



## Departement de Technologie Chimique Industrielle

En vue de l'obtention du diplôme de **Master en : Génie De La  
Formulation**

### Thème :

**Développement D'une Peinture Epoxy En Poudre Enrichie En  
Zinc Pour La Protection Anticorrosion  
Des Pipelines**

### Réalisé par :

- SOUDANI MOUSTAPHA

### Encadré par :

- BELKACEMI Samir (Encadreur) MCB/Institut de Technologie, BOUIRA

### Soutenu devant le jury :

- BANOUH Hicham (President) MCB/Institut de Technologie, BOUIRA
- HAMIDOUCHE Sabiha (examinatrice) MCB/Institut de Technologie, BOUIRA

Année Universitaire : 2023/2024

# Dédicace

Je Dédie ce Modeste travail :

A mon meilleur ami du monde **Amine Kremis,**

---

## ملخص

يعد تآكل المواد المعدنية مشكلة كبيرة تؤثر على متانتها وأدائها. ولمعالجة هذه المشكلة، يوفر تطبيق الطلاءات المضادة للتآكل مثل تلك المعتمدة على مسحوق الإيبوكسي حلاً فعالاً بفضل التصاقها القوي وقدرتها على تشكيل حاجز مادي ضد العناصر المسببة للتآكل. تتطور هذه الطلاءات باستمرار نحو تركيبات أكثر صديقة للبيئة واستدامة، وتلبية المعايير الحديثة مع توفير الحماية الفعالة في بيئات متنوعة، بما في ذلك التطبيقات الحرجة مثل خطوط الأنابيب.

**الكلمات المفتاحية:** المواد المعدنية. الأنابيب. التآكل

---

## **Résumé**

La corrosion des matériaux métalliques est un problème majeur affectant leur durabilité et leurs performances. Pour y remédier, l'application de revêtements anticorrosion comme ceux à base d'époxy en poudre offre une solution efficace grâce à leur adhérence robuste et leur capacité à former une barrière physique contre les éléments corrosifs. Ces revêtements sont en constante évolution vers des formulations plus écologiques et durables, répondant aux normes modernes tout en assurant une protection efficace dans des environnements divers, y compris pour des applications critiques comme les pipelines.

**Mots-clés :** La corrosion. Matériaux métalliques. Les pipelines.

---

## **Abstract**

Corrosion of metallic materials is a major problem affecting their durability and performance. To remedy this, the application of anti-corrosion coatings such as those based on powdered epoxy offers an effective solution thanks to their robust adhesion and their ability to form a physical barrier against corrosive elements. These coatings are constantly evolving towards more environmentally friendly and sustainable formulations, meeting modern standards while providing effective protection in diverse environments, including for critical applications such as pipelines.

**Key words:** Corrosion. metallic materials. pipelines

---

## Sommaire

Dédicace .....	I
Résumé .....	II
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	X
Introduction générale.....	1
I. Généralité sur la corrosion .....	2
Introduction .....	2
I.1. Définition de la corrosion .....	2
I.2. L'origine de la corrosion.....	2
I. 3. Impact économique de la corrosion des métaux .....	3
I.4. Les types de corrosion .....	3
I.4.1. La corrosion chimique .....	3
I.4.2. La corrosion bactérienne.....	4
I.4.3. Corrosion électrochimique (humide) .....	4
I.5. Les formes de corrosion.....	4
I.5.1. Corrosion uniforme ou généralisée :.....	4
I.5.2. Corrosion localisée.....	5
I.5.3. Corrosion galvanique .....	5
I.5.4. Corrosion sous-contrainte .....	6
I.3.5. Corrosion caverneuse.....	6
I.5.6. Corrosion par piqures.....	7
I.5.7. Corrosion inter granulaire .....	7
I.5.8. Corrosion érosion.....	8
I.6. Les facteurs qui influencent la corrosion .....	8
I.6.1. Facteurs du milieu corrosif .....	9

---

---

I.6.2. Facteurs métallurgiques .....	9
I.6.3. Facteurs définissant les conditions d'emploi .....	9
I.6.4. Facteurs dépendant du temps .....	9
I.7. Vitesse de corrosion.....	9
I.8. L'acier.....	10
I.8.1. Composition chimique des aciers .....	10
I.8.2. Structure des aciers .....	11
I.8.3. Fabrication de l'acier .....	11
I.8.4. Propriétés mécaniques .....	12
I.8.5. L'acier au carbone.....	12
I.8.6. Caractérisation et application des aciers doux.....	12
I.8.7. Protection contre la corrosion .....	12
I.8.8. Réaction de corrosion .....	13
I.9. Corrosion du fer .....	13
I.9.1. Corrosion du fer en milieu aqueux.....	13
I.9.2. Corrosion dans des milieux acides :.....	14
II. Généralité sur les peintures .....	15
Introduction .....	15
II.1. Définition de peinture.....	15
II.2. Les Principaux constituants des peintures.....	15
II.3. Types des peintures .....	15
II.4. La peinture poudre.....	16
II.4.1. Principaux constituants.....	16
II.4.1.1. Le liant.....	16
II.4.2. Les pigments .....	18
II.4.2.2. Classement des pigments.....	18

---

---

II.4.2.3. Les additifs .....	19
II.4.2.4. Les charges .....	20
II.5. Les types de peinture poudre .....	20
II.5.1. La peinture en poudre époxy.....	20
II.5.2. La peinture en poudre polyester .....	20
II.5.3. La peinture en poudre mixte époxy-polyester .....	20
II.6. Domaine d'application .....	21
II .7. Avantages et inconvénients .....	21
II .7.1. Avantage.....	21
II .7.2. Les inconvénients .....	22
I. Matériel et méthode .....	23
Introduction .....	23
I.1. Matérielles utilisé.....	23
I.2. Le thermo laquage (système électrostatique).....	24
I.2.1. Équipement nécessaire pour procéder au thermolaquage.....	25
I.3. L'épaisseur du revêtement selon le type de poudre .....	26
I.4. Les matières Première utilisées et leurs rôles .....	27
I.5. Le mode opératoire .....	28
I.5.1. Le prémélange.....	28
I.5.2. Extrusion .....	29
I.5.3. Refroidissement .....	30
I.5.4. Concassage.....	30
I.5.5. Le broyage .....	30
I.5.6. Le tamisage .....	30
I.5.7. L'étape de conditionnement.....	31
I.5.8. Traitement de surface.....	31

---

---

I.5.9. Le poudrage polymérisation .....	32
I.6. Les tests a faire .....	32
I.6.1. Les tests mécaniques.....	32
I.6.1.1. Test de choc .....	32
I.6.1.2. Test d'adhérence .....	33
I.6.1.2.3. Test de pliage mandrine conique .....	35
III.6.1.2.4. Teste de l'emboutissage .....	36
I.6.2. Les tests chimiques .....	37
Conclusion.....	40
II. Contrôle de qualité.....	40
II.1. Contrôle de qualité du revêtement.....	40
II.2. Les essais de contrôle de qualité du revêtement extérieure.....	40
II.2.1. Essai d'immersion dans l'eau chaude .....	40
II.2.1.1. Déroulement de l'essai .....	41
II.2.2. Essai d'immersion dans l'eau salée .....	42
II.2.3. Essai de décollement cathodique .....	43
II.2.3.1. L'équipement de l'essai .....	43
II.2.3.2. Caractéristiques mesurables .....	44
II.2.3.3. Principe.....	45
II.2.4. Calorimétrie différentielle (DSC) .....	47
II.2.4.1. Caractéristiques mesurables .....	48
II.2.4.2. Principe.....	49
I. Résultats et discussions.....	52
Introduction .....	52
I.1. Les tests à faire .....	52
I.1.1. Les tests mécaniques.....	52

---

---

I.1.1.1. Test de choc .....	52
I.1.1.2. Test d'adhérence .....	52
I.1.1.3. Test de pliage mandrine conique .....	53
I.1.1.4. Teste de l'emboutissage .....	53
Conclusion.....	53
II. Contrôle de qualité du revêtement.....	53
Introduction .....	53
II.1. Calorimétrie différentielle (DSC).....	53
Conclusion générale .....	58
Références bibliographiques .....	59

---

---

## Liste des figures

Figure I. 1 : La nature des paramètres dus à la corrosion.....	2
Figure I. 2 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.....	3
Figure I. 3 : Corrosion uniforme .....	4
Figure I. 4 : Corrosion localisée .....	5
Figure I. 5 : Représentation schématique d'une pile de corrosion.....	6
Figure I. 6 : Corrosion sous-contrainte.....	6
Figure I. 7 : Corrosion caverneuse .....	7
Figure I. 8 : Corrosion par piqures .....	7
Figure I. 9 : Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique.....	8
Figure I. 10 : Corrosion érosion .....	8
Figure I. 11 : L'acier doux .....	12
Figure II. 1 : Le poudrage.....	25
Figure II. 2 : La poudre de thermo laquage.....	25
Figure II. 3 : Le pistolet de thermo laquage .....	26
Figure II. 4 : Le four de thermo laquage .....	26
Figure II. 5 : Durcisseur et Les agents a utilisez .....	27
Figure II. 6 : Les pigments Utilisées. Et PHOSFATE DE ZINC Charges (sulfate de baryum) +Résine Epoxy .....	27
Figure II. 7 : Le pesage des matières premières .....	28
Figure II. 8 : Le mélangeur.....	29
Figure II. 9 : L'extrusion .....	29
Figure II. 10 : Le concassage .....	30
Figure II. 11 : Le broyage.....	30
Figure II. 12 : Le tamisage .....	31

---

Figure II. 13 : le traitement de surface des plaques.....	31
Figure II. 14 : Le test de choc.....	31
Figure II. 15 : Le poudrage polymérisation.....	32
Figure II. 16 : le test de choc .....	32
Figure II. 17 :Le peigne.....	33
Figure II. 18 : Appareil de pliage muni d'un mandrin conique .....	35
Figure II. 19 : Emboutisseur Erichsen.....	36
Figure II. 20 : Schéma de fonctionnement de brouillard salin .....	38
Figure II. 21 : La Préparation des plaques .....	39
Figure II. 22 : Appareille l'eau chaud .....	41
Figure II. 23 : Les matière première de l'essai immersion dans l'eau salée .....	42
Figure II. 24 : L'eau salée .....	43
Figure II. 25 : Appareillage et d'essai d'écoulement cathodique (photo originale) [33].....	44
Figure II. 26 : Support de fixation du cylindre sur l'éprouvette .....	44
Figure II. 27 : Eprouvette d'essai .....	45
Figure II. 28 : Perçage du défaut artificiel .....	46
Figure II. 29 : DSC.....	47
Figure II. 30 : Echantillon d'époxy poudre riche de zinc.....	48
Figure II. 31 : Echantillon de filme polymérisé après broyage.....	49
Figure II. 32 : Exemples de balayage thermique sur la poudre époxy [34] .....	50
Figure II. 33 : Exemples de balayage thermique sur le filme polymériser .....	51
Figure III. 1 : Le Test de choc .....	52
Figure III. 2 : Le Test d'adhérence.....	52
Figure III. 3 : Le Teste de l'emboutissage .....	53
Figure III. 4 : La resulta obtenus DSC Pour la Poudre d'époxy et Pour le filme polymérisé de peinture poudre riche de zinc .....	55

---

---

Figure III. 5 : La résulta obtenus de essais l'eau salée .....	56
Figure III. 6 : La résulta obtenus de essais l'eau chaud .....	57

---

## Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Résume les principaux facteurs de corrosion.....	9
Tableau I. 2 : Caractéristiques mécanique de l'X70 selon l'API5L.....	12
Tableau I. 3 : les principaux liants utilisé en peinture poudre.....	17
Tableau I. 4 : Les différents pigments minéraux.....	19
Tableau II. 1 : Matérielles utilisés .....	23
Tableau II. 2 : La formule de la Peinture Epoxy riche en zinc .....	28
Tableau II. 3 : Les Surface de la partie quadrillée pour laquelle un écaillage s'est produit ....	34
Tableau II. 4 : Les paramètres de l'essai de brouillard salin.....	38
Tableau II. 5 : les caractéristique mesurables de l'essai décollement cathodique .....	45
Tableau II. 6 : Les caractéristiques mesurables de l'essai Calorimétrie différentielle .....	48

# **Introduction**

## **générale**

---

## Introduction générale

La corrosion est un phénomène destructeur qui affecte considérablement la durabilité et les performances des matériaux métalliques. Pour contrer ce problème, il est crucial de rechercher des solutions efficaces afin de protéger les surfaces métalliques et de réduire les coûts associés à la corrosion. La méthode la plus courante pour prévenir ou retarder la corrosion des métaux est l'application d'un revêtement imperméable sur leur surface. Lorsque ce revêtement offre une barrière protectrice efficace dans un environnement corrosif, il empêche l'oxygène et l'eau d'atteindre la surface métallique, limitant ainsi les réactions chimiques responsables de la corrosion.

Les revêtements anticorrosion à base d'époxy en poudre ont démontré leur efficacité dans la protection des surfaces métalliques. Ils présentent des propriétés telles qu'une excellente adhérence, une résistance mécanique et une barrière physique entre le métal et son environnement corrosif. Cela réduit les réactions électrochimiques et prévient finalement la corrosion. Pour améliorer l'efficacité des revêtements anticorrosion à base d'époxy, il est pertinent d'explorer des formulations qui utilisent des molécules organiques ou polymériques non toxiques et stables. Il est également crucial de développer des méthodes pour évaluer l'efficacité de ces améliorations, en se basant sur des tests de performance spécifiques adaptés à chaque environnement corrosif potentiel.

