

N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE CHIMIE



DOMAINE : SCIENCES DE LA MATIERE

FILIERE : CHIMIE

MEMOIRE DE MASTER
SPECIALITE : CHIMIE PHYSIQUE

THEME

*Etude des revêtements des aciers contre la corrosion
au milieu salin*

Présenté par : M^{elle} OUILES Iman

Soutenu publiquement, le 25 / 06 / 2024, devant le Jury composé de :

M ^{me} AIT-MEDJBER	Farida	MCA	UMMTO	PRESIDENTE
M ^{me} NAFA	Ouahiba	MCA	UMMTO	ENCADRANT
M ^{me} SMAIL	Taous	Chef de service production	ENIEM	CO-ENCADRANT
M ^r CHIKH	Anis	MCB	UMMTO	EXAMINATEUR

Remerciements

Tout travail de recherche n'est jamais totalement l'œuvre d'une seule personne, car il met en jeu la participation et l'aide de plusieurs personnes et organismes que ne tenons à remercier.

Tout d'abord je tiens à remercier le bon dieu de m'avoir donné le courage et la volonté suffisante pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à adresser mes remerciements à Madame NAFA Ouahiba, Maître de Conférences à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour son encadrement hors pair et ses encouragements constants qui ont été déterminants dans la réussite de ce mémoire. Sa bienveillance, sa patience et sa disponibilité ont fait d'elle un véritable guide pour moi tout au long de ce projet. Son soutien indéfectible m'a permis de surmonter les obstacles et de repousser mes limites. Je suis particulièrement reconnaissante pour ses précieux conseils et sa confiance en mes capacités. Grâce à elle, j'ai pu atteindre mon objectif. Je lui suis reconnaissante pour sa contribution inestimable à mon parcours académique et personnel.

Tous mes plus sincères remerciements à Madame SMAIL Taous, chef de service de l'unité froid à l'Entreprise Nationale des Industries de l'Electroménager, pour son encadrement et son soutien indéfectible lors de la réalisation de la partie expérimentale de ce travail. Sa rigueur, sa pédagogie et sa bienveillance ont fait d'elle un véritable mentor pour moi tout au long de cette expérience. Son expertise et sa passion pour le métier m'ont inspiré et m'ont donné envie de poursuivre dans cette voie. Et je voue aussi une reconnaissance à l'ensemble des employés de l'ENIEM pour leur accueil chaleureux, leurs précieux conseils et leur aide inestimable.

Je ne saurais jamais exprimer assez ma gratitude à mes parents, ma sœur et mon frère pour leur soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leur présence, leurs encouragements et leur amour inconditionnel ont été ma force et ma source de motivation.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à madame AIT MEDJEBAR Farida, Maître de Conférences classe A à l'université de Tizi-Ouzou, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury. Je suis aussi très sensible à l'honneur que m'a fait monsieur CHIKH Anis, Maître de Conférences classe B à l'Université de Tizi-Ouzou, d'avoir accepté de juger ce modeste travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude

Mes remerciements vont également à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin au bon accomplissement de ce travail.

Last but not least I want to thank me, I want to thank me for believing in me, I want to thank me for doing all this hard work, I want to thank me for having no days off, I want to thank me for no quitting, I want to thank me for always being a giver and trying to give more than I receive, I want to thank me for trying do more right than wrong, I want thank me for just being me at all time.

Dédicaces

Aujourd'hui, je vous offre le fruit de mon travail, en espérant qu'il soit à la hauteur de vos attentes et qu'il vous procure une immense fierté et c'est avec une profonde gratitude que je dédie ce travail

À mes très chers parents Votre amour inconditionnel, votre patience infinie et votre soutien indéfectible ont été ma force motrice tout au long de ce parcours. Je vous aime infiniment.

À mon très cher frère Ali et à ma précieuse sœur Lydia Je suis infiniment reconnaissante pour votre aide précieuse votre présence réconfortante et vos encouragements constants.

À mes deux piliers de vie, Kamélia et Gouraya, Votre présence constante à mes côtés a été un havre de paix et une source de motivation infaillible vous avez su me soutenir avec une bienveillance et une loyauté sans bornes.

À toute ma grande famille sans exception : ma grand-mère, oncles, tantes, cousins et cousines, Je suis particulièrement reconnaissant pour l'aide inestimable que vous m'avez apportée tout au long de mon parcours.

Iman

TABLE DE MATIERE

Liste des figures

Liste des tableaux

Présentation de l'entreprise.....	1
Introduction générale	3

CHAPITRE I : Généralités sur les revêtements de surfaces contre la corrosion

Introduction	5
I.1 Processus et différents types de la corrosion.....	5
I.1.1 Processus de la corrosion	6
I.1.2 Les différentes formes de corrosion.....	8
I.1.3 Facteurs de corrosion	12
I.1.4 Approches de prévention de la corrosion.....	13
I.2. Traitement de surface	13
I.2.1 Les procédés de traitement	14
I.2.2 Différentes techniques de nettoyage de la surface.....	14
I.2.3 Différents types de traitements de surface	15
I.3 Revêtement de surface.....	17
I.3.1 Revêtement organique	17
I.3.2 Les revêtements minéraux	17
I.3.3 Les revêtements métalliques	18
Conclusion.....	18

CHAPITRE II : Matériels et protocole expérimental

Introduction	19
II.1 Mode d'application du revêtement organique (peinture).....	19
II.1.1 Préparation de la pièce métallique	19
II.1.2 Traitement de la surface.....	20
II.1.3 Analyse des bains	22
II.1.4 Revêtement de la pièce	23
II.1.5 Contrôle de la pièce revêtue.....	24
II.2 Mode d'application d'un revêtement électrochimique au Nickel (Le nickelage)	28

TABLE DE MATIERE

II.2.1 Préparation de la pièce.....	28
II.2.2 Traitement de la surface.....	29
II.2.3 Analyse des bains	30
II.3 Revêtement électrochimique (zingage).....	33
II.3.1 Préparation de la pièce.....	33
II.3.2 Traitement de la pièce.....	33
II.3.3. Analyse des bains	34
II.4 Essai brouillard salin.....	36
II.4.1 Préparation de la solution saline.....	37
II.4.2 Préparation des échantillons.....	37
Conclusion.....	38

CHAPITRE III: Influence du milieu salin sur les revêtements organiques et électrochimiques

Introduction	39
III.1. Revêtements organiques	39
III.1.1 Traitement de la pièce	39
III.1.2. Revêtement de la pièce	40
III.1.3. Résultats obtenus et leurs interprétations	41
III.2 Revêtement électrochimique	46
III.2.1 Nickelage	46
III.2.2 Zingage.....	47
III.3 Essai de brouillard salin.....	48
III.3.1 Résultats obtenus avec la peinture JOTUN	48
III.3.2 Résultats obtenus avec la peinture ENAP	48
III.3.3 Résultats obtenus dans le cas du Nickelage.....	49
III.3.4 Résultats obtenus dans le cas du Zingage.....	49
Conclusion.....	50
Conclusion générale.....	51
Références bibliographique	53
Annexes	58
Résumé	

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

CHAPITRE II : Matériels et protocole expérimentale

Figure II.1 : La bobines de tôles utilisées.....	20
Figure II.2 : Le tunnel de prétraitement.....	20
Figure II.3 : Le four de séchage.....	22
Figure II.4 : La cabine de poudrage utilisée	23
Figure II.5 : Le micro test.....	24
Figure II.6.a : Le testeur de résistance au choc par chute de masse	25
Figure II.6.b : Les différentes pièces et masses du testeur	25
Figure II.7 : L'appareil pour essai emboutissage	25
Figure II.8.a : L'appareil pour essai de pliage.....	26
Figure II.8.b : Les tiges et plaques de l'appareil de pliage.....	26
Figure II.9 : L'appareil pour l'essai de quadrillage.....	27
Figure II.10.a : La bobine de fil.....	28
Figure II.10.b : La grille avant traitement	28
Figure II.11.a : Les bains de traitement	29
Figure II.11.b : Le séchoir	29
Figure II.12.a : Un fardeau de tubes.....	33
Figure II.12.b : Une rampe	33
Figure II.13.a : Les bains de traitement	34
Figure II.13.b : Le séchoir de zingage.....	34
Figure II.14 : Le brouillard salin	37
Figure II.15.a : La rampe et la grille dans le brouillard salin.....	38
Figure II.15.b : L'éprouvette du brouillard salin	38

CHAPITRE III : influence du milieu salin sur les revêtements organiques et électrochimiques

Figure III.1 : La pièce en acier DC03 après traitement.....	40
Figure III.2 : La porte après revêtement avec la peinture en poudre.....	41

LISTE DES FIGURES

Figure III.3 : Résultat l'essai de quadrillage (JOTUN).....	42
Figure III.4 : Résultat de la résistance au choque (JOTUN).....	42
Figure III.5 : Résultat de l'essai d'emboutissage (JOTUN).....	43
Figure III.6 : Résultat d'essai pliage (JOTUN)	43
Figure III.7 : Résultat essai quadrillage pour la peinture (ENAP)	44
Figure III.8 : Résultat de la résistance au choque (ENAP).....	45
Figure III.9 : Résultat de l'essai d'emboutissage (ENAP).....	45
Figure III.10 : Résultat d'essai pliage (ENAP).....	45
Figure III.11 : La grille après nickelage.....	46
Figure III.12 : Une rampe traitée	47
Figure III.13 : Résultat obtenue du test brouillard salin avec la peinture JOTUN	48
Figure III.14 : Résultat de l'essai du brouillard salin avec la peinture ENAP	48
Figure III.15 : Résultat de l'essai du brouillard salin sur le revêtement de nickelage	49
Figure III.16 : Résultat de l'essai du brouillard salin sur le revêtement de zingage.....	49

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : généralités sur les revêtements de surface contre la corrosion

Tableau I.1 : principale facteurs de corrosion 12

CHAPITRE II : matériels et protocole expérimental

Tableau II.1 : composition chimique de DC03..... 19
Tableau II.2 : paramètre de travail de chaine de peinture 21
Tableau II.3 : diamètre tiges et épaisseur de la plaque équivalente..... 27
Tableau II.4 : composition chimique de FE37-2 28
Tableau II.5 : paramètre de travail de la chaine de nickelage..... 30
Tableau II.6 : composition chimique de DC01 33
Tableau II.7 : paramètre de travail de chaine de zingage..... 34

CHAPITRE III : influence du milieu salin sur les revêtements organiques et électrochimiques

Tableau III.1 : résultat obtenue lors du traitement des bains 39
Tableau III.2 : paramètres des cabines des revêtements organique 40
Tableau III.3 : les différents essais de résistance au choc JOTUN..... 42
Tableau III.4 : les différents essais de résistance au choc ENAP 44
Tableau III.5 : résultat obtenue de traitement des bains dans le cas de nickelage 46
Tableau III.6 : résultat obtenue de traitement des bains dans le cas de zingage..... 47
Tableau III.7 : équivalence du temps du brouillard salin et dans le milieu naturel 48



PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ENIEM

I Historique

L'Entreprise Nationale des Industries Electroménagères (ENIEM) est une société par actions algérienne spécialisée dans la production et la commercialisation d'appareils électroménagers. L'ENIEM est située à Tizi Ouzou, en Algérie. Son siège social et sa principale usine se trouvent dans la zone industrielle de Oued Aissi, à environ 7 kilomètres à l'est de la ville de Tizi Ouzou. L'entreprise disposait auparavant d'autres bâtiments et terrains au niveau du boulevard Stiti (sortie ouest de la ville), mais on pense savoir qu'ils sont désormais loués.

Son histoire remonte à l'époque post-indépendance de l'Algérie, marquée par une volonté de développer une industrie nationale autonome. Elle a été créée en 1974 et a commencé sa production dans le domaine de l'électroménager en 1977. Elle a été transformée en entreprise publique économique (société par action) en 1989 et a été dotée d'un capital social de 40.000.000,00 DA. Son capital social est de 10 279 800 00,00 DA en 2009 et est détenu en totalité par la SGP INDELLENCE dont elle dépend actuellement. La mission de l'ENIEM consiste dans la fabrication, l'assemblage, la vente et la promotion des services après vente des produits électroménagers. L'entreprise a évolué dans un environnement où la contrainte budgétaire n'existait pas et l'objectif de rentabilité n'a jamais été une priorité. Les objectifs sociaux ont dominé et la législation avantagait les valeurs sociales (le maintien d'emploi, l'augmentation des salaires). Cependant, aujourd'hui, l'ENIEM se met sur un autre chemin où la rentabilité constitue l'objectif ultime de toute entreprise.

Points clés de l'histoire de l'ENIEM

- **1977:** Création de l'ENIEM et inauguration de l'usine de Tizi Ouzou
- **1979:** Ouverture de l'usine de Mohammedia
- **Années 1990:** Diversification de la gamme de produits et partenariats avec des sociétés étrangères
- **Années 2000:** Restructuration de l'entreprise pour améliorer son efficacité et sa compétitivité
- **Aujourd'hui:** L'ENIEM est l'un des principaux producteurs d'appareils électroménagers en Algérie et exporte ses produits vers plusieurs pays d'Afrique et du Moyen-Orient

II Unités de l'ENIEM

L'Entreprise Nationale des Industries Électroménagères (ENIEM) est structurée en plusieurs unités principales, chacune ayant ses propres fonctions et responsabilités:

1. Unités de production

- Unité Froid (UF): Spécialisée dans la production de réfrigérateurs et congélateurs, tant domestiques qu'industriels.
- Unité Cuisson (UC): Dédiée à la fabrication de cuisinières à gaz, électriques et mixtes, ainsi que de plaques de cuisson et hottes aspirantes.
- Unité Climatisation (UCL): Conçoit et fabrique des climatiseurs et des systèmes de climatisation pour les particuliers et les professionnels.
- Unité Lavage (UL): Produit des machines à laver le linge, semi-automatiques et automatiques, pour répondre aux besoins domestiques et professionnels.

2. Unités de support

- Unité Prestations Techniques (UPT): Assure la maintenance et l'entretien des équipements des unités de production et d'autres sites de l'ENIEM.
- Unité Recherche et Développement (URD): Mène des recherches pour développer de nouveaux produits, améliorer les technologies existantes et optimiser les processus de production.
- Unité Qualité: Contrôle la qualité des produits et des processus de production afin de garantir le respect des normes et des exigences des clients.
- Unité Logistique: Gère la réception, le stockage, le transport et la distribution des produits finis et des matières premières.
- Unité Achats: Procède à l'achat des matières premières, des composants et des fournitures nécessaires à la production.
- Unité Commerciale: Responsable de la vente et du marketing des produits ENIEM sur le marché national et international.

3. Filiales

- EIMS Miliana: Spécialisée dans la production de tôles et d'outillages pour l'industrie électroménagère.
- FILAMP: Dédiée à la fabrication de lampes et de luminaires.

Il est important de noter que cette liste n'est peut-être pas complète et que l'organisation de l'ENIEM peut évoluer en fonction des besoins et des changements stratégiques.

Un Organigramme de l'entreprise est donné en Annexe 1.



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La corrosion est un processus électrochimique [1] qui détériore les métaux, en particulier le fer et les aciers, entraînant ainsi la perte de leurs principales caractéristiques telles que la dureté et la résistance. Cela peut les rendre instables et fragiles, conduisant à des situations dangereuses. La prévention de la corrosion [2] doit être envisagée dès la conception des installations pour garantir leur durabilité et leur résistance au vieillissement, notamment dans des industries à risque comme le nucléaire, la chimie, l'aéronautique et le maritime [3-5].

Pour protéger les aciers et autres métaux contre la corrosion [6], plusieurs méthodes existent, telles que la modification de la conception des pièces, le choix judicieux des matériaux, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion et la protection électrochimique [7-8].

Une autre technique très utilisée est l'application d'un revêtement sur la pièce métallique à protéger [9]. Ce revêtement empêche le contact entre la pièce et son environnement. Les revêtements sont couramment utilisés dans l'industrie, principalement pour protéger contre la corrosion des métaux, tout en offrant un aspect esthétique variable selon le type de revêtement choisi. Pour évaluer la qualité des revêtements, des tests classiques de résistance à la corrosion sont effectués sur les matériaux revêtus, incluant des tests de tenue mécanique et des évaluations qualitatives.

La chambre climatique, ou enceinte climatique, est parmi les meilleurs moyens de tester la résistance à la corrosion des matériaux [10]. L'essai au brouillard salin permet d'accélérer les effets d'une attaque corrosive sur les matériaux dans un milieu salin. Ces essais aident à comprendre comment la corrosion peut affecter les matériaux et à déterminer les meilleurs revêtements à choisir. L'étude des revêtements anticorrosion pour les aciers en milieu salin est cruciale, car la corrosion des métaux dans ces environnements agressifs est un problème majeur. Les revêtements jouent un rôle essentiel en formant une barrière protectrice entre le métal et son environnement corrosif [11].

