contrôle de L'adhérence ..... 44
II.11. Technique de caractérisation des produits obtenus ..... 44
II.11.1 Observation microscopiques ..... 44
II.11.1.1 Microscope optique ..... 45
II.12. Microdureté ..... 46
Conclusion ..... 46
CHAPITRE 03 : Techniques expérimentales .....47
III.1. Introduction ..... 48
III.2. Matériaux et procédures expérimentales ..... 48
III.2.1. Choix du métal de base ..... 48
III.2.2. Analyse chimique de l'acier ..... 49
III.3- Essais mécaniques ..... 50
III.3.1. Essai de traction ..... 51
III.3.1.1. Principe de l'essai de traction ..... 51
III.3.1.2. Découpage et usinage des éprouvettes..... 52
III.3.1.3. Résultats de l'essai de traction..... 54
III.3.2. Essais de dureté..... 57
III.3.3. Essai de Résilience (K) ..... 60
III.3.3.1 Conditions de réalisation de l'essai ..... 62
III.4. Analyse des résultats..... 63
Conclusion .....65

# Liste des figures

## Chapitre II

**Figure II. 1**: L'évolution des techniques et des installations utilisées pour la galvanisation à travers les siècles .....12
**Figure II. 2**: Attaque de l'acier par le flux .....17
**Figure II. 3**:étapes de la galvanisation à chaud .....17
**Figure II. 4**: Représentation schématique des deux procédés De galvanisation humide .....19
**Figure II. 5:** Amélioration de la galvanisation d'aciers au silicium .....23
**Figure II. 6:** Tenue à la corrosion des revêtements obtenus Dans des bains Supergalv .....25
**Figure II. 7:** Influence de la vitesse d'émersion Sur la masse de revêtement déposée .....26
**Figure II. 8:** Influence de la teneur en aluminium et De la température Du bain de galvanisation sur la durée d'inhibition.....31
**Figure II. 9:** Revêtement galvanisé : bain de zinc pur .....31
**Figure II. 10**: Revêtement galvanisé bain .....33
**Figure II. 11:** Deux cas possibles de protection active ou sacrificielle (a-b), passive ou barrière (c-d) .....37
**Figure II. 12:** Tubes à galvanisés .....38
**Figure II. 13:**Représentation des différentes étapes de la galvanisation de produits finis. .....40
**Figure II. 14**: Echantillons galvanisés.....40
**Figure II. 15:** mesure de L'appareil.....41
**Figure II. 16:** Balance.....42
**Figure II. 17:** Solution de sulfate de cuivre ($CuSO_4$).....43
**Figure II. 18:** Machine à cintrer .....44
**Figure II.19 : Polisseuse** de finition MECAPOL P300. .....45
**Figure II. 20:** Microscope optique.....45
**Figure II. 21:** Microdureté .....46

## Chapitre III

**Figure III. 1 :** Mesure de l'épaisseur de la couche de revêtement.....49
**Figure III. 2:** Machine de traction (Deux angles différentes) .....51
**Figure III. 3:** Forme générale de l'éprouvette. .....52
**Figure III. 4:** courbe de traction conventionnelle. .....52
**Figure III. 5:** Courbe rationnelle de traction avant Galvanisation. .....56
**Figure III. 6:** courbe rationnelle de traction après Galvanisation. .....57
**Figure III. 7:** Essai de dureté Brinell. .....58
**Figure III. 8:** Dureté avant et après Galvanisation. .....59
**Figure III. 9** : Dimensionnement d'éprouvettes d'essais .....60
**Figure III. 10 :** Essai de résilience **[&&&].**.....61
**Figure III. 11:** Essais de choc avant et après galvanisation .....62

# Liste des tableaux

## Chapitre I

**Tableau I. 1 :** Tableau comparatif des procédés ..... 8

## Chapitre II

**Tableau II. 1:** Composition chimique d zinc selon le norme NF A-55-101 ..... 22
**Tableau II. 2:** Composition chimique (bains faiblement alliés). ..... 22
**Tableau II. 3** : Types des aciers près a galvanisation a chauds selon la norme (**NF A91-121**) ..... 28
**Tableau II. 4 : Caractéristiques des phases Fe-Zn** ..... 32
**Tableau II. 5 :** Caractéristiques mécaniques et chimiques de substrat ..... 38
**Tableau II. 6 :** La composition chimique de zinc. ..... 38
**Tableau II. 7 :** La composition chimique de zamak. ..... 39

## Chapitre III

**Tableau III. 1 : Équivalences des nuances entre les normes NF EN 10025-2, NF 10025 et NF A 35-501** ..... 48
**Tableau III. 2:** Composition chimique du métal de base ..... 50
**Tableau III. 3:** Propriétés physiques et mécaniques de l'acier S235 ..... 50
**Tableau III. 4**: résultats de l'essai de traction avant galvanisation. ..... 54
**Tableau III. 5**: résultats de l'essai de traction après galvanisation. ..... 54
**Tableau III. 6:** Données géométriques de l'essai de traction pour une éprouvette avant et après galvanisation ..... 55
**Tableau III. 7:** résultats de l'essai de traction. ..... 55
**Tableau III. 8:** Essai de dureté Brinell avant et après Galvanisation ..... 59

# Introduction générale

Les aciers sont d'une importance capitale puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines [1]. Ils sont élaborés pour résister à des différentes sollicitations mécaniques et des agressions chimiques ou une combinaison des deux [2-3].

Les métaux sont utilisés depuis des siècles à des fins de fabrication d'outils. Dans la construction, dans l'industrie sont présents partout où il y a de l'activité. L'acier est le plus connu et le plus utilisé des métaux depuis la révolution industrielle car il allie des propriétés techniques très intéressantes et a des atouts économiques indéniables. Toutefois, tous les métaux et l'acier en particulier, ont un point faible : ils se corrodent, ce qui va entrainer un aspect inesthétique de rouille à la surface, mais surtout la formation d'entailles qui vont fortement altérer leurs propriétés mécaniques et doivent donc être protégés contre les agressions de l'environnement.

La lutte contre la corrosion des métaux peut être envisagée de plusieurs manières, soit par l'emploi d'alliage passivable (acier inoxydable) qui reste stable dans les conditions d'utilisation, soit par l'emploi de la protection par inhibition par l'ajoute à faible concentration un composé chimique (ex: molécules organiques) au milieu corrosif à fin de ralentir ou stopper le processus de corrosion, soit par l'application de revêtements métalliques ou non métalliques [4].

La protection de l'acier par galvanisation à chaud s'est imposée comme la solution la plus efficace et la plus économique des systèmes de protection anti corrosion. De nos jours, le procédé de galvanisation est le plus fréquemment utilisé pour combattre la corrosion. Prés de la moitié des 10 millions de tonnes de zinc produites annuellement à travers le monde sont utilisées pour la galvanisation de pièces d'acier. Les produits d'acier galvanisé servent dans les industries de l'automobile, de la construction et des appareils électroménagers. Ce n'est donc pas un hasard si c'est la solution la plus utilisée à l'heure actuelle.

La galvanisation à chaud est une opération qui a pour but de former des couches intermétalliques fer/zinc par immersion dans un bain de zinc en fusion à une température se situant entre 450°C et 460°C. Ce procédé permet une protection parfaite du métal contre la corrosion (intérieur et extérieur). Lorsqu'un acier zingué est soumis à la corrosion, le zinc protège l'acier grâce à deux mécanismes [5]:

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

Le but de ce travail est d'étudier le comportement mécanique des aciers avant et après la galvanisation de comparer les résultats obtenus.

Cette étude comprend trois chapitres :

- Le premier chapitre présente d'abord une étude bibliographique sur les procédés de revêtements des surfaces des métaux ; puis quelques notions sur les types de protection, mécanismes de formation des couches.

- Le deuxième chapitre présente les notions générales sur la galvanisation des aciers (zingage), et le processus technologique qui gouverne de galvanisation à chaud en continue.

- Le troisième chapitre a été consacré à la présentation des différents résultats et à la discussion de ces derniers.

# Chapitre I. Généralités sur les revêtements métalliques

## I.1. Introduction :

Ces techniques de revêtement sont encore les plus répandues, qu'il s'agisse des dépôts de nickel, cuivre, cadmium, zinc, étain, laiton par exemple, ou de prétraitements avant peinture. Il existe une abondante littérature concernant l'emploi de la spectrométrie à décharge luminescente pour la phosphatation, le laitonnage les électro dépôts fer-nickel, cuivre-zinc ou Pb-Sn, la chromisation Mais ce sont les revêtements de zinc, obtenus par galvanisation ou électrodéposition qui ont fait l'objet du plus grand nombre de publications [3].

## I.2.Les revêtements métalliques

On les emploie couramment pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre ou le laiton, comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome sur les robinets D'une manière générale, on distinguera deux types de revêtements métalliques

### a) Les revêtements anodiques

Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc) que nous avons déjà évoqué. En cas de défaut du revêtement, il ya formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant catholiquement le métal de base.

### b) Les revêtements cathodiques

Le métal protecteur est plus noble que le méta protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique".

## I 3. Techniques de revêtement

Suivant le type de matériau à protéger et le matériau de revêtement envisagé, différentes techniques de mise en place peuvent être utilisées Dans ce paragraphe nous décrirons brièvement les méthodes les plus couramment employées.

## I.3.1. Les dépôts électrolytiques

Ce sont des dépôts métalliques réalisés à partir d'une solution contenant les ions du métal à déposer ainsi que des agents complexant, des agents tampons ou des additifs organiques visant à améliorer les qualités (brillance, dureté, adhérence...) du revêtement réalisé.

La vitesse de dépôt est directement liée à la densité de courant circulant dans la cellule d'électrolyse dont la pièce à revêtir constitue la cathode, l'anode pouvant être un barreau du métal à déposer (anode soluble), ou un matériau inerte. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de régénérer périodiquement la solution.

### I.3.2. Les dépôts chimiques (ou auto catalytiques)

La réalisation d'un dépôt chimique consiste à réduire les ions en solution du métal à déposer soit par réaction avec la surface du matériau à recouvrir, soit par réaction avec un autre corps présent dans la solution.

#### I.3.2.1. Les dépôts en phase vapeur

Le dépôt en phase gazeuse d'un métal ou d'un composé réfractaire du type carbure, nitrure, ou borure, peut se faire soit par voie physique (dépôt PVD pour Physical Vapour Deposit), soit par voie chimique (dépôt CVD pour Chemical Vapour Deposit). Parmi les dépôts PVD, la pulvérisation cathodique est le plus important : les atomes du matériau à déposer sont expulsés d'une cible par un bombardement de particules (par exemple des ions argon) Dans les procédés CVD, on utilise un mélange de gaz contenant un composé volatil du matériau à déposer et un réducteur comme par exemple l'hydrogène ou le méthane. Quant on introduit ce mélange dans l'enceinte de réaction, le composé volatil se réduit à la surface du substrat pour former le dépôt.

#### I.3.2.2. Les dépôts par immersion

C'est une des méthodes de protection la plus ancienne qui consiste à plonger le métal à recouvrir dans un bain fondu du métal de revêtement. C'est un procédé classique permettant de recouvrir l'acier de zinc (galvanisation).

#### I.3.2.3. Les dépôts par projection à chaud (shoopage)

La matière, sous forme de poudre, fil, ou cordon, est fondue au chalumeau ou à l'arc et projetée sur le substrat au moyen d'un pistolet. Les épaisseurs déposées vont de quelques dizaines de micromètres à quelque millimètre avec une porosité résiduelle de 1 à 10%.

On peut enfin citer d'autres techniques de revêtement comme le placage par explosion ou le calaminage, et le beurrage (dépôt par soudage). [4]

## I.4. Revêtements de zinc

L'industrie sidérurgique a développé durant ces dernières années, des tôles revêtues de zinc utilisées dans les domaines de l'automobile, du bâtiment, de l'électroménager principalement. Les dépôts sont réalisés par galvanisation à chaud ou par électrodéposition.

Bien que ces revêtements aient été abondamment caractérisés, leur analyse demande certaines précautions tant au niveau de la propreté de la lampe que de la maîtrise de la température à la surface de l'échantillon. Comme cela a déjà été signalé précédemment, la pulvérisation ionique de matériaux à basse température de fusion (Zn, Sn...) peut conduire à des zones de fusion locale et corrélativement à une déformation des profils L'emploi d'un système de refroidissement adapté et d'un modèle de quantification permet d'obtenir des profils riches en informations.

Les revêtements électro déposés sont un cas d'application très favorable, car ils sont généralement peu épais (inférieurs à 10µm) et la structure est très fine, ce qui conduit à des interfaces très bien définies, même sur les profils qualitatifs  Dans le cas des dépôts à chaud, obtenus au trempé, l'analyse est un peu plus délicate car les couches sont plus épaisses et la structure plus grossière ; cela conduit à un étalement des interfaces qui est partiellement corrigé par les modèles de quantification.

Il existe maintenant de nombreux cas d'analyses quantitatives, aussi bien pour les dépôts chaud (galvanisation, Galvanneal, Galdan, Galvalume ..) que pourles dépôts électrolytiques (Zn, Zn-Ni...).[3]

## I.5. Procédé de fabrication de l'acier à galvanisation :

Le cycle de production d'un produit sidérurgique comprend un passage à l'état solide. Autrefois ce passage se situait à la coulée en lingots à l'aciérie, aujourd'hui il se situe pour la grande majorité des produits à la coulée continue.

Les étapes ultérieures du cycle du produit comprennent des mises en forme Successives dans les ateliers de laminage, à chaud en première étape, puis de laminage à froid dans une seconde étape. Ces transformations géométriques sont accompagnées de transformations métallurgiques.

L'objectif visé est la fabrication d'un produit dont les caractéristiques géométriques et métallurgiques sont définies et fonction de l'utilisation Finale.

La compréhension des transformations thermomécaniques du système laminoir-produit est une nécessité pour atteindre cet objectif. Cet article traite donc de la théorie du laminage, de la technologie des outils et de leur utilisation. [5]

## I.6 Revêtements de surface et traitements thermiques

Les revêtements de surface et les traitements thermiques sont des procédés essentiels en ingénierie des matériaux. Ils visent à améliorer les propriétés mécaniques, la résistance à l'usure, à la corrosion ou encore la dureté des pièces métalliques. Ces procédés sont largement utilisés dans l'industrie automobile, aéronautique, mécanique, etc.

### I.6.1 Galvanisation

La galvanisation est un revêtement de surface qui consiste à appliquer une couche de zinc sur une pièce en acier ou en fer. Ce revêtement forme une barrière protectrice contre la corrosion et offre également une protection cathodique : si la couche de zinc est endommagée, le zinc se corrode à la place du métal de base.

**Méthodes principales :**

Galvanisation à chaud : la pièce est plongée dans un bain de zinc fondu (~450 °C).

Galvanoplastie (zincage électrolytique) : le zinc est déposé par électrolyse.

**Applications** : construction métallique, poteaux, toitures, automobiles.

### I.6.2 Étainage (ou étamage)

L'étainage est l'application d'une couche d'étain sur un métal, souvent de l'acier. Ce procédé a pour but de protéger contre l'oxydation et d'assurer une bonne conductivité électrique. L'étain est aussi non toxique, ce qui le rend idéal pour les emballages alimentaires.

- **Méthodes :**

Étamage électrolytique

Étamage à chaud

**Applications** : boîtes de conserve, connecteurs électroniques, composants électriques.

- **Traitements thermochimiques**

Les traitements thermiques modifient la composition chimique de la surface d'un métal en le chauffant dans un environnement contrôlé contenant certains éléments actifs (carbone, azote...).

### I.6.3 Cémentation

La cémentation est un traitement thermochimique qui consiste à enrichir la surface de l'acier en carbone. Ce procédé se fait généralement à haute température (850–950 °C) dans une atmosphère carbonée.

Après cémentation, une trempe est souvent réalisée pour obtenir une surface dure et résistante à l'usure, tandis que le cœur reste tenace et ductile.

**Applications** : engrenages, arbres de transmission, pièces mécaniques soumises à des chocs.

### I.6.4 Nitruration

La nitruration consiste à diffuser de l'azote dans la surface de l'acier. Ce traitement est effectué à plus basse température (500–600 °C) que la cémentation, ce qui limite les déformations de la pièce.

Il existe plusieurs types :

- Nitruration gazeuse
- Nitruration ionique (plasma)
- Nitruration liquide

Ce procédé permet d'obtenir une couche très dure, résistante à l'usure, à la corrosion et à la fatigue.

**Applications** : moules, vilebrequins, pièces de moteurs, vis sans fin.

### I.6.5 Carbonitruration

La carbonitruration est similaire à la cémentation, mais elle implique la diffusion simultanée de carbone et d'azote. Elle est réalisée à des températures comprises entre 700 et 900 °C

Ce traitement permet d'obtenir une surface encore plus dure que la cémentation seule, avec une meilleure résistance à l'usure et à la fatigue thermique.

**Avantages :**

Moins de déformation qu'une cémentation classique

Cycle de traitement plus court

Applications : pièces de petite taille : vis, axes, pignons, pièces automobiles.

**Tableau I. 1 : Tableau comparatif des procédés [21]**

| Procédé | Type | Température (°C) | Éléments diffusés ou deposes | But principal | Avantages | Applications typiques |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Galvanisation** | Revêtement de surface | ~450 (à chaud) | Zinc | Protection contre la corrosion | Protection cathodique, bon marché | Poteaux, toitures, construction, auto |
| **Étainage (Étonnage)** | Revêtement de surface | ~250–300 (à chaud) | Étain | Protection + compatibilité alimentaire | Non toxique, bonne conductivité électrique | Boîtes de conserve, électronique |
| **Cémentation** | Traitement thermochimique | 850–950 | Carbone | Surface dure + cœur tenace | Très bonne résistance à l'usure, bonne ténacité interne | Engrenages, arbres de transmission |
| **Nitruration** | Traitement thermochimique | 500–600 | Azote | Dureté en surface, sans déformation | Pas de trempe nécessaire, très bonne résistance à la fatigue | Moules, vilebrequins, vis sans fin |
| **Carbonitruration** | Traitement thermochimique | 700–900 | Carbone + Azote | Dureté élevée + résistance à l'usure | Cycle court, peu de déformation, bonne dureté superficielle | Vis, pignons, axes, petites pièces mécaniques |

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales opérations de mise en forme de l'acier, en insistant sur les procédés de traitement de surface, les méthodes de protection les plus courantes, notamment la galvanisation, et les étapes de fabrication de l'acier galvanisé. Ces notions fondamentales seront régulièrement évoquées tout au long de ce mémoire. Dans le chapitre suivant, nous approfondirons le procédé de galvanisation à chaud, ses principes et ses différentes étapes.

# Chapitre II : Les mécanismes de galvanisation des aciers

## II.1. Introduction

La Galvanisation à chaud est un procédé de revêtement anticorrosion traditionnel. Inventé par le Français J. Malouin en 1742. La première usine fut construite en Allemagne à Solingen en 1847. Le nom de Galvanisation, donné au procédé par S. Sorel en l'honneur du savant italien Galvani, recouvre en fait la propriété fondamentale offerte par tout revêtement de zinc, l'effet galvanique qui peut s'appliquer également aux autres procédés d'application du zinc (shérardisation, zingage électrolytique...).