L'industrie de la peinture a évolué au fil des décennies, en mettant en œuvre des systèmes moins polluants tels que les peintures à haut extrait sec, hydrodiluable, en poudre, ou réticulables sous l'influence de la lumière ultraviolette ou par bombardement électronique. La peinture en poudre, également connue sous le nom de poudrage ou projection électrostatique, est une technique de revêtement écologique et économique, utilisée notamment pour appliquer des revêtements sur des pipelines comme ceux utilisés par Alphapip à Ghardaia.

En résumé, la recherche continue dans le domaine des revêtements anticorrosion, en particulier ceux à base d'époxy en poudre, vise à améliorer leur efficacité et leur durabilité, tout en répondant aux normes environnementales modernes pour minimiser leur impact écologique.

# **Chapitre I :**

## **Généralités sur la corrosion et les peintures**

---

# I. Généralités sur la corrosion

## Introduction

La corrosion est un grand problème mondial touche tous les secteurs sur tous dans l'industrie pétrolière, dans ce chapitre on peut présenter quelques notions principales sur la corrosion, ces types, ces formes et les facteurs qui dues de ces problèmes.

### I.1. Définition de la corrosion

La corrosion désigne la détérioration progressive d'un matériau due à des réactions chimiques ou électrochimiques avec son environnement. Cette interaction physico-chimique implique des changements dans les propriétés du métal, souvent accompagnés d'une dégradation fonctionnelle du matériau, de son environnement ou du système technique dans son ensemble.

### I.2. L'origine de la corrosion

L'origine de la corrosion réside dans une série d'interactions chimiques et/ou physiques entre un matériau et son environnement. Ces interactions sont complexes et multiples. Les principaux paramètres qui favorisent la corrosion d'un matériau incluent : la composition chimique et la microstructure du métal, la composition chimique de l'environnement dans lequel le métal est exposé, les paramètres physiques tels que la température et l'irradiation, ainsi que les sollicitations mécaniques telles que les contraintes, les chocs et le frottement [1]. Ainsi, les phénomènes de corrosion sont intrinsèquement liés aux propriétés du matériau lui-même et à son environnement.

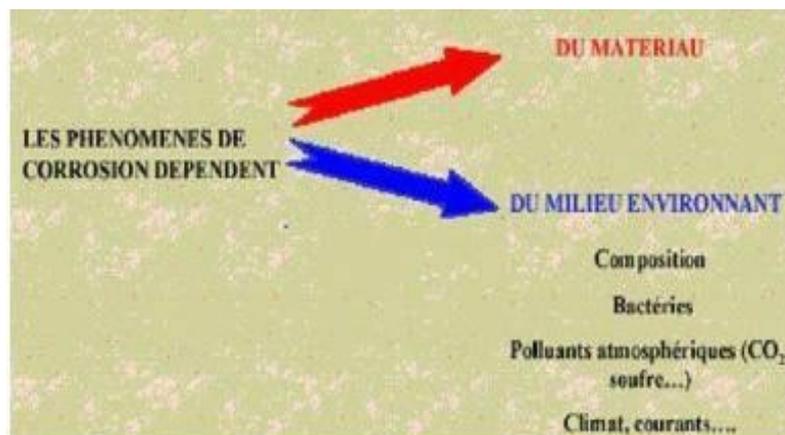


Figure I. 1 : La nature des paramètres dus à la corrosion

---

### I. 3. Impact économique de la corrosion des métaux

La corrosion est un domaine étendu qui affecte une multitude de matériaux tels que les métaux, les céramiques et les polymères, dans divers environnements comme les milieux aqueux, l'atmosphère et les hautes températures. Les dommages causés par la corrosion aux équipements et aux matériaux sont considérables dans de nombreux secteurs tels que le bâtiment, le génie civil, le transport, les communications, ainsi que les industries chimique et pétrolière [4]. On estime que le coût de la corrosion représente environ 4% du produit national brut [5].

### I.4. Les types de corrosion

Selon la nature de l'environnement et son comportement qui autour le métal, on peut déterminer le type de corrosion :

#### I.4.1. La corrosion chimique

C'est la réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. Si cette corrosion se produit à haute température elle est alors appelée « corrosion sèche » ou corrosion à haute température. Au cours de la corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se fait en une seule action, c'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques. La réaction qui se produit est de la forme [6].

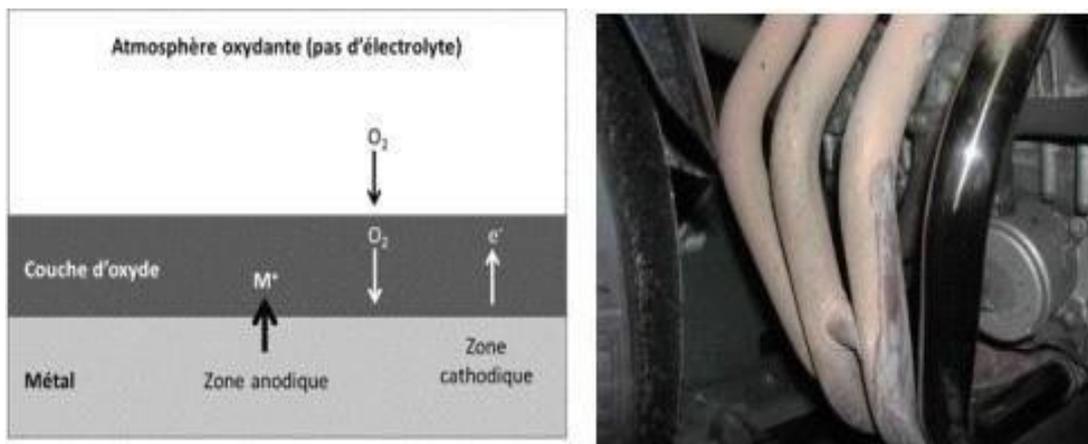


Figure I. 2 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.

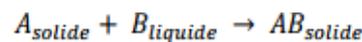
---

## I.4.2. La corrosion bactérienne

La corrosion bactérienne, également appelée corrosion biochimique, survient en présence de colonies significatives de bactéries anaérobies qui se développent dans des eaux contenant des sulfates. La lutte contre ce type de corrosion repose principalement sur des méthodes biologiques, telles que l'injection de produits bactéricides dans les milieux corrosifs [7].

## I.4.3. Corrosion électrochimique (humide)

Pour expliquer la corrosion électrochimique, il est important de comprendre qu'elle est généralement accompagnée par l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes, et la réduction de l'agent corrosif présent dans la solution électrolytique. Ce processus implique des transferts d'électrons entre le métal et la solution électrolytique au contact, ce qui génère un courant électrique (circulation d'électrons) [3, 8].



## I.5. Les formes de corrosion

### I.5.1. Corrosion uniforme ou généralisée :

La corrosion uniforme, également appelée corrosion généralisée, se caractérise par l'attaque de l'ensemble de la surface du métal en contact avec l'électrolyte [9]. Elle se manifeste par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent corrosif [10]. Ce type de corrosion se développe typiquement dans des milieux acides ou alcalins où le métal est affecté de manière homogène sur toute sa surface exposée à l'environnement corrosif.

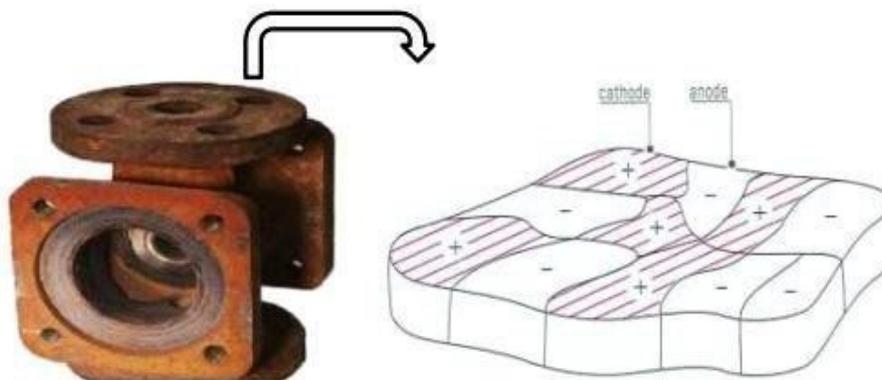


Figure I. 3 : Corrosion uniforme

---

### **I.5.2. Corrosion localisée**

Ce phénomène survient lorsque le matériau est exposé à un environnement qui présente un comportement sélectif à son égard. Cette sélectivité peut avoir diverses origines, tant du côté du matériau lui-même (présence d'alliages hétérogènes, inclusions, défauts locaux de la protection de surface, matériaux bimétalliques, etc.) que de l'environnement (variations locales de composition chimique, de pH ou de température).

Cette forme de corrosion se manifeste par des attaques localisées sur quelques points spécifiques de la surface du matériau, contrastant avec la corrosion uniforme qui affecte l'ensemble de la surface exposée. [11]



Figure I. 4 : Corrosion localisée

### **I.5.3. Corrosion galvanique**

Le processus de corrosion galvanique débute lorsqu'il y a contact entre deux matériaux ayant des potentiels électrochimiques différents dans un électrolyte. Cette interaction établit un équilibre où le matériau le plus noble devient la cathode tandis que l'autre matériau agit comme l'anode. [12].

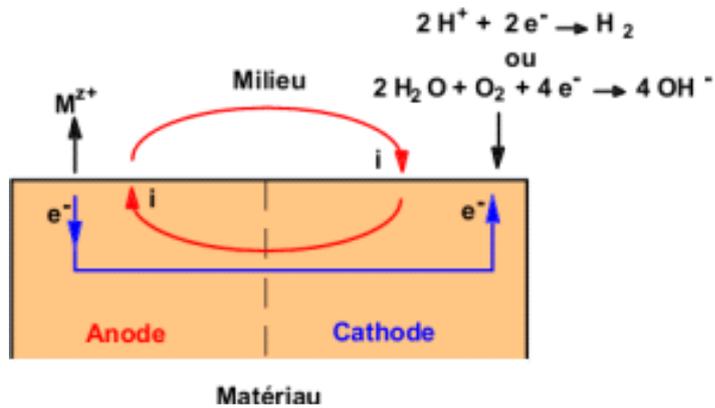


Figure I. 5 : Représentation schématique d'une pile de corrosion

#### I.5.4. Corrosion sous-contrainte

Il s'agit d'une attaque ou d'une rupture localisée résultant de l'interaction entre un facteur mécanique et la corrosion. C'est l'effet combiné de la corrosion et d'une contrainte mécanique. [13].



Figure I. 6 : Corrosion sous-contrainte

#### I.3.5. Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est similaire à la corrosion par piqûre. Elle survient généralement en présence de petits volumes de solution stagnante situés dans des cavités, sous des dépôts, ou dans des joints et des fissures. Dans ces conditions, la solution devient appauvrie en oxygène et s'acidifie, favorisant ainsi le processus corrosif. [7]



Figure I. 7 : Corrosion caverneuse

### **I.5.6. Corrosion par piqûres**

La corrosion par piqûres se caractérise par des attaques très localisées, souvent dues à la formation d'anodes de petite taille à proximité de grandes cathodes [9]. Ce phénomène provoque des dommages fortement concentrés sur des secteurs spécifiques du métal, créant de petits puits qui peuvent progresser jusqu'à la perforation du matériau. [14]



Figure I. 8 : Corrosion par piqûres

### **I.5.7. Corrosion inter granulaire**

La corrosion intergranulaire se caractérise par une attaque sélective au niveau des joints de grains ou de leur proximité immédiate, tandis que le reste du matériau n'est pas affecté. Ce phénomène entraîne la désintégration de l'alliage et une perte de ses propriétés mécaniques. Cette forme de corrosion peut être causée par la présence d'impuretés dans les joints, par un enrichissement ou un appauvrissement local en l'un des constituants de l'alliage, ou par la précipitation de phases et de combinaisons chimiques lors de traitements thermiques (comme la formation de martensite, de nitrures, de carbures, etc.). [6]

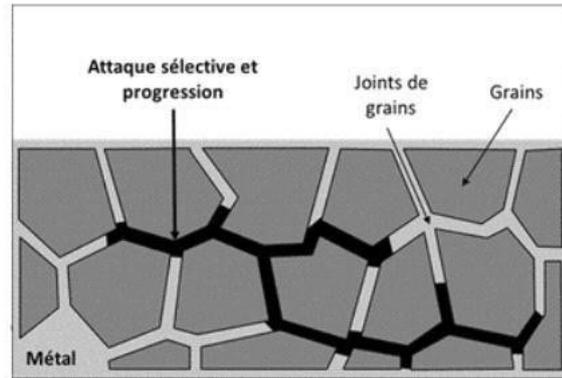
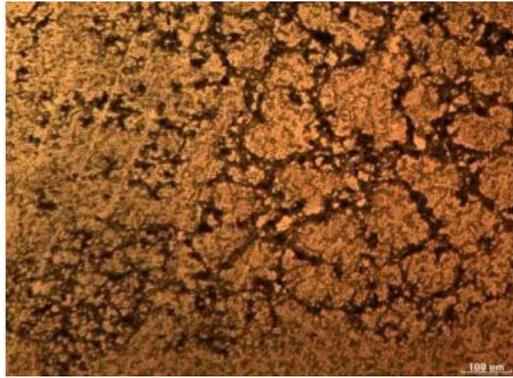


Figure I. 9 : Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique.

### I.5.8. Corrosion érosion

La corrosion érosion se manifeste lorsque des fluides corrosifs entrent en contact avec une surface métallique en mouvement relatif. Ce phénomène crée des sillons, des vallées, des surfaces ondulées et des trous qui présentent un aspect caractéristiquement directionnel (voir Figure I.10) [15].