Les recherches visent à comprendre les mécanismes de corrosion spécifiques à ces milieux et à développer des solutions efficaces ^[12], telles que l'évaluation de différents types

Introduction générale.

de revêtements organiques, électrochimiques, etc., en conditions réelles ou lors de tests accélérés. Leur objectif est d'améliorer la durabilité et la résistance des structures métalliques exposées à la corrosion en milieu marin ou salin, afin de prolonger leur durée de vie, réduire les coûts de maintenance et prévenir les dangers matériels et humains qui peuvent en découler.

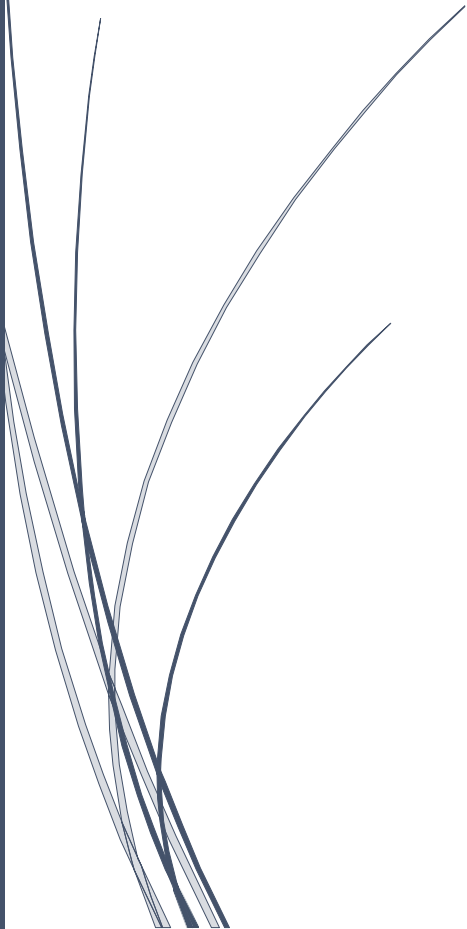
L'objectif de ce mémoire est d'étudier le comportement de trois types de revêtements face à la corrosion en milieu salin : le revêtement organique par peinture, le revêtement électrochimique par zingage et le revêtement électrochimique par nickelage/chromage.

Ce mémoire est constitué d'une introduction, de trois chapitres et d'une conclusion. Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur la corrosion, le traitement de surface et les revêtements. Le deuxième chapitre présente un résumé des expériences et des tests effectués sur les revêtements. Les résultats obtenus sont discutés dans le troisième chapitre. Le manuscrit de cette étude se termine par une conclusion générale et une liste de références bibliographiques.



CHAPITRE I

Généralités sur les revêtements de surfaces
contre la corrosion



Chapitre I : Généralités sur les revêtements de surfaces contre la corrosion**Introduction**

Les métaux et les alliages jouent un rôle essentiel dans la fabrication de nombreuses structures, véhicules et objets de notre quotidien, tels que les voitures, les bâtiments et les navires. Ils se distinguent par des propriétés avantageuses comme une bonne conductivité électrique et thermique, une haute résistance à la traction et aux températures élevées, une bonne ductilité et une grande maniabilité. Cependant, ils présentent l'inconvénient de se dégrader dans des environnements corrosifs [13], à cause de facteurs tels que l'oxygène, la température, l'humidité, les sels chimiques et les polluants [14]. Ces éléments accélèrent la corrosion, compromettant la durabilité et la fiabilité des structures métalliques. Les études ont identifié les facteurs les plus influents et développé divers types de revêtements métalliques pour protéger efficacement l'acier en formant une barrière contre les agents corrosifs [15].

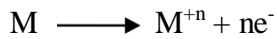
Ce premier chapitre présente les notions de base de la corrosion, du traitement de surface et des revêtements de surface.

I.1 Processus et différents types de la corrosion

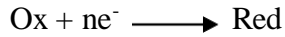
Le nom « corrosion » vient du latin « corrusus » qui signifie ronger ou attaquer. En effet, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés (physicochimiques, mécaniques, etc.) par interaction chimique avec le milieu environnant [16].

En réalité, dans la nature, la plupart des métaux se trouvent sous forme d'oxydes et de sulfures métalliques, à l'exception des métaux nobles notamment l'or (Au) et le platine (Pt). Du point de vue thermodynamique, cet état est très stable. Cependant, l'extraction des métaux à partir de ces minerais [17] nécessite une quantité significative d'énergie, ce qui conduit les métaux obtenus à se trouver dans un état énergétique élevé, les rendant thermodynamiquement instables. En conséquence, les métaux courants ont une tendance à retourner à leur état initiale d'énergie, un processus qui s'accomplit en interagissant avec leur environnement [13].

La corrosion des métaux en milieu aqueux conducteur est essentiellement un phénomène de nature électrochimique dans lequel un métal se dissout en abandonnant des électrons [18]. La réaction anodique de dissolution prend alors la forme suivante :



Il n'y a donc possibilité de corrosion d'un métal que s'il y a présence d'une espèce oxydante susceptible pour être réduite, les électrons libérés en corrosion



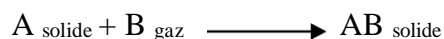
Le résultat de la corrosion est la formation de composés plus stables comme les oxydes, sulfures ou hydroxydes métalliques, par exemple la rouille sur le fer.

I.1.1 Processus de la corrosion

Les origines de la corrosion sont variées et complexes [18], résultant d'interactions chimiques et/ou physiques entre un matériau et son environnement. Malgré les progrès réalisés, la compréhension de la corrosion reste incomplète, en partie en raison des limitations des essais en laboratoire qui ne permettent pas de prédire de manière certaine le comportement d'un métal ou d'un alliage face à la corrosion. En général, la résistance à la corrosion d'un métal est conditionnée par des paramètres spécifiques [19]. Ainsi la corrosion peut se développer suivant différents types de processus qui dépendent du type de la corrosion. On peut distinguer la corrosion chimique (sèche), la corrosion électrochimique (humide), corrosion biochimique et la corrosion associée à l'érosion (mécanique).

I.1.1.a Corrosion chimique

Il s'agit généralement d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte. La corrosion purement chimique ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique, le flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement. L'air renferme de l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides anhydride carbonique (CO₂) et sulfureux (SO₂), hydrogène sulfureux (SH₂), etc. Ces gaz sont des agents corrosifs, mais le dioxyde de carbone (CO₂) est généralement le principal responsable de la corrosion. On admet que la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous ces éléments, mais il faut qu'un acide soit présent, même en protection faible pour que l'attaque puisse se produire. L'attaque du métal par une réaction chimique avec le milieu ambiant sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées, la réaction qui se produit est de la forme :



Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (Al dans CCl_4) l'exemple de la corrosion sèche en atmosphère oxydante à haute température [20].

I.1.1.b Corrosion électrochimique

Appelée aussi corrosion humide [21], elle se produit lorsqu'il y a hétérogénéité soit dans le métal ou l'alliage métallique soit dans le milieu. Il y a formation d'une pile avec passage d'un courant.

Anode : l'électrode où se produit la réaction d'oxydation (dissolution du métal), où le courant passe du métal vers la solution.

Cathode : l'électrode où se produit la réaction de réduction (déposition à la surface du métal), où le courant passe de la solution vers le métal. L'anode et la cathode peuvent :

- prendre naissance simultanément en différents points dans un même métal ou d'un alliage
- être deux métaux ou alliages différents (corrosion galvanique). Les réactions électrochimiques sont des réactions d'oxydoréduction avec transfert d'électrons. Toute réaction d'oxydoréduction se compose de deux réactions :

- Une réaction d'oxydation $M \rightarrow Mz^+ + ze^-$ est la réaction anodique, pôle (-), avec perte d'électrons.

- Une réaction de réduction $Ox^+ + ze^- \rightarrow Red$ est la réaction cathodique, pôle (+), avec gain d'électrons.

Les deux réactions se produisent simultanément de sorte que le courant électrique total est en apparence nul, néanmoins, il existe réellement. Il est nommé courant de corrosion [22].

I.1.1.c Corrosion biochimique

La corrosion d'origine bactérienne peut affecter des métaux au contact des eaux industrielles soit brutes soit obtenues par déminéralisation [23]. Un très grand nombre d'alliages, de compositions très différentes, sont susceptibles d'être atteints notamment les aciers non alliés, les aciers inoxydables austénitiques et les alliages cuivreux (cupronickel et bronze)

Le développement de ce type de corrosion dépend du pH, de la température et de la teneur en oxygène dissous. Les deux types de bactéries particulièrement connues sont les Bactéries sulfato-réductrices et les Bactéries oxydant le soufre.

- **Bactéries sulfato-réductrices**

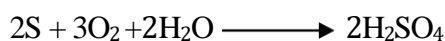
Ce sont des bactéries anaérobies réductrices de sulfates, qui donnent des sulfures suivant la réaction [24]



L'hydrogène est fourni par des plages cathodiques ou les composés organiques de l'environnement.

- **Bactéries oxydant le soufre**

Ces bactéries aérobies sont capables d'oxyder le soufre des composés soufrés suivant la réaction :



On les retrouve dans les gisements de pétrole et dans les égouts où elles attaquent rapidement le ciment. Il y a parfois des effets concomitants des bactéries sulfato-réductrices à la partie inférieure (fermentation anaérobie des boues déposées) et des bactéries aérobies à la partie supérieure [25].

I.1.2 Les différentes formes de corrosion

Plusieurs formes de corrosion peuvent être dénombrées [26]. Elles sont caractérisées par des modifications de propriétés physiques du métal. Une simple observation visuelle ou au microscope est capable d'identifier la forme de la corrosion. Selon ces formes, on distingue.

I.1.2.a Corrosion uniforme (généralisé)

Cette forme de corrosion est la plus courante. Bien qu'elle puisse causer des dommages aux pièces métalliques, elle est considérée comme la moins dangereuse car sa durée de vie peut être approximativement calculée. Elle résulte de l'exposition de l'acier au milieu acide provoqué par la présence d'agents agressifs. La perte de matière se produit de manière uniforme sur toute la surface. Elle se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration (ternissement) [27].

I.1.2.b Corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme par la distinction claire des endroits anodiques et cathodiques. En pratique la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement et souvent elle pose beaucoup de problèmes [28]. On distingue plusieurs types, à savoir :

- **Corrosion galvanique**

La corrosion galvanique [29] se produit lorsque deux matériaux de natures différentes sont reliés entre eux électriquement et plongés dans le même milieu ; il se forme alors une pile de corrosion. Le métal dont le potentiel de corrosion est le plus faible va se consommer préférentiellement, protégeant ainsi le métal « noble ». Le métal le plus actif (ou anodique) va se corroder rapidement tandis que le métal en contact le moins actif (ou cathodique) sera préservé [21].

- **Corrosion par piqûres**

La piqûration est une autre forme de corrosion très localisée qui se manifeste par de petites piqûres ou de petites cavités sur le métal [30]. Les métaux protégés par un film passif sont généralement sujets à une attaque par piqûres. Ce film se décolle à l'intérieur dans certains endroits, ce qui permet la pénétration de la solution et provoque la corrosion dans ces endroits localisés. Elle s'amorce habituellement sur la partie supérieure d'une surface horizontale et se propage verticalement vers le bas. Cette forme de corrosion est particulièrement sournoise puisqu'elle peut passer inaperçue et ne causer qu'une très faible perte de matériau avant que ne survienne la défaillance. L'attaque se concentre en un point et évolue en profondeur dans le matériau [31]. Il existe plusieurs types de piqûres, ce qui rend la mesure de ce phénomène délicate, les piqûres touchent plus particulièrement les aciers inoxydables, les aciers et les alliages d'aluminium.

- **Corrosion caverneuse**

La corrosion caverneuse [32] est le type de corrosion vraiment dommageable comme par exemple pour un véhicule[33] ; c'est en effet une corrosion localisée qui passe habituellement inaperçue durant les premiers stades car elle s'initie à l'intérieur des corps creux : l'attaque est souvent rapide et peut aller jusqu'à la perforation des pièces. La corrosion caverneuse peut provenir de petits volumes d'électrolyte piégés dans des trous, des interstices ou des joints d'étanchéité.

Elle est due à un gradient de concentration en dioxygène dissous entre deux parties de la même pièce de métal, créant une pile de concentration électrochimique. La corrosion apparaît aux endroits où la concentration en oxygène est la plus faible. On décrit la corrosion

caverneuse par la création d'une cellule d'aération différentielle (abondance d'oxygène à la surface de l'électrolyte et déficience d'oxygène à la surface du métal). Le mécanisme de cette corrosion peut être décomposé en plusieurs étapes :

L'oxygène initialement présent dans la cavité est consommé par la réaction cathodique de réduction de l'oxygène. Le confinement empêche le renouvellement de l'oxygène, la pile d'aération différentielle rend alors le métal encore plus anodique, accélère la dissolution du métal et provoque l'accumulation de cations dans la cavité.

L'accumulation de cations conduit à la diffusion d'anions (souvent des chlorures qui sont très mobiles) afin de conserver la neutralité électrique. Il en résulte une concentration élevée de chlorures métalliques facilement hydrolysables.

La diminution locale du PH conduit à l'accélération de la dissolution du métal. La réaction est alors auto-catalytique [34].

- **Corrosion inter granulaire**

La corrosion inter granulaire se produit généralement le long des joints de grains de certains alliages. Ce type de corrosion prévaut notamment dans certains aciers inoxydables qui deviennent, après avoir été chauffés assez longtemps à une température comprise entre 500C° et 800C°, vulnérable à une attaque inter granulaire. Ce traitement thermique favorise la formation de petites particules de précipité de carbure de chrome (Cr_3C_2) à la suite d'une réaction entre le chrome et le carbone dans l'acier inoxydable. Ces deux éléments diffusent jusqu'aux joints de grains pour que se forment les précipités, ce qui engendre une zone appauvrie en chrome près du joint de grains. Cette région devient alors fortement sujette à une corrosion inter granulaire [35].

- **Corrosion sélective**

Cette forme de corrosion est due à l'oxydation d'un composant de l'alliage Cette corrosion ne se produit que si la teneur en éléments préférentiellement solubles dépasse un seuil. Le cas le plus connu est la dézincification des laitons.

- **Corrosion sous contrainte**

Ce type de corrosion conduit à une fissuration du métal résultant de l'action combinée d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique. C'est la forme la plus grave de corrosion car le métal peut être soumis à une dégradation rapide sans manifestation extérieure visible, c'est-à-dire sans formation de produits de corrosion, ni de variation de poids. La corrosion fissurante sous contraintes se produit le plus souvent dans des milieux fragilisant [36- 37].

- Corrosion par érosion

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide de fluide. Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface du métal, la vitesse de corrosion est généralement réduite lorsque ces dépôts sont éliminés par abrasion due à l'écoulement du liquide ou à la présence de particules solides. Cependant, cette élimination peut également accélérer la corrosion en révélant de nouvelles surfaces sensibles à la corrosion. Une forme spéciale de corrosion par érosion est la corrosion par cavitation, qui se produit dans les turbines hydrauliques, pompes etc. Ce type de corrosion est causé par la formation et l'explosion de bulles de vapeur dans un liquide en contact de la surface du métal [20].

- Corrosion filiforme

Corrosion filiforme [38] est une forme de corrosion spécifique qui se produit sur des métaux minces à revêtement organique, tels que l'aluminium et l'acier, stockés pendant une longue période. Elle se caractérise par l'apparition de filaments sous le revêtement, généralement de 0,05 à 3 mm de large, qui se propagent latéralement à partir de défauts du revêtement. Cette corrosion peut être retardée mais pas totalement empêchée par l'amélioration de la qualité des revêtements et des apprêts. Pour prévenir la corrosion filiforme, il est essentiel de choisir des alliages d'aluminium avec une faible teneur en cuivre, de bien préparer les surfaces avant la peinture, et de veiller à ce que la peinture adhère correctement. La corrosion filiforme est principalement esthétique et superficielle, affectant souvent les alliages d'aluminium à haute résistance mécanique [39].

- Corrosion frottement

La corrosion-frottement désigne les dommages résultant de la corrosion entre deux surfaces métalliques en mouvement l'une par rapport à l'autre. Ce phénomène se produit principalement lorsque ces surfaces sont soumises à des vibrations et à des charges de compression[40]. Lorsqu'un mouvement de frottement continu se produit dans un environnement corrosif, on préfère utiliser le terme "tribocorrosion".