## II.2. Définition

La galvanisation à chaud, est une technique de l'industrie qui est utilisée pour renforcer une pièce d'acier à l'aide de zinc. Ce procédé donne au revêtement protecteur contre la corrosion de l'adhérence, de l'imperméabilité, et de la résistance mécanique. Donc une pièce traitée par cette technique à de tels atouts ; ouvre le champ d'application pleinement pour qu'elle continue de s'étendre de plus en plus. La galvanisation par immersion à chaud est utilisée pour revêtir des pièces de petites dimensions (pièces de fixation, visserie, tiges filetées,…) ainsi que des bobines de tôle utilisées dans le bâtiment et autres usages concernent le mobilier urbain (éclairage, signalisation, barrières) [25]. Le revêtement par Galvanisation à chaud assure, grâce au recouvrement de l'acier par le zinc, une double protection : physico- chimique : effet barrière isolant l'acier de l'atmosphère, cette barrière perdurant à cause de la formation de sels de zinc protecteurs ; électrochimique : due à l'effet de protection cathodique apporté par le zinc vis - à-vis du fer qui se fait sen tir à l'aplomb des blessures de revêtement.

## II.3. L'acier Galvanisé

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 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 Cette couche à une épaisseur courante de 55 µm. En réalité ces composés intermétalliques vont dépendre de la composition exacte du bain et de l'acier ainsi revêtu est alors refroidi ce qui permet au revêtement riche en zinc de se solidifier.

### II.3.1 Historique de la galvanisation

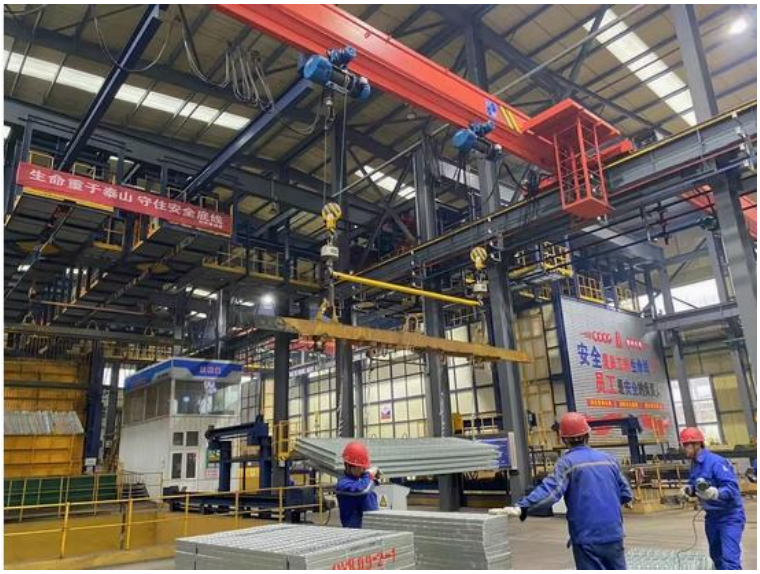
La galvanisation est un procédé ancien de protection contre la corrosion, dont les origines remontent au XVIIIe siècle. C'est en 1742 que le chimiste français Melouin présente à l'Académie des sciences une méthode consistant à recouvrir le fer d'une couche de zinc fondu afin de le protéger de la rouille. Bien que novateur, ce procédé reste peu exploité à cette époque en raison de l'absence de moyens techniques permettant son application à grande échelle.

Ce n'est qu'au XIXe siècle que la galvanisation prend un véritable essor industriel. En 1836, l'ingénieur français **Stanislas Sorel** dépose un brevet pour un procédé de protection du fer par **immersion dans du zinc fondu**. Il nomme cette technique « galvanisation », en hommage au scientifique italien **Luigi Galvani**, connu pour ses travaux sur l'électricité et la stimulation des métaux. Cette date marque la **naissance officielle de la galvanisation à chaud**, telle qu'elle est encore utilisée aujourd'hui. Le procédé connaît rapidement un grand succès en Europe, notamment en Angleterre, en Allemagne et en France, où il est employé pour protéger les toitures, les tuyauteries, les clôtures et diverses structures métalliques.

Au cours du **XXe siècle**, la galvanisation se perfectionne grâce aux avancées technologiques. L'introduction de procédés automatisés permet une meilleure maîtrise de l'épaisseur du zinc, une amélioration de l'adhérence, ainsi qu'une qualité de surface supérieure. De nouveaux procédés apparaissent, notamment la **galvanisation électrolytique** (ou électrozingage ), qui dépose une fine couche de zinc par électrolyse, particulièrement adaptée aux pièces de petite taille et de précision. En parallèle, la **galvanisation en continu** est développée pour le traitement des bandes et tôles d'acier, et devient un procédé essentiel dans des industries telles que l'automobile, l'électroménager ou encore la construction.

Au **XXIe siècle**, la galvanisation poursuit son évolution dans une perspective de **développement durable**. Les recherches actuelles visent à améliorer l'efficacité énergétique du procédé, à réduire son impact environnemental et à optimiser l'utilisation des ressources, notamment le zinc. Grâce à sa capacité à prolonger la durée de vie des structures métalliques tout en réduisant les besoins d'entretien, la galvanisation demeure aujourd'hui une solution de protection incontournable dans de nombreux secteurs industriels, notamment le bâtiment, les transports, les infrastructures, l'énergie et l'agriculture.

**Figure II. 1**: L'évolution des techniques et des installations utilisées pour la galvanisation à travers les siècles **[20]**



## II.4. Procédés de fabrication des aciers

Les évolutions récentes dans l'élaboration et la mise en forme des métaux visent principalement deux objectifs : **une pureté accrue** des matériaux et **l'optimisation des processus de production** grâce à leur continuité et à l'enchaînement efficace des différentes étapes.

Ces améliorations permettent une **meilleure stabilité** des propriétés mécaniques et dimensionnelles des produits. Parmi les avancées majeures, on peut citer :

- L'**amélioration des traitements de la fonte**, notamment la désulfuration ;
- L'évolution des procédés d'aciéries, comme le **soufflage mixte**, le **soufflage d'argon**, ou les progrès dans les **aciéries électriques** ;
- Le **développement de la métallurgie en poche** pour une meilleure homogénéité ;
- L'**intégration du dégazage sous vide** dans la production de masse ;
- La **généralisation de la coulée continue**, sauf pour certaines pièces de très grande taille ;
- La **modernisation des équipements**, tels que les fours et laminoirs, combinée à une automatisation renforcée, garantissant une meilleure régularité ;
- L'**amélioration des traitements thermomécaniques** pour tirer parti du formage à chaud ;
- Le **couplage en continu** du décapage et du laminage à froid ;

- Le **développement du recuit continu**, notamment sous hydrogène pur ;
- L'**innovation dans les procédés de revêtement**, comme la galvanisation à chaud et l'électrozingage ;
- L'**utilisation croissante de la modélisation numérique** pour optimiser les procédés.

Ces progrès permettent un **meilleur contrôle de la composition chimique des aciers**, une **réduction des impuretés** (soufre, phosphore, azote, hydrogène) et une **diminution du taux de carbone**, selon les applications.

## II.5. Galvanisation à chaud – Processus

### II.5.1. Galvanisation par trempage

La **galvanisation à chaud par immersion** est utilisée pour protéger durablement les pièces finies ou les structures métalliques déjà formées, surtout lorsqu'une bonne résistance à la corrosion est souhaitée sans exigences esthétiques spécifiques.

Il existe deux grands types d'ateliers :

**Les galvaniseurs à façon**, qui traitent des pièces variées selon la demande (pylônes, poutres, glissières, vis, etc.) ;

**Les ateliers intégrés**, qui font partie d'une chaîne de production (ex. boulons, pièces forgées), et où la galvanisation est systématique.

Le processus de galvanisation comporte plusieurs étapes, dont **la préparation de surface**, la galvanisation elle-même, puis les **traitements finaux**. La qualité du revêtement dépend notamment de la **composition de l'acier**, des **caractéristiques du bain de zinc** (température, durée d'immersion), et des traitements comme la **centrifugation** ou le **refroidissement**.

#### II.5.1.1. Préparation de surface : le dégraissage

Avant la galvanisation, il est essentiel de nettoyer parfaitement les pièces pour garantir une bonne adhérence du zinc et éviter la contamination des bains.

##### II.5.1.1.1. Méthodes de dégraissage :

**Dégraissage alcalin** : méthode la plus répandue, utilisant des bains à base de soude ou de carbonate de sodium, avec des additifs tensioactifs. Température entre 60 et 80 °C. Un rinçage soigné est impératif.

**Dégraissage à froid** : réservé aux pièces peu grasses, il est moins courant.

**Autres méthodes pour surfaces peintes** : grenaillage, brûlage, ou brossage mécanique.

**Dégraissage acide** : possible sans rinçage avant décapage.

**Dégraissage biologique (ex : procédé Came)** : recours à des bactéries dans les bains, sans rinçage intermédiaire, avec un contrôle automatique des paramètres.

#### II.5.1.1.2. Décapage

Le **décapage** a pour objectif d'éliminer les couches d'oxydes présentes à la surface de l'acier, qu'elles soient dues aux traitements thermiques (comme la calamine) ou à l'exposition à l'humidité (rouille). Il peut être réalisé selon deux méthodes principales :

**A. Décapage chimique (voie humide)**

Cette méthode utilise des acides tels que l'acide chlorhydrique (dilué à une concentration de 120 à 210 g/L, utilisé à température ambiante) ou l'acide sulfurique (nécessitant un bain chauffé à environ 70 °C).

L'acide chlorhydrique est souvent privilégié pour sa capacité à dissoudre efficacement les oxydes tout en générant des sels solubles (chlorures de fer), offrant ainsi une surface propre avec un aspect satiné et limitant les risques de fragilisation de l'acier.

L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion est recommandée pour protéger le métal de base tout en ciblant les oxydes.

Après le décapage, un rinçage minutieux est indispensable pour éliminer les résidus acides et prévenir toute contamination ou réaction indésirable. Il est conseillé d'utiliser plusieurs bains de rinçage successifs pour garantir une neutralisation optimale.

Le suivi régulier des bains acides permet une gestion efficace du procédé et assure la conformité aux normes environnementales grâce à une neutralisation maîtrisée des effluents.

**B. Décapage mécanique**

Réalisé le plus souvent par **grenaillage**, il consiste à projeter des billes d'acier ou de fonte sur les pièces afin d'enlever les impuretés comme les restes de peinture, calamine, laitier de soudure ou sable de moulage.

Cette technique est idéale pour les pièces en fonte ou en acier moulé. Elle crée également une rugosité de surface favorable à une meilleure adhérence du zinc.

Dans certains cas, un léger décapage chimique peut compléter le traitement mécanique.

### II.5.1.1.3. Fluxage

Le fluxage est une étape cruciale pour compléter la préparation de surface avant la galvanisation. Il remplit trois fonctions essentielles :

**Éliminer les oxydes résiduels** pouvant se reformer après le rinçage ;

**Protéger temporairement la surface** contre l'oxydation avant immersion dans le zinc;

**Faciliter la mouillabilité** de l'acier par le zinc fondu.

Les flux utilisés sont généralement des mélanges de chlorure de zinc ($ZnCl_2$) et de chlorure d'ammonium ($NH_4Cl$), formant des sels doubles ($ZnCl_2 \cdot 2NH_4Cl$) ou triples ($ZnCl_2 \cdot 3NH_4Cl$). En solution concentrée, le $ZnCl_2$ agit aussi comme agent décapant, tout en jouant un rôle de fondant chimique en fixant des impuretés (oxydes métalliques, molécules organiques, etc.).

Les principales réactions chimiques impliquées sont :

Décomposition du flux :

$$ZnCl_2 \cdot 2NH_4Cl \rightarrow ZnCl_2(NH_3) + NH_3 + 2HCl \quad \text{(II.1)}$$

Attaque des oxydes :

$$FeO + 2HCl + NH_3 \rightarrow FeCl_2(NH_3) + H_2O \quad \text{(II.2)}$$

$$ZnO + 2HCl + NH_3 \rightarrow ZnCl_2(NH_3) + H_2O \quad \text{(II.3)}$$

Pour remplir efficacement ses fonctions, le flux doit présenter certaines propriétés physiques :

**Faible tension superficielle** (obtenue avec des agents mouillants ou de la glycérine),

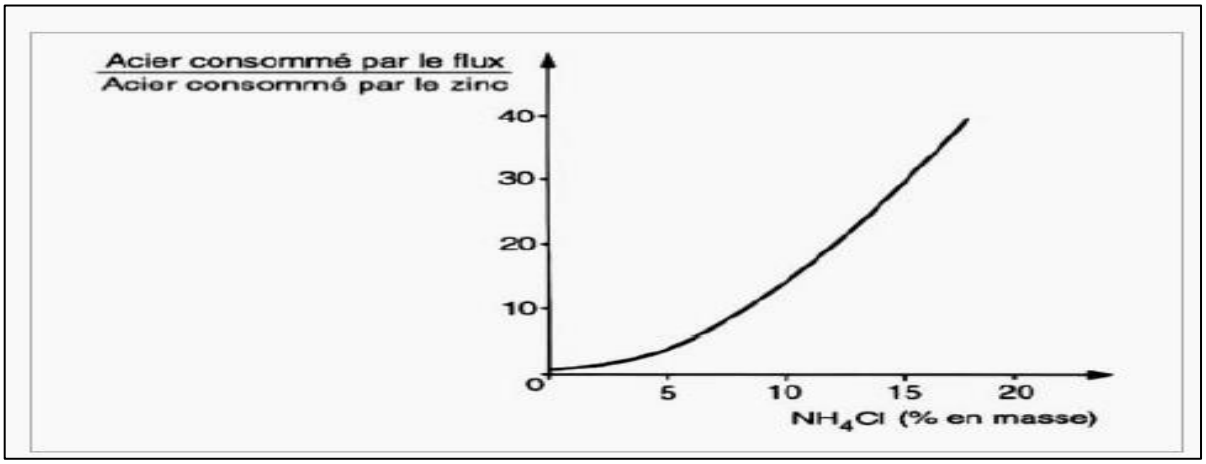
**Faible viscosité** (par ajout de chlorures alcalins),

**Faible densité**,

**Basse température de fusion**, généralement entre 180 et 230 °C, ajustée à l'aide d'additifs comme HCl ou KCl.

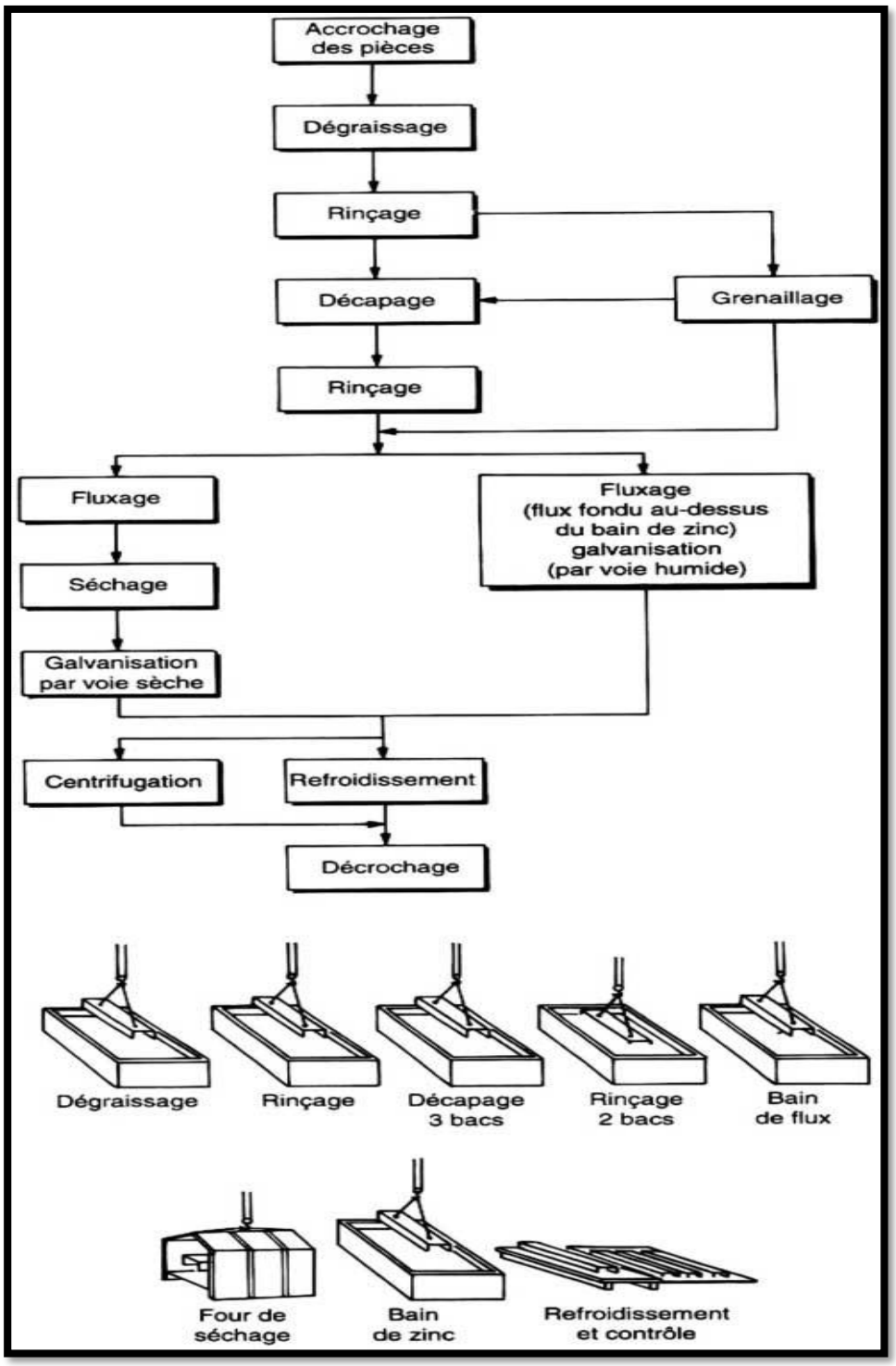
Le flux peut également réagir avec certains éléments du bain de zinc (ex. aluminium ou magnésium), modifiant leur concentration.Enfin, la formation de chlorure de fer par attaque de l'acier (**Voir la Figure II.2**) peut entraîner une réaction avec le zinc fondu, créant un composé $FeZn_{13}$, appelé "matte", qui contient 7 % de fer et 93 % de zinc. Cela peut influencer le comportement du bain et la qualité du revêtement final

**Figure II. 2**: Attaque de l'acier par le flux **[23]**




En résume les étapes précédentes de galvanisation à chaux dans la (**Figure II.3**) suivant :

**Figure II. 3**:étapes de la galvanisation à chaud **[22].**




## A - Galvanisation à sec

Dans ce procédé, les pièces métalliques sont d'abord immergées dans une solution de flux concentrée (entre 400 et 600 g/L), puis séchées à environ 120 °C dans une étuve. Ce séchage forme une fine pellicule de flux protecteur à la surface des pièces, tout en jouant le rôle de préchauffage avant leur immersion dans le zinc fondu.