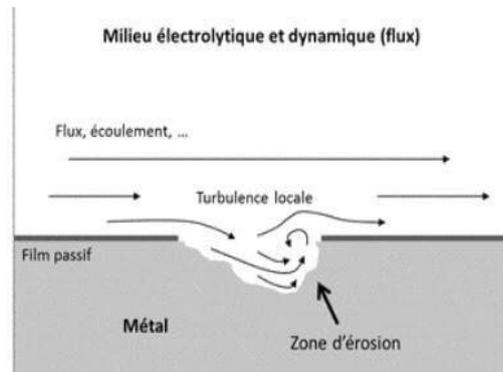


Figure I. 10 : Corrosion érosion

## I.6. Les facteurs qui influencent la corrosion

La résistance à la corrosion d'un matériau n'est pas seulement déterminée par ses caractéristiques intrinsèques, mais aussi par les conditions environnementales dans lesquelles il est utilisé. En plus de ces facteurs, les conditions opérationnelles et la durée d'utilisation jouent un rôle crucial dans les processus de corrosion.

Tableau I. 1 : les principaux facteurs de corrosion

<i>Facteurs du milieu corrosif</i>	<i>Facteurs métallurgiques</i>	<i>Facteurs définissant les conditions d'emploi</i>	<i>Facteurs dépendant du temps.</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentration du réactif</li> <li>• Teneur en oxygène</li> <li>• pH du milieu</li> <li>• Température</li> <li>• Pression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composition de l'alliage</li> <li>• Procédés d'élaboration</li> <li>• Impuretés</li> <li>• Traitement thermique</li> <li>• Traitement mécanique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etat de surface</li> <li>• Forme des pièces</li> <li>• Emploi d'inhibiteur</li> <li>• Procédés d'assemblage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vieillessement</li> <li>• Tensions mécaniques</li> <li>• Modification des revêtements protecteurs.</li> </ul>

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux :

### **I.6.1. Facteurs du milieu corrosif**

- ✓ Concentration du réactif
- ✓ Teneur en oxygène
- ✓ pH du milieu
- ✓ Température Pression

### **I.6.2. Facteurs métallurgiques**

- ✓ Composition de l'alliage Procédés d'élaboration Impureté
- ✓ Traitement thermique
- ✓ Traitement mécanique.

### **I.6.3. Facteurs définissant les conditions d'emploi**

- ✓ Etat de surface
- ✓ Forme des pièces
- ✓ Emploi d'inhibiteur
- ✓ Procédés d'assemblage

### **I.6.4. Facteurs dépendant du temps**

- ✓ Vieillessement
- ✓ Tensions mécaniques
- ✓ Modification des revêtements protecteurs [16,17]

## **I.7. Vitesse de corrosion**

La vitesse de corrosion, soit la vitesse à laquelle un matériau se dissout par suite d'une action chimique, constitue un important paramètre à cet égard. Elle renvoie à la perte

---

d'épaisseur d'un matériau par unité de temps et de surface. La formule de la vitesse de corrosion est :

$$v_c = DM / St \dots\dots\dots I. 1$$

- ✓ M est la perte de masse après le temps d'exposée de l'échantillon,
- ✓ M en milligrammes,
- ✓ S en centimètre carrés,
- ✓ t en heures,

Dans la plupart des applications, une vitesse de corrosion inférieure à environ 0,50 mm/an est acceptable La vitesse de corrosion  $v_c$ , ici en mol/dm<sup>2</sup> [18].

## **I.8. L'acier**

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone, dans des proportions comprises entre 0,02% et 2% en masse. C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autre métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferronickels par exemple [19].

### **I.8.1. Composition chimique des aciers**

La composition chimique des aciers joue un rôle très important du point de vue mécanique (dureté, limite d'élasticité, charge à la rupture, etc.) que de point de vue physico-chimique (résistance à la corrosion, mesure, etc.). Nous allons développer le rôle de quelques éléments :

- ✓ Silicium (Si) : Il est nécessaire à la désoxydation en cours d'élaboration. De ce fait, une certaine proportion est fixé sous forme d'oxyde dans les inclusions, la partie non oxydée (et donc en solution solide) participe au durcissement
- ✓ Manganèse (Mn) : Participant aussi à la désoxydation, il fixe en outre le soufre sous forme de sulfure et permet le forgeage et le laminage du métal à chaud. La proportion de Mn qui subsiste en solution solide joue plusieurs rôles : durcissement par effet de solution solide et affinement de la structure (et donc durcissement).
- ✓ Soufre (S) : Impureté résiduelle, cet élément est fixé sous forme de sulfures manganèse. Les progrès des procédés sidérurgiques ont permis d'abaisser très sensiblement les proportions présentes dans les aciers.

- 
- ✓ Phosphore (P) : Impureté résiduelle, cet élément est présent en solution solide substitution. Il durcit la ferrite et dégrade sa résistance à la rupture fragile. Par ailleurs, ces aciers de construction métallique peuvent, dans certains cas, recevoir des additions particulières.
  - ✓ Nickel (Ni) : Il est ajouté pour affiner la structure et améliorer la résistance à la rupture fragile (aciers pour emplois à basses températures).
  - ✓ Cuivre (Cu) : Il participe au durcissement par effet de solution solide diminue la sensibilité des aciers non alliés à la corrosion atmosphérique (probablement en neutralisant les effets nocifs du soufre). En fin, on doit noter que les aciers de construction métallique sont des aciers qui possèdent leurs caractéristiques d'emploi à la sortie Del 'usine du producteur et n'exigent pas l'exécution d'un traitement thermique ultérieur pour les acquérir[6].

### **I.8.2. Structure des aciers**

Selon la composition chimique (teneur en carbone et en éléments d'alliage) et les conditions de chauffage et de refroidissement (traitements thermiques ou thermomécaniques lors de processus de fabrication) les aciers présentent, dans les conditions de mise en oeuvre, les structures métallographiques distinctes: en plus de la ferrite, qui est une solution solide du carbone dans le fer, on trouve la perlite qui est un agrégat de ferrite et de cémentite et la lédurite qui un agrégat de perlite et de cémentite. D'autre structure peuvent exister sous certaines conditions, il s'agit de la bainite, la troostite et la martensite.[6].

### **I.8.3. Fabrication de l'acier**

L'acier s'élabore actuellement de deux manières Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.

Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique [20].

---

### I.8.4. Propriétés mécaniques

Tableau I. 2 : Caractéristiques mécanique de l'X70 selon l'API5L

Caractéristiques API5L	EPAISSEUR (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A(%)	Re/Rm
X70	5-25	485-605	570-605	≥ 18	0.9

### I.8.5. L'acier au carbone

Utilisable dans différentes techniques économiques de formation du métal (notamment le pressage), l'acier ordinaire au carbone est utilisé dans un très large éventail d'application. Ces matériaux combinent faciliter de production et résistance adéquate, ainsi que d'excellentes caractéristiques qui permettent d'obtenir une bonne finition de surface. [20].

### I.8.6. Caractérisation et application des aciers doux

Faiblement résistant à la corrosion. Résistance 600 à 900 N /mm<sup>2</sup> ondulation légère. Ø : 0,10 / 0,16 / 0,20 Polissage, satinage et métaux tendres [21].



Figure I. 11 : L'acier doux

### I.8.7. Protection contre la corrosion

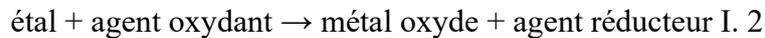
La lutte contre la corrosion des métaux peut être envisagée de plusieurs manières. Ses trois principes sont les suivants :

Application de revêtement. Emploi d'alliage passable. Protection par inhibiteur. [22]

---

### I.8.8. Réaction de corrosion

La corrosion des métaux est causée par une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant présent dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant selon la réaction suivante :



Ainsi, la corrosion du fer dans l'acide est due à la réaction spécifique suivante :



Cette réaction montre comment le fer réagit avec les ions hydrogène dans un milieu acide, conduisant à la formation de ions ferreux et de gaz hydrogène.

En milieu neutre et alcalin, la corrosion des métaux est généralement due à une réaction du métal avec l'oxygène. En présence de l'humidité, par exemple, le fer se corrode et forme de la rouille (Fe OOH) d'après la réaction I.4.

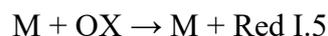


La rouille est un mélange complexe de différentes phases cristallines et amorphes d'oxyde et d'hydroxyde de fer. Sa composition varie en fonction des conditions climatiques et de la durée d'exposition à l'atmosphère. En général, les couches de rouille présentent une partie intérieure adjacente au métal relativement dense, composée principalement de magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) et de phases amorphes de Fe OOH. À l'extérieur, on trouve généralement une partie poreuse constituée principalement de lépidocrocite (γ Fe OOH) et de goethite (αFe OOH) [23].

## I.9. Corrosion du fer

### I.9.1. Corrosion du fer en milieu aqueux

La corrosion est le phénomène pour lequel les métaux et alliages subissent de leur environnement une attaque qui les fait retourner à l'état d'ion métallique, état qu'ils avaient sous leur forme originelle dans les minerais. Il s'agit de réactions d'oxydoréduction :



Où M est le métal, Ox est l'oxydant, Mn<sup>+</sup> union métallique et Red le réducteur. Les différents types d'étapes qui peuvent intervenir au cours d'une réaction électrochimique sont rassemblés. Le transfert de masse ; c'est le transport de matière entre le sein de la solution et

---

la surface de l'électrode. Les modes de transports sont : la migration, la diffusion et la convection. Le transfert de charge ; il se produit à la surface du métal dans la double couche, des réactions chimiques ; elles peuvent intervenir avant ou après le transfert des électrons. Ces réactions peuvent être par exemple des déshydratations, des échanges de protons. On trouve aussi des réactions de surface telles que l'adsorption et la désorption. La double couche est la zone à partir de laquelle l'espèce est réactive vis du métal. L'épaisseur de cette couche est de l'ordre du nanomètre. [24] Les phénomènes de corrosion sont importants lorsque le métal est placé au contact de solutions aqueuses. Cette corrosion humide est dans la plupart des cas de nature électrochimique : elle se manifeste lorsque le métal et l'électrolyte en présence. Elle résulte de courants locaux dus à l'existence de piles locales, la réaction cathodique et anodique étant localisées en deux zones distinctes selon les deux réactions suivantes :



En solution aqueuse, un équilibre électrochimique peut mettre en jeu des protons  $H^+$ . Le potentiel électrochimique d'un tel système va donc dépendre de la concentration en  $H^+$ , c'est à dire du pH. On représente cette dépendance à travers des diagrammes E- pH ou diagrammes de Pourbaix [25].

### **I.9.2. Corrosion dans des milieux acides :**

Dans ce type de milieu, la surface de nombreux métaux peut souvent être considérée comme dépourvue de toute couche protectrice telle que de l'oxyde ou de l'hydroxyde. Cependant, il est important de noter qu'elle peut être recouverte de manière plus ou moins uniforme par de l'hydrogène atomique adsorbé, et au fil du temps, par des couches de produits de corrosion insolubles dans le milieu acide considéré. Les mécanismes décrits ci-après ne tiennent généralement pas compte de la présence éventuelle de telles couches superficielles préexistantes [26]. Dans les milieux acides, les inhibiteurs les plus couramment utilisés sont des molécules organiques. Ces inhibiteurs agissent d'abord à la surface des métaux avant d'intervenir dans les processus réactionnels de corrosion pour en diminuer la vitesse.

---

## II. Généralité sur les peintures

### Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons les différents types de peintures, leurs principaux constituants ainsi que leurs domaines d'application, en mettant un accent particulier sur les peintures en poudre, sujet central de notre recherche.

### II.1. Définition de peinture

Une peinture, également appelée "paint" en anglais, est une préparation fluide (liquide, pâteuse ou pulvérulente) capable de s'étaler en une couche mince sur divers matériaux. Après séchage ou réticulation (durcissement), elle forme un revêtement mince. Pour remplir son rôle efficacement, le système de peinture doit être adhérent, continu, imperméable et durable dans le temps [18]. Selon le dictionnaire technique des peintures et des travaux d'application, une peinture est un produit liquide ou en poudre contenant des pigments, destiné à être appliqué sur une surface pour former un film opaque doté de qualités protectrices, décoratives ou techniques spécifiques [19].

### II.2. Les Principaux constituants des peintures

Une peinture est un mélange complexe de matières premières suivantes :

- ✓ Les solvants (ou diluants à l'exception des peintures poudres et des peintures sans solvant),
- ✓ Les pigments
- ✓ Les polymères

### II.3. Types des peintures

- ✓ Les peintures à l'eau : Les peintures à base d'eau sont des peintures dont la phase solvant est principalement constituée d'eau. On distingue principalement trois grands types : les peintures acryliques, vinyliques et alkydes. Ces termes font référence aux types de liants utilisés, qui peuvent être des polymères solubles dans l'eau, des systèmes colloïdaux ou des dispersions aqueuses de polymères, auxquels peuvent être ajoutées différentes quantités de co-solvants selon le système spécifique.
- ✓ Les peintures à haut extrait sec : Qui sont composées de très faibles quantités de

---

solvant ou de Co-solvant (20% et 30%).

- ✓ Les peintures poudres : Qui ne contiennent aucun solvant
- ✓ Les peintures à émulsion : Le lait est la plus vieille émulsion du monde [19].