- La fragilisation par l'hydrogène

La fragilisation par l'hydrogène est un phénomène qui peut affecter les métaux, notamment les alliages d'aluminium, les aciers, et les alliages de cuivre. Ce processus peut résulter de diverses sources d'hydrogène, telles que l'humidité des charges, des produits d'addition, et de l'air dans l'enceinte du four d'élaboration [41]. L'hydrogène peut pénétrer dans la structure cristalline du métal, souvent par diffusion, et s'accumuler à des concentrations élevées dans

certaines zones. Cette accumulation d'hydrogène peut altérer les propriétés mécaniques du matériau, provoquant une diminution de sa ductilité et de sa résistance à la rupture. En conséquence, le matériau devient fragile et susceptible de se fracturer même sous des contraintes relativement faibles.

I.1.3 Facteurs de corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux [42], facteurs métallurgiques, les facteurs définissant les conditions d'emploi, les facteurs dépendant du temps et les facteurs dépendant du milieu et des modes d'attaques. Ils sont classés sur le tableau suivant :

Tableau I.1 : Principaux facteurs de corrosion [43]

Les facteurs métallurgiques	Les facteurs définissant les conditions d'emploi	Les facteurs dépendant du temps	Les facteurs du milieu et les modes d'attaque
<ul style="list-style-type: none"> • Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines • Procédés d'élaboration • Impuretés dans l'alliage, inclusions • Traitements thermiques, mécaniques • Additions protectrice 	<ul style="list-style-type: none"> • Etat de surface, défaut de fabrication • Forme de pièces • Sollicitations mécaniques • Emploi d'inhibiteurs • Procédés d'assemblage (couple galvaniques, soudures, ...) • Croûtes d'oxydes superficielles • Force électromotrice extérieure (électrolyse) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vieillessement • Tensions mécaniques internes ou externes • Température-Modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous • Modification des revêtements protecteurs • Apparition d'un dépôt (calcique ou autre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentration du réactif • Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO₂, NH₃, H₂S,) • Acidité (PH) du milieu, salinité, résistivité • Température, Pression • Présence de bactéries

I.1.4 Approches de Prévention de la Corrosion

Pour prévenir efficacement la corrosion, il est nécessaire d'adopter une approche globale en combinant judicieusement les différentes méthodes de prévention et de protection, adaptées à chaque situation.

I.1.4.a Choix judicieux des matériaux

- Sélectionner des métaux et des alliages intrinsèquement résistants à la corrosion dans l'environnement donné, tels que l'acier inoxydable ou l'aluminium.
- Utiliser des aciers et métaux passivés qui forment une couche de protection contre la corrosion.

I.1.4.b Conception adaptée des pièces

- Concevoir les pièces de manière à éviter les zones de rétention d'eau et de dépôts qui favorisent la corrosion par piqûres et par crevasses.
- Éviter les contacts entre métaux de potentiels électrochimiques trop différents pour prévenir la corrosion galvanique.

I.1.4.c Méthodes de protection

- Appliquer des revêtements organiques (peintures, vernis) ou métalliques (zingage, chromage) pour créer une barrière physique entre le métal et le milieu corrosif.
- Utiliser la protection cathodique par courant imposé ou par anodes sacrificielles pour polariser cathodiquement la surface métallique.
- Ajouter des inhibiteurs de corrosion dans les milieux aqueux pour ralentir les réactions anodiques et cathodiques.

I.1.4.d Entretien préventif

- Réaliser un nettoyage régulier des surfaces métalliques pour éliminer les dépôts et produits de corrosion.
- Effectuer des contrôles périodiques pour détecter précocement l'apparition de la corrosion et intervenir rapidement.

I.2. Traitement de surface

Un traitement de surface est une opération qui vise à modifier les propriétés superficielles d'un matériau, généralement métallique, avant l'application d'un revêtement. L'importance de cette opération est d'améliorer l'adhérence du revêtement en augmentant l'énergie de surface du substrat, d'augmenter la résistance à la corrosion en créant une barrière protectrice, de modifier l'aspect surfacique telle que la couleur, la brillance et la texture et d'améliorer les propriétés mécaniques comme la dureté et la résistance à l'usure.

I.2.1 Les procédés de traitement

Pour traiter une surface on a deux procédés qui sont les suivants :

I.2.1.a Procédés par immersion

Une installation de traitement par immersion ^[44] consiste en une série de cuves pour les différents bains et rinçages, dans lesquelles les pièces accrochées ou fixées sur des balancelles, suspendues à un palonnier ou positionnées dans des paniers, ou encore en vrac dans un tonneau rotatif, sont complètement immergées. On parle, dans ce cas, de traitement par immersion totale ^[45] on utilise ce genre de procédé plus dans les revêtements électrochimique.

I.2.1.b Procédés par aspersion

La technique par aspersion (ou par jets) [46] s'adresse aux fabrications de grandes séries et de formes accessibles par les jets : les pièces défilent en continu dans un tunnel pour être soumises aux différentes phases du traitement depuis le pré dégraissage préliminaire jusqu'au rinçage final. Après passage à l'air libre, les pièces subissent un séchage final dans une enceinte d'air chaud pulsé. La température de l'air est comprise entre 80 et 150°C. Dans le cas de finition par peinture électrophorétique ou du type hydrosoluble au trempé, le séchage des pièces n'est pas indispensable, un simple poste d'égouttage suffit. Dans le cas d'ensembles de grandes dimensions (véhicules industriels, machines agricoles, containers maritimes, échafaudages tubulaires, etc.), le traitement s'effectue dans une enceinte ou dans plusieurs chambres d'aspersion ; dans ce cas, le transport des pièces se fait de manière successive, étape par étape. Cette technique d'aspersion est applicable à l'ensemble des métaux jusqu'ici envisagés : l'acier, l'acier pré revêtu de zinc ou d'alliages (par exemple Zn/Al), l'aluminium et ses alliages.

I.2.2 Différentes techniques de nettoyage de la surface

Avant toute application de revêtement ou traitement ultérieur, il est nécessaire de nettoyer la surface des métaux pour éliminer les contaminants, les traces de corrosion et d'oxydation. Voici les principales techniques de nettoyage utilisées :

I.2.2.a Dégraissage

Le dégraissage est une étape essentielle du traitement de surface visant à éliminer toutes les traces de graisse, d'huile et de souillures de la surface du métal avant l'application d'un revêtement ou d'un traitement ultérieur. L'opération de dégraissage se divise en deux

grandes classes, le pré-dégraissage aux solvants cette étape contribue à éliminer l'essentiel des polluants organiques et le dégraissage chimique en milieu aqueux avec une finition souvent électrolytique [47], celle-ci aide à éliminer les résidus de corps gras de faible épaisseur.

I.2.2.b Décapage

Le décapage sert à éliminer toute trace de corrosion et d'oxyde qui adhèrent à la surface des pièces. Il peut être réalisé par des actions mécaniques (sablage ou grenailage), chimiques ou électrolytiques. Ces opérations sont toujours suivies d'un rinçage [48]. Il existe plusieurs procédés de décapage, chacun ayant sa spécificité selon le métal décapé et le moyen utilisé. Les méthodes couramment utilisées sont; le décapage chimique qui vise à mettre en solution les substances à éliminer, le décapage électrolytique qui a le même but que le précédent mais avec un effet mécanique supplémentaire lié au dégagement gazeux, décapage mécanique réalisé par projection d'abrasifs secs ou en milieu aqueux, le décapage laser celui-ci utilise des impulsions photoniques de très courte durée et de très forte puissance et le décapage par plasma en utilisant la pulvérisation par bombardement d'ions.

I.2.3 Différents types de traitements de surface

Les traitements de surface sont des procédés qui modifient les propriétés d'une surface pour l'adapter à des conditions spécifiques. Voici quelques-uns des types de traitements de surface. Un organigramme des différents types de traitement est donné en annexe 2.

I.2.3.a Transformation structurale

Transformation structurale d'origine mécanique

C'est un type de traitement de surface mécanique impliquant des techniques comme le grenailage de précontrainte [49], le galetage, le martelage, le choc laser. Il s'agit dans ce cas, d'améliorer les propriétés fonctionnelles de tenue à la fatigue dans la masse et à la fatigue superficielle. Il peut s'agir aussi d'améliorer la tenue à la corrosion sous contraintes.

Transformation structurale d'origine thermique

Les traitements d'origine thermique[50] sont le résultat d'un apport superficiel d'énergie avec différentes techniques comme le chalumeau oxyacétylénique, l'induction magnétique, le laser et le faisceau d'électrons. Ces traitements ont l'avantage de réduire les déformations induites par traitements thermiques dans la masse, de diminuer la consommation d'énergie et d'avoir un matériau tenace à cœur et aussi dur que possible en surface.

I.2.3.b Traitement par diffusion

- Traitement par diffusion de metalloïdes

Le traitement par diffusion de metalloïdes est une technique de traitement de surface qui fait intervenir des éléments semi-métalliques comme le carbone, l'azote ou le bore. Ces éléments sont diffusés dans les alliages métalliques pour améliorer leurs propriétés, notamment en termes de dureté, de résistance à l'usure et de ténacité [51]. Ils ont des applications variées, notamment dans les traitements thermiques pour améliorer les propriétés des matériaux. Par exemple, la carburation des aciers peut être réalisée par diffusion de metalloïdes [52].

- **Traitement par diffusion de métaux**

Le traitement de diffusion de métaux implique la diffusion de métaux tels que le chrome ou le zinc pour améliorer les caractéristiques des matériaux. Ces traitements sont couramment utilisés pour renforcer la résistance à la corrosion et à l'usure des surfaces métalliques [51].

I.2.3.c Traitement par conversion

La réaction entre le substrat et un produit extérieur conduisant à la formation d'une couche superficielle de composé protecteur. Par exemple :

- **Oxydation anodique** : L'anodisation, principalement des alliages d'aluminium, mais aussi de titane consiste à faire croître une couche d'oxyde épaisse et adhérente, par application d'un potentiel anodique élevé (jusqu'à plusieurs dizaines de volts), en milieu aqueux, par exemple sulfurique. Des épaisseurs d'oxyde de plusieurs microns ou dizaines de microns sont ainsi obtenues. La couche d'oxyde est composée d'une couche barrière compacte et d'une couche externe poreuse. La croissance de la couche barrière se fait par diffusion ionique à travers l'oxyde et son épaisseur augmente de façon linéaire avec le potentiel appliqué. Un traitement de colmatage des couches externes poreuses, améliore l'efficacité de l'anodisation et /ou permet les colorations à usage décoratifs [53].
- **La phosphatation** : C'est une méthode consistant à faire une sous-couche permettant une meilleure adhérence des peintures à la surface d'une pièce à protéger. La pièce est immergée dans une solution de phosphate de manganèse, de zinc ou de sodium, portée à une température de 80°C à 100°C. L'immersion prend entre quelques minutes et une heure. Des cristaux de phosphate de fer insolubles sont formés à la surface du métal qui permettront ensuite une meilleure adhérence mécanique de la peinture ou une protection naturelle [54].
- **La Chromatation** : La chromatation [55] est un traitement de conversion chimique qui permet de former des couches complexes d'oxydes et de sels de chrome sur des

revêtements électrolytiques de métaux communs, tels que le zinc. Ce procédé est couramment utilisé dans divers domaines, notamment l'aérospatial, l'aéronautique, l'électronique et la construction.

I.3 Revêtement de surface

Le revêtement consiste à couvrir la pièce métallique pour la protéger de toute forme de corrosion et ainsi prolonger sa durée de vie. Les revêtements de surface sont classés en trois catégories principales, les revêtements organiques, les revêtements minéraux et les revêtements métalliques.

I.3.1 revêtement organique

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu pour éviter tous types de corrosion. Il existe une grande variété parmi lesquels on trouve les polymères et les peintures.

I.3.1.a Polymères

Il existe une grande variété de ce type de revêtement comme les thermoplastes, les caoutchoucs (naturel ou synthétique) et les thermodurcissables. Leur épaisseur est généralement de 100 à 500 μm . On les applique par divers procédés : par poudre, au pistolet, par laminage, par immersion [56].

I.3.1.b Peinture

Les peintures n'ont plus la fonction décorative pour fonction principale et doivent également remplir des fonctions diverses telles que l'imperméabilité, l'isolation, la protection contre des agressions sans cesse accrues ou nouvelles. Une peinture est une préparation fluide (liquide, pâteuse ou poudreuse) qui peut s'étaler en couche mince sur toutes sortes de matériaux (appelés subjectiles) pour former, après séchage ou réticulation (durcissement), un revêtement mince. Pour remplir son rôle, le système de peinture doit être adhérent, continu, imperméable et durable dans le temps. Son aspect esthétique (brillance, couleur) doit être conservé [57].

I.3.2 Les revêtements minéraux

L'émail ou les dépôts céramiques sont utilisés dans des situations où d'autres revêtements sont impossibles à appliquer à cause des conditions thermiques et chimiques.

Ces revêtements n'autorisent aucune mise en forme et exigent des précautions de manipulation. Les techniques modernes de dépôts permettent le développement d'un nombre croissant de revêtement minéraux à base d'oxydes, de carbures, de nitrures, etc. dont certains ont des propriétés protectrices vis-à-vis de la corrosion aqueuse [53].

I.3.3 Les revêtements métalliques

Les revêtements métalliques [58] sont couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Les revêtements métalliques, outre leur effet anticorrosion, remplissent souvent une fonction décorative. On les utilise aussi comme protection contre l'usure.

I.3.3.a Revêtements anodique

C'est le dépôt d'un métal plus réducteur (Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger): par électrolyse en le plongeant dans le métal fondu. On utilise souvent le zinc (galvanisation) ou l'étain (étamage) Il faut qu'en s'oxydant, le zinc ou l'étain soit passivé; ainsi, le fer sera protégé par le zinc, lui-même protégé par sa couche protectrice [59].

I.3.3.b Revêtements cathodiques

Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. Pour les revêtements de plomb, d'étain, de nickel, de cuivre, d'argent, d'or, de rhodium ou de platine, on parle de revêtements plus nobles, où ces métaux forment la cathode et l'acier est considéré comme l'anode. Par exemple, lorsqu'on recouvre l'acier de nickel, l'acier joue le rôle d'anode tandis que le nickel agit comme cathode [59].

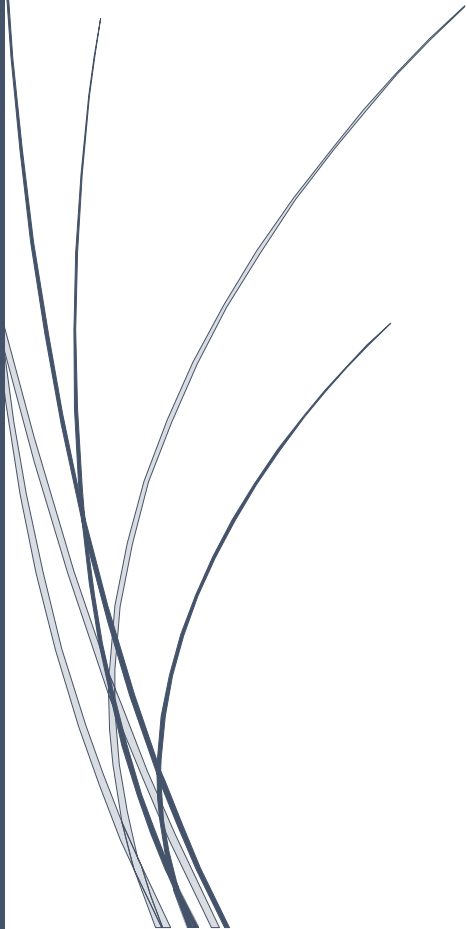
Conclusion

Les revêtements des surfaces sont des moyens efficaces pour prévenir et contrôler la corrosion des métaux et des alliages. Ces revêtements créent une barrière physique qui empêche l'accès des agents corrosifs à la surface métallique, ce qui réduit significativement la corrosion. Les revêtements peuvent être choisis en fonction des conditions spécifiques de l'environnement et des propriétés du matériau à protéger. Ils sont donc essentiels pour prolonger la durée de vie des installations métalliques et réduire les coûts de maintenance et de réparation.

A dark blue vertical bar runs down the left side of the page. A blue arrow points to the right from the bar, positioned above the chapter title.

CHAPITRE II

Matériels et protocole expérimental



CHAPITRE II : Matériels et protocole expérimental

Introduction

Diverses techniques sont appliquées pour la réalisation de revêtements afin de protéger les matériaux contre la corrosion. L'efficacité de ces procédés repose largement sur la fiabilité des méthodes de préparation des surfaces, permettant une bonne adhérence sur les supports métalliques et préservant les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion, l'usure et la micro dureté. Dans ce chapitre, nous présenterons les matériaux et le processus opérationnel pour le traitement de l'acier, en détaillant les trois types de revêtements utilisés dans ce travail de mémoire. Ces revêtements incluent les revêtements organiques, qui impliquent l'application de peinture en poudre sur la tôle, et les revêtements électrochimiques, qui consistent en l'application de zinc ou de nickel sur la pièce. Nous exposerons également le matériel et le protocole expérimental utilisés pour réaliser les différents revêtements sur les aciers étudiés.