La solution de fluxage est maintenue à environ 60 °C, ce qui permet de réduire le temps nécessaire au séchage en facilitant l'élimination de l'eau contenue dans les sels. Un séchage complet est indispensable pour éviter toute projection dangereuse de zinc liquide lors de la galvanisation.

Le bain de fluxage doit être suivi régulièrement en contrôlant des paramètres comme la densité, le pH et la teneur en fer. La purification se fait généralement par ajout d'eau oxygénée, qui précipite les sels ferriques au fond du bain, lesquels sont ensuite évacués par siphonnage. Les installations modernes intègrent des systèmes automatisés de décantation et de filtration en continu, améliorant la stabilité et la propreté du bain.

**B - Galvanisation humide**

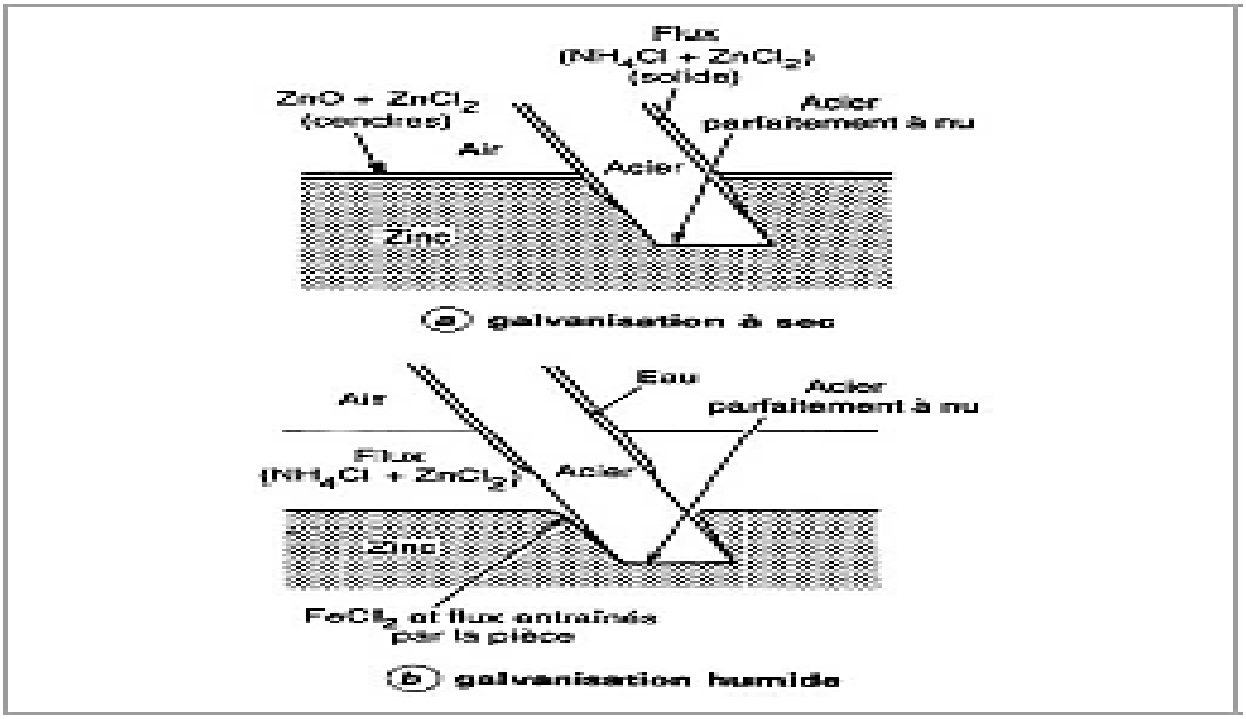
Dans cette méthode, une couche de flux fondu (environ 30 cm d'épaisseur) est maintenue en surface du bain de zinc, et les pièces sont plongées à travers cette couche avant d'être retirées du bain par la zone dépourvue de flux.

Cette technique n'est applicable que si la teneur en aluminium du bain de zinc est inférieure à 0,01 %, car une teneur plus élevée entraînerait des réactions indésirables entre le flux et l'aluminium, réduisant ainsi l'efficacité du traitement.

La couche de flux s'appauvrit progressivement en chlorure d'ammonium ($NH_4Cl$) à cause des réactions chimiques. Pour maintenir son efficacité, des ajouts réguliers de $NH_4Cl$ sont nécessaires. (**Voir la Figure II.4**)

Actuellement, la galvanisation à sec est majoritairement utilisée dans l'industrie, en raison de sa flexibilité et de ses performances. La galvanisation humide reste encore employée pour des applications spécifiques, notamment pour les petites pièces, les feuilles métalliques fines et les fils.

**Figure II. 4**: Représentation schématique des deux procédés De galvanisation humide **[23]**




### II.5.1.2. Galvanisation

Une fois les étapes de préparation de surface achevées, les conditions sont réunies pour garantir un contact optimal entre l'acier et le zinc fondu. L'opération de galvanisation proprement dite, qui consiste en l'immersion de l'acier dans un bain de zinc liquide, peut alors être effectuée.

#### II.5.1.2.1. Aciers à galvaniser

Tous les types d'acier peuvent être galvanisés, mais le résultat final dépend fortement de leur composition chimique, en particulier de leur teneur en silicium et en phosphore.

**Aciers de construction courants** :

On distingue plusieurs classes en fonction de la teneur en silicium (Si) et de la somme Si + 2,5P :

**Classe I** : Si < 0,03 % et Si + 2,5P < 0,09 % ;

**Classe II** : Si < 0,04 % et Si + 2,5P < 0,11 %.
Les aciers contenant entre **0,15 % et 0,25 % de silicium** peuvent également donner des résultats acceptables, ce qui justifie l'étude d'une **classe III en cours de normalisation**.

**Aciers à haute résistance** :

Grâce à l'utilisation d'**inhibiteurs spécifiques lors du décapage**, on évite l'absorption d'hydrogène, ce qui prévient la fragilisation des aciers à très haute limite d'élasticité (1 600 à 1 650 MPa).

Cela permet leur galvanisation, notamment pour des applications exigeantes comme les **câbles de ponts suspendus**. Des **précautions supplémentaires au refroidissement** peuvent être nécessaires pour préserver les propriétés mécaniques de ces aciers.

### II.5.1.2.2. Bains de galvanisation

### A. Composition

La composition chimique des lingots de zinc standard utilisés pour la galvanisation est définie dans la norme NF A 55-101 (**voir tableau 1**).

Pour certaines applications spécifiques, des ajouts d'éléments alliés tels que aluminium (Al), béryllium (Be), magnésium (Mg), nickel (Ni) peuvent être demandés. Ces ajouts doivent faire l'objet d'une spécification contractuelle, et leurs teneurs ne sont pas comptabilisées dans les matières étrangères totales.

La qualité Z7 est généralement privilégiée pour les bains standards. Toutefois, des bains faiblement alliés ont été développés pour répondre à des problématiques spécifiques liées à la composition des aciers, notamment en présence de silicium.

C'est le cas des bains Technigalva et Polygalva, conçus pour limiter les réactions indésirables avec certains aciers. Ces formulations particulières peuvent nécessiter un ajustement des conditions de préparation de surface, notamment au niveau du décapage et du fluxage.

**Tableau II. 1:** Composition chimique d zinc selon le norme NF A-55-101[24]

| Désignation des types normaux | Teneur minimale en zinc (% en masse) | Matières étrangères : teneur maximale (%) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Pb | Cd | Fe | Sn | Cu | Al | Total |
| Z9 | 99,995 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,005 | 0,005 |
| Z8 | 99,95 | 0,03 | 0,02 (1) | 0,02 | 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,05 |
| Z7 | 99,50 | 0,45 | 0,15 (1) | 0,05 | (1) | 0,005 | 0,01 | 0,50 |
| Z6 | 98,50 | 1,4 | 0,20 | 0,05 | 0,5 | 0,03 | 0,02 | 1,5 |
| Z5 | 98 | 1,6 | 0,25 | 0,08 | 0,5 | ..... | ..... | 2 |
| Z4 | 97,75 | 1,75 | 0,25 | 0,10 | ..... | ..... | ..... | 2,25 |

**Tableau II. 2:** Composition chimique (bains faiblement alliés). **[25]**

| Type de bain | Teneur minimale en Zn (%) | Pb (%) | Al (%) | Mg (%) | Sn (%) | Ni (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Z7 | 99,5 | 0,5 à 1 | 0,005 à 0,015 | ..... | 0,002 à 0,03 | |
| Zinc allié Al | 98,5 | 0,3 à 1 | 0,035 à 0,040 | 0,005 à 0,008 | 0,03 à 0,15 | |
| Polygalva® | 98,5 | 0,1 à 1,5 | 0,03 à 0,06 | 0,002 à 0,02 | 0,10 à 0,30 | |
| Technigalva® | 98,5 | 0,5 à 1 | 0,002 | ..... | 0,001 | 0,1 à 0,14 |

**Types de bains faiblement alliés**

Bain Technigalva (allié au nickel)

- **Avantages** :

Permet de limiter les effets négatifs du silicium jusqu'à des teneurs de l'ordre de 0,20 % ;

Offre une utilisation simple et bien maîtrisée ;

Présente une meilleure fluidité que le zinc pur, ce qui facilite le traitement des pièces.

- **Inconvénients** :

Son efficacité devient limitée au-delà de 0,20 % de silicium, n'apportant qu'une amélioration esthétique modérée ;

Sur les aciers faiblement alliés en silicium, la couche de zinc déposée est plus fine (réduction de 10 à 15 µm par rapport au zinc standard), ce qui peut être problématique si des épaisseurs minimales sont exigées par le cahier des charges. Une prolongation significative du temps d'immersion est alors nécessaire pour compenser cette perte ;

L'utilisation du nickel **augmente légèrement la formation de mattes** (environ **1 kg par tonne d'acier**) ;

Le **risque de formation de mattes flottantes** est accru, en raison de la présence de nickel dans les composés intermétalliques, pouvant entraîner la **présence de grains** sur les surfaces traitées.

Bain Polygalva (allié à l'aluminium et au magnésium)

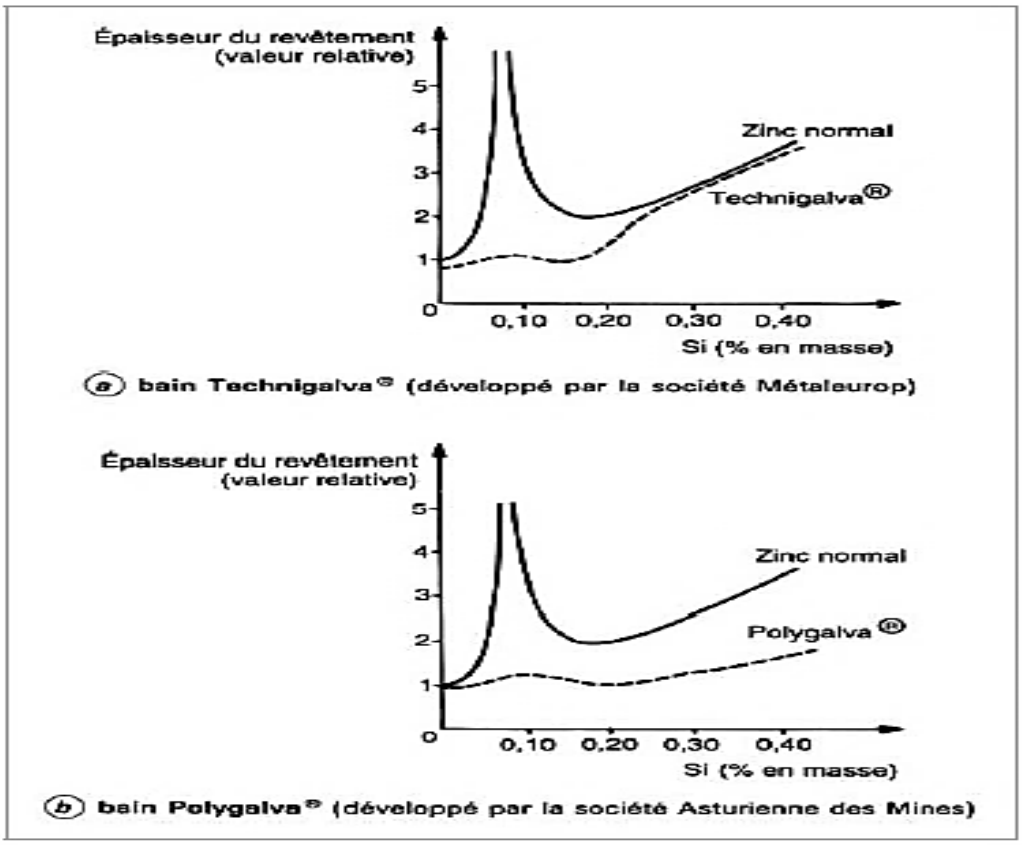
- **Avantages** :

Permet de résoudre la quasi-totalité des problèmes liés à la présence de silicium dans les aciers ;

Le rôle de l'aluminium est de réduire la réactivité des aciers au contact du zinc fondu ;

Le magnésium, quant à lui, compense les effets inhibiteurs de l'aluminium en jouant un rôle de réducteur superficiel, évitant ainsi des défauts de mouillabilité ou de prise de zinc.

**Figure II. 5:** Amélioration de la galvanisation d'aciers au silicium par l'utilisation de bains faiblement alliés. **[26]**



➢ **Inconvénients :**

- Il exige une préparation de surface soignée notamment dégraissage et séchage (risques de défauts de galvanisation) ;
- Il exige un suivi analytique régulier du bain de zinc à cause d'une fourchette serrée en aluminium (analyse hebdomadaire) ;
- On constate une légère diminution de fluidité du zinc, à cause de la présence de magnésium.

❖ Des bains Zn + 5 % Al + Na + Mg semblent se développer (Supergalva) améliorant sensiblement la tenue à la corrosion des revêtements (figure II.5). Leur mise en œuvre pourrait aussi apporter des avantages technologiques, comme une quantité de mattes plus faible, une température du bain plus basse (fusion 382°C), une bonne fluidité lors de l'égouttage ; par contre ils nécessitent un fluxage spécial.

Il reste quand même qu'il est difficile d'avoir des informations précises autres que des données qui semblent issues de laboratoires et donc leur utilisation industrielle semble douteuse.

**A. Température**

- Chauffage des creusets : la chauffe doit être la mieux répartie possible pour éviter les points chauds, risques de percements, de déformations localisées, etc.

Différents procédés existent :

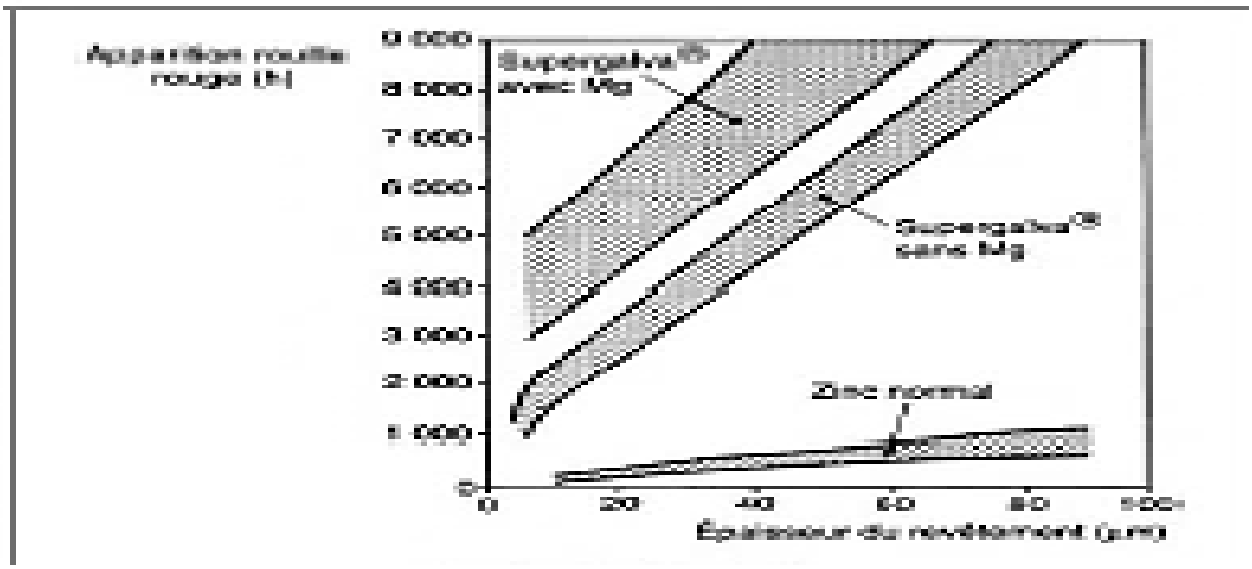
- Les panneaux de résistances radiants (chauffage électrique) ;
- Les brûleurs radiants (fuel, gaz naturel) ;
- La convection forcée (air chauffé par des brûleurs) ;
- La voûte radiante.

Deux types de creuset sont possibles :

- Creuset de fer doux ;
- Creuset céramique (réduction des mattes, température de travail plus élevée).

- Action de la température : la plupart des réactions chimiques mises en cause lors de la galvanisation (réactivité Fe-Zn, formation des cendres, etc.) sont thermiquement activées. Pour réduire la formation des mattes, des oxydes on a donc intérêt à travailler à la température la plus basse possible compatible avec une fluidité correcte du bain. La fourchette classique est 445 à 460°C.

**Figure II. 6:** Tenue à la corrosion des revêtements obtenus Dans des bains Supergalv **[27]**




**Zone critique de température :**

La plage de 490 à 530 °C constitue une zone thermiquement dangereuse, car elle intensifie fortement la réaction entre le zinc et le fer, entraînant la formation excessive de mattes et la constitution d'un revêtement épais mais fragile.

Au-delà de cette plage, les creusets métalliques utilisés pour contenir le bain de zinc voient leur durabilité compromise en raison de la température élevée.