## **II.4. La peinture poudre**

La peinture en poudre, ou poudre de revêtement, est une peinture thermodurcissable qui ne contient pas de solvant. Elle contient des sites actifs qui permettent son durcissement par réticulation lors de la cuisson après application. Ce type de peinture ne nécessite pas l'ajout de diluants. Le procédé de peinture en poudre, également appelé poudrage (ou projection électrostatique), est une technique de revêtement et de protection écologique et économique par rapport aux peintures traditionnelles, car elle est exempte de solvants.

Elle est applicable aux :

- Métaux Ferreux Comme Non –Ferreux.
- Pièces Métalliques En Acier.
- Galvanisé.
- Electro-zingué.
- Aluminium Brut, Anodisé Ou Déjà laqué. [21]

### **II.4.1. Principaux constituants**

Comme toutes types de peinture les peintures poudre sont constituées de quatre éléments principaux selon la littérature [19, 20,21] :

Un liant –des pigments- des charges- des additifs.

#### **II.4.1.1. Le liant**

C'est une substance macromoléculaire synthétique appelée polymère, formée par polymérisation. Cette substance peut être liquide ou solide ; dans le cas des peintures, elle est solide et se compose d'un couple résine-durcisseur ou résine-résine. Le pourcentage de résine utilisé détermine l'aspect de la peinture (brillant, mat, satiné) ainsi que ses propriétés de résistance et de durabilité.

Les liants confèrent certaines caractéristiques spécifiques aux peintures

Il assure le lien et la cohésion entre tous les composants ainsi que l'adhérence de la peinture au subjectile.

Il est aussi responsable de la résistance aux contraintes mécanique et chimique et toutes agressions du milieu ainsi que la tenue au vieillissement et la durabilité du film. Le tableau I. 1 récapitule les principaux liants utilisé en peinture poudre

Tableau I. 3 : les principaux liants utilisé en peinture poudre

Types	constituants	durcisseur	propriétés
Résines époxydiques	Systèmes à base de DGEBA (diglycidyléther du bisphénol A)	Produits aminés a dérivés de la dicyandiamide	-Bonne adhérence et dureté de surface. -Bonne résistance aux produits chimiques et à la corrosion _Mauvaise tenue extérieure (U, V)
Résines époxydiques-polyesters	Résine-polyester carbonylée et résines époxydique type DGEBA	Sans	-Bonne tenu extérieures (UV, T) -Bonne tendu de film _Prix avantageux -Résistance moyenne -Utilisation facile et large
résines polyesters	Résine polyester carbonylée	Isocyanurate de trigly-cidyle	-Excellente tenue extérieure (UV, T) -Résistance chimique limités -Excellentes propriétés mécaniques
Les résines polyuréthannes	Résine polyester hydroxylée	Pré polymères d'iso cyanates	-Très bonne tenue extérieure -Très bonne tension -Difficultés à obtenir certains effets
Les résines acryliques	Résine acrylique hydroxylée ou aminée	Pré polymères d'iso cyanates	-Performances mécaniques faibles -Cout élevé -Excellente tenue extérieure -Bonne dureté de surface

• Les cinq familles de résines existent pour ce type de peintures :

- 1-Les résines époxydiques.
- 2-Les résines époxydiques-polyesters.
- 3-Les résines polyesters.
- 4-Les résines polyuréthannes

---

5- les résines acryliques.

### **II.4.2. Les pigments**

Ce sont des **substances** solides pulvérulents minéral ou organiques de granulométrie très fine généralement  $<1\mu m$  insolubles dans le milieu de suspension dans ce cas c'est le liant. Ils sont utilisés pour leurs propriétés optiques, protectrices et décoratives.

#### II.4.2.1. Le rôle des pigments

- Ils déterminent l'opacité et la couleur de la peinture (pouvoir colorant et aspect décorative). que la dureté, l'imperméabilité ou la résistance à la corrosion (propriété protectrice).
- Lytique par l'absorption et la réflexion des rayons UV (Ultra-Violet).

#### **II.4.2.2. Classement des pigments**

##### **II.4.2.2.1. Pigment organique**

Il existe plusieurs centaines de formules chimiques. Les composés les plus utilisés en peinture sont :

- Les dérivés de phtalocyanine.
- Les dérivés azoïques.
- Les pigments isoindoline.

##### **II.4.2.2.2. Pigments minéraux**

Ils sont regroupés par la couleur, les pigments minéraux : sont classés par importance d'utilisation décroissante Dans le tableau ci-dessous. [21]

Tableau I. 4 : Les différents pigments minéraux.

NOM	FORMULE
<b>Blanc</b>	
Oxyde de titane	TiO <sub>2</sub>
Lithopone	BaSO <sub>4</sub>
Oxyde de zinc	ZnO
<b>Bleu</b>	
Ferrocyanure ferrique	(FeNH <sub>4</sub> Fe(CN) <sub>6</sub> )
Bleu de cobalt	(CoO) <sub>m</sub> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>n</sub>
Bleu outremer	silicate Al <sub>2</sub> Na polysulfure
<b>Vert</b>	
Oxyde de chrome	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Oxyde de chrome hydraté	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .nH <sub>2</sub> O
vert de chrome	Jaune de chrome et ferrocyanure ferrique
<b>Jaune</b>	
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Jaune titanate chrome	(Ti,Cr,Sb) <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
Jaune titane nickel	(Ti,Ni,Sb) <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
Jaune de cadmium	(CdS+ZnS)
<b>Orange</b>	
Orange de chrome	(xPbCrO <sub>4</sub> , yPbO)
Orange de molybdène	Pb(Cr,Mo,S) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
<b>Rouge</b>	
Rouge de cadmium	CdS, CdSe
Rouge molybdène	Pb(Cr,Mo,S) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Brun</b>	
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Noir</b>	
Oxyde de fer	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>

#### II.4.2.3. Les additifs

Ce sont des substances de diverses natures chimiques incorporées aux formulations, il peut s'agir d'adjuvant qui confèrent certaines propriétés spécifiques à la poudre ou au film de peinture : le tendu de surface le matage, le dégazage, l'aptitude à la fluidité. Il s'agit notamment

- d'agent de tension : des polyacrylates, le polybutyral vinylique.
- Agent de matage et accélérateur : des cires polyéthylènes.
- Agent de dégazage : les benzines.
- Additifs à effet spéciaux :
- texturé (acétylate de cellulose, butyle polyvinylique)
- grainé ou givré : argile montronite.
- Vermiculé : tétraméthoxyméthyle.

---

#### **II.4.2.4. Les charges**

Les charges sont des matières solides minérales et pulvérulentes de granulométrie supérieur à  $1\mu m$ , elles sont également des produits pulvérulents insoluble dans le milieu de dispersion mais Possédant un pouvoir opacifiant négligeable, elles sont naturelle, généralement blanche, ou légèrement grisâtre ou jaunâtre.

Il s'agit des carbonates tels que le carbonate de calcium, des sulfates comme le sulfate de Baryum, des silicates comme le talc qui est un silicate de magnésium. [21].

- Le rôle des charges

L'amélioration des propriétés rhéologique ou physique tel que la dureté de film, son imperméabilité ou sa résistance à la corrosion abaisser le prix de revient de la formulation, tout en aidant à régler l'aspect du produit final.

### **II.5. Les types de peinture poudre**

#### **II.5.1. La peinture en poudre époxy**

C'est la plus résistante à la corrosion, y compris quand elle est immergée dans l'eau. Elle est utilisée essentiellement dans l'industrie pour la mise en peinture des vannes, des tuyaux, des citernes. Elle est idéale en milieu marin.

#### **II.5 2. La peinture en poudre polyester**

Elle est utilisée principalement dans le domaine industriel pour les accessoires automobiles, le matériel ferroviaire ou agricole, mais également pour le mobilier de jardin, le luminaire, les clôtures.

#### **II.5.3. La peinture en poudre mixte époxy-polyester**

Elle constitue un compromis technique entre les peintures époxy pur aux bonnes propriétés anticorrosion et de faible résistance aux UV, et les peintures polyester présentant une très bonne résistance aux UV et aux intempéries. Elle est utilisée pour la décoration d'intérieur et pour la protection anticorrosion d'éléments métalliques non soumis à l'exposition extérieure. [22].

---

## II.6. Domaine d'application

La peinture en poudre sert à peindre essentiellement

- Le mobilier métallique.
- Certaines pièces automobiles.
- Du matériel de bâtiment, comme les bétonnières.
- Du matériel agricole et de jardin, comme les brouettes ou salons de jardin en métal thermique.

• Elle est utilisée dans l'industrie pour les tuyaux, les vannes et les citernes, et également pour le Turing des motos et des karts. Dans ce dernier cas, afin de lui donner une finition brillante, il est possible d'appliquer en finition une couche de vernis en poudre polyester de très haute transparence et brillance.

## II .7. Avantages et inconvénients

### II .7.1. Avantage

• La peinture par poudrage est une technologie facile à mettre en oeuvre, autorisant dans certains cas un recyclage des excédents utilisé, utilisant des produits ayant des durées de vie et de stockage assez longues. le principal avantage des peinture en

poudre réside dans le fait qu'elles ne contiennent pas de solvant donc en conséquence ce procédé de peinture ne dégage pas de composés organique volatils.

- Ce type de peinture conduit à un rapport cout bénéfices intéressant
- Cette technologie peut permettre d'obtenir en une seule couche une épaisseur de film de 30 à 500 $\mu m$  .
- Les films obtenus ont d'exéllentes performances tenue résistance mécanique et Chimique
- C'est une peinture écologique, facile à appliquer, d'un aspect uniforme, et qui est monocouche.
- Le résultat obtenu est durable et uniforme.

---

• C'est une peinture à effet qui existe dans un grand choix de finitions (métallisée, mouchetée, grainée, martelée, ou imitation rouille) et dans de nombreux coloris des nuanciers RAL ou Pantone, mais aussi en contre typage.

• Elle est résistante aux chocs, aux rayures, aux torsions et au pliage, mais également aux produits chimiques, aux produits de nettoyage industriel et à l'eau de Javel.

- Plus Ecologique.

- Plus Economique.

- plus rapide ne nécessite pas un temps de séchage.

- Technique convient les formes complexes et de grand volume des pièces.

- Excellente résistance aux chocs Mécaniques.

- Durabilité et Dureté de surface.

- Résistance à la corrosion.

- Très Bonne tenue des couleurs.

• Haut niveau de Finition et de performance avec diversités d'aspect en une seule couche. [19]

### **II .7.2. Les inconvénients**

• En raison du procédé d'application de la poudre (procédé électrostatique), la pièce sur laquelle la peinture est appliquée doit être conductrice (ou cette dernière n'adhérera pas à la surface).

• Le passage au four à 180° C implique que la pièce doit pouvoir résister à une telle température. Certains matériaux comme le bois ou certains plastiques ne peuvent être thermo-laqués.

- La technique du Thermo laquage est obligatoirement en atelier et ne s'applique qu'à des pièces supportant le passage au Four.

- La technique du Thermo laquage est très difficile à décaper.

- Il n'y a pas de temps de séchage lorsqu'une pièce sort du four, mais seulement un Délai.

- de refroidissement variable selon la taille de la pièce peinte. [19].

## **Chapitre II :**

# **Matériels et méthodes**

---

## I. Matériels et méthodes

### Introduction

L'objectif de mon travail est de formuler une peinture en poudre anticorrosion, dans mon prochain chapitre ; je vais familiariser tout les matières et matérielles et leur mode d'utilisation.

### I.1. Matérielle utilisé

Tableau II. 1 : Matérielle utilisé

<p><b><u>Une balance :</u></b></p> <p>Une balance industrielle est utilisée pour peser rapidement des paquets, colis, cartons et produits chimique.</p>	
<p><b><u>Extrudeuse :</u></b></p> <p>C'est la machine industrielle qui permet de fondre le pré mélange des matières premières et le transforme à en pate pseudo plastique qui passe dans un rouleau pour avoir un film de 2 mm d'épaisseur qui vas chemins par la suite sur une bonde de refroidissement.</p>	
<p><b><u>Un broyeur :</u></b></p> <p>Sert à réduire une matière à une dimension donnée, correspondant à son emploi.</p>	

**Un tamis :**

Un tamis est une grille de maillage plus ou moins fin, servant à trier les particules solides, fixée sur un cadre.



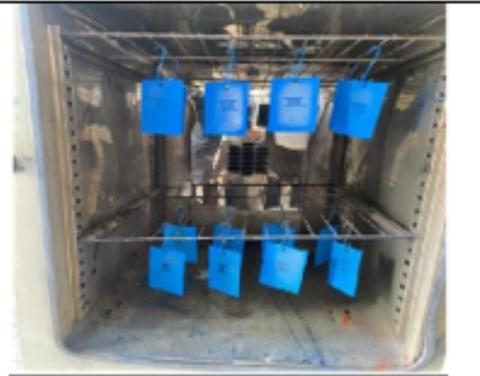
**Un pistolet électrostatique :**

La poudre fine projetée uniformément sur les surfaces métalliques grâce à un pistolet électrostatique.



**Un four+ Des pièces métalliques :**

Les pièces fraîchement peintes doivent séjourner dans un four soumis à une température élevée (200 C°).



## **I.2. Le thermo laquage (système électrostatique)**

Après préparation de la surface à traiter, application par pulvérisation électrostatique d'une peinture poudre thermodurcissable. Les poudres utilisées peuvent être fabriquées à base de résine époxy (résistante à certains agents chimiques), de résine polyester (résistantes aux rayons UV) ou d'un mélange des deux.