II.1 Mode d'application du revêtement organique (peinture)

Avant d'appliquer le revêtement organique sur un matériau, il faut préparer et traiter la surface de ce dernier pour assurer la bon adhésion de celui-ci avec le substrat. Après l'application du revêtement on procède à plusieurs teste de la pièce pour s'assurer que ses propriétés sont protégés.

II.1.1 Préparation de la pièce métallique

Le matériau étudié dans cette partie est NF EN 10103 DC03. Il est livré sous forme de bobines. Ces dernières sont huilées de manière uniforme des deux faces. Ce traitement vise à protéger les tôles de la corrosion durant les étapes d'emballage, de transport, de manipulation et de stockage. Les bobines sont déroulées et découpées en tôles individuelles dans l'atelier de refendage. Ils sont ensuite transformés en portes et armoires dans l'atelier de façonnage.

Tableau II.1 Composition chimique de DC03 [60]

Composition chimique en %			
Carbone	Phosphore	Souffre	Magnésium
0.10	0.035	0.035	0.45



Figure II.1: Les bobines des tôles utilisées.

II.1.2 Traitement de la surface

Avant de peindre la pièce métallique, on procède d'abord au traitement par pulvérisation. Ce processus implique de suspendre la pièce à une chaîne se déplaçant à une vitesse de 3 mètres par minute, la faisant passer au-dessus des bains. L'ENIEM dispose de trois chaînes : une pour les portes, une autre pour les armoires et la dernière pour l'évaporateur (pièce en aluminium).



Figure II.2 : Le tunnel de prétraitement.

la pièce traverse plusieurs bains, chacun étant analysé au préalable. Pour cette étape, on utilise un tunnel de prétraitement TOSHIBA, qui est programmé de faire en chaîne plusieurs opérations (pré dégraissage, dégraissage, phosphatation, ect...). Chaque étape est

suivie d'une opération de rinçage pour éviter la transformation de produit d'un bain à un autre, la variation de la concentration et la contamination entre les bains. Puis la pièce passe par le four de séchage de température qui varie entre 150 et 160°C.

Le tableau suivant résume toutes les étapes du traitement et de tous les paramètres de chaque opération.

Tableau II.2 : paramètres de travail chaîne de peinture

Paramètres Opérations	Volume m^3	Temps d'action	Solution utilisé	Température °C	Ph de la solution	Rôle
Pré dégraissage	2.7	1 min	Dégraissant alcalins	50 ± 5	9.5-13	Lavage des pièces pour éliminer l'huile antirouille et les saletés persistantes
Dégraissage	5.4	2min	Dégraissant alcalins	50 ± 5	9.5-13	
Rinçage 1	2.7	50-60s	Eau du robinet	ambiante	Neutre	Enlève toutes les traces de dégraissant
Affineur	2.7	40-60s	d'oxyde de titane	< 40	8-9	favoriser la germination des cristaux de phosphate .Permettre une phosphatation homogène
Phosphatation	8.1	2 min	Phosphate de zinc (H3PO4) Hydroxyde de sodium (NaOH) Accélérateur	50 ± 2	4-5	contre la corrosion des pièces et améliorer l'adhérence de la peinture
Rinçage	2.7	40-50s	Eau du robinet	Ambiante	Neutre	Lavage après le traitement complémentaire
Rinçage a l'eau pure	2.7	30s	Eau deminéralisée	Ambiante	neutre	Eliminer les ions dissous dans l'eau



Figure II.3 : Le four de séchage.

II.1.3 Analyse des bains

La chaîne est constituée de plusieurs bains où la pièce à traiter doit passer. Avant chaque passage dans un bain, des analyses doivent être effectuées pour vérifier la composition de ce dernier et vérifier la quantité nécessaire de produit, dans le cas contraire, il faut réajuster.

II.1.3.a Le bain du pré dégraissage : Ce bain est analysé deux fois par jour pour cela il nous faut un échantillon du bain, du phénophtaléine et du chlorure d'hydrogène 1N.

Le mode opératoire :

- Pipeter 10 ml de la solution du dégraissant
- Ajouter quelques gouttes de phénophtaléine
- Titrer avec du chlorure d'hydrogène

Volume équivalent V_{eq} obtenu doit être de 2-3 ml, ce qui correspond à la norme des points entre 2-3. Lorsque la concentration est trop faible, on ajoute du dégraissant pour la remonter.

II.1.3.b Le bain dégraissant : pour vérifier ce bain on utilise le même mode opératoire que le précédent (le bain pré dégraissant), mais dans ce cas la norme de V_{eq} doit être entre 19-20 points.

II.1.3.b Bain de phosphatation : ce bain est analysé trois fois par jour, pour cela, il nous faut un échantillon du bain, du vert de bromocrésol, du phénophtaléine et du l'hydroxyde de sodium.

Le mode opératoire

Pour vérifier l'acidité libre (ACL), on procède par :

- Pipeter 10ml de la solution dans un erlenmeyer
- Ajouter quelques gouttes de phénophtaléine
- Titrer avec une base l'hydroxyde de sodium

L'idéale de V_{eq} est de 0.8ml qui est l'équivalent de 0.8 point.

Pour vérifier l'acidité totale (ACT), on procède par la manière suivante :

- Pipeter 10ml de la solution dans un erlenmeyer
- Ajouter quelques gouttes de vert de bromocrésol
- Titrer avec une base l'hydroxyde de sodium

L'idéal est de trouver 17 point. Le rapport $\frac{ACT}{ACL}$ doit être supérieur à 22.

II.1.4 Revêtement de la pièce

Après le traitement de la pièce, on passe à son revêtement. Ce revêtement organique est sous forme d'une peinture en poudre. La pièce entre dans une cabine de peinture préalablement programmée. Avant d'atteindre la pièce, la poudre de peinture traverse plusieurs étapes. Elle est stockée dans un big bag, puis passe par un réservoir, suivi d'un filtre où elle est nettoyée de toute impureté, puis un deuxième réservoir, avant d'être diffusée par les pistolets. La dispersion de la poudre est assurée par une pompe à air qui génère de la poudre chargée négativement attiré vers la pièce, qui est chargée positivement. La poudre qui ne se fixe pas sur la pièce est aspirée par un tuyau vers le filtre, afin d'éviter tout gaspillage de matière. Enfin, la pièce subit une cuisson dans un four à une température de 180°C pendant 10 à 15 minutes, permettant d'obtenir une pièce traitée et revêtue.



Figure II.4 : La cabine de poudrage utilisée

II.1.5 Contrôle de la pièce revêtue

II.1.5.a Contrôle visuel

Après que la pièce soit sortie du four elle passe par un contrôle visuel pour vérifier différents paramètres sur la surface à savoir les grains, l'œil de poisson, la brillance (bleuté) et son aspect comme la présence de peau d'orange.

II.1.5.b Mesure de l'épaisseur

Pour évaluer l'épaisseur du revêtement on utilisera un micro test.



Figure II.5 : Le micro test

Mode opératoire :

- Etalonner l'appareil en posant la sonde sur une plaque d'acier
- Poser la sonde sur cinq points différents et relever 5 valeurs d'épaisseur e_1, e_2, e_3, e_4 et e_5 .
- Calculer la moyenne des valeurs obtenues E ; $E = \frac{e_1+e_2+e_3+e_4+e_5}{5}$
- Vérifier que la valeur moyenne réponde à la norme.

II.1.5.c Essais mécaniques

- Essai résistance au choc

Pour tester la résistance au choc de la pièce revêtue, on utilise le testeur de résistance au choc par chute de masse représenté sur la figure II.6.a. Cet équipement est conçu pour effectuer des tests de fissuration, ainsi que des tests d'adhérence et d'élasticité des revêtements. En ajustant la hauteur de chute, une masse à billes hémisphériques est laissée tomber, générant un choc qui nous permet de mesurer la déformation de la tôle peinte.

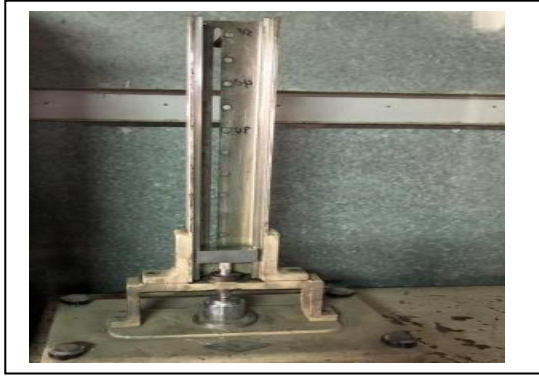


Figure II.6.a: Le testeur de résistance au choc par chute de masse



Figure II.6.b : Les différentes pièces et masses du testeur

Mode opératoire :

- Positionner l'éprouvette sur la plaque de base, en veillant à ce que le côté à examiner soit dirigé vers le haut.
- Faire tomber verticalement des masses de différents poids sur l'éprouvette (pour notre essai on utilise une masse de 500gramme), en débutant par la hauteur de chute la plus basse.
- Augmenter progressivement la hauteur de chute 30cm puis 40cm et enfin 50cm répéter cette opération sur différents emplacements de la pièce d'essai.

Après les tests, on observe l'aspect de l'empreinte, les endroits de décollement et la présence de fissuration de la peinture, c'est ce qui nous permettra de déterminer l'élasticité de la peinture.

-Essaie d'emboutissage

A l'aide de la machine représenté en Figure. II.7 on peut tester l'élasticité et l'adhérence de la peinture.



Figure. II.7: L'appareil pour essai d'emboutissage

Mode opératoire :

- Tourner à gauche le volant de fixation pour que la pièce puisse s'introduire entre la matrice et le poinçon.
- Tourner à gauche le volant d'extrusion jusqu'à ce que la graduation d'extrusion soit inférieure à zéro.
- Poser l'éprouvette de manière que la face à observer soit orientée vers la matrice et fixer l'éprouvette en tournant le volant de fixation à droite.
- Brancher la lampe et orienter le miroir convenablement.
- Tourner le volant d'extrusion à droite pour enfoncer le poinçon à vitesse constante.
- Continuer à enfoncer le poinçon jusqu'à 5 mm.
- Vérifier l'éprouvette si il ya pas de craquelure ou décollement de la peinture.

-Essaie de pliage :

L'essai de pliage est réalisé en utilisant l'appareil représenté sur la figure suivante :



Figure II.8.a : L'appareil pour l'essai de pliage



Figure II.8.b : Les tiges et plaques de l'appareil de pliage

Ce test, consiste à soumettre une éprouvette rectangulaire d'une dimension 100mm × 50mm à une déformation plastique par pliage sans inversion du sens de flexion. L'essai nous permettra de contrôler à la fois l'adhérence du revêtement et l'élasticité de la peinture, après l'essai de pliage le revêtement ne doit pas présenter aucun écaillage visible à l'œil nu.

Le choix de « Ø » (diamètres de la tige) et de « E » (épaisseur de la plaque) est donné par tableau suivant

Tableau II.3 : Diamètre tiges et l'épaisseur de la plaque équivalente

Ø (mm)	2	3	4	6	8	10
E (mm)	4	3.5	3	2	1	0

Mode opératoire :

- Insérer l'éprouvette entre la tige et la plaque de support de sorte que la surface peinte soit du côté de la plaque pour qu'après l'essai le côté revêtu soit à l'extérieur
- Fermer l'appareil régulièrement sans secousse à 180° en une seconde environs
- Examiner l'éprouvette à l'œil nu

Pour notre expérience on utilise :

Tige 4 —————> plaque 3 mm

Tige 6 —————> plaque 2 mm

- Essai de quadrillage**Figure II.9** : L'appareil pour l'essai de quadrillage

-L'appareil de quadrillage est constitué de deux parties, la première partie est le support et la deuxième est la partie coupante qui est composée de plusieurs arêtes tranchantes

Mode opératoire :

- Tracer des bandes grâce aux arêtes tranchantes de l'appareil pour former des centaines de petits carreaux
- Les incisions doivent être faites de manière uniforme et pénétrer jusqu'au support (tôle)

- Perpendiculairement a ces incisions parallèles, exécuter de la même façon et avec le même écart, le même nombre d'incisions parallèles pour former un quadrillage
- Appliquer un ruban adhésif et arracher le avec une force forte.
- Examiner à l'œil nu sur la surface quadrillée de peinture

II.2 Mode d'application d'un Revêtement électrochimique au Nickel (Le nickelage)

II.2.1 Préparation de la pièce

Dans cette partie nous avons étudié un autre matériau, c'est le Fe 37-2. Ce matériau est livré sous forme de bobine et huilé pour le protéger la corrosion durant les étapes d'emballage, de transport, de manipulation et de stockage. Ces fils sont utilisés pour fabriquer les grilles des fours. Pour la préparation de ces grilles, on utilise deux fils de diamètre différent, le fil 06mm de diamètre est découpé pour faire le cadrant de la grille et le fil 04mm est découper pour être souder sur le cadrant pour former la grille des fours données en **Figure II.10.b**.

Tableau II.4 : Composition chimique du Fe 37-2

Composition chimique en %				
Carbone	Manganèse	Phosphore	Souffre	Azote
0.17	1.4	0.045	0.045	0.009



Figure II.10.a : La bobine de fils

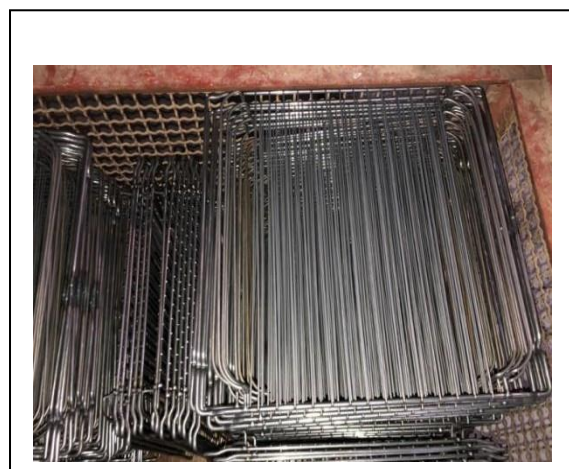


Figure II.10.b : La grille avant traitement

II.2.2 Traitement de la surface

Pour le traitement de la pièce elle doit passer par une chaîne de bains en immersion ou elle passera par plusieurs étapes ; le dégraissage (anodique et cathodique) et décapage bain de nickelage et entre chaque bain la grille passe par des bains de rinçage, pour finir dans un séchoir. Le traitement se fait par immersion dans les revêtements électrochimique.