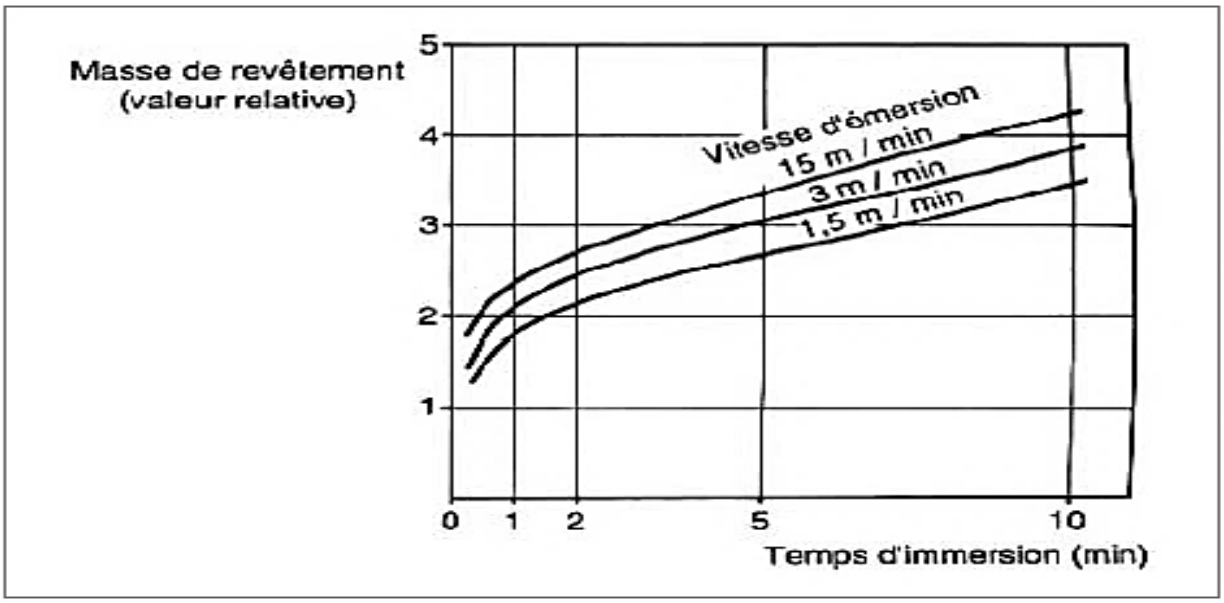
### II.5.1.2.3. Immersion

Lors de l'immersion d'une pièce dans le bain de zinc, plusieurs phénomènes se produisent simultanément (**Voir Figure II.7**) :

**Échanges thermiques** entre la pièce et le bain jusqu'à atteinte d'un équilibre thermique.

**Destruction du flux** protecteur en surface, assurant ainsi un **mouillage optimal** de la pièce par le zinc.

**Figure II. 7:** Influence de la vitesse d'émersion Sur la masse de revêtement déposée **[28]**




L'immersion provoque également l'apparition de **fumées** et de **cendres** à la surface du bain.

Influence de la vitesse d'immersion :

Une vitesse trop lente entraîne la fusion prématurée du flux à la surface de la pièce, ce qui peut laisser l'acier à nu et engendrer une mauvaise adhérence du zinc.

Une vitesse trop rapide peut emprisonner des résidus de sels en surface, car le flux n'a pas le temps de se décomposer et d'éliminer les oxydes, provoquant des défauts d'adhérence ou de mouillage.

Vitesse recommandée : 2 à 3 m/min, afin d'assurer un bon compromis entre qualité du dépôt et remplissage homogène des pièces.

Durée d'immersion :

Elle varie selon la masse, la forme et les dimensions des pièces, mais se situe généralement entre 4 et 10 minutes.

Avant la sortie des pièces, les cendres flottantes doivent être écartées manuellement (spatulées) pour éviter leur dépôt sur les surfaces galvanisées.

### II.5.1.2.4. Sortie du bain

**Émersion**

La vitesse de sortie du bain a une influence directe sur l'épaisseur de la couche externe de zinc pur (η). Elle conditionne l'écoulement du zinc fondu ainsi que sa vitesse de solidification.

Vitesse d'émersion conseillée : entre 0,5 et 2 m/min, selon la géométrie des pièces et les exigences de qualité de surface (réduction des coulures, gouttes, etc.). L'inclinaison des pièces est également ajustée pour améliorer le drainage.

Pour les petites pièces comme les boulons, une centrifugation immédiate permet d'éliminer l'excès de zinc, notamment dans les zones filetées. Cela impose que le zinc reste à l'état liquide, d'où l'importance de minimiser le temps entre émersion et centrifugation.
La vitesse de rotation des paniers perforés peut atteindre 700 tr/min.

- L'émersion peut être accompagnée d'un vibrage qui facilite :
- Le détachement des oxydes et sels brûlés qui retournent dans le bain ;
- Un meilleur égouttage, favorisant un revêtement uniforme ;
- L'éviction des collages entre pièces.
- Ce vibrage peut être généré par des systèmes mécaniques, électriques ou pneumatiques.

- **Refroidissement**

Le refroidissement, souvent réalisé à l'air libre, est une étape critique selon la nature des pièces :

Pour les pièces massives, un refroidissement lent favorise la poursuite des réactions de diffusion entre fer et zinc, épaississant les couches Fe-Zn au détriment de la phase η. Dans ce cas, un refroidissement à l'eau est recommandé, si la pièce le permet, pour bloquer ces réactions.

Pour les pièces galvanisées à haute température (ex. : petites pièces centrifugées), un refroidissement rapide à l'eau est indispensable pour solidifier le zinc efficacement.

Cette étape peut également inclure des post-traitements, comme l'application d'huiles solubles (aspect brillant) ou la chromisation (protection antirouille blanche).

### II.5.1.3. Contrôle de la galvanisation, précautions et défauts

#### a. Normalisation et contrôle

La norme NF A 91-121 définit les exigences pour la galvanisation à chaud des produits finis en acier. Elle fixe les masses et épaisseurs minimales du revêtement :

**Tableau II. 3** : Types des aciers près a galvanisation a chauds selon la norme (**NF A91-121**) **[29].**

| **Type de pièce** | **Masse minimale (g/m²)** | **Épaisseur minimale (µm)** |
|---|---|---|
| Acier < 1 mm | 350 | 49 |
| 1 mm ≤ Acier < 3 mm | 400 | 56 |
| 3 mm ≤ Acier < 5 mm | 450 | 63 |
| Acier ≥ 5 mm | 500 | 70 |
| Écrous et boulons (> 9 mm) | 375 | 52 |
| Pièces moulées | 500 | 70 |

Une **norme européenne** est en cours de développement et proposera des exigences différentes.

Les contrôles comprennent :

- **Inspection visuelle** ;
- **Essais non destructifs** (mesure d'épaisseur par appareil magnétique étalonné) ;
- **Essais destructifs** :
  - Mesure de masse par **double pesée après dissolution chimique**,
  - Test de **continuité au sulfate de cuivre**,
  - **Coupes micrographiques** pour analyser les couches.

#### b. Précautions à la conception des pièces

Pour garantir une galvanisation sans défaut :

**Éviter les corps creux fermés**, qui risqueraient d'exploser dans le bain ;

**Prévoir des points d'accrochage** qui assurent une bonne **circulation du zinc** et évitent la rétention de liquide ;

**Tenir compte de l'épaisseur du revêtement** pour les pièces usinées, notamment les **zones filetées** ;

Prendre en considération les **déformations possibles** dues à l'exposition thermique (440–450 °C) et au refroidissement.

**c. Défauts typiques de galvanisation**

**Grisés, surépaisseurs, écaillages** : causés par une **réactivité excessive de l'acier**, souvent liée à un **excès de silicium, phosphore**, ou à une **température trop élevée / immersion trop longue**.

**Mattes flottantes** (provoquant des grains) : liées à une **mauvaise décantation** du bain, **trop d'agitation**, **gradients thermiques insuffisants** ou **surcharge en mattes**.

**Manques de prise** (zones noires sans zinc) : dus à une **préparation de surface inadéquate** (ex. : dégraissage insuffisant) ou à une **teneur en aluminium trop élevée**, inhibant la réactivité du zinc.

## II.6. Galvanisation à chaud – Principe générale

### II.6.1. Réaction métallurgique

La galvanisation à chaud ne se limite pas à un dépôt superficiel de zinc (comme une peinture), mais implique une réaction métallurgique de diffusion entre le zinc liquide et le fer de l'acier.

Le revêtement formé comprend :

Une ou plusieurs **couches de composés intermétalliques Fe-Zn**, dépendant de la composition du bain et des paramètres opératoires ;

Une couche externe de zinc pur (phase η), déposée par capillarité lors du retrait de la pièce.

#### II.6.1.1. Formation des alliages interfaciaux

Lors de l'immersion :

Le zinc **mouille** la surface de l'acier (dépendant de sa rugosité, propreté, composition);

Le fer **se dissout** partiellement dans le zinc ;

Des réactions de **diffusion** génèrent les couches d'alliages Fe-Zn ou Fe-Al, selon la composition du bain et la température.

Les règles de formation dépendent de deux facteurs :

**1. Thermodynamique** :

Diagramme **Fe-Zn** : phases Γ, $\delta_1$, ζ, η

Diagramme **Fe-Zn-Al (0,1–0,2 % Al)** : formation de phases $\mathbf{Fe_2Al_5}$ et η.

**2. Cinétique** :

Réactions chimiques aux interfaces ;

Diffusion dans les solides et liquides.

Les **paramètres déterminants** sont : qualité de l'acier, température et composition du bain, durée d'immersion, vitesse d'émersion, méthode de refroidissement.

Deux **régimes de croissance** des couches sont observés :

**Mode parabolique** :
m=k1·tm = k_1 \cdot \sqrt{t}m=k1·t
(m : masse de fer réagi, t : temps, $k_1$ : constante de diffusion)

**Mode linéaire** :
m=k2·tm = k_2 \cdot tm=k2·t

**Le type de croissance dépend** :

De la **température du bain** :

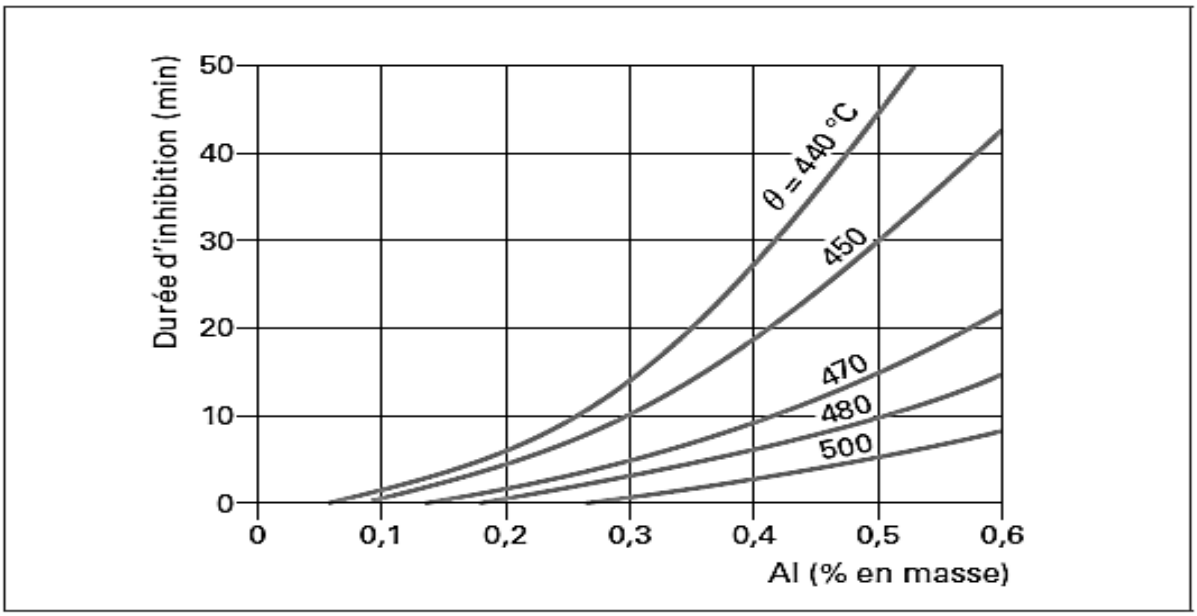
**430 à 490 °C** et **530 à 560 °C** : croissance **parabolique** ;

**490 à 530 °C** : croissance **linéaire** (zone critique).

De la **composition de l'acier**.

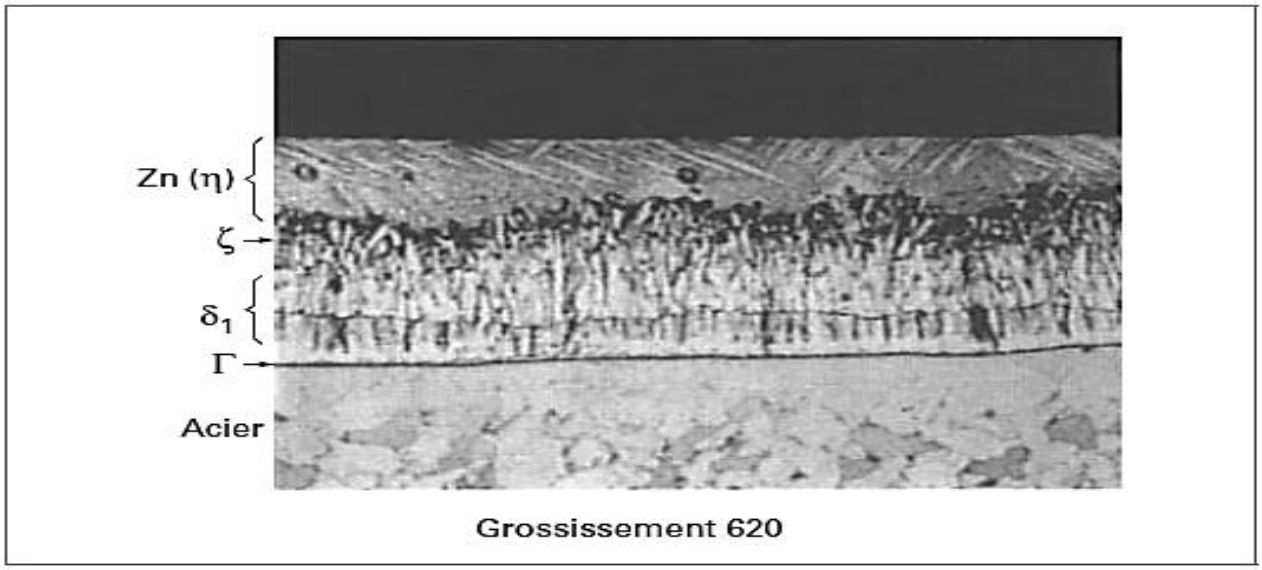
Dans les bains contenant 0,15 à 0,2 % d'aluminium (galvanisation en continu des tôles), la formation d'une couche barrière $Fe_2Al_5$ ralentit considérablement la croissance des couches Fe-Zn..

**Figure II. 8:** Influence de la teneur en aluminium et De la température Du bain de galvanisation sur la durée d'inhibition. **[30].**




Cette barrière présente un temps d'inhibition maximal dépendant de la température et de la quantité d'Al dans le bain (**Figure II.9**), ensuite des phases Fe-Zn apparaissent La réactivité de l'acier (est un paramètre fondamental (pour un temps et une température donnée : vitesse à laquelle se forment les alliages) selon l'image suivant :

**Figure II. 9:** Revêtement galvanisé : bain de zinc pur **[31].**



**Identification des phases :**

- **Acier (base)** : Partie inférieure, substrat métallique.
- **Γ (Gamma)** : Phase inter métallique $Fe_3Zn_{10}$, très mince, juste au-dessus de l'acier.
- **$\delta_1$ (Delta 1)** : Phase $FeZn_7$, apparence en colonnes longues et étroites.
- **ζ (Zêta)** : Phase $FeZn_{13}$, zone plus sombre et granuleuse.
- **Zn (η)** : Couche externe, zinc presque pur, cristaux assez grands.

### II.6.1.2. Diagrammes d'équilibre. (Caractérisation des phases)

Le lecteur se reportera utilement aux articles Diagrammes d'équilibre.

Alliages binaires et Diagrammes d'équilibre. Alliages ternaires de la base documentaire « Étude et propriétés des métaux ».

#### II.6.1.2.1. Diagramme Fe-Zn

Divers auteurs (Schramm, Gelling, Ghoniem...) ont proposé différentes variantes de ce diagramme avec une ou deux phases Γ, la présence de 2 phases δ1 [compacte (δ1K, côté Γ) et palissade (δ1p, côté ζ)], etc.

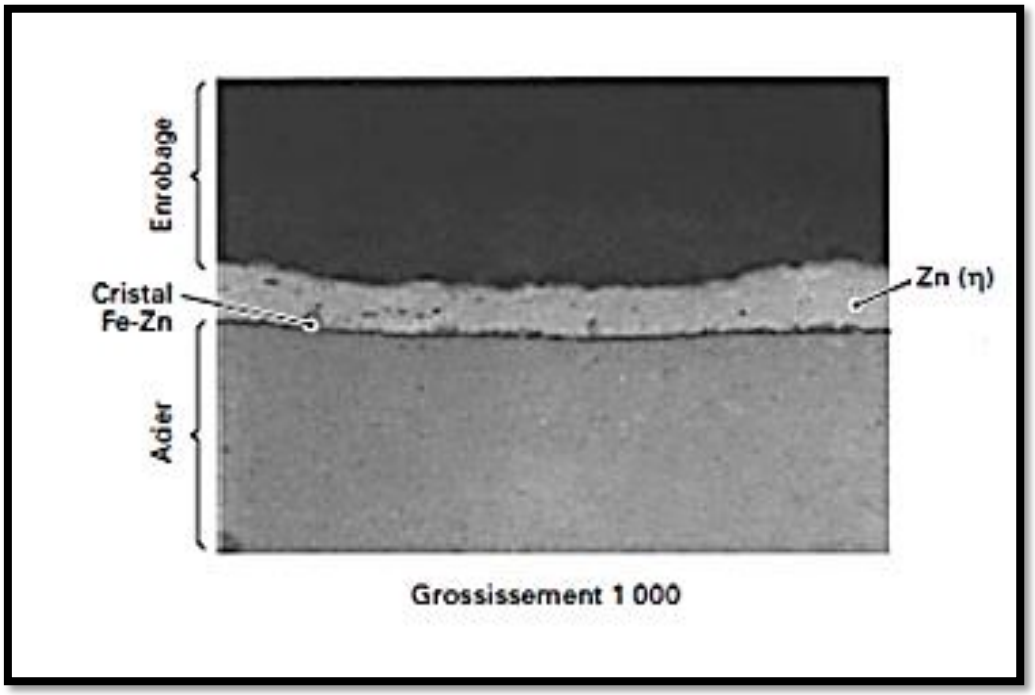
Sur un revêtement du type de la (**Figure II.9**) on distingue successivement plusieurs phases (**Tableau II.4**):

- **Γ** toujours très fine et difficile à visualiser ;

**Tableau II. 4 : Caractéristiques des phases Fe-Zn [32].**

| Phase | Composé | Fer (% en masse) | Système cristallin | Masse volumique ($g/cm^3$) | Dureté Vickers HV |
|---|---|---|---|---|---|
| Êta (η) | Zn | < 0,03 | Hexagonal $a$ = 0,266 nm ; $c$ = 0,495 nm | 7,14 | 37 |
| Dzêta (ζ) | $FeZn_{13}$ | 5 à 6 | | 7,18 | 270 |
| Delta ($\delta_1$) | $FeZn_7$ | 7 à 12 | Hexagonal $a$ = 1,28 nm ; $c$ = 5,76 nm | 7,25 | 450 à 470 |
| Gamma (Γ) | $FeZn_3$<br>$FeZn_{10}$<br>$Fe_5Zn_{21}$ | 21 à 28 | Cubique $a$ = 0,9 nm | 7,36 | 510 à 550 |
| | Acier | 100 | Cubique faces centrées | 7,85 | 150 |

**Figure II. 10**: Revêtement galvanisé bain **[31]**




Zn + 0,16 % Al

•$\delta_1$ composée de deux couches de mêmes caractéristiques physiques, mais se différenciant par leur structure métallographique :

•$\delta_{1K}$ bande continue fine,

•$\delta_{1p}$ bande plus épaisse à l'aspect microfissure (au total 15 à 20 % de l'épaisseur du revêtement);

•$\zeta$ sous forme de bâtonnets perpendiculaires au métal support.