Le thermolaquage consiste à appliquer de la peinture poudre sur une surface, qui se fixe au support grâce à la polymérisation, est une technique qui fonctionne en deux étapes :

---

➤ **Première étape : le poudrage.**

Un opérateur ou un robot, muni d'un pistolet, va appliquer de la poudre colorée, qui va s'accrocher à la pièce à peindre grâce à ses propriétés électrostatiques, Cette peinture se présente sous la forme d'une poudre froide très fine qui est chargée (positivement) par un champ électrique. La pièce à peindre, porte une charge opposée (négative) ; la poudre, attirée par la force de Coulomb, adhère ainsi provisoirement sur la pièce.



Figure II. 1 : Le poudrage

➤ **Deuxième étape : la polymérisation.**

La pièce recouverte de peinture poudre va être placée dans un four à plus de 180° C, afin de faire durcir la poudre et la fixer à la surface de la pièce.

### **I.2.1. Équipement nécessaire pour procéder au thermolaquage**

La poudre de thermolaquage : il s'agit de la peinture sous forme de poudre. Plusieurs types de peintures peuvent être utilisés : peinture époxy (très résistante aux attaques chimiques mais pas aux UV), peinture polyester (résistante aux UV mais pas aux attaques chimiques), peinture mixte époxy et polyester (pour réunir les avantages des deux), peinture plascoat (très bonne résistance aux attaques chimiques)...



Figure II. 2 : La poudre de thermo laquage

- 
- Le pistolet de thermolaquage : ce pistolet va servir à pulvériser la peinture poudre. Très maniable, il permet aux opérateurs de bien appliquer la peinture sur l'ensemble de la pièce, même dans les recoins difficiles.



Figure II. 3 : Le pistolet de thermo laquage

- Le four de thermolaquage : il s'agit d'un four de polymérisation qui peut atteindre de très hautes températures (plus de 180° C).



Figure II. 4 : Le four de thermo laquage

- La cabine d'application de peinture thermolaquage : c'est un espace ventilé, dans lequel est projeté la peinture poudre. Elle permet d'assurer la sécurité dans l'atelier, en aspirant la poudre pour éviter sa dispersion dans l'air, mais aussi de réutiliser la poudre aspirée pour éviter le gaspillage.
- La loi de Coulomb : La loi de Coulomb exprime la force de l'interaction électrique entre deux particules chargées électriquement et immobiles. Elle stipule que cette force est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les charges et directement proportionnelle au produit des charges.

### **I.3. L'épaisseur du revêtement selon le type de poudre**

À température ambiante, l'épaisseur du revêtement dans des applications de type décorative peut varier de 30 à 80 microns et de 150 à 200 pour des applications d'ordre plus fonctionnelles. Cela peut varier aussi, naturellement, selon la nature de la poudre (époxy, polyester, mixte).

## I.4. Les matières Première utilisées et leurs rôles



Figure II. 5 : Durcisseur et Les agents a utiliser



Figure II. 6 : Les pigments Utilisées. Et PHOSFATE DE ZINC Charges (sulfate de baryum) +Résine Epoxy

---

## I.5. Mode opératoire

Tableau II. 2 : La formules de la Peinture Epoxy riche en zinc

Peinture Epoxy ROUGE BRIQUE riche en phosphate de zinc				
DESIGNATION	FO 1%	FO 2%	FO 3%	FO 4(%)
EPOXY	48.000	48.000	48.000	48.000
DURCISSEUR	15.760	15.760	15.760	15.760
Charge	15.440	19.440	25.440	28.440
PIGMENT BLANC	2.000	2.000	2.000	2.000
A1	0.300	0.300	0.300	0.300
A2	0.500	0.500	0.500	0.500
A3	01.000	01.000	01.000	01.000
Phosphate de zinc	17.000	13.000	07.000	04.000

Pour fabriquer la peinture en poudre, il est nécessaire de suivre différentes étapes :

### I.5.1. Le prémélange

Cette étape constitue de 3 étapes :

1- Le pesage des matières premières : en fonction d'une formule bien précis on pèse la quantité de chaque matière première, soit des matières pesées en grosses quantités, soit des petits compliments (qui nécessitent une balance de précision).

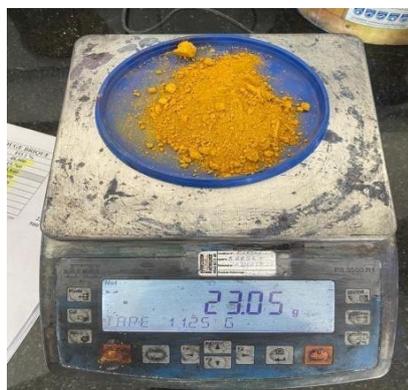


Figure II. 7 : Le pesage des matières premières

---

2- Remplissage : selon un ordre de remplissage pour donner une bonne homogénéité, les composants pesés sont versés dans une cuve de Pré-mélange.

3- Mélange : la cuve est placée sous un mélangeur pour homogénéisation en fonction des conditions (vitesse, temps de mélange...)



Figure II. 8 : Le mélangeur

### **I.5.2. Extrusion**

L'étape de l'extrusion permet de fondre les composants pour former une pâte viscoélastique et homogène. Le mélange est mis dans le corps de l'extrudeuse et il subit à une élévation de température qui varie entre 80 et 140 °C sous l'action de l'effort mécanique de la vis et des doigts de la coquille de l'extrudeuse et de l'apport de chaleur.



Figure II. 9 : L'extrusion

---

### **I.5.3. Refroidissement**

A la fin de l'extrudeuse, la pâte homogène est sortie entre deux rouleaux froids et acheminée sur une bande de refroidissement. Maintenant la pâte est alors un film d'épaisseur 1 à 2 mm solide et cassant.

### **I.5.4. Concassage**

Le film cassant réduit en chips.



Figure II. 10 : Le concassage

### **I.5.5. Le broyage**

L'étape de broyage permet de transformer les écaille en poudre prête à l'emploi pour le client.



Figure II. 11 : Le broyage

### **I.5.6. Le tamisage**

Où la peinture est broyée pour avoir la bonne granulométrie.



Figure II. 12 : Le tamisage

### I.5.7. L'étape de conditionnement

La dernière étape est le conditionnement de la poudre dans des cartons ou des fûts, elle est totalement prête à l'emploi pour le client.



Figure II. 13 : le traitement de surface des plaques

### I.5.8. Traitement de surface

On a utilisé l'acide sulfurique avec une quantité de 5% avec du l'eau pour traité les plaque de métal à utiliser.



Figure II. 14 : Le test de choc

---

### **I.5.9. Le poudrage polymérisation**

D'abord, on commence toujours par charger positivement la pièce métallique à peindre. Ensuite, on continue en chargeant négativement la peinture que l'on va appliquer. En définitif, l'objectif est d'obtenir deux courants qui s'opposent en sens inverse. On propulse alors les particules négatives de la peinture à l'aide d'un pistolet. Le métal chargé positivement les attire ainsi automatiquement comme un aimant.

La pièce est ensuite mise dans un four de cuisson à 180/200°C pendant 15 à 20 min, afin de fixer définitivement la peinture par polymérisation.



Figure II. 15 : Le poudrage polymérisation

### **I.6. Les tests mécaniques**

#### **I.6.1. Test de choc**

**II.** Appliquer la peinture sur plaque d'acier

**III.** Placer la plaque sur le support de l'appareil

**IV.** Laisser tomber la masse de 1kg à la hauteur de chute fixée par la norme sans craquelure ni décollement.



Figure II. 16 : le test de choc

---

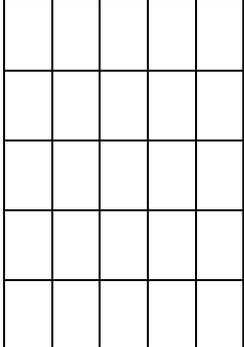
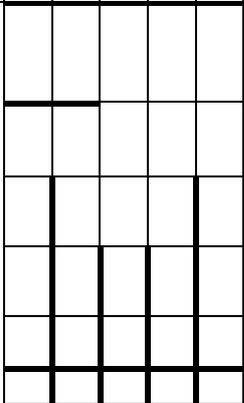
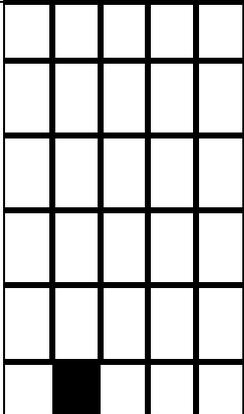
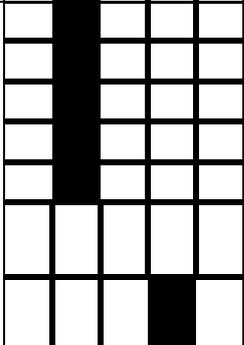
### I.6.2. Test d'adhérence

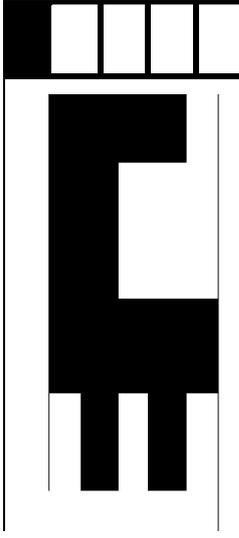
- Le revêtement ou le système complet à tester doit être appliqué et réticulé dans les conditions normales d'utilisation de ces produits.
- Laisser séjourner les plaques peintes à Température ambiante pendant 12 h maximum.
- Selon le type de peigne utilisé, pratiquer des incisions espacées de 1 ou 2 mm dans un sens puis dans le sens perpendiculaire afin d'obtenir un quadrillage. Il est important que la pression exercée sur le peigne soit constante et que le feuil soit incisé jusqu'au support ou jusqu'à la couche immédiatement en dessous (dans le cas d'essais d'adhérence entre couches).
- Souffler ensuite sur la partie quadrillée pour éliminer les fines particules qui se sont détachées de L'incision.
- Appliquer une bande ruban adhésif de façon à ce qu'elle colle entièrement sur la partie quadrillée et qu'il n'y ait aucune bulle d'air entre le ruban et le film de peinture.
- Arracher le ruban d'un mouvement rapide et continu.



Figure II. 17 :Le peigne

Tableau II. 3 : Les Surface de la partie quadrillée pour laquelle un écaillage s'est produit

Classification	Description	Surface de la partie quadrillée pour laquelle un écaillage s'est produit
1	Les Bords des Incisions Sont Parfaitement Lisses ; Aucun des Carrés du quadrillage Ne les détaché.	
2	Détachement de Petites Écailles du Revêtement aux Intersections des Incisions, Qui Représente Environ 5% de la Partie Quadrillée.	
3	Le revêtement s'est détaché le long des bords ou aux intersections des incision, et représente nettement plus de 5% jusqu'à environ 15% de la Partie Quadrillée.	
4	Le revêtement s'est détaché le long des bords des incisions en partie ou en totalité en larges bandes ou s'est détaché en partie ou en totalité en divers	

5	<p>Le revêtement s'est détaché le long des bords des incisions en larges bandes ou quelques carrée se sont détachée représente nettement plus de 35% jusqu'à environ 65% de la partie quadrillée.</p>	
---	---	---

### I.6.3. Test de pliage mandrine conique

Cette méthode a pour objet de définir la résistance d'un film de peinture appliqué sur plaque métallique, aux craquelures et au décollement, lorsqu'il est soumis au pliage sur un mandrin conique.

- **Principe :**

L'essai consiste à plier la plaque recouverte d'un film sec sur mandrin conique selon les normes fixées sans craquelure ou décollement du film.

- **Appareillages et produits :**

Appareil de pliage muni d'un mandrin conique Plaque d'acier 180 x 80 x 0.8 mm



Figure II. 18 : Appareil de pliage muni d'un mandrin conique

- 
- **Mode opératoire :**
    - Appliquer la peinture sur plaque d'acier dans les mêmes conditions que celles utilisées par le client (épaisseur, séchage air, étuvage, etc...) .
    - laisser séjourner les plaques peintes à température ambiante pendant 12 h maximum.
    - Glisser la plaque entre le mandrin et la barre de pliage, la face peinte étant tournée vers la barre.
    - Serrer les vis de blocage
    - Abaisser le levier de 180° à vitesse uniforme
    - Déterminer l'épaisseur du film sec
    - Examiner aussitôt la plaque

#### III.6.4. Teste de l'emboutissage

Cette méthode consiste à vérifier la résistance à l'emboutissage d'un film de peinture appliqué sur un support métallique.

- **Principe :**

L'essai consiste à soumettre la plaque recouverte d'un film sec à une déformation lente et à noter la profondeur de l'embouti selon les normes fixées sans craquelure ou décollement du film.

- **Appareillages et produits :**
  - Emboutisseur Erichsen
  - Plaque d'acier 180 x 80 x 0.8 mm



Figure II. 19 : Emboutisseur Erichsen

- **Mode opératoire :**
  - Appliquer la peinture sur plaque d'acier (épaisseur, séchage air, étuvage, etc...)

- 
- laisser séjourner les plaques peintes à température ambiante pendant 12 h maximum
  - Serrer fortement la plaque entre la bague et la matrice de l'emboutisseur, le revêtement étant du côté de la matrice
  - Faire amorcer (automatiquement ou manuellement) l'extrémité sphérique du poinçon à vitesse constante jusqu'à la profondeur d'embouti exigée par les normes sans craquelure ni décollement.

### **I.6.5. Les tests chimiques**

- **Test de brouillard salin :**

L'essai au brouillard salin, aussi nommé test brouillard salin, est une méthode de contrôle qualité des revêtements largement répandue dans l'industrie. C'est une évaluation standardisée de la résistance à la corrosion de matériaux métalliques.

