

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie des matériaux

SNC • LAVALIN

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'état en génie des matériaux

Thème

Caractérisation Métallurgique d'un tube d'acier A106 Gr B
Corrodés d'un Générateur de Vapeur à Récupération de
Chaleur de Centrale Thermique à Cycle Combiné

Réalisé par :

M^{lle} Nessrine AKROUR

Dirigé par :

M. A. KASSER

M. R. ARRU

Présenté et soutenu publiquement le 08/07/2024

Composition du jury :

Président :

M. A. DAIMELLAH

MCB, ENP

Promoteur :

M. A. KASSER

MCA, ENP

Examineur :

M. S. MERMOUL

Docteur, ENP

ENP 2024

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie des matériaux

SNC • LAVALIN

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'état en génie des matériaux

Thème

Caractérisation Métallurgique d'un tube d'acier A106 Gr B
Corrodés d'un Générateur de Vapeur à Récupération de
Chaleur de Centrale Thermique à Cycle Combiné

Réalisé par :

M^{lle} Nessrine AKROUR

Dirigé par :

M. A. KASSER

M. R. ARRU

Présenté et soutenu publiquement le 08/07/2024

Composition du jury :

Président :

M. A. DAIMELLAH

MCB, ENP

Promoteur :

M. A. KASSER

MCA, ENP

Examineur :

M. S. MERMOUL

Docteur, ENP

ENP 2024

ملخص :

تركز هذه الدراسة على التوصيف المعدني للأنابيب الفولاذية A106 Gr B التي تعرضت للتآكل في مولد بخار استرداد الحرارة في محطة طاقة ذات دورة مركبة. قمنا بتحليل ثلاث عينات بدرجات متفاوتة من التآكل. تظهر النتائج تباينات كبيرة من حيث فقدان الكتلة، والتركيب الكيميائي، والبنية المجهرية والصلابة، وقوة الشد. على الرغم من أن الفولاذ مناسب للعديد من التطبيقات، إلا أنه يظهر نقاط ضعف تجاه التآكل، خاصة في البيئات الرطبة والمتغيرة حرارياً

الكلمات المفتاحية: الفولاذ A106 Gr B ، التآكل، مولد بخار استرداد الحرارة، التوصيف المعدني، محطة طاقة ذات دورة مركبة.

Abstract :

This study focuses on the metallurgical characterization of A106 Gr B steel tubes exposed to corrosion in a heat recovery steam generator of a combined cycle power plant. Three samples with varying degrees of corrosion were analyzed. The results revealed significant variations in mass loss, chemical composition, microstructure, and hardness. While A106 Gr B steel is suitable for many applications, it shows vulnerabilities to corrosion, particularly in humid and thermally variable environments.

Key words : A106 Gr B steel, corrosion, heat recovery steam generator, metallurgical characterization, combined cycle power plant.

Résumé :

Cette étude se concentre sur la caractérisation métallurgique d'un tube d'acier A106 Gr B corrodé dans un générateur de vapeur à récupération de chaleur d'une centrale à cycle combiné. Nous avons analysé trois échantillons présentant différents degrés de corrosion. Les résultats montrent des variations significatives en termes de perte de masse, de composition chimique, de microstructure, de dureté et de traction. Bien que l'acier A106 Gr B soit approprié pour de nombreuses applications, il présente des vulnérabilités face à la corrosion, particulièrement dans des environnements humides et thermiquement variés.

Mots-Clés : acier A106 Gr B, corrosion, générateur de vapeur à récupération de chaleur, caractérisation métallurgique, centrale à cycle combiné

Dédicace

À mes parents, pour leur amour inconditionnel,

leur soutien sans faille et leur foi en moi.

Vous êtes ma source d'inspiration et de force.

À mes sœurs, Meriem, Sarah, Hadjer, et à mon frère,

Mohammed, pour leur encouragement constant

et leur présence rassurante. Vous avez toujours été à mes côtés,

et pour cela, je vous en suis profondément reconnaissant.

À mon Besboussa, merci d'avoir cru en moi et de m'avoir accompagné

dans chaque étape de cette aventure.

Je vous dédie ce travail avec tout mon amour et ma gratitude.

Remercîment

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la foie, la volonté et le courage afin de pouvoir accomplir ce modeste travail

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant à l'École Nationale Polytechnique Mr. A. KASSER pour son accompagnement, ses conseils précieux et son soutien indéfectible. Son expertise et son engagement ont été essentiels à la réalisation de cette étude.

Je remercie également mon encadrant au sein de SNC-Lavalin R. ARRU pour son encadrement professionnel, sa disponibilité et ses encouragements constants. Sa connaissance approfondie et son soutien ont été déterminants pour le bon déroulement de ce projet. J'adresse aussi mes sincères remerciements à toute l'équipe de SNC-Lavalin pour leur collaboration et leur appui technique.