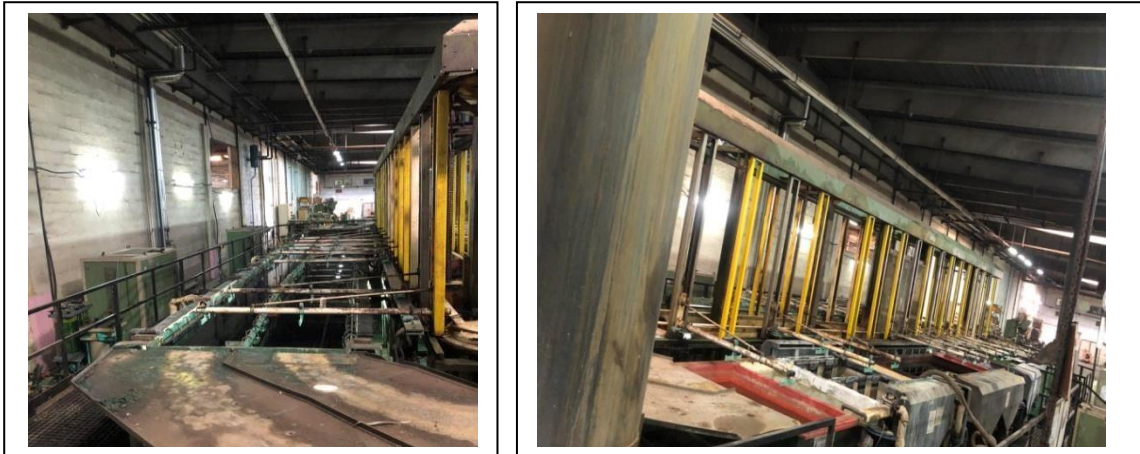


Figure II.11.a : Les bains de traitement

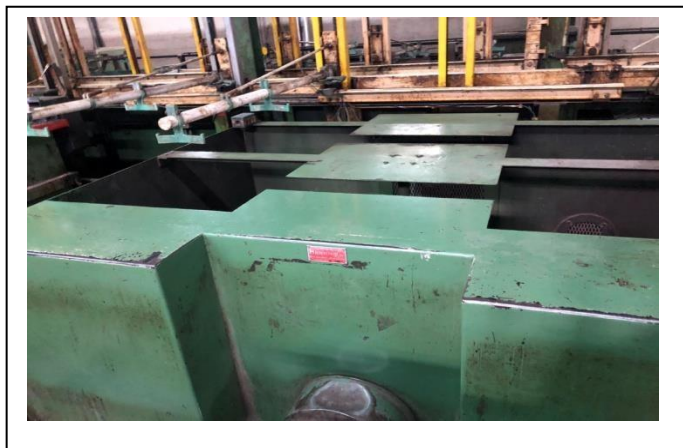


Figure II.11.b : Le séchoir de nickelage

Les étapes de traitement et les paramètres pour le revêtement nickelage chromage sont donnés sur le tableau II.5 suivant :

Tableau II.5 : Paramètres de travail de la chaîne de nickelage chromage [61]

Paramètres Traitement	Volume M^3	Température $^{\circ}C$	Concentration g/L	Temps d'immersion	Produits
Dégraissage Cathodique	2.350	40 à 60	80 à 85	2min50s	Dégraissant électrolytique
			2L/bain		Mouillant
Rinçage	1.176	Ambiante	--	1min10s	Eau de robinet
Décapage	4.7	Ambiante	40 %volumes 3 à 4 N	6min	Acide chlorhydrique
Rinçage	1.176	Ambiante	--	1min10s	Eau de robinet
Dégraissage Anodique	2.350	40 à 60	80 à 85	2min50s	Dégraissant électrolytique
			2L/bain		Mouillant
Rinçage	1.176	Ambiante	--	1min10s	Eau de robinet
Rinçage Acide	1.176	Ambiante	2 a 4L/bain	1min10s	Acide chlorhydrique
Rinçage	1.176	Ambiante	--	1min10s	Eau de robinet
Nickelage	11.750	45 à 60	280	13 min	Sulfate de nickel
			60		Chlorure de nickel
			40 à 45		Acide borique
			3a 5ml/L pour 10000AH		Brillanteur primaire
			1 a 2ml /L pour 10000A/H		Brillanteur secondaire
			0.5 à 1 ml/L pour 10000A/H		Additif nivelant
			1ml/L pour 10000A/H		Agent stabilisateur
Bain mort	1.176	Ambiante	--	1min10s	Contient-la Solution du nickel
Rinçage	1.176	Ambiante	--	1min10s	Eau de robinet
Rinçage Chaud	1.176	60	--	1min10s	Eau de robinet
Séchage	3.528	100	--	5min 40s	Air chaud

II.2.3 Analyse des bains

La chaîne est constituée de plusieurs bains où la pièce à traiter doit passer. Avant de passer l'un de ces bains l'analyse de celui-ci est nécessaire pour vérifier sa composition. Si

on trouve des manques de produits il faut faire des ajustements. L'analyse de ces bains se fait une fois par semaine.

II.2.3.a Bain dégraissage cathodique : en présence d'un dégraissant électrolytique, la pièce à traiter est connectée à la cathode. Le dégraissage s'effectue par la libération de l'hydrogène H_2 , ce qui augmente l'effort mécanique.

Mode opératoire :

- On prélève 10 ml de la solution du bain qu'on dilue dans 50 ml d'eau distillée
- On ajoute 4 gouttes de phénophtaléine
- On titre avec l'acide chlorhydrique 1N ou acide sulfurique 1N jusqu'à disparition de la coloration rouge. La concentration du bain est donnée par $V_{HCl} \times 5.56 = C$ en gr/L.

La concentration doit être de 80 à 85 gr/L

II.2.3.b Bain décapage : Celui-ci est constitué d'une solution d'acide HCl à 40%, son but est de former des pores et éliminer les graisses et la rouille sur la tôle.

Mode opératoire :

- On prélève 5 ml de la solution du bain on lui rajoute 4 gouttes de méthyle orange.
- On titre avec NaOH à 1N jusqu'à la disparition de la couleur orange.
- La norme du bain est donnée par la relation suivante :

$$\frac{V_{NaOH} \times n_{NaOH}}{V_{Bain}}$$

La norme doit être 3 et 4 N.

II.2.3.c Bain dégraissage anodique : En présence d'un dégraissant électrolytique, la pièce à traiter est connectée à l'anode. Le même principe que le dégraissant cathodique mais ici il y aura un dégagement de l'oxygène O_2 .

Mode opératoire :

- On prélève 10 ml de la solution du bain qu'on dilue dans 50 ml d'eau distillée.
- On ajoute 4 gouttes de phénophtaléine et on titre avec l'acide chlorhydrique 1N ou l'acide sulfurique 1N jusqu'à la disparition de la coloration rouge.

II.2.3.d bain de nickel : pour ce bain on teste le dosage du Nickel, de Chlorure de Nickel et de l'acide borique.

- Dosage de nickel : Les réactifs utilisés dans ce dosage sont ; Fluorure de sodium ; une solution d'ammoniaque à 15%, un indicateur murexide (à 0.5% dans le chlorure de sodium) et un E.D.T.A en solution 0.1 M.

Mode opératoire :

- Pipeter 5 ml de la solution de nickelage, les introduire dans une fiole jaugée de 50 ml compléter au trait de jauge par de l'eau distillée.
- Transférer 10 ml de la solution dans un erlenmeyer de 250 ml et diluer à 100ml environ avec de l'eau distillée
- Ajouter une pointe de spatule de fluorure de sodium , 15ml environ de solution d'ammoniaque et une pointe de spatule d'indicateur murexide.
- Titrer avec la solution 0.1M d'E.D.T.A jusqu'à l'apparition d'une coloration pourpre–violacée Soit V ml le volume d'E.D.T.A du titrage.

A : nickel (Ni) = $V \times 5.87 \text{ g/L}$ (A)

B : nickel du au chlorure de nickel = $E \times 0.247 \text{ g/L}$ (B)

C : sulfate de nickel ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) = $(A-B) \times 4.48 \text{ g/L}$ (C)

- Dosage de chlorure de nickel : les réactifs utilisés sont le Chromate de potassium et le Nitrate d'argent en solution 0.1N

Mode opératoire :

- Pipeter 2ml de la solution de nickelage dans un erlenmeyer de 250ml et diluer à 50 ml avec de l'eau distillée.
- Additionner une pincée de chromate de potassium
- Titrer avec la solution de nitrate 0.1 N jusqu'à qu'une coloration rougeâtre soit obtenue Soit Vml le volume de nitrate d'argent utilisé

On obtient

D : ions chlorures (Cl) = $V \times 1.77 \text{ g/L}$ (D)

E : chlorure de nickel ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) = $v \times 5.94 \text{ g/L}$ (E)

Dosage de l'acide borique : Dans ce cas, on utilise un indicateur composé de 1g de promocrésol propre et 0.2g de bromothymol bleu dissous dans 100 ml d'alcool, du mannitol et une solution de soude 1N.

Mode opératoire :

- Pipeter 5 ml de la solution de nickelage dans un erlenmeyer de 250 ml.

- On lui ajoute 50ml d'eau distillée et 3 à 5 gouttes de l'indicateur composé la couleur doit être violet-bleu (si la couleur est jaune, ajouter la solution de soude jusqu'à ce que la couleur vire au bleu) soit V ml le volume de soude utilisé
- Additionner 2 à 3 spatules de mannitol et mélanger
- Titrer avec la solution de soude 1N jusqu'à virage de la couleur vert au bleu

La concentration de l'acide Borique est donnée par

$$C (\text{H}_3\text{BO}_3) = V \times 12.36\text{g/L}$$

II.3 Revêtement électrochimique (zincage)

II.3.1 Préparation de la pièce

Le matériau étudié dans cette partie est celui des tubes utilisés pour fabriquer les rampes qui est du NF EN 10130 DC01. Ils arrivent en forme de fardeau. Il est huilé pour sa protection. Le tube est découpé puis cintrer et soudé à l'autre partie pour former une rampe.

Tableau II.6 : Composition Chimique de DC01 [60]

Composition chimique en %			
Carbone	Phosphore	Souffre	Magnésium
0.12	0.045	0.045	0.60



Figure II.12.a : Un fardeau de tubes



Figure II.12.b : Une rampe

II.3.2 traitement de la pièce

Le traitement de la pièce ici se fait par immersion et elle passe par une chaîne de bains

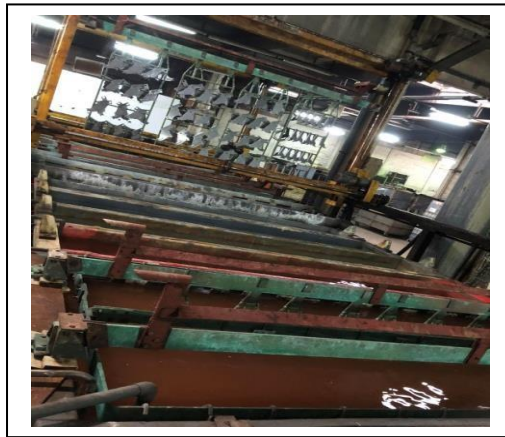


Figure II.13.a : Les baignoires de traitement



Figure II.13.b : Le séchoir de zingage

Tous les paramètres utilisés dans la chaîne de Zingage sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.7 : paramètre de travail chaîne de zingage [61]

Paramètres Traitement	Volume m^3	Température $^{\circ}C$	Concentration g/L	Temps d'immersion	Produit
Dégraissage Chimique	3	40 à 60	60 à 66	5min25s	Dégraissage chimique Mouillant
Rinçage	2.6	Ambiante	--	3min30s	Eau du robinet
Décapage	5.2	Ambiante	10% volume	12mn30s	Acide sulfurique
			20% volume		Acide chlorhydrique
			3.1N a 5N		Inhibiteur de décapage
Rinçage	2.6	Ambiante	--	4min40s	Eau du robinet
Dégraissage Anodique	3.5	40 à 60	50 à 57	4min	Dégraissant Electrolytique Mouillant
Rinçage	2.6	Ambiante	--	1min25s	Eau du robinet
Rinçage Acide	2.6	Ambiante	2%	1min	Acide Chlorhydrique
Rinçage	2.6	Ambiante	--	1min15s	Eau du robinet
Zingage Acide	7x2	18 a 40	156 à 170	25min40s	Sel conducteur
			70		Sel de zinc acide
			1ml/L pour 10 000AH		Brillanteur de base

			1ml/L a 3ml/L pour 10 00AH		Brillanteur Zingage
Bain mort	2.6	Ambiante	--	1min15s	Contient la solution de zinc
Rinçage	2.6	Ambiante	--	25s	Eau de robinet
Rinçage Acide	2.6	Ambiante	2 %	12s	Acide chlorhydrique
Passivation (Bleuté)	2.6	Ambiante	--	12s	Sel de passivation
Rinçage	3	60	--	2min	Eau chaude
Séchage	2.7	100	--	5min40	Air chaud

II.3.3. Analyse des bains

II.3.3.a Bain de dégraissage électrolytique

Concentration de travail du dégraissant chimique est 60 à 66 g/L et celle du dégraissant anodique est de 50 à 57 g/L

Mode opératoire :

- On prélève 10ml de la solution du bain qu'on dilue dans 50ml d'eau distillée.
- On lui ajoute 4 gouttes de phénolphtaléine.
- On titre avec l'acide chlorhydrique 1N, jusqu'à disparition de la coloration rouge

Calcul :

$$V_{\text{HCl}} \times 5.56 = \text{g/L}$$

II.3.3.b Bain décapage

Mode opératoire :

- On prélève 5ml de la solution du bain , on lui ajoute 4 gouttes methyle-orange
- On titre avec NaOH 1N jusqu'à disparition de la couleur orange

- Calcul :

$$\text{Normalité} : \frac{V_{\text{(NaOH)}} \times N_{\text{NaOH}}}{V_{\text{acide}}}$$

II.3.3.c Bain de zinc

- Dosage de zinc

Pour le dosage de Zinc, on utilise comme réactifs une solution d'ammoniaque 15%, un indicateur noir eriochrome T (A 1% dans chlorure sodium, de formaldéhyde 20% et l'E.D.T.A en solution 0.1%

Mode opératoire :

- Pipeter 2 ml de la solution du bain de zingage dans un erlenmeyer de 250ml diluer a 50-100 ml avec de l'eau distillée, Ajouter 15ml environ de solution d'ammoniaque et 2ml environ de formaldéhyde
- Titrer avec la solution 0.1 M d'E.D.T.A jusqu'à ce que la couleur passe du violet au bleu Calcul :

$$A : \text{zinc (Zn)} = V_{(E.D.T.A)} \times 3.25 \text{ g/L}$$

$$B : \text{chlorure de zinc (ZnCl}_2) = A \times 2.08 \text{ g/L}$$

- Dosage des chlorures

Les réactifs utilisés dans le dosage des chlorures sont, l'acétate de sodium, le chromate de potassium et le nitrate d'argent en solution à 0.1N.

Mode opératoire :

- prélever 5 ml de la solution du bain de zinc, les introduire dans une fiole jaugée de 50ml et compléter jusqu'à trait de jauge par de l'eau distillée
- transférer 5ml de cette dilution dans un erlenmeyer de 250ml, diluer a 50ml avec de l'eau distillée ajouter une demi spatule d'acétate de sodium et une pincée de chromate de potassium
- titrer par le nitrate d'argent 0.1N jusqu'à ce qu'une couleur rougeâtre soit obtenu

Calculs :

$$C : \text{ions chlorures total (Cl}^-) = V \times 7.1 \text{ g/L}$$

$$D : \text{ions chlorures dues au chlorure zinc} = B \times 0.52 \text{ g/L}$$

$$E : \text{chlorure d'ammoniaque (NH}_4\text{Cl)} = (C-D) \times 1.5 \text{ g/L.}$$

II.4 Essai brouillard salin :

Brouillard salin, également connu sous le nom de test de pulvérisation de sel, est une méthode standardisée utilisée pour évaluer la résistance à la corrosion des matériaux, en particulier des métaux, et de leurs revêtements. Cet essai utilise une solution de chlorure de sodium a 5% avec une plage de pH de 6.5 à 7.2, la cuve doit être a 35°C et le saturateur d'air à 47°C. Un diagramme schématique est représenté dans l'annexe 3



Figure II.14 Le brouillard salin

II.4.1 Préparation de la solution saline

- Utiliser de l'eau déminéralisée ou distillée pour préparer la solution saline.
- Utiliser du chlorure de sodium (NaCl) de qualité technique ou analytique.
- La concentration en sel est de 5% en poids (50 g de NaCl par litre d'eau).

II.4.2 Préparation des échantillons

- Préparer des éprouvettes avec une dimension de 150mm ×100mm.
- La face avant du panneau est marquée avec un outil pointu pour produire trois rayures à travers le revêtement jusqu'au substrat métallique, chaque rayure étant espacée de 25 mm.
- Les bords des éprouvettes sont protégés, avec du ruban adhésif

Mode opératoire :

- Placer les éprouvettes dans le brouillard salin incliné à 30°
- Laisser agir le temps qu'il faudra
- Retirer les éprouvettes après la période d'essai et laisser sécher durant 30min à 1h
- Rincer pour éliminer tout les résidus puis relaisser sécher dans un courant d'air
- Utiliser le ruban adhésif pour voir l'adhérence de la peinture

Dans notre expérimentation on laisse nos éprouvettes de peinture 500 heures dans le brouillard salin, ce qui est l'équivalent à 20jours et 20 heures

Lors d'un revêtement électrochimique l'essai du brouillard salin est le même avec le revêtement organique. On prend notre pièce et notre rampe et on les mets dans l'étuve.