La conduite de ces essais est décrite par différentes normes (ASTM B117, DIN 50021, EN ISO 9227)

- **Principe :**

Dans la chambre d'essai, la vaporisation d'une solution salée produit une atmosphère propice à la corrosion qui attaque la pièce testée. Dans ces conditions, le phénomène de corrosion est accéléré et les revêtements perdent leurs propriétés de protection. La durée du test dépendra de la qualité du revêtement. En fixant les paramètres de concentration de la solution salée, de température, de pression et de pH, les résultats sont reproductibles.

- **Types d'essais :**

On distingue, en fonction de la solution utilisée :

- essai au brouillard salin neutre avec l'utilisation d'une solution de chlorure de sodium (NaCl) au pH neutre : test NSS (Neutral Salt Spray) ;
- essai au brouillard salin acétique avec l'ajout d'acide acétique à la solution saline : test ASS (Acetic Acid Salt Spray) ;
- essai accéléré au brouillard salin cupro-acétique avec l'ajout de chlorure de cuivre(II) à la solution saline : test CASS (Copper Accelerated Salt Spray test).

Les essais ASS et CASS sont particulièrement adaptés aux revêtements décoratifs.

▪ **Les paramètres de l'essai :**

Lors d'un essai au brouillard salin avec une solution de NaCl selon la norme DIN 50021, les paramètres sont fixés de la façon suivante :

Tableau II. 4 : Les paramètres de l'essai de brouillard salin

Paramètre	Valeur
<b><u>pH</u></b>	<b>de 6,5 à 7,2</b>
<b>Concentration en NaCl de la solution</b>	<b>50 ± 5 g/l</b>
<b>Température intérieure de la chambre</b>	<b>35 °C ± 2 °C</b>
<b>Pression atmosphérique</b>	<b>de 0,7 à 1,4 bar</b>
<b>Débit de solution recueillie (condensats)</b>	<b>de 1 à 2 ml/h</b>
<b>durée de l'essai</b>	<b>10 Jours</b>

▪ **Schéma de fonctionnement de la pareille :**

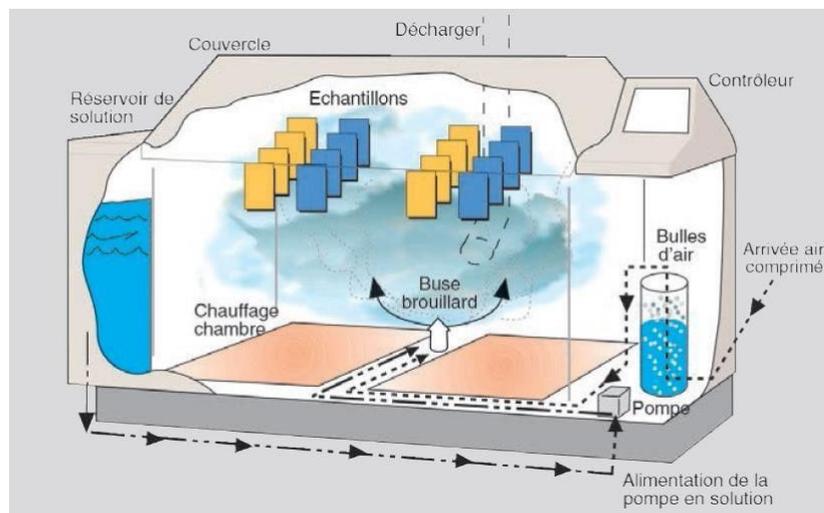


Figure II. 20 : Schéma de fonctionnement de brouillard salin

- La solution corrosive est pompée dans le réservoir et dirigée vers la buse
- L'air comprimé passe par l'agitateur à bulles (humidificateur), se charge d'humidité et est envoyé vers la buse

- 
- La buse pulvérise l'air et la solution sous forme de brouillard fin et corrosif
  - Les systèmes de chauffages maintiennent la température programmée dans la chambre

- **Mode opératoire :**

**A) Préparation :**

**1- Des échantillons :**

- Etaler la peinture sur une plaque métallique d'une surface déterminée(S en m<sup>2</sup>).
- Pesée la plaque après séchage m<sub>1</sub> en grammes.
- Rayer la peinture en forme de x a l'aide d'un cutteur jusqu'à atteindre le support métallique, utiliser la règle pour guider le cutteur et effectuer un mouvement continu d'une façon à ne pas endommager la peinture alentour la rayure.
- Placer les échantillons sur un support non corrosif en les inclinant  $20 \pm 5^\circ$  par rapport à la verticale.



Figure II. 21 : La Préparation des plaques

**2- Solution saline :**

- Dissoudre une masse suffisante de NaCl pour obtenir une concentration de  $50 \pm 5$  g/l dans l'eau distillé ou dé ionisée ayant une conductivité inférieure ou égale à  $20 \mu\text{s/cm}$  (à  $25 \pm 2$  °C).
- Mesurer le Ph de la solution, et ajuster si nécessaire selon la norme ISO 9227 2006.
- Filtrer la solution avant d'utiliser pour éviter toutes les matières solides.

---

- Maitre les plaques dans le brouillard salin pendant quelques jours (une durée dans laquelle se fait la corrosion des plaques).

- **Après cette durée :**

- Contrôle du PH : 6,5 à 7,2 en milieu salin neutre.

- Retirer les plaques d'essai et sécher durant 0.5 a 1 PH avant rinçages.

- Rincer ou plonger soigneusement l'échantillon dans l'eau courante et sécher les afin d'éliminer les produits de corrosion par un nettoyage mécanique.

- Pesée la plaque après séchage  $m^2$  en grammes.

- Détermination de la perte de masse  $\Delta m$ .

## **Conclusion**

En fin j'ai pu récolter mes données et commencer leur analyse.

## **II. Contrôle de qualité**

### **II.1. Contrôle de qualité du revêtement**

Le contrôle de la qualité du revêtement permet de savoir si les produits vendus par l'entreprise sont conformes aux spécifications de vente. Ce contrôle est effectué par un contrôleur qualité. Ce dernier peut contrôler :

- Les composants d'un produit ou la matière première dès la réception ;
- La production en cours de réalisation ;
- Les produits finis.

A la suite du contrôle, le contrôleur qualité va rédiger un rapport sur le déroulement du contrôle et les mesures à prendre pour améliorer la production et réduire les cas de non-conformité [33].

### **II.2. Les essais de contrôle de qualité du revêtement extérieure**

#### **II.2.1. Essai d'immersion dans l'eau chaude**

L'essai doit consister en une immersion dans l'eau chaude pour évaluer la résistance du revêtement.

Le matériel utilisé est constitué par :

- 
- Un four ou un bain chauffant, dont la température peut être contrôlée à  $80\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$  ;
  - De la verrerie, de taille appropriée pour recevoir les échantillons, avec un couvercle en verre/plastique pour minimiser l'évaporation;
  - Un couteau;
  - Eprouvettes [33].

#### II.2.1.1. Déroulement de l'essai

- Les échantillons doivent être découpés à froid sous forme d'éléments de  $150\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ , avec le petit côté dans la direction perpendiculaire à l'axe du tube.
- Trois échantillons doivent être préparés à partir de l'échantillon de tube, pour chaque essai.
- Les éprouvettes doivent être placées dans un récipient en verre, remplie d'eau distillée préalablement chauffée à  $80\text{ °C}$ .
- S'assurer que les éprouvettes sont recouvertes par une hauteur d'au moins  $50\text{ mm}$  d'eau.
- Maintenir l'eau et les éprouvettes à  $80\text{ °C}$  pendant 48 heures.

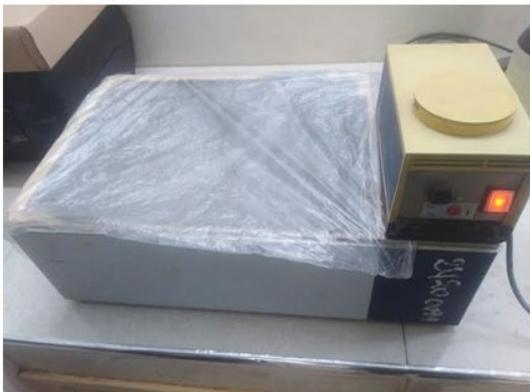


Figure II. 22 : Appareille l'eau chaud

- Après la période de conditionnement, les échantillons doivent être retirés du bain, séchés au moyen de papier ou d'un linge.
- Les échantillons doivent être examinés après avoir été refroidis à la température ambiante.
- Les échantillons doivent être soumis à un examen visuel pour évaluer la perte d'adhérence à l'interface revêtement/substrat sur les quatre faces. Ne pas tenir compte de tout décollement de revêtement de  $5\text{ mm}$  sur chaque face au niveau des coins de l'échantillon [33].

---

## II.2.2. Essai d'immersion dans l'eau salée

Pour réaliser un essai d'immersion dans l'eau salée pour tester la corrosion, voici un mode opératoire standard et une méthode recommandée :

### 1. Préparation des échantillons :

- Choisissez les échantillons à tester. Assurez-vous qu'ils sont propres et exempts de toute contamination avant de commencer.
- Identifiez les zones à tester sur chaque échantillon, par exemple des zones exposées et non exposées à l'eau salée.

### 2. Préparation de la solution d'eau salée :

- Préparez une solution d'eau salée en dissolvant du sel dans de l'eau distillée pour obtenir une concentration spécifique, généralement exprimée en % de poids/volume (% p/v). Une concentration typique est de 3.5% NaCl.



Figure II. 23 : Les matière première de l'essai immersion dans l'eau salée

Lorsque la plaque métallique est immergée dans l'eau salée, des bulles de gaz peuvent se former à la surface si la peinture n'est pas imperméable. Des dépôts de corrosion peuvent également apparaître sur la surface, indiquant une dégradation potentielle du revêtement.



Figure II. 24 : L'eau salée

## **II.2.3. Essai de décollement cathodique**

### **II.2.3.1. L'équipement de l'essai**

- Une source électrique en courant continu. Redressé, avec une sortie à tension contrôlée
- Une plaque chauffante, avec un récipient en acier, contenant du sable ou de la grenaille d'acier dont la température est maintenue à 3°C ou un four dont la température est maintenue à 3 °C
- Une électrode de référence au calomel ;
- Un fil électrode, en platine, de 0,8 mm à 1 mm ;
- Un cylindre en plastique, de diamètre intérieur 75 mm  $\pm$  3 mm
- Une solution de chlorure de sodium à 3 % dans l'eau distillée. Un couteau



Figure II. 25 : Appareillage et d'essai d'écoulement cathodique (photo originale) [33]

- Deux forets, de 6 mm et de 4 mm
- Support de fixation du cylindre sur l'éprouvette avec son Joint d'étanchéité entre le cylindre et l'éprouvette.

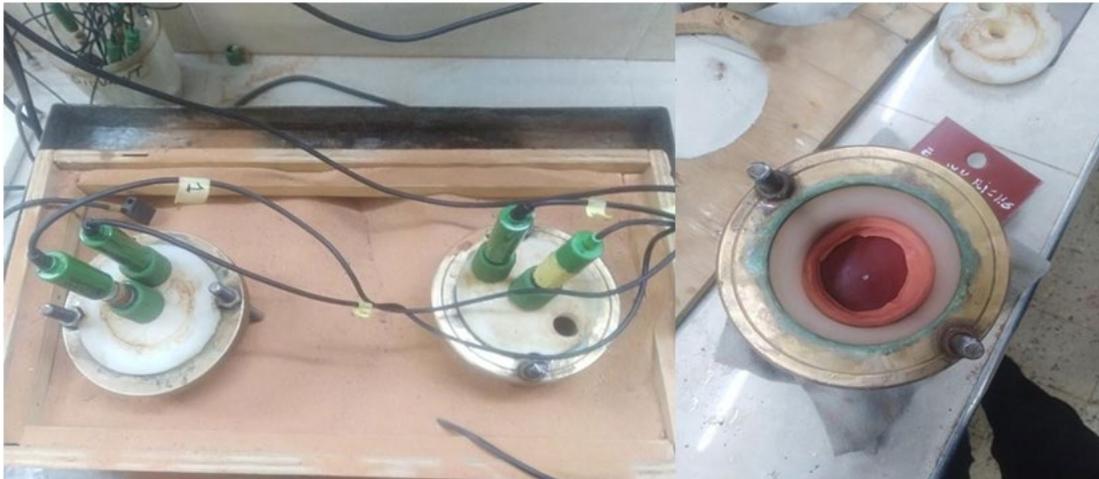


Figure II. 26 : Support de fixation du cylindre sur l'éprouvette

### II.2.3.2. Caractéristiques mesurables

La mesure de caractéristiques suivantes est prévue par le présent mode opératoire,

Tableau II. 5 : les caractéristique mesurables de l'essai décollement cathodique

Caractéristique	Symbole	Dispositifs nécessaires
<b>Tension (V)</b>	<b>E</b>	<b>Pt</b>
<b>Température (°C)</b>	<b>T°</b>	<b>TM</b>
<b>Rayon décollé (mm)</b>	<b>R<sub>d</sub></b>	<b>PC</b>

PC: Pied à coulisse

Pt : Potentiostat

TM : Thermomètre

▪ **Prise en charge des éprouvettes :**

- Les éprouvettes prélevées dans des anneaux d'essai doivent être approximativement de 100 mm x 100 mm x l'épaisseur du tube.