Je suis particulièrement reconnaissant envers l'ingénieur de laboratoire du département de génie des matériaux Mme S. GUENNOUN, pour son assistance précieuse dans la réalisation des essais et des analyses.

Un remerciement spécial à l'équipe du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) pour leur soutien technique et scientifique, qui a été inestimable pour le succès de cette étude.

Mes vifs remerciements vont à Mr. HADDAD pour ses conseils avisés, sa patience et son aide précieuse tout au long de ce projet. Son soutien a été d'une grande valeur pour l'accomplissement de ce travail.

Je saisis cette occasion pour destiner à mes professeurs ayant contribué à ma formation mes remerciements les plus sincères, ainsi qu'aux membres du jury qui ont bien voulu évaluer ce travail.

Que toute personne ayant participé de près ou de loin, à la réalisation de ce projet, veuille trouver ici mon témoignage de gratitude et de remerciements.

Table des matières

Liste des figures

Liste des Tableaux

Abréviations

INTRODUCTION GENERALE	15
------------------------------------	-----------

CHAPITRE 1 : Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

Introduction	17
1. Les centrales à cycle combiné	18
1.1. Qu'est-ce qu'un cycle combiné	18
1.2. Différents types de cycles combinés	18
1.3. Configurations de cycle combiné	19
1.4. Les équipements principaux de Centrale à Cycle Combiné	20
1.4.1. Turbine à gaz	20
1.4.2. Générateur de vapeur à récupération de chaleur	21
1.4.3. Turbine à vapeur	22
1.4.4. L'alternateur	22
1.4.5. Le condenseur de vapeur	23
1.5. Le Principe de Fonctionnement de Centrale à Cycle Combiné	23
1.6. Les avantages et les inconvénients du cycle combiné	24
2. Le Générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) de centrale à Cycle Combiné	25
2.1. Présentation Générale de Générateur de vapeur à récupération de chaleur	25
2.2. Le principe de fonctionnement	27
2.3. Classification des générateurs de vapeur à récupération de chaleur	28
2.3.1. Selon l'arrangement des échangeurs	28
• Générateur de vapeur à récupération de chaleur horizontale	28
• Générateur de vapeur à récupération de chaleur verticale	29
2.3.2. Selon la circulation des fluides	29

• Les générateurs de vapeur à circulation naturelle	29
• Les générateurs de vapeur à circulation assistée	30
• Les générateurs de vapeur à circulation forcée	30
2.3.3. Selon le nombre de niveau de pression	31
2.4. Les matériaux utilisés dans la construction des Générateurs de vapeur à récupération de chaleur	31
3. Présentation Générale de Hadjret-Ennous.....	37
3.1. Emplacement	37
3.2. Description et Données techniques de la Centrale	38
3.3. Partenaires	39
3.4. Présentation de SNC-LAVALIN	39
3.4.1. SNC Lavalin Mondial	39
3.4.2. SNC Lavalin O&M	39
3.4.3. SNC Lavalin O&M Algérie	40
Conclusion	40

CHAPITRE 2 : Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Introduction	41
1. Généralités sur la Corrosion.....	42
1.1. Définition de la corrosion.....	42
1.2. Les facteurs de corrosion.....	43
1.3. Les paramètres influençant sur la vitesse de corrosion	44
1.3.1. Effet de Température	44
1.3.2. Effet de pH	44
1.3.3. Régime hydrodynamique	44
1.3.4. La salinité	44
1.4. Processus de la corrosion	45
1.4.1. Corrosion Chimique (sèche).....	45
1.4.2. Corrosion électrochimique (humide)	46
1.5. Les Types de corrosion.....	46

1.5.1. La morphologie de corrosion	46
1.5.1.1. La corrosion généralisée (uniforme)	47
1.5.1.2. Corrosion localisée	47
1) Corrosion par piqûres	47
2) Corrosion galvanique	48
3) Corrosion intergranulaire	49
4) Corrosion-Érosion (Flow Accelerated Corrosion) FAC.....	50
5) Corrosion sous contrainte (CSC)	51
6) Corrosion par crevasses (caverneuse)	51
7) Corrosion sous fatigue	52
1.6. Protection et lutte contre la corrosion	53
2. Compréhension de la corrosion dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur HRSG.....	53
2.1. La corrosion de circuit eau/ vapeur	54
2.1.1. Corrosion par l’oxygène.....	54
2.1.2. Corrosion galvanique	55
2.1.3. Corrosion caustique.....	56
2.1.4. Corrosion-Érosion (Flow Accelerated Corrosion) FAC.....	56
2.1.5. Fragilisation par l’hydrogène	62
2.1.6. Corrosion Sous Contrainte (CSC)	62
2.1.7. Corrosion Sous Calorifuge	64
2.1.8. Fluage	71
2.2. La corrosion du circuit air/fumée	73
2.2.1. Oxydation du vanadium et du sodium.....	73
2.2.2. Sulfuration.....	74
2.2.3. Encrassement.....	74
Conclusion.....	75