Dans notre expérimentation on laisse la rampe 48h et la grille 72heure



Figure II.15.a : La rampe et la grille dans le brouillard salin



Figure II.15.b : L'éprouvette du brouillard salin

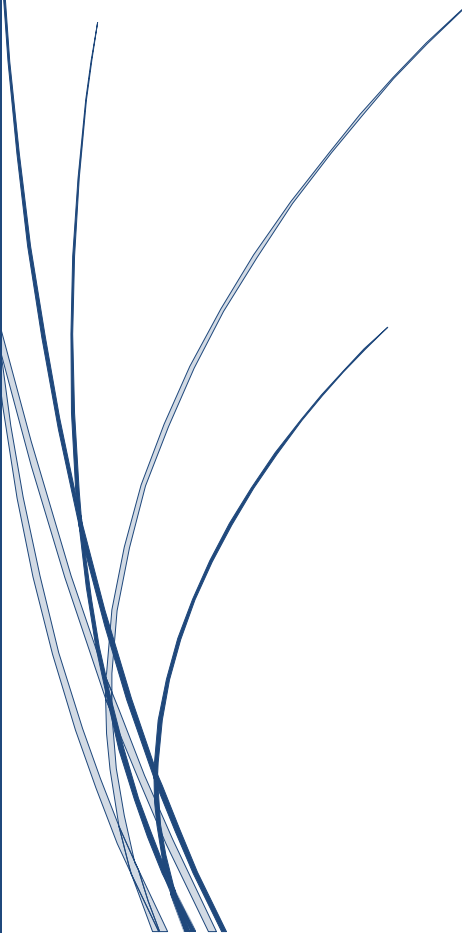
Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé ainsi que les méthodes et techniques à suivre pour mener convenablement notre travail. Pour que notre revêtement soit impeccable et qu'il dure à long terme, on doit vraiment avoir les bons paramètres de travail, pour chaque bain de traitement et aussi les paramètres de revêtements utilisés. La deuxième chose importante est de suivre les protocoles pour chaque analyse et mode d'emploi des machines pour atteindre les résultats voulus.



CHAPITRE III

Influence du milieu salin sur les
revêtements organiques et
électrochimiques



CHAPITRE III : Influence du milieu salin sur les revêtements organiques et électrochimiques

Introduction

Le choix d'un revêtement, qu'il soit organique ou métallique, nécessite de s'assurer de son efficacité et de sa conformité aux normes en vigueur pour son utilisation. À cet effet, tout type de revêtement reçu par l'entreprise ENIEM doit passer par plusieurs essais pour garantir qu'il répond bien à leurs exigences. La connaissance de sa nature et de sa marque n'est pas suffisante pour l'accepter et l'utiliser ; il est également nécessaire de s'assurer de sa durabilité dans les conditions d'emploi prévues, en particulier les conditions environnementales, notamment pour les pièces qui seront exposées à des milieux corrosifs.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus des différents essais effectués pour tester l'efficacité des revêtements étudiés. Dans la première partie, nous avons étudié deux types de revêtements organiques. La deuxième partie est consacrée à l'étude de deux revêtements métalliques. Dans la troisième et dernière partie, nous avons présenté les tests de corrosion obtenus par le brouillard salin des différents revêtements étudiés.

III.1. Revêtements organiques

Après traitement des pièces étudiées, nous avons procédé à leur revêtement. Nous avons utilisé deux peintures différentes, la première est une marque de Norvège JOTUN® et la deuxième est une peinture locale de marque ENAP®.

III.1.1 Traitement de la pièce

Avant de traiter la pièce, on a analysé les différents bains, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau.III.1 : Résultats obtenus lors du traitement des bains.

Traitement	Température	Titrage
Pré dégraissage	51 °C	2.7
Dégraissage	59.5 °C	19
Phosphatation	48 °C	ACT 22 ACL 0.7

Après avoir fait passer la pièce dans les bains de pré dégraissage alcalin ou acide avec tensioactif, puis celui de dégraissage alcalin ou acide avec tensioactif, nous l'avons fait passer

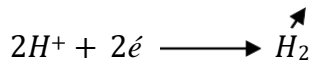
par celui de la phosphatation, bien sur, après sa sortie de chaque bains la pièce passe par les rinçages nécessaires.

Après le traitement de la pièce et son séchage, on aura une pièce qui est grise grâce à la couche de phosphatation qui se forme par les réactions suivantes :

- Oxydation anodique



- Réduction cathodique



Formation du revêtement :

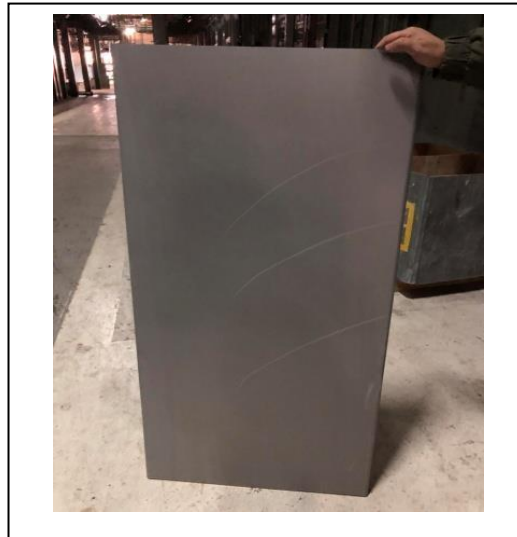
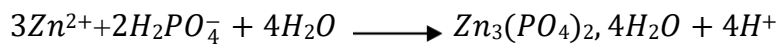
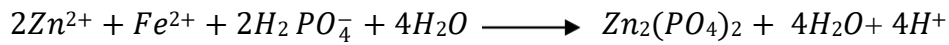


Figure III.1 : La pièce en acier DC03 après traitement

III.1.2. Revêtement de la pièce

Avant que la pièce passe par la cabine de peinture en poudre, on doit régler les paramètres des cabines donnés dans le tableau suivant

Tableau.III.2 : Paramètres des cabines des revêtements organiques.

Potentiel	70kv
Courant	30μA
Débit	50

III.1.3. Résultats obtenus et leurs interprétations

Après le revêtement de la pièce, nous avons étudié son efficacité en effectuant en premier lieu un contrôle visuel pour prélever les imperfections, ensuite nous avons déterminé son épaisseur moyenne et nous avons effectué quelques essais mécaniques afin de tester sa résistance aux chocs, au quadrillage, aux emboutissages et au pliage.

III.1.3.a Peinture de type JOTUN

-**Contrôle visuel** : c'est une vérification de l'aspect de la peinture à l'œil nue. La pièce présente une brillance bleuté et homogène. On constate l'absence de peau d'orange, absence de petits grains et absence de bulles d'air.



Figure III.2 : La porte après revêtement avec de la peinture en poudre

- Détermination de l'épaisseur du revêtement

On détermine l'épaisseur du revêtement aux quatre extrémités et au milieu de la pièce et puis on divise sur 5 pour avoir une moyenne. L'épaisseur moyen E de ce revêtement est donné par :

$$E = \frac{54+51+57+88+76}{5} = 65.2 \mu m.$$

Epaisseur moyenne de ce revêtement est de $65.2 \mu m$, cette valeur est conforme aux normes données sur sa fiche technique qui sont entre $60 \mu m$ et $70 \mu m$

- Essais mécaniques

Essai quadrillage

La figure II.3 montre les photographies des tôles peintes après essai de quadrillage. L'examen à l'œil nu montre l'absence de tout arrachement des carrés du quadrillage. La surface de la pièce est restée lisse et ne présente aucun décollement de la couche de revêtement.



Figure II.3 Résultat l'essai de quadrillage (JOTUN)

Resistance au choc

Nous avons effectué trois chocs de hauteurs différentes, données dans le tableau III.3. Les empreintes obtenues pour chaque choc sont données par la figure III.4

Tableau.III.3 : Les différents essais de résistance au choc.

Empreinte	Hauteur du choc	Conformité
1	30 cm	Conforme
2	40 cm	Conforme
3	50 cm	Conforme

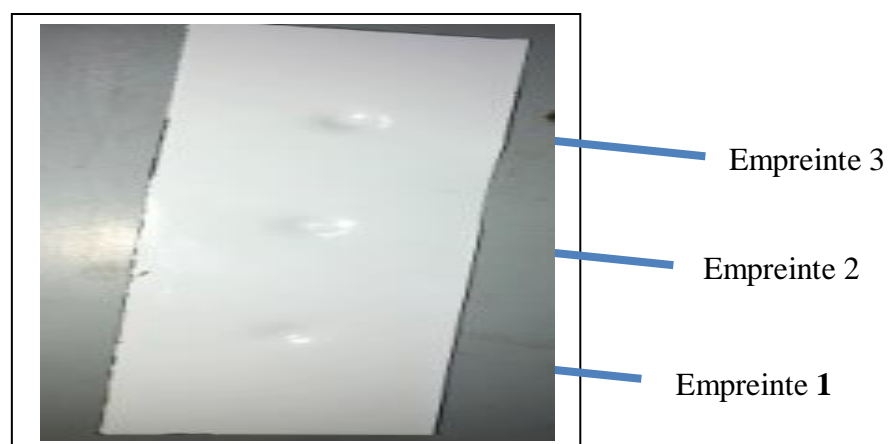


Figure III.4 Résultats de la résistance au choc (JOTUN)

La figure III.4 montre qu'il y'a aucun craquage du revêtement dans les trois endroits. Il supporte bien les chocs et la peinture adhère bien à la surface.

Essai de l'emboutissage

L'essai d'emboutissage nous a permis de tester l'élasticité du revêtement. Aucune fissure et aucun arrachement de la peinture n'a été remarqué sur la surface extérieure de l'échantillon, la résistance élastique du revêtement est remarquable.



Figure III.5 Résultat de l'essai d'emboutissage (JOTUN)

Essai pliage : tige 4 et 6

Les résultats des essais d'adhérence de la peinture obtenus sur les produits traités, ayant subi un essai de pliage et examinés à l'œil nu, ne présentent aucune fissuration sur la surface externe de la partie pliée, ce qui nous permet de déduire que notre revêtement résiste au pliage, son adhérence est importante.

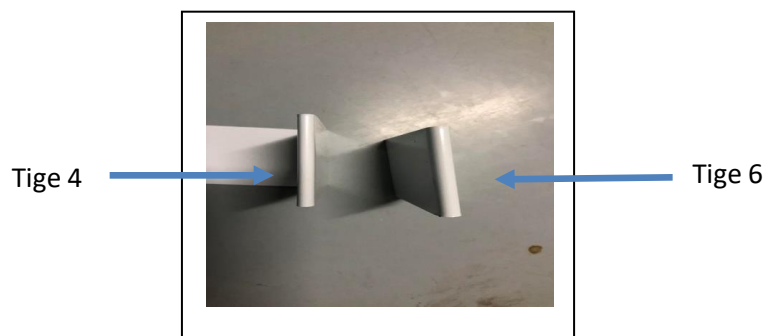


Figure III.6 : Résultat d'essai pliage (JOTUN)

III.1.3.b Peinture de type ENAP

Nous avons effectué les mêmes opérations précédentes pour tester l'efficacité de la peinture de l'ENAP®.

- Contrôle visuel

La vérification de l'aspect de la pièce à l'œil nue, montre une brillance bleuté et homogène, absence de peau d'orange, absence de petits grains et absence de bulles d'air.

- Détermination de l'épaisseur du revêtement

Par la méthode utilisée précédemment ; on détermine l'épaisseur de ce revêtement. On calcul la moyenne de l'épaisseur E en déterminant l'épaisseur aux quatre extrémités et au milieu de la pièce.

$$E = \frac{46+64+53+55+55}{5} = 54.6 \mu m$$

L'épaisseur moyenne est de $54.6 \mu m$ cela est conforme à sa fiche technique, qui est entre $45 \mu m$ et $55 \mu m$.

- Les essais mécaniques

Essai quadrillage

L'essai du quadrillage montre qu'il n'y a aucun arrachement des carré quadrillé. La surface reste intacte. Ce revêtement résiste très bien au quadrillage.



Figure III.7 Résultat essai quadrillage pour la peinture (ENAP)

Résistance au choc

Nos essais de ce type de peinture par apport aux chocs, ont montré qu'elle ne supporte pas le moindre choc (Figure III.8). Le tableau suivant résume les essais effectués et les résultats obtenus.

Tableau.III.4 : Les différents essais de résistance au choc du revêtement ENAP®.

Empreinte	Hauteur	Conformité
1	30 cm	Non conforme
2	40 cm	Non conforme
3	50 cm	Non conforme

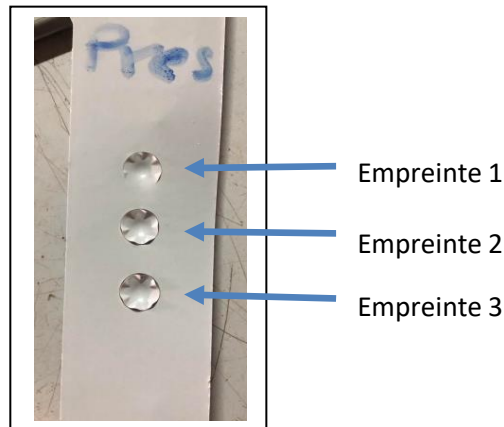


Figure III.8 : Résultats essai résistance au choc (ENAP)

Essai de l'emboutissage

Les essais de l'emboutissage ont montré une très bonne élasticité de cette peinture. On remarque sur la figure III.9, l'absence de fissures et de décollement de ce type de revêtement.



Figure III.9 : Résultat essai emboutissage (ENAP)

Essais de pliage

Nos résultats ont montré que ce revêtement n'a pas pu supporter le pliage. Il s'est complètement décollé (Figure III.10).



Figure III.10 : Résultat essai pliage (ENAP)

III.2 Revêtement électrochimique

Dans cette partie, nous avons traité deux types de revêtement, le premier est le nickelage et le deuxième est le zingage.

III.2.1 Nickelage

Avant le traitement, on analyse les bains où va passer la pièce notamment le bain de dégraissage cathodique, de décapage, de dégraissage anodique, de Nickelage et bien sur à la fin la pièce passe par le séchage. Nous avons résumé les résultats trouvés de ces traitements et toutes les étapes sur le tableau suivant.

Tableau.III.5 Résultats obtenus de traitement des bains dans le cas de Nickelage

Bains	Traitement	Concentration Trouver g/L	Concentration de Travail g/L
Dégraissage	Anodique	55.6	80 à 85
	cathodique	105.64	80 à 85
Décapage		3.6	3 à 4 N
Bain de nickel	Nickel	70.44	--
	Nickel du au chlorure de nickel	16.138	--
	Sulfate de nickel	259.56	280
	Ions chlorures	19.47	--
	Chlorure de nickel	65.34	60
	Acide borique	37.08	40 à 45

Après avoir effectué le traitement, nous avons obtenu une grille brillante comme le montre la figure ci-dessous.



Figure III.11 La grille après Nickelage

III.2.2 Zingage

Dans le cas de Zingage, la pièce passe par le dégraissage chimique, le décapage, le dégraissage anodique, le Zingage, la passivation bleuté et en dernier par le séchage.

Et entre toutes ces étapes, la pièce passe par des bains de rinçage pour éviter toute contamination.

Les réactifs utilisés dans chacune des étapes, les concentrations trouvés et celles avec les quelles nous avons travaillé sont dressés dans le tableau suivant.

Tableau.III.6 Résultats obtenus de traitement des bains dans le cas de Zingage.

Bain	Réactifs	Concentration trouver (g/L)	Concertation de travail (g/L)
Dégraissage	Chimique	33.36	60 a 66
	Anodique	33.9	50 a 57
Décapage		3.6 N	3.1 a 5 N
Bain de zinc 1	Zinc	52	--
	Chlorure de zinc	108.16	70
	Ions chlorure totale	138.45	--
	Ions chlorure du au chlorure de zinc	56.24	--
	Chlorure d'ammonium	123	156-170
Bain de zinc 2	Zinc	43.87	--
	Chlorure de zinc	91.26	70
	Ions chlorure totale	138.45	--
	Ions chlorure du au chlorure de zinc	47.45	--
	Chlorure d'ammonium	136.5	156-170

Après le traitement de la rampe on aura une pièce traitée et un peu bleuté grâce a la passivation bleuté



Figure III.12 : Une rampe

III.3 Essai de brouillard salin

Nous avons fait passer toutes les pièces étudiées précédemment pour tester les différents revêtements obtenus dans un milieu salin. Le temps spécifique dans le brouillard salin et le temps correspondant dans la nature sont donnés sur le tableau suivant.

Tableau.III.7 Equivalence de temps dans le brouillard salin et dans le milieu naturel.

Test de Brouillard salin	Temps dans le brouillard salin	Temps en milieu naturel
Neutre	24 heures	1 an
Acétique	24 heures	3ans
Sel de Cu accéléré et Acétique	24 heures	8 ans

III.3.1 Résultats obtenus pour la peinture JOTUN

Après avoir laissé les pièces revêtues de la peinture JOTUN® pendant 500 heures dans le brouillard salin, la peinture n'a pas tenu. Figure III.13.

La norme du brouillard salin est de 3 millimètre (voir l'annexe 4) et nous on a obtenu une moyenne de 13.5 millimètre



Figure III.13 : Résultat obtenus de test du brouillard salin sur la peinture JOTUN

III.3.2 Résultats obtenus pour la peinture ENAP

Après 500 heures, on obtient le résultat suivant.