Cette dernière phase peut atteindre 50 % du revêtement.

On peut noter que les alliages Fe-Zn sont d'une grande dureté par rapport à l'acier de base Cela peut conférer au revêtement des Propriétés particulières Mais cette dureté s'accompagne aussi de fragilité et, lors du refroidissement du produit galvanisé ou ultérieurement lors de la mise en œuvre, des contraintes internes voire des fissures peuvent apparaître dans les couches d'alliage.

### II.6.1.2.2. Diagramme Zn-Al

À l'état liquide, le zinc et l'aluminium sont totalement miscibles. En revanche, à l'état solide, le système se compose de deux phases distinctes :

**α** : solution solide riche en aluminium ;

**β** : solution solide riche en zinc.

Aucun composé intermétallique ne se forme dans ce système. Un eutectique est présent à environ **5 % d'aluminium**, et à l'état solide, la solubilité de l'aluminium dans le zinc est très faible, de l'ordre de **0,05 %**.

#### II.6.1.2.3. Diagramme Zn-Fe-Al

L'analyse du diagramme ternaire **Zn-Fe-Al** (figure II.9) révèle plusieurs points essentiels :

Le fer et l'aluminium ont une **forte affinité chimique**, formant de nombreux **composés intermétalliques**.

Les composés $\mathbf{Fe_2Al_5}$ et $\mathbf{FeAl_3}$ peuvent **dissoudre entre 10 et 15 % de zinc** en solution solide.

La **solubilité de l'aluminium** dans les phases **Γ** et **ζ** est faible, contrairement à la phase $\boldsymbol{\delta_1}$ où elle est plus significative.

La phase **δ (Fe-Zn)**, normalement stable au-dessus de **600 °C**, peut apparaître dès **500 °C** en présence d'aluminium.

### II.6.2. Étapes clés d'un procédé de galvanisation

Quel que soit le procédé utilisé, on retrouve les mêmes étapes fondamentales, bien que les technologies puissent varier :

**Préparation de surface**

Objectif : nettoyer l'acier de toute contamination externe (poussières, huiles, particules d'abrasion) et interne (oxydes).

Un fluxage peut être ajouté pour améliorer l'adhérence et la réactivité du zinc.

→ La qualité de cette étape est cruciale pour l'adhérence et la structure uniforme du revêtement.

**Immersion dans le zinc fondu**

Cette opération définit la **composition chimique du revêtement**.

**Sortie du bain**

La quantité de zinc entraînée peut être ajustée selon les exigences du produit. Les techniques incluent :

- Égouttage
- Vibrage
- Essorage par jets de gaz ou dispositifs électromagnétiques

→ Cela permet un **contrôle précis de l'épaisseur du dépôt**.

**Post-traitements**

Le refroidissement influence la cristallisation de surface.

Des traitements chimiques peuvent améliorer la durabilité et l'aspect visuel (brillance, résistance à la corrosion).

### II.6.3. Rôle du zinc dans la protection contre la corrosion

La corrosion correspond à la **dégradation des métaux** dans des environnements agressifs, phénomène naturel tendant à ramener le métal à son **état oxydé stable**.

Le zinc comme barrière anticorrosion

Le zinc est largement utilisé dans :

- La galvanisation
- L'électro zingage
- Les peintures riches en zinc
- La métallisation
- La shérardisation

Cela repose sur deux propriétés principales :

Ses **produits de corrosion protecteurs** Son **rôle sacrificiel** dans les systèmes ferreux.

#### II.6.3.1. Zinc et produits de corrosion

Propriétés physiques

- **Symbole** : Zn
- **Masse atomique** : 65,38
- **Densité** : 7,14
- **Fusion** : 419 °C
- **Ébullition** : 907 °C

**Comportement chimique**

Bien que **thermodynamiquement peu stable**, le zinc s'oxyde facilement en libérant des ions **$Zn^{2+}$** :
→ Zn → $Zn^{2+} + 2e^-$

Ces ions réagissent avec des espèces chimiques présentes pour former des composés peu solubles, agissant comme une barrière protectrice, par exemple :

- **Carbonate de zinc ($Zn\ CO_3$).**
- **Hydroxy-carbonate ($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$).**
- **Hydroxyde de zinc ($Zn\ (OH)_2$).**

Ces produits de corrosion ralentissent la diffusion de l'oxygène et d'autres agents agressifs vers le métal sous-jacent.

### II.6.3.2. Protection électrochimique

La corrosion électrochimique repose sur la formation de piles locales. Quatre éléments sont nécessaires :

- Un électrolyte (ex : humidité, sol).
- Deux électrodes à potentiels différents.
- Une liaison électrique.

L'anode (potentiel plus négatif) se corrode par oxydation ; la cathode est protégée par réduction.

Dans le cas du zinc sur l'acier :

Si le revêtement est endommagé, une pile se forme :
→ le zinc devient l'anode sacrificielle
→ le fer est protégé (cathode).

Cette réaction lente de corrosion du zinc permet :

- Une autoprotection du fer
- Une "cicatrisation" locale grâce aux composés formés (oxydes, carbonates...)

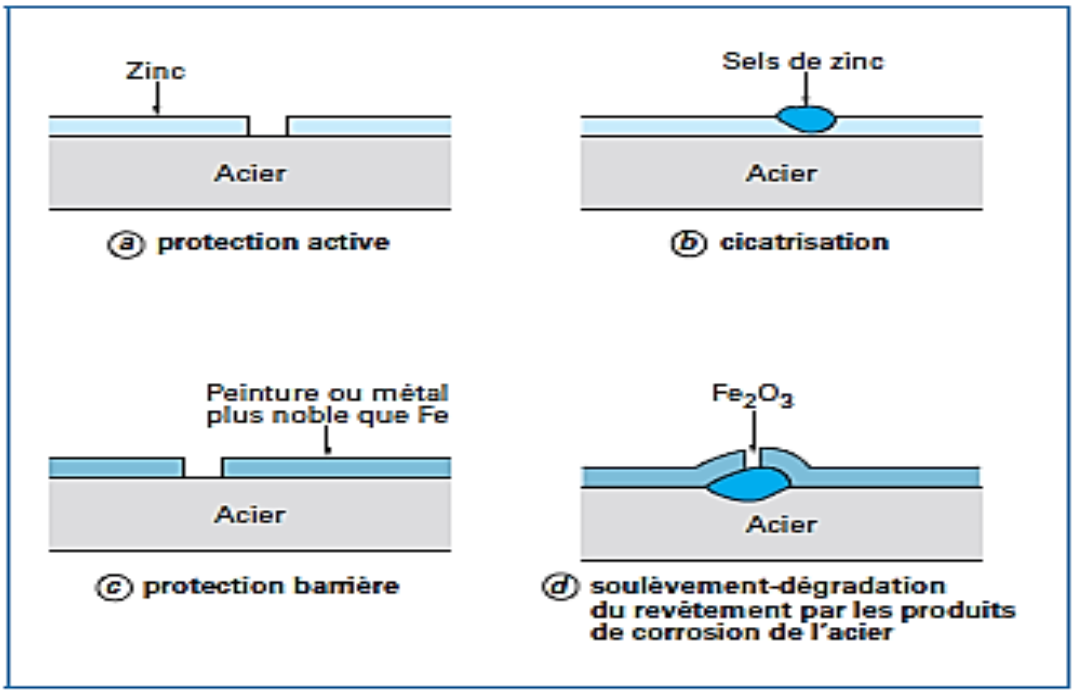
Le **Figure II.11** illustre deux types de protection offerts par les revêtements métalliques :

- **(a) Protection active** : le zinc, métal moins noble que le fer, se corrode préférentiellement, protégeant ainsi l'acier sous-jacent (protection cathodique).
- **(b) Cicatrisation** : les produits de corrosion du zinc (sels de zinc) colmatent localement les défauts, limitant la propagation de la corrosion.

- **(c) Protection barrière** : un revêtement noble (ex. peinture ou nickel) agit comme barrière physique à l'humidité et aux agents corrosifs.
- **(d) Défaillance barrière** : en cas de défaut, les produits de corrosion du fer ($Fe_2O_3$) soulèvent le revêtement, entraînant sa dégradation.

Ces deux approches (active et passive **Figure II.11**) montrent les avantages spécifiques des revêtements métalliques, notamment la galvanisation, dans la protection durable des structures en acier.

**Figure II. 11:** Deux cas possibles de protection active ou sacrificielle (a-b), passive ou barrière (c-d) **[33]**




## II.7. L'unité Anabib :

L'Unité Anabib Tebessa (Tube Gaz de Tébessa « TGT ») a fait l'objet de maturation entre 1977 et 1980. Dans le cadre du développement des zones frontalières Algérie-Tunisiennes, le projet a été transféré à Elma-Labiod wilaya de Tébessa. L'unité est conçue pour produire les tubes soudés longitudinalement à haute fréquence.

Son activité couvre la fabrication des:

- Tubes ronds pour canalisation de transport fluide et vapeur (eau, gaz).
- Tubes carrés et rectangle de construction pour diverses industries.
- Accessoires divers de raccordements (manchons, coudes etc.…).

### II.7.1. Matériau :

L'acier à revêtir a été fourni par l'unité d'Anabib Tébessa il peut être utilisé après revêtement pour les canalisations et transport de différent fluide et vapeurs (eaux). Les échantillons sont des tubes galvanisés de 48,3mm de 2,2mm diamètre d'épaisseur. (**Figure II.12**).

**Figure II. 12:** Tubes à galvanisés **[34]**




- ✓ La composition chimique et les caractéristiques mécaniques du substrat sont données dans le **Tableau II.5.**

**Tableau II. 5 :** Caractéristiques mécaniques et chimiques de substrat [16].

| Bobines Laminées à Chaud Nuances S235JR (E24-2) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Analyses Chimiques | | | | | | Caractéristiques Mécaniques | | |
| C% | Mn% | Si% | S% | P% | Al% | Re ($N/mm^2$) | Rm ($N/mm^2$) | A% |
| 0.07 | 0.34 | 0.02 | 0.007 | 0.006 | 0.009 | 315 | 406 | 33 |

- ✓ Composition chimique du bain du zinc **:** Le bain de zinc contient du zinc pur et 0.02**%** d'AL. La composition chimique de type de zinc en lingots utilisé au niveau de l'entreprise Anabib est donnée du le **Tableau II.6** Suivent :

***Tableau II. 6 :*** *La composition chimique de zinc [16].*

| Tableau III.2: composition chimique de zinc | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Désignation Des types norme | Teneur minimale En zinc (% en masse) | Matières étrangères : teneur maximale (%) | | | |
| | | Pb | Cd | Fe | Cu |
| Z9 | 99.995 | 0.003 | 0.003 | 0.002 | 0.001 |

En plus il Ya une addition de l'aluminium sous forme de Zamak pour améliorer l'aspect du revêtement. La composition chimique de zamak est donnée dans le **Tableau II.7**.

**Tableau II. 7 :** La composition chimique de zamak [16].

| Eléments | Al | Mg | Zn |
|---|---|---|---|
| % massique | 3.90 | 0.03 | 96.07 |

### II.8. Préparation des échantillons :

Les échantillons sont des tubes laminés à chaud de dimensions 48,3 × 2,2 (mm).

### II.8.1. Polissages des surfaces du substrat :

La préparation du substrat comporte un polissage mécanique à l'aide des papiers abrasifs, la durée de chaque opération est d'environ deux minutes.

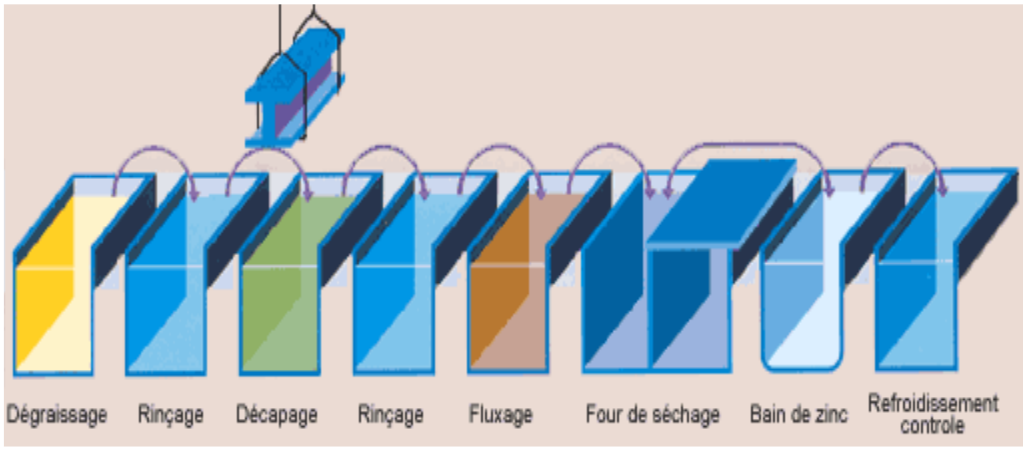
### II.8.2. Prétraitement :

Pour éviter tout défaut ultérieur de protection, toute opération de traitement de surface doit être précédée d'une préparation de surface, ou prétraitement qui doit permettre la mise à nu du matériau de base. En effet, l'interposition de matériaux étranges, plus ou moins localisés, provoque des défauts dans le revêtement, concernant notamment son adhérence au support, sa compacité et sa continuité [16] Le prétraitement est un traitement préalable de la surface à traiter. Il comprend les opérations dans l'ordre suivant (Figure II.17):

- Dégraissage.
- Rinçage.
- Décapage.
- Rinçage.
- Fluxage.

- Préchauffage.
- Galvanisation.

**Figure II. 13:**Représentation des différentes étapes de la galvanisation de produits finis **[17]**.




## II.9. Technique de position :

Les échantillons ont été galvanisés par immersion dans le bain de zinc, dont la température est maintenue à 450C°. Les temps d'immersion testés sont de : (1min, 5 min, 10 min et 20 min). (**Figure II.14**).

**Figure II. 14**: Echantillons galvanisés. **[34]**




## II.10. Spécification du revêtement des tubes :

La norme française NFA 49-700 spécifie les règles aux revêtements et essais relatifs :

- La masse de zinc déposée par unité de surface ;
- La continuité du revêtement ;
- L'adhérence du zinc sur l'acier.

### II.10.1. Contrôle de la masse surfacique de zinc :

Vu l'importance de ce paramètre, il existe un grand nombre de méthodes de mesure pouvant être utilisées. Une méthode destructive et une méthode non destructive.

**Méthode non destructive:(**contrôle de l'épaisse de la couche déposée**)**

La mesure est faite à l'aide d'un appareil (NEO-DERM-MITUTOYO), son principe de fonctionnement est basé sur les propriétés magnétiques des dépôts. (**Figure II.15**)[18].

**Figure II. 15:** mesure de L'appareil. **[34]**




❖ **Méthode destructive :**

- **Principe** : Après dégraissages de l'échantillon, on détermine la masse M en grammes de zinc déposée sur l'échantillon en mesurant la différence entre la masse de l'échantillon revêtu et celle de l'échantillon après dissolution du zinc dans une solution d'acide chlorhydrique inhibée à la pyridine.
- **Réactifs :** Le réactif employé est une solution d'acide chlorhydrique et de pyridine comprenant:
  - 100 ml d'acide chlorhydrique pur pour analyse ($P_{20}$ = 1.19g/ml).
  - 2,5 ml d'une solution de pyridine.
- **Appareillage :**

  Balance d'une précision de 0.01g. **(Figure II.16**).

**Figure II. 16:** Balance. **[**




- **Mode opératoire :**
  - On dégraisse l'échantillon avec du benzène ou du trichloréthylène.
  - On pèse l'échantillon on couvre la surface ont concernée.
  - On plonge l'échantillon dans le réactif.
  - On laisse l'échantillon dans la solution jusqu'à ce que le dégagement d'hydrogène cesse. À l'exception de quelques bulles qui tarderaient à se dégager. La température de la solution ne doit pas excéder 30C°.
  - Après attaque, on lave l'échantillon, à l'eau courante, on l'essuie, puis on le fait sécher à l'air chaud à environ 100C° et on le laisse refroidir.
  - On repese l'échantillon.

- **Calcul de la masse de zinc déposée :**
  - **Surface intérieure :** on pèse les éprouvettes revêtues et celles misent à nu. Les différences de représentent la poids masse de zinc déposée sur la surface intérieure

Etant exprimées en $m^2$, la masse surfacique du revêtement exprimée en $g/m^2$ est : [II.1].

$$\mathbf{M}=\frac{m}{S}\text{..... [II.1].}$$

  - **Surface extérieure :** on effectue la vérification de la masse sur la surface extérieure comme indiqué pour la surface intérieure [II.1].

### II.10.2. Contrôle de la Continuité du revêtement de zinc :

- **Principe :** La continuité du revêtement de zinc est contrôlée en soumettant l'échantillon à des immersions successives dans une solution de sulfate de cuivre. Après immersion, le revêtement doit apparaitre continu et homogène.
- **Réactif :** La Solution de sulfate de cuivre est changée à chaque immersion, elle est préparée de cuivre cristallisé ($CuSO_4$ ,5 $H_2$ O), à raison de 314g de sel ajouté à 1000 ml d'eau distillée. La densité de cette solution doit être de 1.170 $\pm$ 0.002 à la température de 20C°$\pm$ 2C°. La solution doit être bien agitée décantée ou filtrée avant l'emploi. (**Figure II.17**).

- **Mode opératoire :**
  - On dégraisse les échantillons au benzène ou au trichloréthylène ; on les rince ensuite à l'eau distillée et on les essuie avec de l'ouate propre.
  - On met les échantillons dans le réactif.
  - Les échantillons subissent, dans la solution quatre immersions d'une minute chacune. (ils sont tenus verticalement dans la solution sans les agiter**)**
  - Après chaque immersion, on lave aussitôt les échantillons, on les rince à l'eau courante et on les essuie avec de l'ouate de façon à enlever le cuivre déposé (la solution est changée à chaque immersion, et doit être utilisée pour chaque série de quatre immersions). [18].

***Figure II. 17:*** *Solution de sulfate de cuivre ($CuSO_4$)***[34]**



### II.10.3. Contrôle de L'adhérence :

- **Principe :** L'adhérence du revêtement de zinc pour les tubes de dimensions 48,3 × 2,2(mm) est contrôlée par un assai de cintrage à froid.
- **Essai de cintrage :** L'essai est effectué sur une machine à cintrer **(Figure II.18**). Dans le cas d'un essai sur tubes soudés, le cordon de soudure est placé à 90° du plan de la courbure, c'est-à-dire sur la surface neutre. (Un cintrage de 90° est exécuté autour d'un galet formeur ayant un rayon à fond de cannelure égal à huit fois le diamètre extérieur du tube) [18].