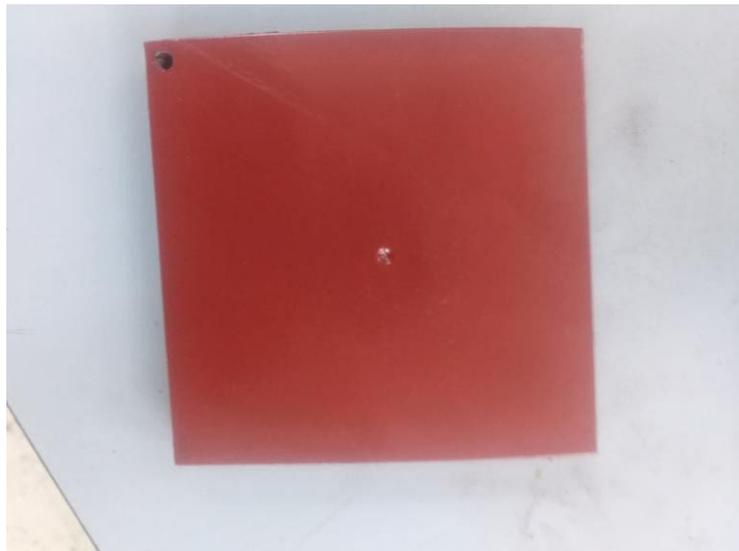


Figure II. 27 : Epreuve d'essai

**II.2.3.3. Principe**

- Les éprouvettes prélevées dans les tubes dont l'absence de porosités a été confirmée au moyen d'un détecteur de porosités pour assurer la continuité de revêtement.
- Un défaut de diamètre 6 mm doit être percé au travers du revêtement au centre de l'éprouvette pour exposer le substrat en acier

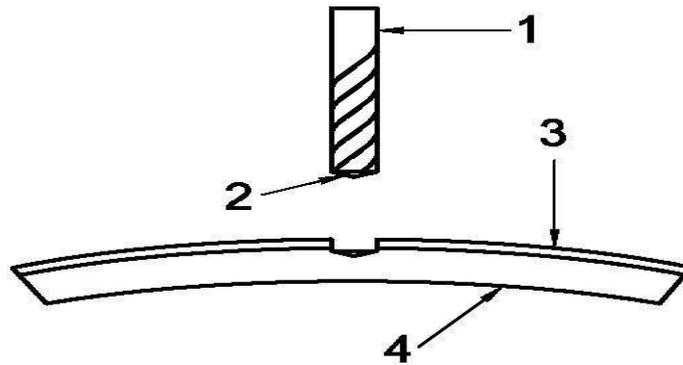


Figure II. 28 : Perçage du défaut artificiel

1. Foret conique Ø6 mm
2. Extrémité conique
3. Revêtement
4. Acier

- Le cylindre en plastique doit être centré sur le défaut et un produit d'étanchéité doit être appliqué pour constituer un joint étanche à l'eau
- Le cylindre doit être rempli à une hauteur d'au moins 70 mm avec la solution de chlorure de sodium.
- Préchauffée l'ensemble (éprouvette + solution) à la température d'essai.
- Le niveau de la solution doit être marqué sur le cylindre.
- L'électrode doit être insérée dans la solution et branchée à la borne positive de la source électrique de courant continue.
- La borne négative de la source électrique de courant continue. Doit être connectée à une zone Dénudée de l'éprouvette [33].
- La tension (négative par rapport à l'électrode de référence au calomel) doit être appliquée à l'éprouvette, maintenue constante dans les conditions d'essai suivantes :  
3,5 V,  $65\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ , pendant 24
- A la fin de l'essai, la cellule d'essai doit être démontée, l'éprouvette refroidie à l'air
- À  $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$  et les caractéristiques de décollement cathodique de l'éprouvette évaluées en au plus 1 h après retrait du milieu d'essai.

- 
- Au moyen du couteau, 06 incisions radiales doivent être faites au travers du revêtement jusqu'au substrat. De telles incisions doivent s'étendre d'au moins 20 mm à partir du centre du défaut.
  - La pointe de la lame du couteau doit être insérée sous le revêtement au niveau du défaut. En Procédant à une action de levier, peler le revêtement. Continuer jusqu'à ce que le revêtement montre une ferme résistance à l'action de levier [33].
  - La longueur sur laquelle il y a perte d'adhérence doit être mesurée à partir du bord du défaut le long de chaque incision radiale et la moyenne de ces valeurs mesurées doit être calculée et enregistrée dans le rapport d'essai Photo [33].

#### **II.2.4. Calorimétrie différentielle (DSC)**

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est une technique d'analyse et de quantification des phénomènes thermiques. Son principe de fonctionnement consiste à mesurer la variation de la différence de flux de chaleur échangé entre un échantillon à analyser et une référence. Le calorimètre consiste à mesurer le flux de chaleur nécessaire au maintien du matériau à la même température que celle de l'échantillon de référence.

L'enregistrement d'un signal proportionnel à la différence de flux de chaleur entre ces deux éléments permet de déterminer l'enthalpie de fusion [34].



Figure II. 29 : DSC

---

### II.2.4.1. Caractéristiques mesurables

La mesure de caractéristiques suivantes est prévue par le présent mode opératoire, elles nécessitent les dispositifs répertoriés, ci-dessous [33].

Tableau II. 6 : Les caractéristiques mesurables de l'essai Calorimétrie différentielle

Caractéristique	Symbole	Dispositifs nécessaires
Température de transition vitreuse (°C)	Tg	DSC
Enthalpie (J/g)	$\Delta H$	DSC
Poids (mg)	M	Balance
<b>DSC : calorimètre différentiel à balayage</b>		

#### • Poudre époxy :

Un échantillon représentatif de poudre époxy doit être prélevé directement à partir de l'enceinte de stockage.

#### • Filme polymérisé :



Figure II. 30 : Echantillon d'époxy poudre riche de zinc

Un échantillon représentatif de film polymérisé doit être prélevé directement à partir du tube monocouche par pelage



Figure II. 31 : Echantillon de filme polymérisé après broyage

- Peser  $10 \text{ mg} \pm 3 \text{ mg}$  d'avec une exactitude de  $0,1 \text{ mg}$ . Le creuser est hermétiquement fermé avec le couvercle Déterminer la masse finale après fermeture.
- Placer l'échantillon et l'échantillon de référence dans la cellule DSC et purger à sec. Etant donné que l'essai d'analyse thermique d'époxy poudre et film polymérisé est réalisé par une DSC assistée par l'ordinateur, une série de paramètres sont déjà prédéfinis.

#### II.2.4.2. Principe

##### A- Mesure pour la poudre époxy :

Les cycles de chauffages suivants doivent être réalisés, en commençant par l'opération

(a) comme opération de conditionnement seulement pour la poudre époxy.

Cycle (a) Chauffer l'échantillon de  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$  à  $70 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$  à une vitesse de  $20 \text{ °C/min}$  et maintenir pendant  $1,5 \text{ min}$ , puis refroidir l'échantillon à  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ .

Cycle (b) Chauffer l'échantillon de  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$  à  $275 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$  à une vitesse de  $20 \text{ °C/min}$ , puis refroidir l'échantillon à  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ . Attendre  $3 \text{ min}$  à  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ .

Cycle (c) Chauffer l'échantillon de  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$  à  $T_g + 40 \text{ °C}$  (typiquement  $150 \text{ °C}$ ) à une vitesse de  $20 \text{ °C/min}$ , puis refroidir l'échantillon à  $25 \text{ °C} \pm 5$ .

##### ▪ Évaluation des résultats :

- Température de transition vitreuse ( $T_g$ ),  $T_g$  est calculée au point d'inflexion.
- En évaluant le cycle (b), le  $T_g$  de la poudre non polymérisée est obtenu =  $T_{g1}$ .

- En évaluant le cycle (c), le Tg de la poudre polymérisé est obtenu = Tg2. Chaleur de réaction de l'époxy

La chaleur exothermique de réaction ( $\Delta H$ ) est obtenue par intégration du pic exothermique du balayage DSC.

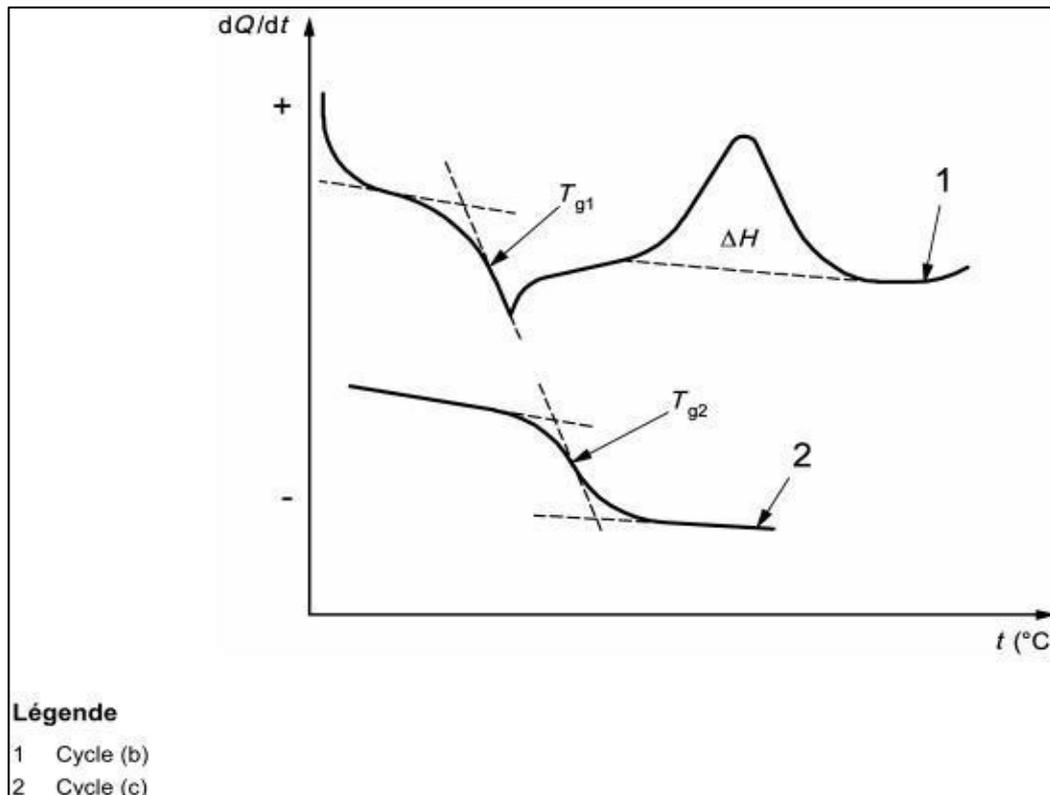


Figure II. 32 : Exemples de balayage thermique sur la poudre époxy [34]

### B- Mesure pour le film polymérisé :

Cycle (b) Chauffer l'échantillon de  $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  à  $275\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  à une vitesse de  $20\text{ °C/min}$ , puis refroidir l'échantillon à  $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ . Attendre 3 min à  $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ .

Cycle (c) Chauffer l'échantillon de  $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  à  $T_g + 40\text{ °C}$  (typiquement  $150\text{ °C}$ ) à une Vitesse de  $20\text{ °C/min}$ , puis refroidir l'échantillon à  $25\text{ °C} \pm 5$ .

- Évaluation des résultats :
- Température de transition vitreuse (Tg), Tg est calculée au point d'inflexion
- En évaluant le cycle (b), le Tg de film polymérisée est obtenu Tg3.

- En évaluant le cycle (c), le Tg de filme polymérisée est obtenu Tg4.
- Déterminer le degré de Polymérisation de filme polymériser  $\Delta Tg = Tg4 - Tg3$ .
- Chaleur de réaction de filme polymériser

La chaleur exothermique de réaction ( $\Delta H_1$ ) doit être obtenue par intégration du pic exothermique du cycle (b) du balayage DSC du film polymérisé.

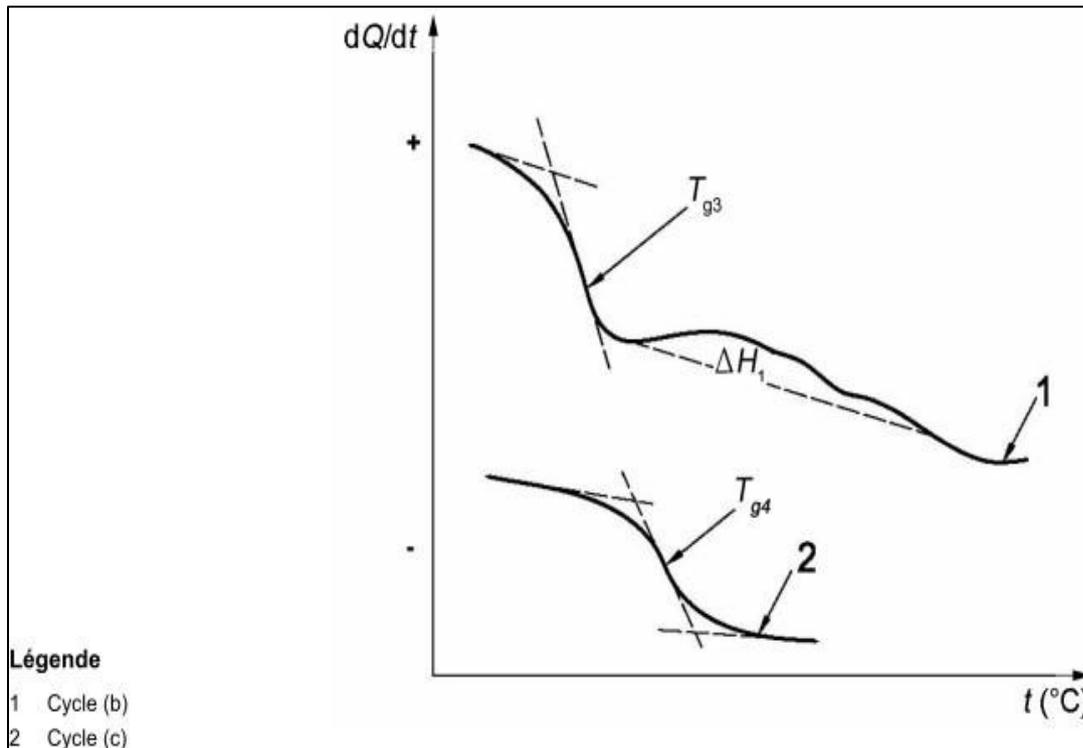


Figure II. 33 : Exemples de balayage thermique sur le filme polymériser

### C- Chaleur résiduelle de réaction du revêtement polymérisé :

Dans un film de revêtement complètement polymérisé, il convient d'observer aucune chaleur résiduelle de Réaction.