Figure III.14 : Résultat de l'essai du brouillard salin sur la peinture ENAP.

Le résultat obtenu n'est pas bon et non conforme à la norme de l'ISO 9227 qui se trouve dans l'annexe 4.

III.3.3 Résultats obtenus dans le cas du Nickelage

Après 24h dans le brouillard salin la pièce est corrodé (Figure III.5). Ce revêtement ne tiendra pas dans un milieu salin.



Figure III.15 : Résultat de l'essai du brouillard salin sur le revêtement de Nickelage.

III.3.4 Résultats obtenus dans le cas du Zingage



Figure III.16 : Résultat de l'essai du brouillard salin sur le revêtement de Zingage

Conclusion

La peinture JOTUN® a bien tenue pour les essais mécaniques, L'essai du brouillard salin a donné un mauvais résultat, ce qui peut être attribué à un problème dans le traitement, plus précisément dans la phosphatation. En effet, nous n'avons pas la possibilité de mesurer l'épaisseur de cette couche pour vérifier si elle est conforme aux normes. Pour la peinture ENAP® l'essai du pliage et l'essai du choc n'ont pas été concluants idem pour l'essai au brouillard salin donc dans ce cas on peut dire que le revêtement n'a pas une bonne

élasticité. Dans le cas de Zingage et de Nickelage les revêtements n'ont pas tenu plus de 24h dans le brouillard salin. Cela peut dépendre des bains de dégraissage, de nickelage ou de zingage qui ont besoin de quelques ajustements pour augmenter l'efficacité des revêtements dans un milieu salin.



CONCLUSION

Conclusion générale

L'objectif de ce sujet de mémoire est d'étudier l'efficacité des revêtements organiques et électrochimiques dans un milieu salin. Pour le revêtement organique, nous avons utilisé deux marques de peinture l'une est JOTUN® et l'autre est ENAP®. Pour le revêtement, nous avons utilisé le Nickelage et le Zingage.

La partie pratique de ce travail a été réalisée à l'Entreprise Nationale des Industries Electroménagères (ENIEM) à Oued Aissi, Tizi Ouzou. Tous les matériaux et le matériel utilisé appartient à l'entreprise.

Les essais de corrosion de brouillard salin que nous avons effectués, ont montré que les deux types de peinture ne peuvent pas être utilisés dans un milieu salin. Il est possible d'expliquer le manque d'adhérence à plusieurs facteurs, notamment à des défauts dans la composition de la peinture, à une mauvaise phosphorisation ou à une contamination entre les bains qui peut s'expliquer par la présence des impuretés dans les bains de traitement.

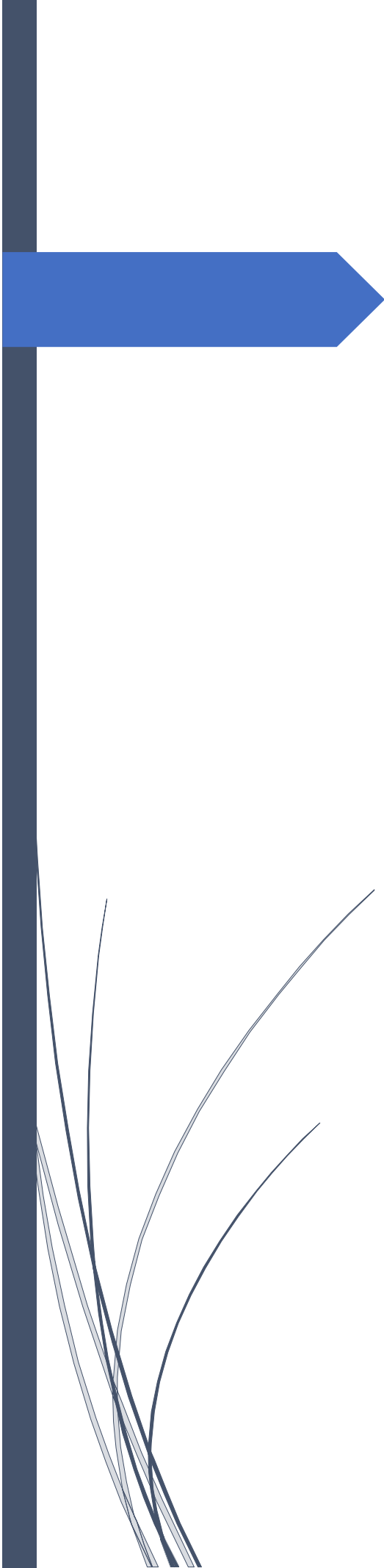
Pour les revêtements électrochimiques, comme le nickelage, l'essai de corrosion au brouillard salin n'a pas été concluant. Les causes de ces résultats peuvent être multiples, citons : faible courant électrique, manque de réactifs dans les bains, ou l'anode de nickel est détériorée, tous ces défauts peuvent réduire l'efficacité du revêtement électrochimique.

Le revêtement de zinc peut protéger l'acier grâce à la corrosion galvanique et que le revêtement peut agir comme barrière physique. Si la couche de zinc demeure intacte, le zinc sert de barrière physique contre l'humidité, et l'acier ne subira donc pas de corrosion. Bien que le zinc soit plus actif que l'acier, il est protégé par ses produits de corrosion, généralement le carbonate de zinc, et il se corrode plus lentement à l'extérieur que l'acier non protégé. Si la couche de zinc présente des imperfections ou elle est endommagée, l'acier ainsi exposé peut se corroder. Dans un tel cas, la corrosion galvanique n'offre aucune protection, au contraire, elle augmente le taux de corrosion du métal sous-jacent. Une fois que la majeure partie du zinc aura disparu, l'acier sera laissé sans protection et il peut être endommagé gravement par la corrosion par piqûres aux endroits où se trouvent les imperfections c'est le relevé de notre étude. Les résultats de notre recherche ont démontré que zingage dans un milieu salin n'est pas une solution efficace.

Conclusion générale

Cette étude aidera à identifier les causes de l'inefficacité des revêtements et à améliorer leur performance contre la corrosion dans un environnement salin.

Bien que chaque type de revêtement présente des avantages et des inconvénients spécifiques, le choix du revêtement approprié doit être basé sur les conditions spécifiques d'utilisation et les exigences de performance. Une approche intégrée, combinant différentes techniques de revêtement et une maintenance régulière, est essentielle pour garantir la longévité et la fiabilité des structures en acier dans les environnements salins. La collaboration continue entre les chercheurs, les ingénieurs et les industries est indispensable pour développer des solutions plus efficaces et durables contre la corrosion.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

-
- [1] S. Harsimran, Overview of corrosion and its control: a critical review, *Proceedings on engineering sciences* 3(1),13-24(2021).
- [2] B. Normand, *Prévention et lutte contre la corrosion: Une approche scientifique et technique*. EPFL Press(2004).
- [3] R. Tricot, G. Boutonnet, M. Perrot, & J. M. Blum, Problèmes posés par la corrosion dans le cycle du combustible nucléaire. *Matériaux & Techniques*, 65(9-10), 605-620 (1977).
- [4] A. Ferat, & H. MAZILLE, L'INDUSTRIE CHIMIQUE ET LA CORROSION. *L'actualité chimique*, 23 (1977).
- [5] J. Dorenlor, *Contribution à l'étude du comportement en corrosion et des évolutions microstructurales d'alliages Ni-Co: application au cas d'un alliage Ni-20Co utilisé dans l'aéronautique*, Thèse de Doctorat, Normandie Université (2021).
- [6] P. Sarrazin, A. Galerie, & J. Fouletier, 6 Protection contre la corrosion. Dans *Les mécanismes de la corrosion sèche*, EDP Sciences, pp. 213-250 (2022).
- [7] F. Constantin, *Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement*, thèse de Doctorat, INSA de Lyon (2011).
- [8] W. Von Baeckmann, W. Schwenk & W. Prinz, *Handbook of cathodic corrosion protection*. Elsevier(1997).
- [9] P. A. Schweitzer, *Corrosion-resistant linings and coatings*. CRC press(2001).
- [10] J. M. VOSGIEN, Les essais de corrosion. L'essai de brouillard salin: vers de nouvelles spécifications: Essais de corrosion. *Revue de métallurgie, Paris*, 99(9) (2002).
- [11] S. S. Kumar, V. Tripathi, R. Sharma, G. Puthilibai, M. Sudhakar & K. Negash, Study on Developments in Protection Coating Techniques for Steel. *Advances in Materials Science & Engineering*(2022).
- [12] P. Marcus & J. Oudar, *Corrosion mechanisms in theory and practice*, Eds. New York: Marcel Dekker pp. 243-286 (2002). .
- [13] D. J. Young, *High temperature oxidation and corrosion of metals* (Vol. 1). Elsevier(2008).
- [14] B. Normand, *Prévention et lutte contre la corrosion: Une approche scientifique et technique*. EPFL Press(2004).

Références bibliographiques

-
- [15] E. Dupuy, Les revêtements métalliques par immersion. *Revue de Métallurgie*, 41(7), 208-216. (1944).
- [16] D. H. Bensabra, Cours de corrosion et protection des métaux. *Université de JIJEL*, 3-4(2016).
- [17] J. Philibert, A. Vignes, Y. Brechet & P. Combrade, *Métallurgie. Du minerai au matériau, Technique et ingénierie/Mécanique et matériaux*. Paris, Dunod, coll. 2(2013)..
- [18] D. Landolt, *Corrosion et chimie de surfaces des métaux*, Vol. 12. EPFL Press(2003).
- [19] H. Marmi, *Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs*, thèse Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra (2017).
- [20] S. Bensaada, Cours de corrosion(2011).
- [21] R. Benatmane & I. Aidel, Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par les méthodes électrochimiques, Mémoire de Master, Université Bordj Bou Arreridj (2020)..
- [22] B. Grosogeat & P. Colon, La corrosion. *Société Francophone de Biomateriaux Dentaires*(2009).
- [23] D. Féron, V. L'Hostis & M. Roy, Eau de mer synthétique biochimique pour essais de corrosion. *Matériaux & Techniques*, 90,7-8 et 43-48(2002).
- [24] W. Lee, Z. Lewandowski, P. H. Nielsen & W. A. Hamilton, Role of sulfate-reducing bacteria in corrosion of mild steel: a review. *Biofouling*, 8(3), 165-194(1995).
- [25] Corrosion des métaux, ENSPM formation industrie - IFP training, France, 2005
- [26] G. DAUFIN & J. TALBOT, Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. *Le Lait*, 51(507), 375-398(1971).
- [27] L. Jaubert, *Etude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables: utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques*, thèse de Doctorat, Lyon, INSA (2004).
- [28] G. P. Legry & A. Pourbaix, Corrosion localisée. *Les Editions de Physique*(1994)..
- [29] S. Payan, *Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium renforcée par des fibres de carbone haut-module*, thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, (2001). .
- [30] G. Mankowski, C. Lemaître & H. H. Strehblow, Corrosion par piqûres. *Corrosion localisée*, 173-239(1994).

Références bibliographiques

- [31] S. Tricoit, *Modélisation et simulation numérique de la propagation de la corrosion par piqûres du fer en milieu chloruré: contribution à l'évaluation de la durabilité des aciers au carbone en conditions de stockage géologique*, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne (2012).
- [32] P. Combrade, La corrosion cavernueuse des alliages passivables. Dans *Corrosion localisée*, pp. 241-284 (2022).
- [33] S. Tierce, *Etude de la corrosion des alliages d'aluminium brasés constituant les échangeurs thermiques utilisés dans les véhicules automobiles*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse (2006).
- [34] J. GROLET, L. Séraphin & R. Tricot, Mécanisme d'action du soufre sur la résistance à la corrosion cavernueuse des aciers inoxydables. *MEM SCI REV METALL*, 5 (1977).
- [35] M. Froment, Corrosion intergranulaire. Sur le mécanisme de la corrosion intergranulaire des matériaux métalliques. *Le Journal de Physique Colloques*, 36, C4-371(1975)..
- [36] C. Lemaignan, La corrosion sous contrainte. Dans *La rupture des matériaux*, 11, pp. 105-112 (2022).
- [37] L. Dupin & B. de l'Épinois, Corrosion sous contrainte, retour sur une année inédite. *Revue Générale Nucléaire*, 6, 18-19(2022).
- [38] J. P. Rique, la corrosion filiforme dans les peintures pour l'aeronautique, pascal-francis.inist.fr (1978).
- [39] N. Birbilis, B. Hinton, Corrosion and corrosion protection of aluminium, *Metals and Surface Engineering*, Pages 574-604(2011).
- [40] P. Ponthiaux, F.Wenger, J. Galland, P. Kubecka & L. Hyspecka, Effets combinés du frottement et de la corrosion, dans le cas d'un alliage fer-nickel en milieu sulfurique. *Matériaux & Techniques*, 87, 11-15(1999).
- [41] F. Iacoviello, Fragilisation par l'hydrogene de l'acier inoxydable austéno-ferritique Z2CND22 05-rôle de la microstructure'. *Ph thesis Ecole Centrale Paris*(1997)..
- [42] G. Béranger & H. Mazille, Les facteurs de la corrosion. *Prévention et lutte contre la corrosion une approche scientifique et technique*, 19(2004).
- [43] M. Hadi & D. Benamer, Minimisation de l'épaisseur de la couche de peinture utilisée pour les carcasses des réfrigérateurs (ENIEM), Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, (2014).

Références bibliographiques

- [44] H. Karim, B. & Kahina, Automatisation du système de traitement de surface par immersion à l'Eniem, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri (2013).
- [45] T. Guéguen, Traitements de surface des métaux avant peinture. Procédés . Techniques De L'Ingénieur(1992).
- [46] M. Fillon & L. Quemener, Installations de traitement de surface par aspersion: optimisation du compromis production-pollution. Surfaces Paris, (235), 23-26(1993).
- [47] R. Anthoine, Dégraissage des métaux avant dépôts électrolytiques ,Prat. Ind. Méc., Vol. 35, N°5 pp. 147–149(1952).
- [48] M. WERY, Décapage chimique des surfaces métalliques. Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques, M1456-1(2001).
- [49] D. Deslaef, *Modélisation numérique du grenailage de précontrainte: approche tridimensionnelle et dynamique*, Thèse de Doctorat, Troyes (2000).
- [50] A. Ben Rhima, J. Bessrou, M. Bouhaf, R. Khadrani, Une modélisation de la genèse des contraintes résiduelles lors d'un traitement superficiel par une source laser mobile, International Journal of Thermal Sciences, 42, 8, Pages 759-776(2003).
- [51] R. Lévêque, *Traitements et revêtements de surface des métaux-2e éd.* Dunod(2022).
- [52] J. Cabezon, J. Oudin, Y. Ravalard & J. M. Rigaut, Le traitement par phosphatation au zinc des pièces en acier destinées à la mise en forme à froid. *Revue de Métallurgie*, 85(2), 175-182(1988).
- [53] J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet & P. Combrade, Metallurgie, du minerai au matériau. In *Annales de chimie-Sciences des matériaux* ,Vol. 4, No. 24, p. 404 (1999)..
- [54] H. Bensabra, N. Azzouz & J. P. Chopart, (Effet de la phosphatation au zinc sur la résistance à la corrosion par piqûres des aciers rond à béton. *Revue de Métallurgie*, 110(2), 153-163(2013).
- [55] M. P. GIGANDET & L. THIERY, Chromatation(2004).
- [56] F. Coeuille, *Revêtements polymères de canalisation de fluide: caractérisation et évolution de l'adhésion en milieu agressif*, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (2002).
- [57] R. CRESSON, Peinture et revêtements connexes-Travaux(2007).
- [58] E. Dupuy, Les revêtements métalliques par immersion. *Revue de Métallurgie*, 41(7), 208-216(1944).
- [59] M. Dupeux, Science des matériaux. Paris, France: Dunod(2004).
- [60] M. Ammiche & D. Belacel, Etude et choix des revêtement zingage, nickelage et phosphatation pour les tôles dc1, dc03 et dc04, Mémoire de Master, Université Mouloud