**Figure II. 18:** Machine à cintrer **[34]**



### II.11. Technique de caractérisation des produits obtenus :

L'étude porte sur la caractérisation des échantillons galvanisés (dépôts). La mise en œuvre et le contrôle des propriétés du revêtement nécessitent une bonne connaissance de la nature chimique et structurale de la surface. Les méthodes d'analyse utilisés au cours de ce mémoire sont la microscopie optique, microdureté Vickers, une méthode destructive et non destructive de contrôle de l'épaisseur du revêtement.

Aussi contrôle de l'adhérence du revêtement par cintrage [19].

### II.11.1 Observation microscopiques :

L'observation microscopique nécessite un polissage fin de la surface et de la coupe du dépôt à observer (**Figure II.19**). Le polissage mécanique, est manuelle, il vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à brader la surface, sous une charge constante, à l'aide de papiers revêtus de carbure de silicium (Sic) de grade progressif (80,320,500,et 1000), montés sur des tourets de polisseuse dont la vitesse est de 300 tr/min. La diminution de la taille des grains d'un papier abrasif à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité

moyenne. Un nettoyage à l'acétone et un séchage par flux d'air chaud termine le polissage mécanique. Le réactif d'attaque utilisé est le nital à 1%, les échantillons est abondamment lavés, puis parfaitement séchés par permettre une bonne observation microscopique [19].

**Figure II.19 : Polisseuse** de finition MECAPOL P300**[34]**.




### II.11.1.1 Microscope optique :

**Figure II. 20:** Microscope optique **[34] .**




Un microscope métallographique optique universel de type (ZEISS MC100) permet l'observation des échantillons, avec un grandissement qui varie de 5 à 100.Ce microscope s'accompagne d'une caméra. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation des surfaces, et des coupes transversales (**Figure II.20**).

## II.12. Microdureté :

Cet essai consiste à mesurer l'empreinte faite dans une partie du dépôt. Il permet d'estimer la résistance à l'usure. Les mesures des dépôts ont été effectuées sur des surfaces ou des coupes polies. Elles ont été réalisées avec un inventeur de type Vickers. Des charges de 10gf ont été appliquées pendant 10 à 15 secondes. L'appareillage utilisé est un duromètre (Micro Dur Krantkràmer revanson), équipé d'un pénétrateur diamant Vickers (**Figure II.21**). Les valeurs obtenues résultent de la moyenne de 05 mesures. [19].




**Figure II. 21:** Microdureté **[34].**

## Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail le procédé de galvanisation à chaud, qui constitue l'étape essentielle du traitement de surface appliqué aux aciers. L'accent a été mis sur les paramètres critiques du procédé, notamment le temps d'immersion dans le bain de zinc et les traitements thermiques post-galvanisation, qui jouent un rôle déterminant dans la qualité, l'adhérence et les propriétés mécaniques de la couche déposée. À travers l'analyse de la littérature, nous avons défini les conditions de galvanisation permettant d'atteindre une gamme étendue de caractéristiques souhaitées telles que la dureté, la morphologie et la microstructure. De plus, les différentes techniques de caractérisation utilisées pour évaluer les dépôts ont été abordées, ainsi que les étapes de préparation des échantillons nécessaires à leur analyse. Ces éléments constituent la base méthodologique sur laquelle repose la partie expérimentale de cette étude.

# CHAPITRE III :
# Techniques expérimentales

### III.1. Introduction

L'expérience est le complément indispensable de la théorie et l'argument de chacun Questions sur le comportement mécanique de l'acier avant (ébauche) et après (production Terminé). Dans cette étape, nous pouvons effectuer une série d'expériences (analyse chimique, traction, dureté et résilience) sur des éprouvettes plates.et d'autre part, nous pouvons calculer les paramètres responsables du processus d'emboutissage. Les résultats sont enregistrés et commentés.

## III.2. Matériaux et procédure expérimentale

### III.2.1. Choix du métal de base

L'acier de construction E24-2, Nuance selon l'ancienne norme française (NF A 35-501). Il existe plusieurs types de classification des aciers basée soit sur leur composition chimique, soit sur leurs caractéristiques mécaniques. La classification couramment utilisée en construction métallique est la nuance d'acier qui est définie par sa limite d'élasticité Re, (Tableau III.1) [8].

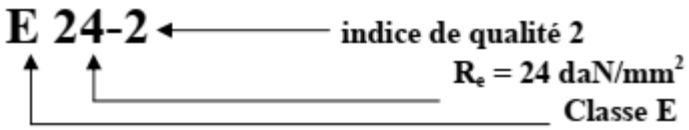



**Tableau III. 1– Équivalences des nuances entre les normes NF EN 10025-2, NF 10025 et NF A 35-501[41]**

| Nuance selon NF EN 10025-2 | Nuance selon l'ancienne norme NF EN 10025 | Nuance selon l'ancienne norme NF A 35-501 |
|---|---|---|
| S235JR | S235JR | E 24-2 |
| S235J0 | S235J0 | E 24-3 |
| S235J2 | S235JRG3 | E 24-4 |

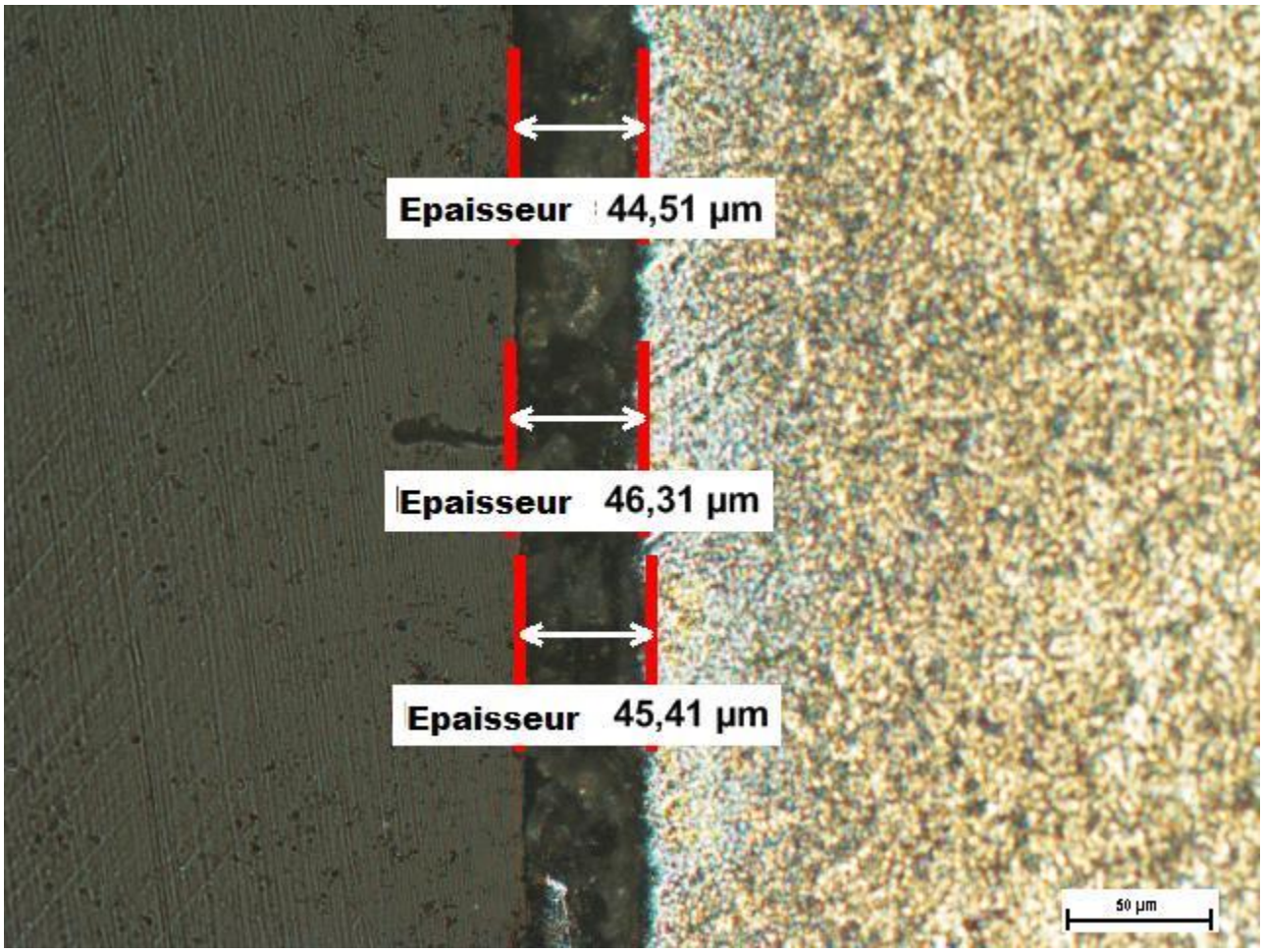



**Figure III. 1 : Mesure de l'épaisseur de la couche de revêtement**

**Ref : Mémoire Annaba Tourqui**

### III.1.3. Analyse chimique de l'acier

L'analyse spectrale prend une part exceptionnelle à côté des examens mécaniques et chimiques. En peu de temps, elle livre des informations sur l'échantillon en déterminant avec certitude aussi bien les concentrations importantes en éléments d'alliages, que pour les petites teneurs en impuretés indésirables. Elle est l'un des moyens les plus rationnels pour le contrôle des nuances en usine **[5].** La composition chimique de l'acier décarburé utilisés dans notre étude est répertoriée dans le tableau III.2.

**Tableau III. 2:** Composition chimique du métal de base **[50].**

| % C | % Mn | % Si | % P | % Al | % S |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.06 | 0.45 | 0.04 | 0.02 | 0.05 | 0.02 |

A partir du tableau ci-dessus, on remarque que la tôle de l'acier à une teneur en carbone très faible, c'est ce qui nous permet de dire que l'acier S235JR est un acier doux Le pourcentage des additifs de notre acier est aussi faible.

- **Propriétés physiques de l'acier**

Les différentes Propriétés physiques des aciers utilisés sont répertoriées dans le tableau. III.3.

**Tableau III. 3:** Propriétés physiques et mécaniques de l'acier S235 **[5].**

| **Propriétés physiques** | **Valeur** | **Unité** |
|---|---|---|
| Masse volumique 20° C | 7.86 | $Kg/dm^3$ |
| Point de fusion | 1400-1500 | °C |
| Module d'élasticité longitudinal | 210 | GPa |
| Conductivité thermique | 45-55 | W/M.K |
| Conductivité électrique | **7.7** | $M/\Omega\ mm^2$ |
| Résistivité électrique | 0.13 | $\Omega\ mm^2/m$ |
| Coefficient de dilatation linéaire de 20 à 300°C | $12 \times 10^{-6}$ | $°C^{-1}$ |

### III.3- Essais mécaniques

Ils ont pour but les assemblages du point de vue de la résistance et les caractéristiques mécaniques et la vérification que les conditions de mises en œuvre ne mettent pas en cause la résistance globale de l'ensemble. Les différents essais mécaniques sont:

- la traction,
- la dureté,

- la résilience.

### III.3.1. Essai de traction

#### III.3.1.1. Principe de l'essai de traction

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction de façon progressive, généralement jusqu'à la rupture dans le but de définir une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. Un essai de traction est une expérience qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque **[6].** Les éprouvettes du matériau concerné, comportant une partie centrale calibrée à section constante $S_0$ et longueur raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction (Figure III.1).



***Figure III. 2*:** Machine de traction (Deux angles différentes)

### III.3.1.2. Découpage et usinage des éprouvettes

L'éprouvette est constituée soit par un tronçon de tube soit par une bande longitudinale ou transversale découpée dans le tube et ayant l'épaisseur totale de la paroi du tube une éprouvette de section plat usinée dans la tôle **[5].**

Les éprouvettes comportent généralement deux têtes d'amarrage et une partie calibrée de section constante comportant deux repères distants d'une longueur L (figure III.2).

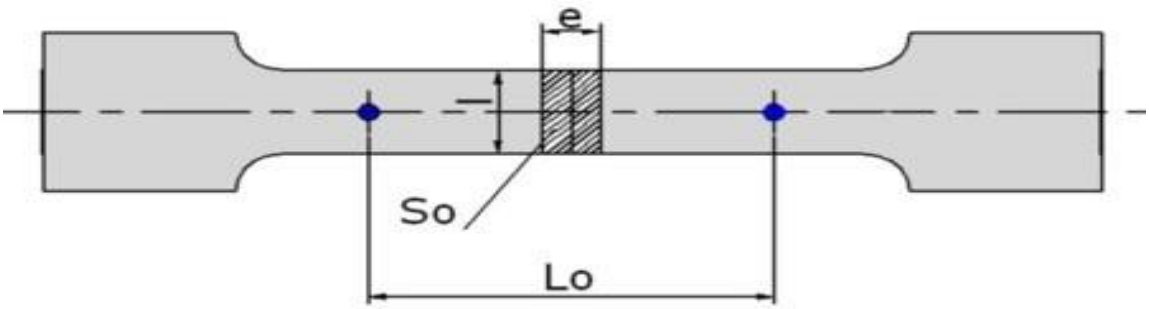



***Figure III. 3*:** Forme générale de l'éprouvette.

On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte. On obtient alors le graphe de la figure (III.3) suivant :

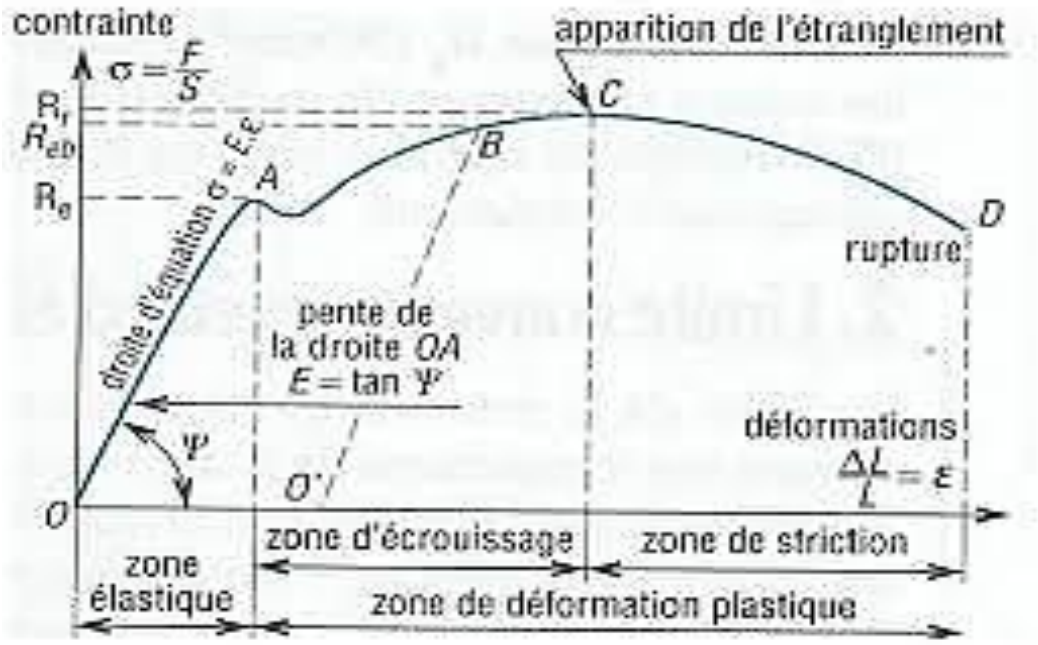



***Figure III. 4*:** courbe de traction conventionnelle.

- **Module d'élasticité longitudinale E (MPa)**

Le Module d'Young E a la dimension d'une contrainte. Il représente la contrainte qu'il faudrait appliquer pour obtenir une d´déformation unité soit doubler la longueur initiale **[57].** La loi d'élasticité est la loi de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad \text{(III.1)}$$

E acier = 210000 Mpa

- **Limite élastique $Re$**

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

$$Re = \frac{Fe}{S0} \qquad \text{(III.2)}$$

Avec :

$Re$ : Limite d'élasticité apparente ($Mpa$)

Fe : charge à la limite apparente d'élasticité (N).

S0 : section initiale (mm2).

Section d'une éprouvette plate initiale

$$S_0 = e_0 \ . l_0 \qquad \text{(III.3)}$$

- **Limite conventionnelle d'élasticité $R_e$ 0,2 Mpa**

On utilise cette détermination pour les courbes de traction où le palier de fin de limite élastique n'apparaît pas nettement. Pour la mesure de $R_e$ on tolère une légère déformation permanente de 0,2% (A% = 0,2) **[50].**

- **Limite maximale de la résistance à la rupture $Rm$ (Mpa)**

C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau avant d'atteindre la zone de striction. Utilisé dans le calcul des organes de sécurité. Souvent appelée résistance à la rupture **[11].**

$$Rm = \frac{Fm}{S_0} \qquad \text{(III.4)}$$

Fm : charge maximale.

- **Allongement à la rupture**

L'allongement à la rupture donne une valeur de l'aptitude du métal à la déformation plastique.

$$A(\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} 100 \qquad \text{(III.5)}$$

$L_f$: Longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture

$L_0$: Long'ueur initiale de l'éprouvette.