- ✓ Le degré de conversion peut être calculé par :  $C = \frac{\Delta H - \Delta H_1}{\Delta H} \times 100$
- ✓  $\Delta H \times 100$

Où

- ✓ C'est le degré de conversion (%)
- ✓  $\Delta H$  est la chaleur exothermique de réaction de la poudre ; cycle (b) ;
- ✓  $\Delta H_1$  est la chaleur exothermique de réaction du film de revêtement ; cycle (b).

## **Chapitre III :**

# **Résultats et discussion**

---

## I. Résultats et discussions

### Introduction

Le bon choix de matières et la présence de tous le matériel essentiel permet d'obtenir une meilleure qualité de produit fini ; dans ce chapitre je vais présentés tout les résultats obtenus pendant les contrôles de la qualité de la peinture en poudre qui j'ai formulé.

#### I.1. Les tests mécaniques

##### I.1.1. Test de choc

Aucune craquelure ou décollement ne doit apparaître au niveau de la plaque recto ou verso.



Figure III. 1 : Le Test de choc

##### I.1.2. Test d'adhérence

Les bords des incisions sont parfaitement lisses ; aucun des carrés du quadrillage ne s'est détaché.



Figure III. 2 : Le Test d'adhérence

---

### **I.1.3. Test de pliage mandrine conique**

Aucune craquelure ou décollement ne doit apparaître au niveau du pliage.

### **I.1.4. Teste de l'emboutissage**

Aucune craquelure ou décollement ne doit apparaitre au niveau de l'embouti.



Figure III. 3 : Le Teste de l'emboutissage

La Préparée donne des résultats conformes.

## **II. Contrôle de qualité du revêtement**

### **Introduction**

Le choix judicieux des matériaux et l'utilisation de tous les équipements nécessaires sont cruciaux pour garantir une qualité optimale du produit fini. Ce chapitre se concentre sur les résultats obtenus lors des contrôles de qualité de la peinture en poudre que j'ai formulée. Cette peinture en poudre a été appliquée comme revêtement sur des pipelines, jouant ainsi un rôle essentiel dans la protection contre la corrosion et assurant la durabilité des infrastructures métalliques.

### **II.1. Calorimétrie différentielle (DSC)**

Lorsqu'on utilise la Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) pour analyser une peinture en poudre riche en zinc, les résultats obtenus peuvent inclure plusieurs aspects thermiques importants. Voici quelques points clés que l'on pourrait observer dans les résultats de la DSC pour ce type de matériau :

---

1. **Température de fusion ou de transition vitreuse** : La DSC peut révéler des pics de fusion ou de transition vitreuse, indiquant des changements de phase ou de structure dans la peinture en poudre à différentes températures.

2. **Réactions exothermiques ou endothermiques** : Si la peinture en poudre contient des composants qui réagissent chimiquement à la chaleur, la DSC peut détecter des pics de chaleur libérée (exothermique) ou absorbée (endothermique) lors de ces réactions.

3. **Stabilité thermique** : La DSC peut fournir des informations sur la stabilité thermique de la peinture en poudre, en montrant à quelles températures elle commence à se décomposer ou à perdre ses propriétés.

Les résultats DSC pour le revêtement en poudre riche en zinc nous ont fourni les données Les mesures thermiques peuvent être utilisées pour évaluer la structure, la stabilité et

Les performances de ce revêtement dans différentes conditions thermiques.

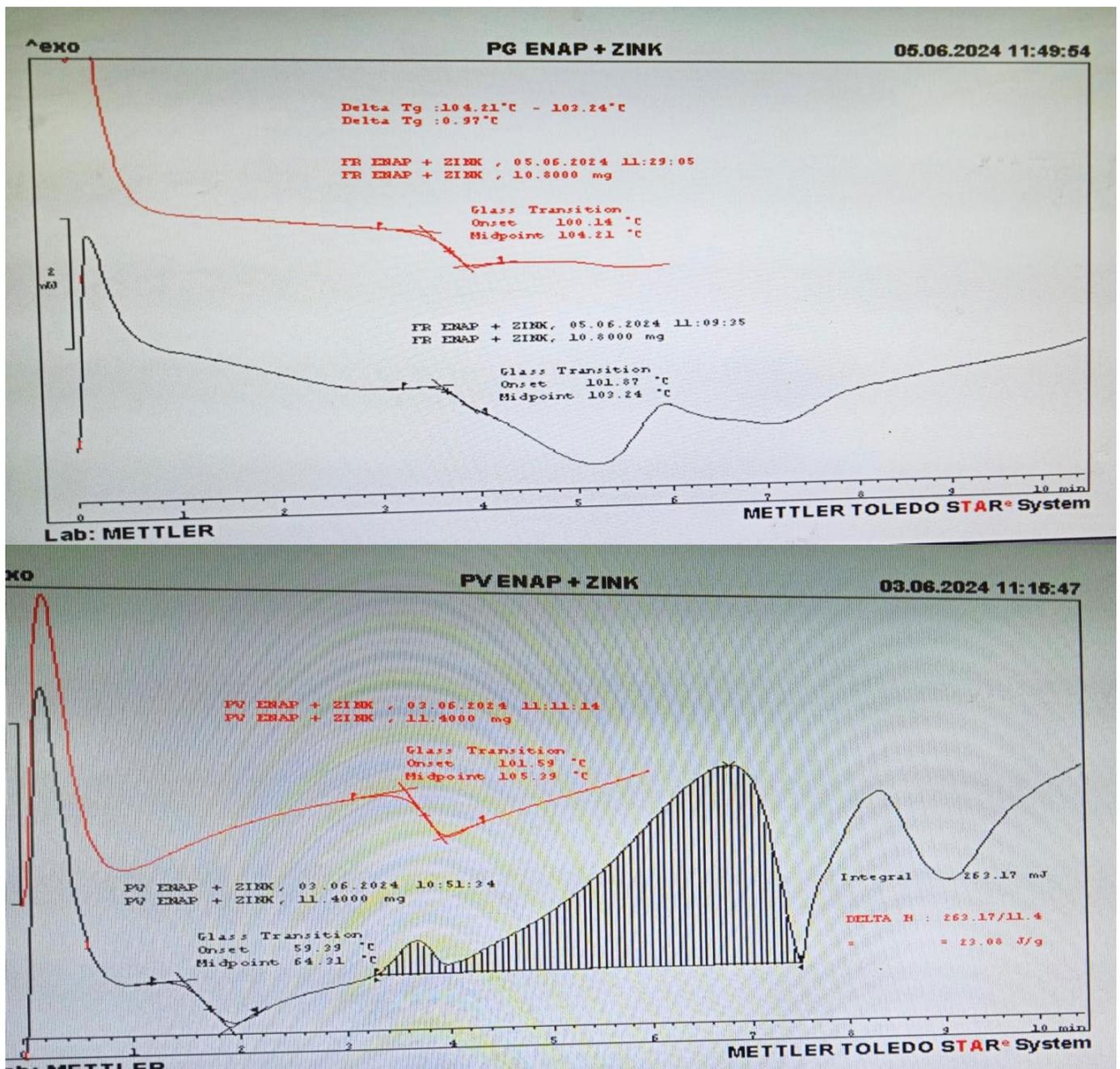


Figure III. 4 : La résultats obtenus DSC Pour la Poudre d'époxy et Pour le film polymérisé de peinture poudre riche de zinc

#### 4. Essai d'immersion dans l'eau salée :

Lorsque l'on teste une plaque métallique revêtue de peinture en poudre riche en zinc à travers un essai d'immersion dans l'eau salée.

---

Après une période d'immersion, l'aspect visuel de la plaque métallique peut révéler des signes de corrosion tels que la formation de rouille ou de taches. Cela indique si la peinture en poudre a réussi à protéger efficacement le métal contre l'eau salée.



Figure III. 5 : La résultat obtenus de essais l'eau salée

Les résultats de l'essai d'immersion de performance pour les revêtements anticorrosion satisfait aux exigences spécifiques pour une utilisation dans des environnements maritimes ou exposés à l'eau salée.

l'essai d'immersion dans l'eau salée pour une plaque métallique revêtue de peinture en poudre riche en zinc est essentiel pour évaluer sa capacité à résister à la corrosion dans des conditions environnementales sévères.

#### **5. Essai d'immersion dans l'eau chaud :**

Lorsqu'un panneau métallique recouvert d'un revêtement en poudre riche en zinc est testé par immersion dans l'eau chaude, les résultats obtenus peuvent fournir des informations importantes sur la résistance du revêtement à des conditions thermiques élevées et à une exposition prolongée à l'eau.



Figure III. 6 : La résultats obtenus de  
essais l'eau chaude

1. **Sécurité du revêtement** : Après immersion dans l'eau chaude, nous avons vérifié visuellement l'état du revêtement en poudre. Il n'y avait aucun signe de détérioration tel que des cloques, des fissures ou des changements de couleur.

2. **Adhérence de la peinture** : Évaluez la capacité de la peinture à rester solidement adhérente à la surface métallique après un test d'immersion. Une perte d'adhérence peut être observée si le revêtement en poudre n'est pas correctement formulé pour résister aux conditions thermiques et humides de l'eau chaude.

3. **Évaluation de la corrosion** : Nous avons inspecté la plaque métallique pour détecter tout début de corrosion sous la couche de peinture. Des zones de rouille ou de décoloration peuvent apparaître, indiquant que de l'eau chaude a pu pénétrer à travers la peinture et exposer le métal à des réactions de corrosion.

# **Conclusion**

## **générale**

---

## Conclusion générale

La corrosion des métaux est un problème significatif qui compromet la durabilité et les performances des matériaux métalliques. Pour contrer ce phénomène destructeur, l'application de revêtements anticorrosion, notamment les revêtements à base d'époxy en poudre, s'avère être une solution efficace. Ces revêtements offrent une barrière physique robuste qui empêche l'oxygène et l'eau d'atteindre la surface métallique, réduisant ainsi les réactions chimiques responsables de la corrosion. Leur adhérence excellente et leur résistance mécanique renforcent cette protection, améliorant ainsi la durabilité des structures métalliques dans divers environnements corrosifs.

L'évolution vers des formulations de revêtements anticorrosion utilisant des molécules organiques ou polymériques non toxiques et stables représente une avancée importante. Ces formulations répondent aux normes environnementales modernes en minimisant leur impact écologique tout en maintenant leur efficacité protectrice. De plus, l'utilisation de techniques de revêtement comme la peinture en poudre, grâce à son caractère écologique et économique, contribue à promouvoir des pratiques durables dans l'industrie.

Pour assurer la pertinence et l'efficacité continue de ces revêtements, il est essentiel de poursuivre la recherche et le développement dans ce domaine. Cela inclut l'exploration de nouvelles formulations et l'évaluation rigoureuse de leur performance à travers des tests adaptés aux conditions spécifiques des environnements corrosifs. En conclusion, l'innovation continue dans les revêtements anticorrosion est cruciale pour prolonger la durée de vie des infrastructures métalliques tout en respectant les exigences environnementales actuelles.

# **Références bibliographiques**

---

## Références bibliographiques

1. El Bakouri, H. Étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique. Mémoire pour du DESA. Université Mohammed 1, Oujda.2019.
2. Guettouch, S. Récupération du Sulfarlem et synthèse de leurs dérivés en vue d'application dans l'inhibition de la corrosion. Mémoire de Magister. Université d'Ouargla, 2003.
3. Mehibil, R. Étude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium. Magister, Université de Skikda, 2008.
4. Quang Kinh, V. Corrosion et protection des matériaux métalliques, coopération avec le Vietnam.2017.
5. Landot, D. Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, Vol. 12, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1993.
6. Bensabra, Dr. H. Cours de Corrosion et Protection des Métaux, Université de Jijel, 2016.
7. Rouibah, K. Contribution à l'étude du comportement électrochimique du couple galvanique acier au carbone/anodes de zinc dans l'eau de mer naturelle. Mémoire de Magister, Université de Skikda, 2003.
8. Bensaada, S. Effet des inhibiteurs de corrosion  $ZnCl_2$ ,  $Na_2MoO_4$  et  $ZnCl_2+Na_2MoO_4$  sur le comportement de l'acier pour armature à béton en milieu oxydant  $NaCl$ , Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.
9. ISBN, Corrosion et Inhibition des Puits et Collectes, Édition Technip, Paris, 1981.
10. Kherraf, S. Comportement électrochimique de l'acier A 105 dans différents milieux sous l'influence de quelques inhibiteurs. Mémoire de Magister, Université de Skikda, Algérie, 2008.
11. Habchi, A. Étude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier XC52 en présence du sulfarlem et de leurs sels dans un milieu  $H_2SO_4$  20%. Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2013.