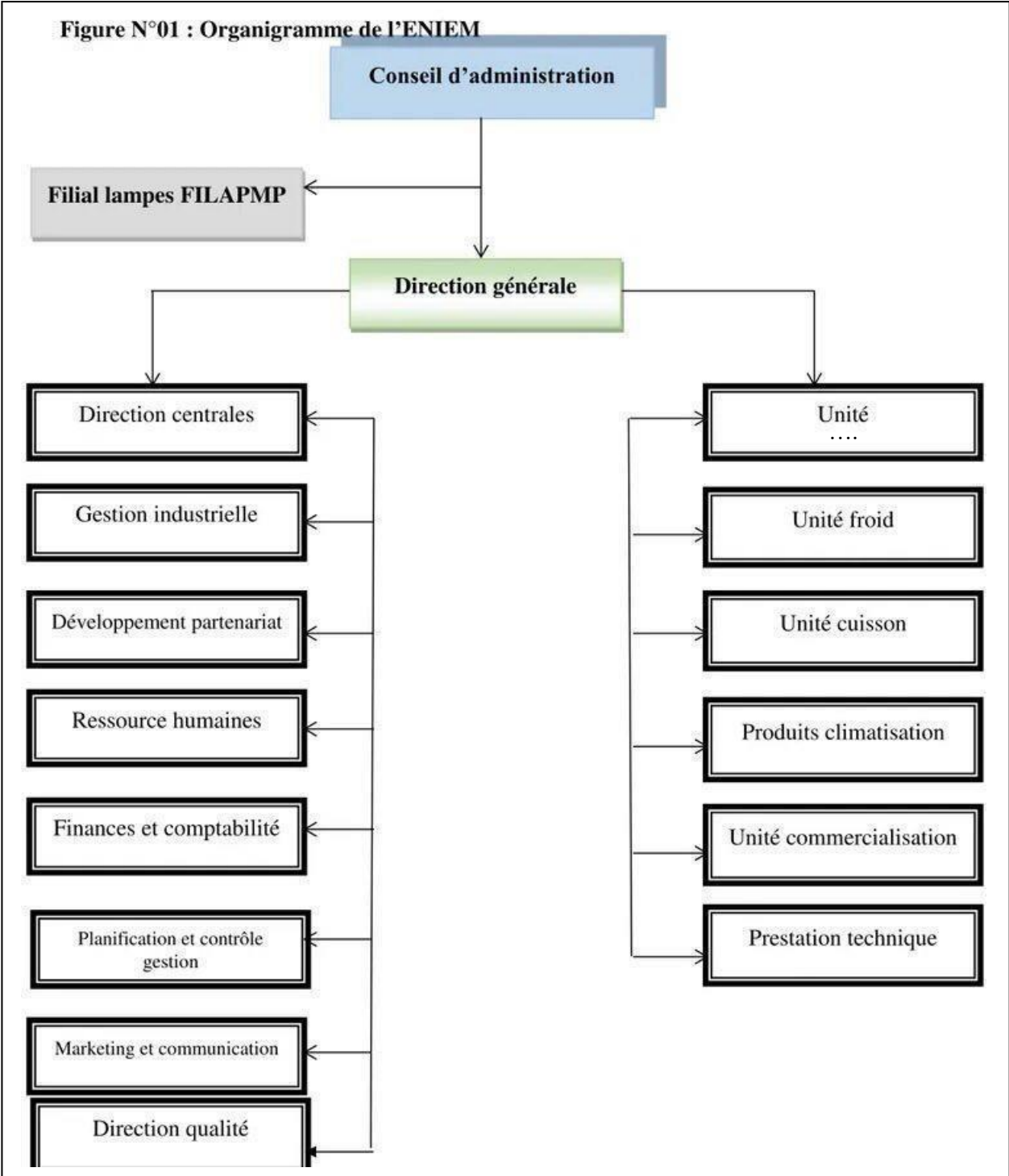
Références bibliographiques

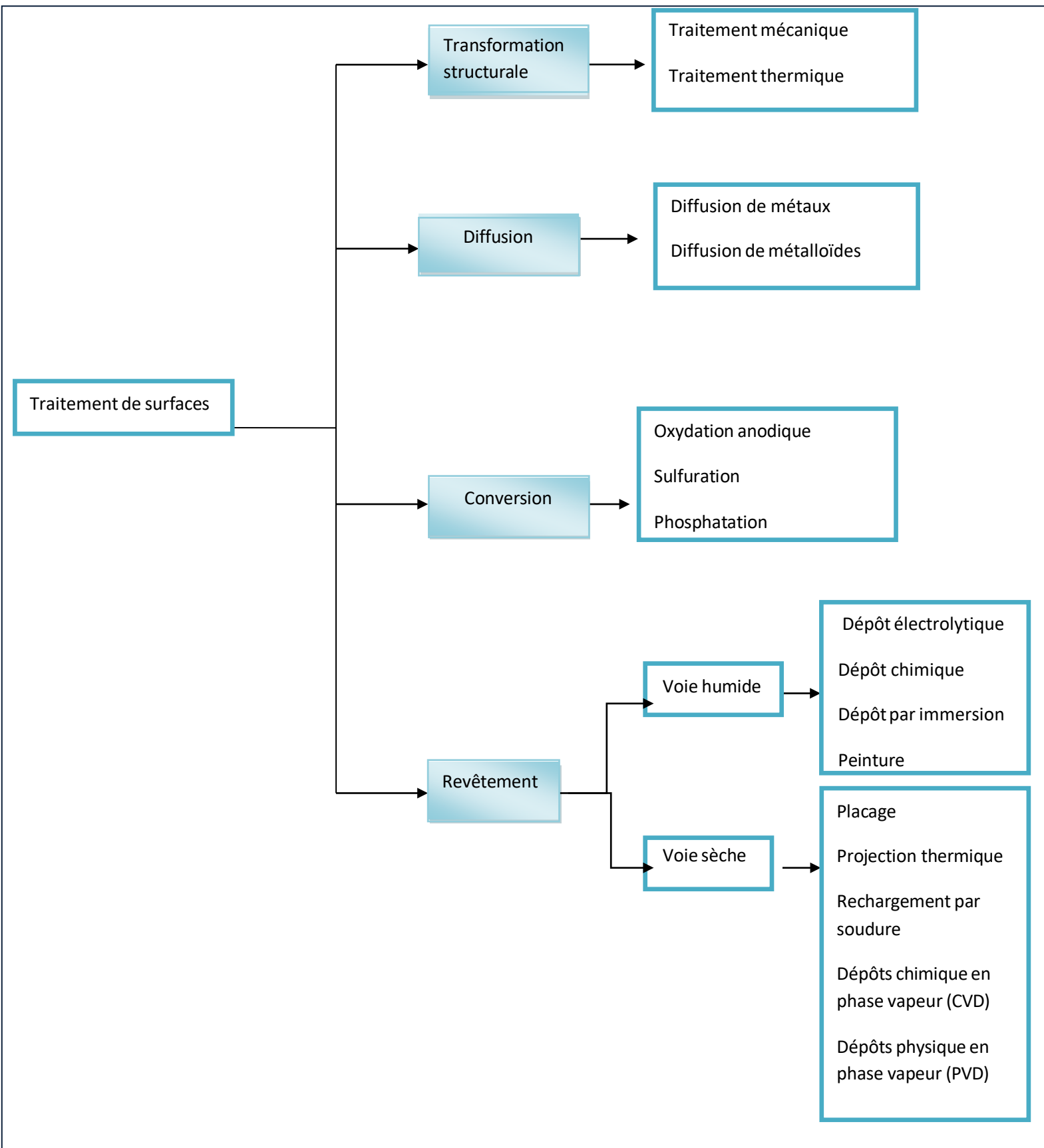
Mammeri Tizi Ouzou (2021).

[61] S. Issolah, parametre de travail chaine de nickelage chromage, unité cuisson l'ENIEM(2018).

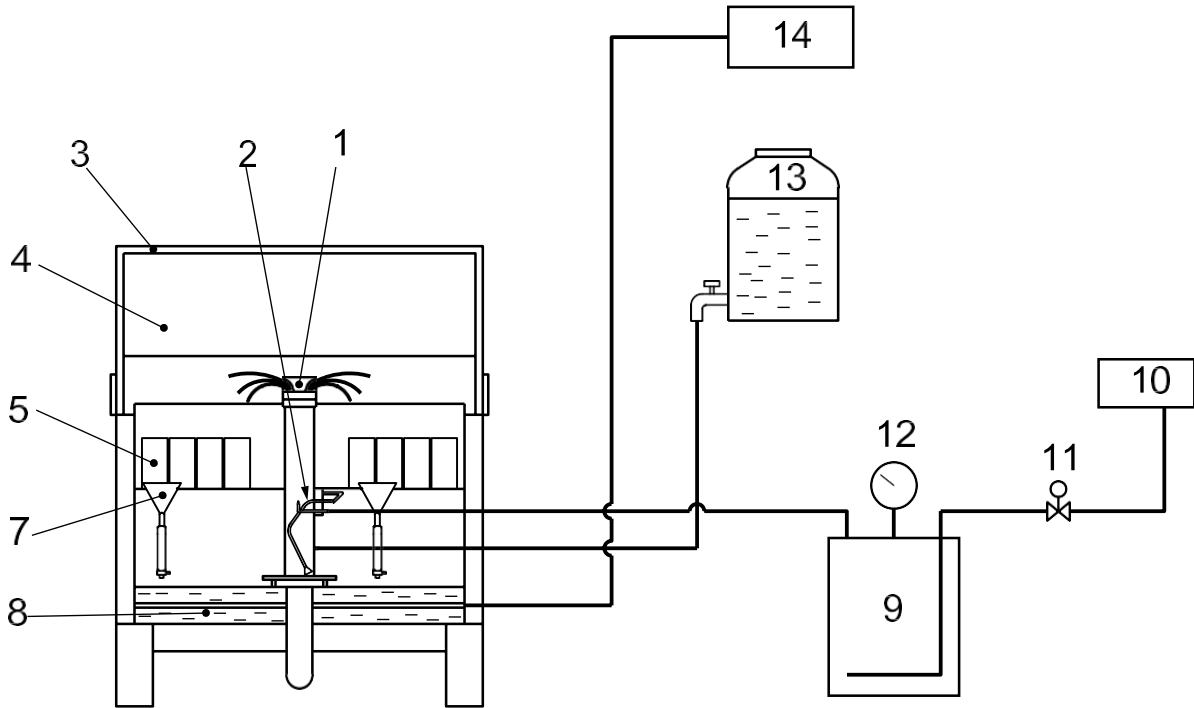


ANNEXES





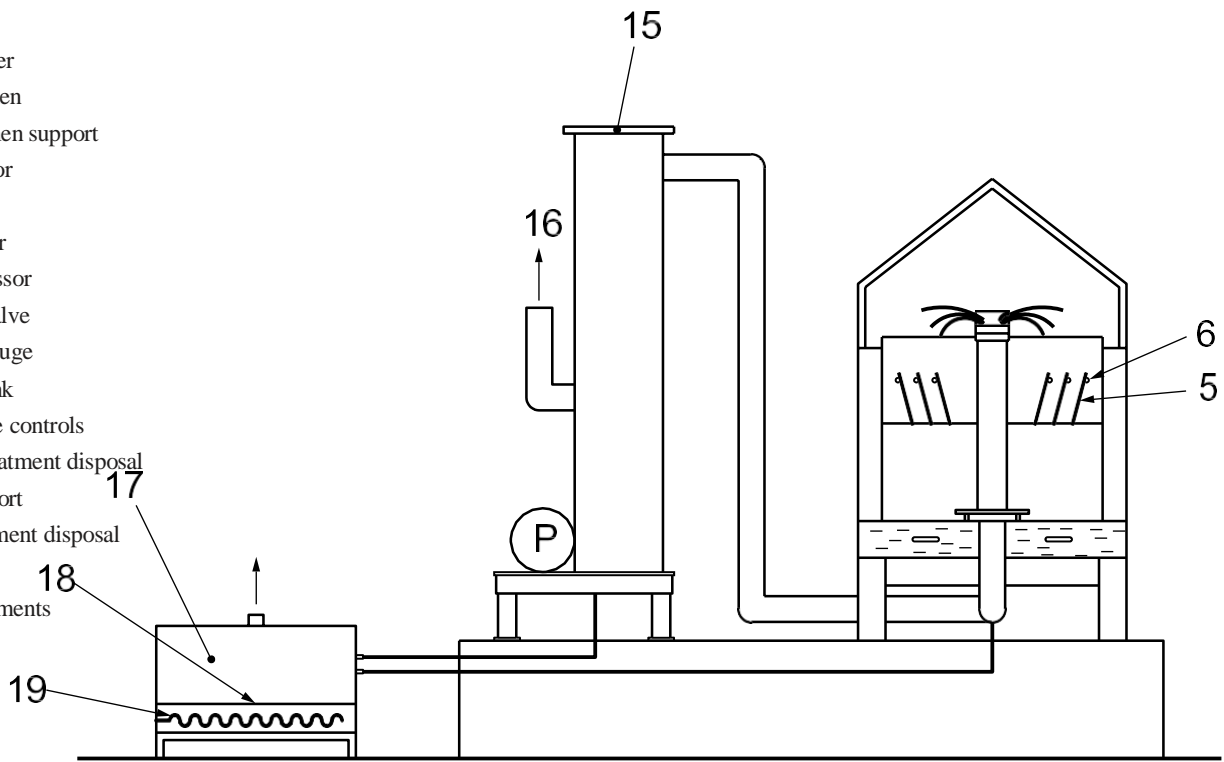
Annexe 3 Diagramme schématique d'une conception possible d'une cabine de pulvérisation avec des moyens de traitement des gaz d'échappement et de drainage du brouillard



a) vue de face

Key

- 1 atomizer
- 2 cover
- 3 test chamber
- 4 test specimen
- 5 test-specimen support
- 6 fog collector
- 7 chamber
- 8 air saturator
- 9 air compressor
- 10 solenoid valve
- 11 pressure gauge
- 12 solution tank
- 13 temperature controls
- 14 exhaust-treatment disposal
- 15 air-outlet port
- 16 drain-treatment disposal
- 17 salt tray
- 18 heating elements



b) vue latérale

Annex 4 Preparation of panels with organic coatings for testing

C.1 Preparation and coating of panels

Unless otherwise specified, each test panel with organic coating shall be prepared in accordance with ISO 1514 and coated by the specified method with the product or system under test.

Unless otherwise specified, the back and edges of the panel shall be coated with the coating system under test.

If the coating on the back or edges of the panel differs from that of the coating product under test, it shall have a corrosion resistance greater than that of the coating product under test.

C.2 Drying and conditioning

Dry (or stove) and age (if applicable) each coated test panel for the specified time under specified conditions and, unless otherwise specified, condition them at a temperature of 23 ± 2 °C and a relative humidity of 50 % \pm 5 % for at least 16 h, with free circulation of air and without exposing them to direct sunlight. The test procedure shall then be carried out as soon as possible.

C.3 Thickness of coating

Determine the thickness, in micrometres, of the dried coating by one of the non-destructive procedures described in ISO 2808.

C.4 Preparation of scratches

All scribe marks shall be made in accordance with ISO 17872 and shall be at least 25 mm from each other and from any edge of the test panel.

If specified, make a straight scratch or scribe mark through the coating to the substrate.

To apply the scratch, use a scratch instrument with a hard tip. Unless otherwise agreed, the scratch shall have either parallel sides or an upwards-broadening cross-section that shows a width of 2 mm to 3 mm of the metallic substrate.

One or two scribe marks may be applied. The scribe mark(s) shall be parallel to the longer edge of the test panel, unless otherwise agreed.

The tool used to introduce scribe marks should give a uniform shape. Penknives should not be used.

For aluminium panels, two scribe marks shall be made which are perpendicular to, but do not intersect, each other. One scratch shall be parallel to the rolling direction and the other at right angles.

Résumé

Ce travail s'intéresse à l'évaluation de la performance de trois types de revêtements pour l'acier ; la peinture, le zingage et le nickelage, face à un environnement salin agressif. Des échantillons d'acier ont été revêtus séparément avec chaque type de revêtement et exposés à un test au brouillard salin. Différents paramètres ont été étudiés à savoir la concentration la température le courant électrique. L'analyse des résultats a révélé une corrosion des aciers. Ce phénomène peut être attribué à plusieurs facteurs, dont la concentration des bains et leurs contaminations, une couche de phosphatation faible ou bien l'état initial de l'acier. Des investigations plus approfondies sur ces paramètres et l'optimisation des procédés de revêtement sont nécessaires pour améliorer la performance des revêtements et prolonger la durée de vie des structures en acier dans des conditions salines.

Mots clés : revêtement, environnement salin, concentration, contamination, phosphatation.

Abstract

This work focuses on evaluating the performance of three types of coatings for steel : paint, zinc plating and nickel plating, against an aggressive saline environment. Steel samples were separately coated with each type of coating and exposed to a salt fog test. Various parameters were studied, including concentration, temperature, and electric current. The analysis of the results revealed corrosion of the steels. This phenomenon can be attributed to several factors, including the concentration of baths and their contaminations, a weak phosphating layer, or the initial state of the steel. Further investigations into these parameters and the optimization of coating procedures are necessary to improve the performance of coatings and extend the lifespan of steel structures in saline conditions.

Keywords : coating, saline environment, concentration, contamination, phosphating.