- **Déformation rationnelle**

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \mathrm{A}) \qquad \text{(III.6)}$$

- **Striction**

$$Z(\%) = \frac{\Delta S}{S_0} 100 \qquad \text{(III.7)}$$

- **Section finale**

$$S_f = e_f \cdot L_f \qquad \text{(III.8)}$$

### III.3.1.3. Résultats de l'essai de traction

**Tableau III. 4**: résultats de l'essai de traction avant galvanisation.

| | Rm (MPa) | **Rm (MPa) moy** | Re (MPa) | **Re (MPa) moy** | **A (%)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Avant galvanisation** | 421.23 | **448.18** | 266.72 | **260.04** | **20** |
| | 439.06 | | 267.24 | | **23** |
| | 453.19 | | 264.59 | | **26** |
| | 447.92 | | 243.0 | | **29** |
| | 479.50 | | 258.66 | | **32** |

**Tableau III. 5**: résultats de l'essai de traction après galvanisation.

| | Rm (MPa) | Rm (MPa) moy | Re (MPa) | Re (MPa) moy | A (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Apres galvanisation** | 540.22 | **546.65** | 308.01 | **301.81** | **15** |
| | 577.79 | | 339.04 | | **16** |
| | 537.70 | | 292.65 | | **17** |
| | 540.72 | | 289.57 | | **18** |
| | 536.85 | | 279.79 | | **19** |

**Source : réalisé par l'étudiant a partir les résultats expérimentaux.**

**Tableau III. 6:** Données géométriques de l'essai de traction pour une éprouvette avant et après galvanisation

| Type d'éprouvette | N° d'éprouvette | Epaisseur initial $e_0$ (mm) | Largeur initiale $l_0$ (mm) | Longueur initiale $L_0$ (mm) | Section initiale $S_0$ ($mm^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Avant Galvanisation | **1** | **3.5** | **49.4** | **72** | **160.3** |
| Après Galvanisation | **1** | **3.513** | **50** | **74** | **169.2** |

**Tableau III. 7:** résultats de l'essai de traction.

| Type d'éprouvette | $R_e$ (MPA) | Rm (MPA) | A% |
|---|---|---|---|
| Avant Galvanisation | 260 | 448.18 | 26 |
| Après Galvanisation | 301.81 | 546.65 | 17 |

- **Pour résultat détail de l'essai de traction vous pouvez voir l'annexe N°1.**

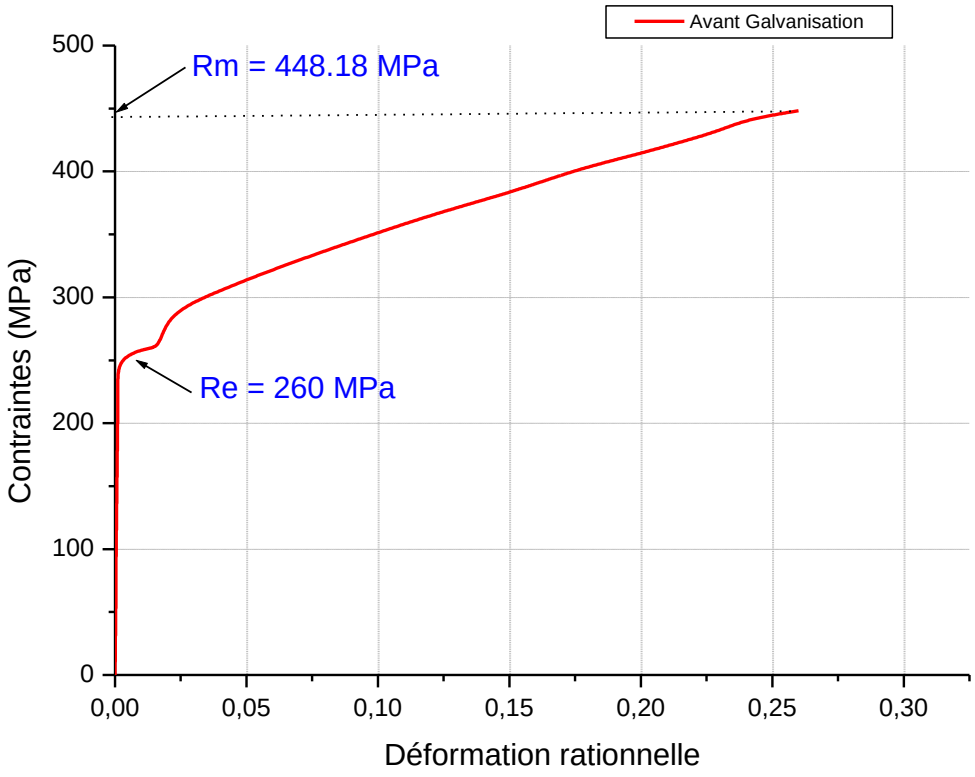



***Figure III. 5:*** Courbe rationnelle de traction avant Galvanisation.

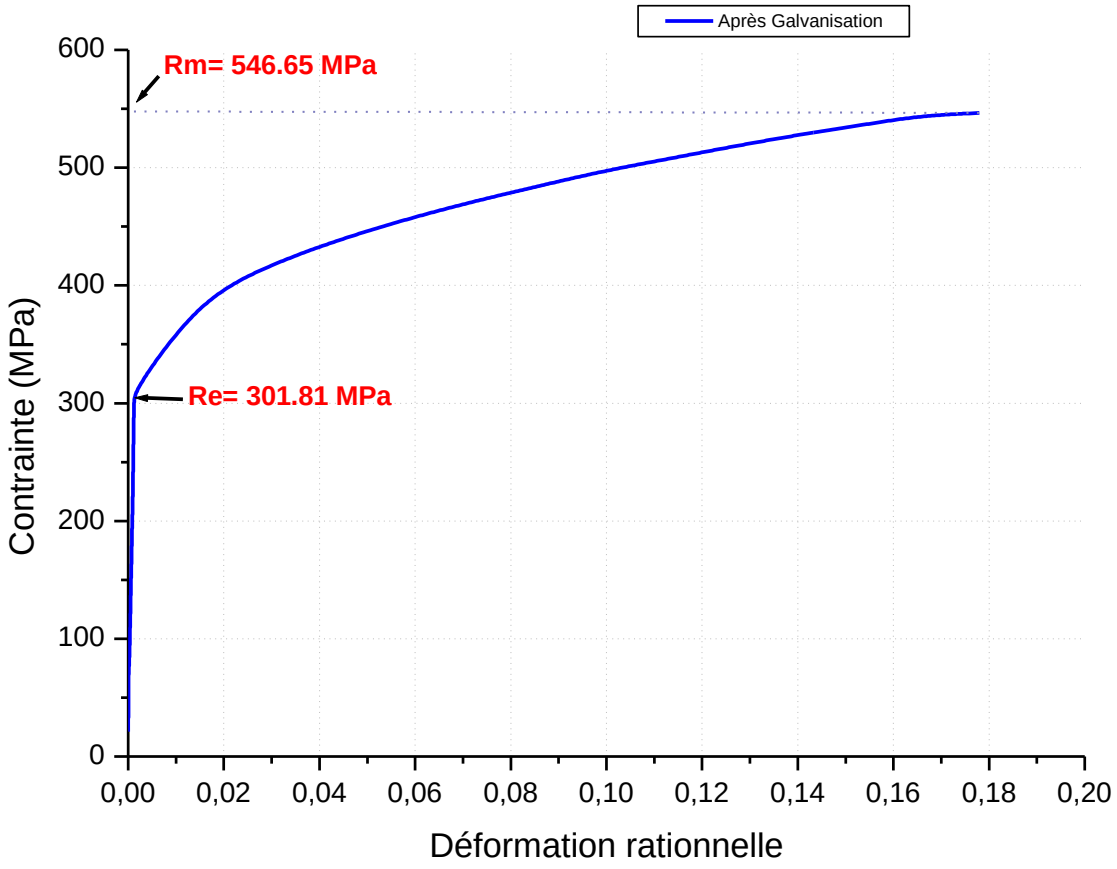



***Figure III. 6:*** courbe rationnelle de traction après Galvanisation.

### III.3.2. Essais de dureté

La dureté caractérise la résistance à la déformation qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur. L'essai de dureté, qui généralement s'effectue sur des machines d'essai appelées duromètres, a pour but de déterminer la dureté des matériaux. C'est un moyen de contrôle non destructif utilisé dans la production pour un contrôle rapide de la qualité des produits finis car il permet d'évaluer les propriétés d'un matériau tel que sa résistance à la traction, sa ductilité et sa résistance à l'usure. Selon les normes, la dureté est exprimée comme un nombre sans dimension. Les essais les plus courants sont les essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell **[8].**

## ➢ Principe de l'essai de dureté

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à tester. La charge appliquée est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. Celle-ci est d'autant plus grande que le métal est mou. La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte **[5] :**

$$H = \frac{F}{S} \qquad \text{(III.8)}$$

Avec

H : symbole de dureté (MPa)

F : charge d'essai (N)

S : surface de l'empreinte (mm2)

### ➢ Types d'essai

**1. Essai Brinell**

Il consiste à imprimer dans la pièce à tester une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F, et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge **[5].**

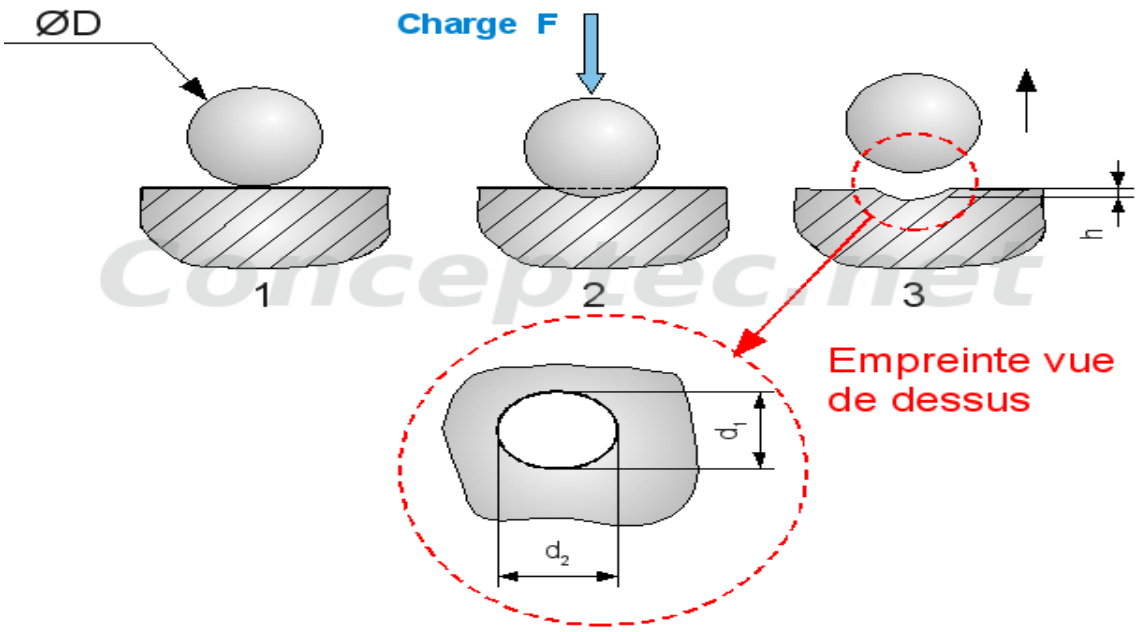



***Figure III. 7*:** Essai de dureté Brinell.

La dureté Brinell est donnée par la relation suivante :

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})} \times 0.102 \quad \text{(III. 9)}$$

P : la charge appliquée

D : diamètre de la bille (mm)

d : diamètre de l'empreinte (mm).

**Tableau III. 8:** Essai de dureté Brinell avant et après Galvanisation **[9].**

| Essai de dureté HB | |
|---|---|
| Avant Galvanisation | Après Galvanisation |
| 100 | 109 |

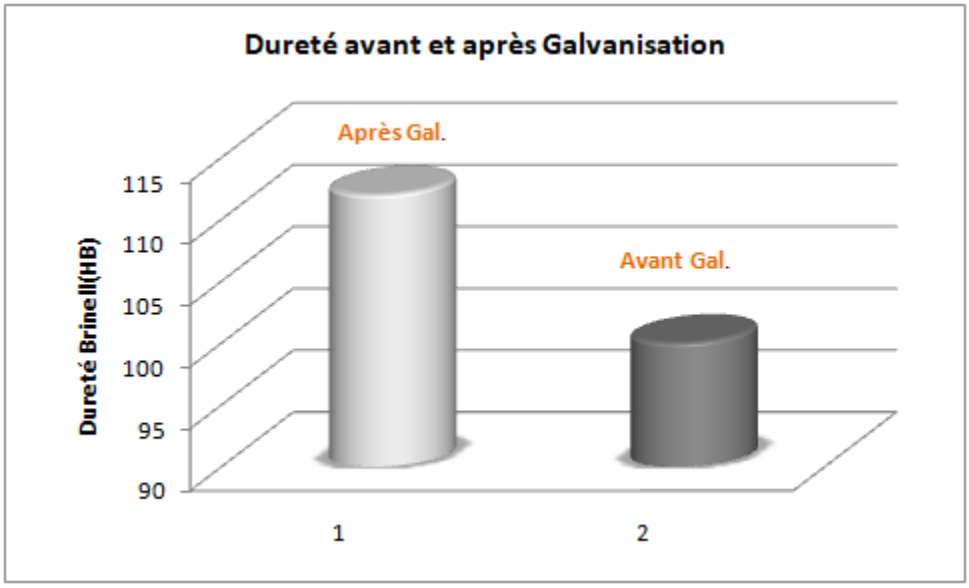



***Figure III. 8:*** Dureté avant et après Galvanisation.

### III.3.3. Essai de Résilience (K)

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture **[6].**

L'essai Charpy est très utilisé industriellement pour caractériser la fragilité des matériaux et

Principalement des métaux. Son développement, qui a conduit à l'établissement de normes (ISO 179 pour les plastiques, ISO 1456 pour les aciers, par exemple), résulte de la facilité et de la rapidité de son exécution, mais également de la faible quantité de matière nécessaire Cet essai permet de mesurer la résistance au choc d'un matériau en présence d'une entaille dite en U ou en V, selon sa géométrie **[6].**

**Résilience en U :** Barreau unifié français (KCU). Eprouvette normalisée dont l'amorce de rupture est en forme de U.

**Résilience en V :** Barreau suivant la méthode Charpy (KCV). Eprouvette normalisée dont l'amorce de rupture est en forme de V.

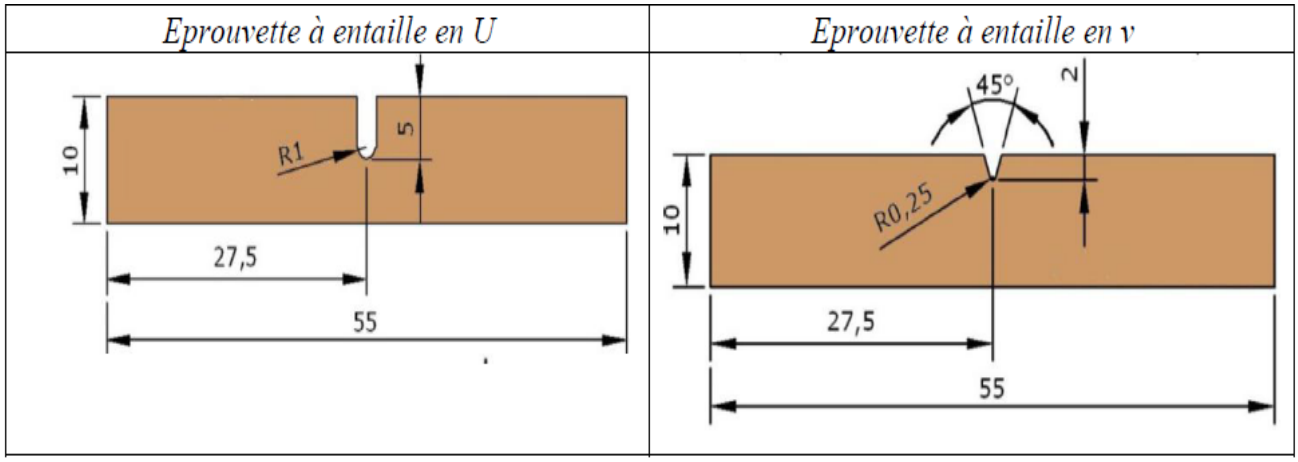



**Figure III. 9** : Dimensionnement d'éprouvettes d'essais

Elle est définie par :

$$K = \frac{W}{S} \qquad \text{(III.12)}$$

W : travaille nécessaire

S : section après entaille

L'essai de Charpy est considéré comme un essai dynamique lent, qui donne l'influence de la vitesse de déformation sur les propriétés mécanique des matériaux, et plus particulièrement la ténacité. Cette influence est le résultat de l'emploi du critère de plasticité thermiquement activé associé au critère local de rupture. Celle-ci est décrite par la variation de la distribution des contraintes dans les zones de discontinuités géométriques, compte tenu de la forme d'entaille et pour différents types d'éprouvette Charpy **[6].**

La figure (III.9) : montre une représentation schématique de cet essai de Charpy : la hauteur initiale du mouton est indiquée par h0 et la hauteur finale par h1.

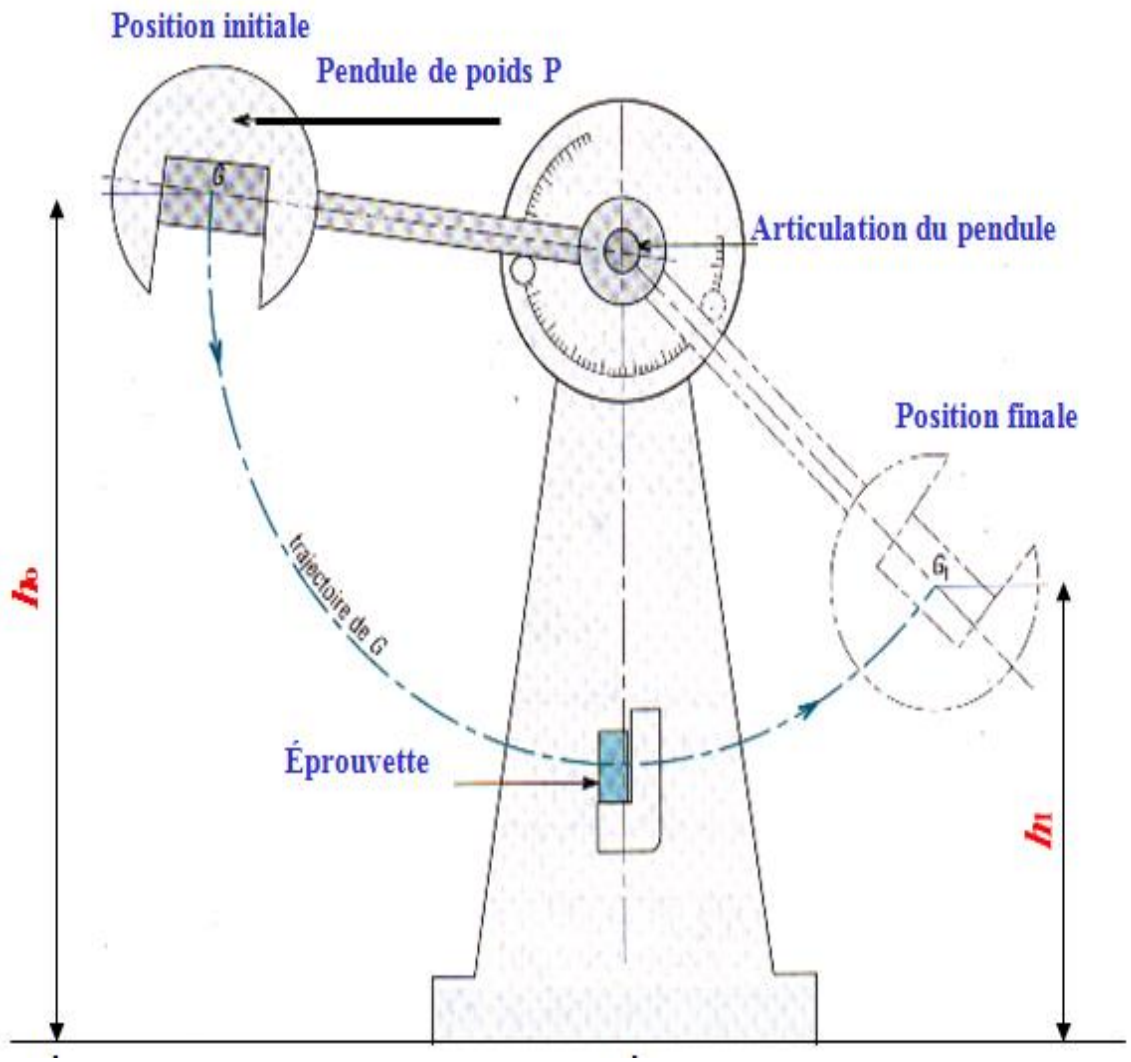



***Figure III. 10*** **:** Essai de résilience **[&&&].**.

### III.3.3.1 Conditions de réalisation de l'essai

• L'essai est réalisé à une température ambiante.

• L'éprouvette doit être disposée sur les appuis du mouton de Charpy, de manière à ce que l'arrête du couteau du mouton vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la surface opposée à celle-ci.

• Pour l'essai normal, l'énergie nominale du mouton doit être de 300 joules.

• Si pendant l'essai, l'éprouvette ne se rompt pas complètement, la valeur obtenue pour la résilience est incertaine, dans ce cas il faudra mentionner : «Eprouvette non rompue par X joules», et on relèvera l'angle de rupture de la pièce **[6].**

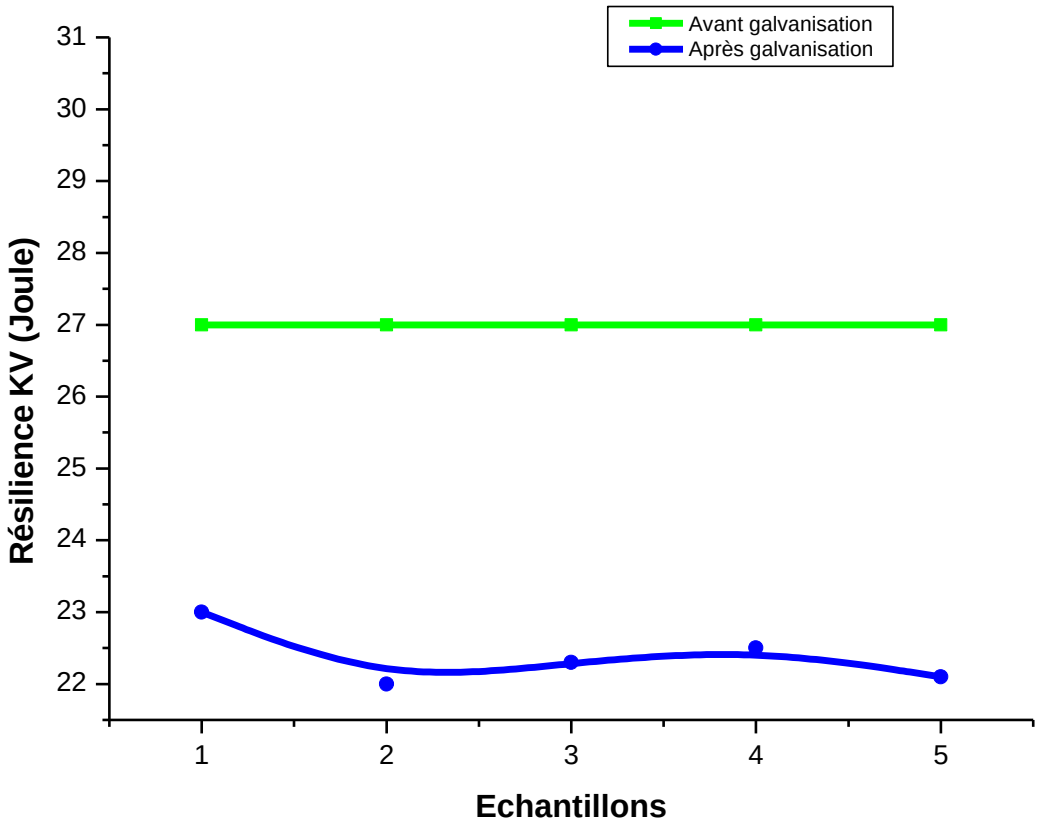



**Figure III. 11:** Essais de choc avant et après galvanisation

## III.4. Analyse des résultats

Les essais mécaniques des aciers galvanisés permettent de déterminer leurs propriétés physiques et leur comportement sous différentes contraintes. Ces essais incluent l'essai de traction, l'essai de dureté, l'essai de choc, l'essai de fatigue, et les essais spéciaux pour simuler le comportement réel de la pièce. L'essai de traction mesure la limite d'élasticité, la résistance à la traction, le module de Young et l'allongement à la rupture du matériau. L'essai de dureté évalue la résistance du matériau à la déformation par indentation. L'essai de choc permet de déterminer la résistance du matériau aux chocs.

La galvanisation à chaud n'affecte généralement pas les propriétés mécaniques de l'acier de base.

Les couches d'alliages de fer-zinc formées lors de la galvanisation sont dures et offrent une bonne résistance à la traction et à l'usure Les résultats de la figure (III.6) et la figure (III.7), représentent une comparaison entre les propriétés mécaniques obtenues par l`essai de traction. De même pour les tests de dureté Brinell qui montre que les tôles galvanisées présentent des durcissements supplémentaires (Figure III. Après Gal.), par rapport à celles au métal de base (figure III.8). Cela est du aux couches de revêtements du procédé d'application du zinc confère au revêtement une résistance mécanique, à l'abrasion, supérieure à celle de l'acier lui même. Les réactions métallurgiques lors de l'immersion des aciers aptes dans un bain de zinc à 450°C provoquent plusieurs couches d'alliages : "composés intermétalliques" zinc-fer, plus durs que l'acier, qui confèrent au revêtement non seulement une parfaite adhérence, mais aussi une résistance exceptionnelle.

La couche supérieure de zinc pur peut amortir les chocs, protégeant les couches d'alliages sous-jacentes. Les résultats de la figure III.11, représentent une comparaison entre les résiliences obtenues par l`essai choc. Cela est expliquer donner par la figure (III. Essais de choc)

En cas de maintenance, il est important d'évaluer l'adhérence et l'épaisseur de la couche résiduelle de zinc.

**Conclusion**

Le choix d'un métal pour un certain but d'utilisation, s'effectue sur la base de ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et technologiques. Les essais mécaniques font partie de la technique des métaux, leur but est de caractériser ou d'évaluer numériquement les propriétés du matériau. La connaissance des grandeurs caractéristiques et leur détermination sont les conditions essentielles pour les calculs des dimensions des différents éléments de construction **[1].**

# Conclusion Générale

Dans la partie bibliographique nous avons défini les principes généraux des revêtements des surfaces des métaux et les défis de protection des métaux contre la corrosion qui pose problème à l'environnement. L'étude de galvanisation à chaud en continue nous a permis de comprendre le processus technologique de la formation de la couche galvanisée.

Dans la partie expérimentale nous avons étudié les effets des changements des propriétés mécaniques des tôles galvanisées. Le travail que nous avons réalisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude  Étude des caractéristiques mécaniques avant et après galvanisation à chaud au niveau de l'ENTTPP – Anabib cis à El malabiod, nous a permis de mieux comprendre le processus technologique de galvanisation, les mécanismes se déroulent lors du passage des tubes soudés dans le bain de zinc, ainsi les croissances des caractéristiques mécaniques de résistances et la décroissance des propriétés de ductilité des aciers après galvanisation.

Cette étude a permis de mettre en évidence les effets de la galvanisation sur les propriétés mécaniques de l'acier à travers une série d'essais de traction réalisés sur des éprouvettes avant et après traitement. Dans la première partie théorique, nous avons rappelé les notions fondamentales relatives au comportement mécanique des matériaux, notamment la résistance à la traction, la limite d'élasticité, l'allongement à la rupture et la contraction de section. Nous avons également défini les principales lois utilisées dans les calculs expérimentaux, telles que la contrainte apparente ($\sigma = F/S_0$) et la résistance maximale

(Rm = Fmax/Sf), afin de pouvoir interpréter correctement les résultats obtenus.

Les essais réalisés ont permis de mesurer des paramètres clés comme la charge maximale supportée, la variation de longueur et de section, et d'en déduire des caractéristiques mécaniques essentielles. Les résultats ont montré que la galvanisation ne compromet pas la résistance de l'acier, bien au contraire : une amélioration sensible de la contrainte apparente a été observée après traitement, avec des valeurs passant de l'ordre de 300 MPa à plus de 400 MPa. De même, la résistance maximale Rm, estimée à partir des sections réduites après rupture, indique une performance mécanique maintenue, voire renforcée.

Sur le plan de la ductilité, l'acier galvanisé conserve des niveaux élevés d'allongement et de contraction de section, ce qui témoigne d'une capacité à se déformer plastiquement sans rupture fragile. Cela suggère que le processus de galvanisation, bien que thermique, ne dégrade pas la microstructure au point d'en affaiblir les propriétés mécaniques.

En somme, cette recherche confirme que la galvanisation constitue un procédé de protection de l'acier à la fois efficace contre la corrosion et compatible avec les exigences de résistance mécanique. Les résultats expérimentaux sont en accord avec les fondements théoriques développés, et offrent une base solide pour recommander l'utilisation de l'acier galvanisé dans les applications structurelles exposées à des conditions environnementales sévères. Pour aller plus loin, des investigations complémentaires portant sur le comportement en fatigue, en flexion ou en environnement salin pourraient enrichir davantage l'évaluation globale de ce traitement de surface.

# Références

**[1**] G. BERANGER, G.Henry, G. Sanz, Livre de L'acier, Ed. Sollac, 1996,

**[2]** D. E. Touabi, Etude et réalisation des assemblages hétérogène (A333 grade 6/A790.532 550) par un métal d'apport (ER2209), projet de fin d'étude, E.N.S polytechnique 2009, Alger.

**[3]** Edelstahl-Vereinigung Verein deutxher Eisneshuttenlente (Vdeh), techniques et documentation, Lavoisier 1990.

**[4]** M. Beskri, B. Cheniti, Effet de la déformation sur le comportement en corrosion de l'assier galvanisé DX54D d'un alliage Zn-Al-Mg, mémoire de Master, soutenu juin 2019, Université Saad Dahled-Blida.

**[5]** M. H. TOURQUI, Etude des facteurs qui influent sur l'homogénéité de l'épaisseur de la couche galvanise au niveau de sider el-hadjar, mémoire de Master, soutenu juin 2018, Université Badji Mokhtar-Annaba.

**[6]** C. Oberlin, Réchauffage par induction lors de la transformation des métaux ; Technique de l'ingénieur M3215 ; pp 1.

**[7]** D. la canette, Thèse de 3ème. Simulation numérique de l'essorage et du refroidissement d'un film liquide en mouvement par un jet plan turbulent, ,2004.

**[8]** H. Hocquaux, caractérisation des surfaces par SPU, Technique de l'ingénieur M1675 ; pp5.

**[9]** Matériaux métalliques-prénommes de corrosion, cour 4

**[10] D. Meyer**, rôle du laminoir dans le cycle de fabrication, technique de l'ingénieur, M7830 ; pp 1.

**[11] D. Acevedo Reyes**, thèse doctorat évolution de d'état de précipitation aux courses de L'austénitisation D'aciers micro allies au vanadium et au niobium ; INSA de Lyon, 2007

**[12]** Association pour promotion et de développement de la construction de l'acier, métallurgie appliquée, leçon 2.2, les procédés de fabrication et de laminage des aciers.

**[13]** S. Bensaada, D. Felliachi, Technologie, OPU, 2007.

**[14**] J. Farhi ; coulée continue de l'acier ; Donne physiques et métallurgiques, technique de l'ingénieur.

**[15**] Roger L. Brocken rough; properties of structural steels and effects of steelmaking and fabrication, R.L. Brocken rough & Associates, Inc. Pittsburgh, Pennsylvanie, USA.

**[16]** P. Roquet, Structure métallographique des aciers extra-doux, mémoire scientifique revue de métallurgie, 1974.

**[17]** B. Thomas et J-H. Schmitt, Durcissement des aciers, Mécanismes, Technique de l'ingénieurM4340.

**[18]** D. Quentin, traitements de surface des métaux, galvanisation à chaud, Technique de l'ingenieurM1534.

**[19]** Marc GRUMBACH**,** Aciers d'usage. Général, Technique de l'ingenieurM305

**[20]** D. Quentin, galvanisation à chaud-principe, article Technique de l'ingenieurM1530

**[21]** Norme française enregistrée en acier (Galvanisation du revêtement des tube et des accessoires tubulaires);NF.49-142-MARS 1986.

**[22]** B Zohra ; Mémoire de fin d'étude en master ; comportement de l'acier galvanisé dans la solution ; eau de robinet (Biskra), 3.5% NaCl et 3.21%$NH_4cl$; 2013-2014.

**[23]** Norme française enregistrée, Tubes en acier (Galvanisation du revêtement des tube et des accessoires tubulaires) ; NF A49-700-Décembre 1982.

**[24]** B D. R. Mémoire ; Magistère, université Mohamed, Boudiaf ; Etude de l'obtention et caractérisation des couches de galvanisation, M'silla.

**[25]** Fanghua Steel. (s.d.) Galvanized steel coils. www.fanghuasteel.com/products/galvanized-steel-coils.html

[26] document de référence technique "Traité de métallurgie et traitement thermique" ou un guide technique en ingénierie des matériaux.

**[27]** Association Technique de la Galvanisation (ATG), La Galvanisation à chaud : principes, procédés et applications, ATG, 2019. [Disponible sur: www.galvaunion.com]

**[28]** V. Vouk, Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures, Woodhead Publishing, 2016.

**[29]** AFNOR, NF A 55-101 : Produits laminés en zinc et en alliages de zinc pour la protection de l'acier par galvanisation à chaud - Spécifications techniques, Association Français e de Normalisation, 1992.

**[30]** S. Benseddik, Technologie de la galvanisation à chaud : étude des bains faiblement alliés, Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2014.

**[31]** F. Dabosi et al., *Galvanisation des aciers à hautes caractéristiques mécaniques – rôle des éléments d'alliage (Al, Mg, Ni)*, Revue de Métallurgie, 2002.

**[32]** H. Leidheiser Jr., *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, 3rd Edition, Wiley-Interscience, 1995.

**[33]** H. Jean-Baptiste, *Galvanisation à chaud : principes et maîtrise du procédé*, Techniques de l'Ingénieur, traité MATERIAUX M 7 840, 2006.

**[34]** AFNOR, NF A 91-121 : Produits en acier – Conditions techniques de livraison – Revêtements par galvanisation à chaud après fabrication, Association Française de Normalisation, 1993.

**[35]** P. Pouilleau et al., Intermetallic layer formation in hot-dip galvanized steel sheets: influence of aluminium and bath temperature, Materials Science and Engineering A, Vol. 269, 1999, pp. 56–63.

**[36]** S. Ziewiec, *Growth kinetics of Fe-Zn intermetallic layers in pure zinc bath during hot-dip galvanizing*, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157–158, 2004, pp. 401–405.

**[38]** C. Marder, *The metallurgy of zinc-coated steel*, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, Issue 3, 2000, pp. 191–271.

**[39]** P. R. Roberge, *Corrosion Engineering: Principles and Practice*, McGraw-Hill, 2008. (Chapitres sur les revêtements métalliques, protection cathodique et rôle du zinc)

**[40]** Documents fournées par usine "Anabib". EL-MA LABIODH 2025.

**[41]** S. Bensaada et D. Felaichi, Essai mécanique, office des publication universitaires 2ém Edition 2008.

# Annexes

**Résultats détailles de l'essai de traction :**

| | *Eprouvette N°* | *Longueur initiale L0 (mm)* | *Largeur initiale l0 (mm)* | *Epaisseur initial e0* | *Section initiale S0(mm²)* | *Section Finale Sf(mm²)* | *Longueur finale Lf (mm)* | *Largeur Finale lf (mm)* | *Epaisseur Final ef* | *Allongement (%)* | *Contraction (%)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Avant la galvanisation* | 1 | 59.9 | 30 | 3.5 | 105 | 63.36 | 79 | 24 | 2.2 | 31.9 % | 49.7 % |
| | 2 | 74.7 | 50 | 3.5 | 175 | 105.74 | 90 | 46 | 2.3 | 20.4 % | 39.6 % |
| | 3 | 76.2 | 52 | 3.5 | 182 | 94.00 | 87 | 47 | 2.0 | 14.1 % | 48.4 % |
| | 4 | 73.0 | 48 | 3.5 | 168 | 98.56 | 88 | 44 | 2.2 | 20.5 % | 42.4 % |
| | 5 | 75.5 | 49 | 3.5 | 171.5 | 96.60 | 89 | 45 | 2.1 | 17.8 % | 44.9 % |
| *Après la galvanisation* | 1 | 71.15 | 42.86 | 3.7 | 158.58 | 85.07 | 93 | 38.03 | 2.24 | 30.7 % | 46.3 % |
| | 2 | 74.61 | 45.87 | 3.81 | 174.42 | 100.36 | 96 | 41.76 | 2.68 | 28.7 % | 35.9 % |
| | 3 | 73.80 | 44.5 | 3.75 | 167.00 | 93.50 | 94 | 40.10 | 2.40 | 27.4 % | 42.4 % |
| | 4 | 75.20 | 46.30 | 3.79 | 175.55 | 97.20 | 95 | 42.50 | 2.45 | 26.3 % | 40.7 % |
| | 5 | 74.00 | 45.20 | 3.77 | 170.40 | 95.00 | 94 | 41.00 | 2 | 27.0 % | 39.8 % |

**Source : réalisé par l'étudiant a partir les résultats expérimentaux.**

**Bilan d'évolution**

| Paramètre | Moyenne Avant Galvanisation | Moyenne Après Galvanisation | Évolution |
|---|---|---|---|
| Allongement (%) | ≈ 20.9 % | ≈ 28.0 % | +7.1 % |
| Contraction (%) | ≈ 45.0 % | ≈ 41.0 % | −4.0 % |

**Source : réalisé par l'étudiant a partir les résultats expérimentaux.**

**Bilan des contraintes**

| | Éprouvette N° | Force Max (kN) | $S_0$ ($mm^2$) | σ_app (MPa) | Rm (MPa) | Re (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Avant galvanisation | 1 | 33 | 105 | 314.29 | 421.23 | 266.72 |
| | 2 | 57 | 175 | 325.71 | 439.06 | 267.24 |
| | 3 | 52 | 182 | 285.71 | 453.19 | 264.59 |
| | 4 | 54 | 168[1] | 321.43 | 447.92 | 243.0 |
| | 5 | 56 | 171.5[1] | 326.03 | 479.50 | 258.66 |
| Aprés galvanisation | 1 | 71.5 | 158.582 | 450.84 | 540.22 | 308.01 |
| | 2 | 70 | 174.42 | 401.52 | 577.79 | 339.04 |
| | 3 | 69 | 167[1] | 413.17 | 537.70 | 292.65 |
| | 4 | 72 | 175.55[1] | 410.22 | 540.72 | 289.57 |
| | 5 | 70 | 170.4[1] | 410.86 | 536.85 | 279.79 |