CHAPITRE 3 : Technique d’étude et procédure expérimental

Introduction	76
1. Généralités sur les aciers au carbone.....	77

1.1. Définition des aciers au carbone	78
1.2. Les principales propriétés des aciers au carbon	78
1.3. Les sous-familles des aciers au carbone.....	79
1.4. Différentes structures des aciers au carbone	79
2. Présentation des échantillons	80
2.1. Le matériau utilisé	81
2.1.1. Microstructure	82
2.2. Description sur les échantillons.....	82
2.2.1. L'état de dégradation de chaque échantillon	82
2.2.2. Les principaux facteurs et phénomènes responsables de la dégradation des échantillons	84
3. Préparation des échantillons	85
3.1. Préparation les échantillons pour la caractérisation par perte de masse	85
3.2. Préparation les échantillons pour la métallographie optique	85
3.2.1. L'enrobage à chaud	86
3.2.2. Polissage.....	86
3.2.3. Attaque chimique.....	86
3.3. Préparation d'une éprouvette plate pour essai de traction.....	87
4. Les Techniques de Caractérisation	88
4.1. Caractérisation par perte de masse	88
4.2. Caractérisation par la spectrométrie par fluorescence X (XRF)	88
4.3. Caractérisation par microscopie optique	89
4.3.1. Analyse d'image.....	90
4.4. La Microdureté.....	91
4.5. La dureté	92
4.6. Essai de traction	93
Conclusion	96

CHAPITRE 4 : Résultats et Discussion des résultats

Introduction	97
1. Résultats de la caractérisation par perte de masse.....	98

2. Résultats d'analyse chimique	99
3. Résultats de l'observation métallographique	103
3.1. Traitement d'image	104
4. Résultats expérimentaux d'essai de microdureté	106
5. Résultats de l'essai de dureté	107
6. Résultats de l'essai de traction	108
Conclusion.....	111
CONCLUSION GENERALE	112
Références Bibliographique.....	113

Liste des figures :

Figure 1-1 : Les équipements principaux de centrale à cycle combiné	20
Figure 1-2 : Schéma de fonctionnement d'une turbine à combustion	21
Figure 1-3 : Générateur de vapeur à récupération de chaleur	21
Figure 1-4 : Turbine à vapeur	22
Figure 1-5 : Schéma d'un alternateur	22
Figure 1-6 : Principe de condenseur de vapeur	23
Figure 1-7 : Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné à arbre unique	24
Figure 1-8 : Vue complète de Générateur de vapeur à récupération de chaleur	25
Figure 1-9 : Principaux échangeurs d'un générateur de vapeur à récupération de chaleur	26
Figure 1-10 : Générateurs de vapeur à récupération de chaleur à circulation naturelle	29
Figure 1-11 : Chaudière à circulation assistée	30
Figure 1-12 : Chaudière à circulation forcée avec ballon de démarrage	31
Figure 2-1 : L'interaction entre la surface de matériau et l'environnement	32
Figure 2-2 : Exemple de corrosion sèche (Mécanisme de oxydation un métal à haute température)	45
Figure 2-3 : Exemple de corrosion humide (Oxydation anodique de métal)	46
Figure 2-4 : (a) Corrosion localisée, (b) Corrosion uniforme	47
Figure 2-5 : Corrosion par piqûres	48
Figure 2-6 : Représentation schématique d'une pile galvanique	49
Figure 2-7 : Corrosion intergranulaire	49
Figure 2-8 : Corrosion- Érosion dans le système d'eau	50
Figure 2-9 : Mécanisme de Corrosion- Érosion	50
Figure 2-10 : Diagramme de Venn, représente les facteurs de CSC	51
Figure 2-11 : Schéma des mécanismes de corrosion caverneuse dans les milieux chlorurés	52
Figure 2-12 : Fissure de Corrosion fatigue	52
Figure 2-13 : Attaque par Oxygène	54

Figure 2-14 : Corrosion caustique	56
Figure 2-15 : Corrosion- Érosion	57
Figure 2-16 : Effet de Cr sur la FAC	58
Figure 2-17 : Effet de Cu et Mo sur la FAC	58
Figure 2-18 : Effet de la composition de matériaux	58
Figure 2-19 : Effet du pH sur la solubilité la magnétite entre 25 et 150 °C	59
Figure 2-20 : Effet de concentration d'O ₂ sur la FAC	60
Figure 2-21 : Effet de température sur la FAC	61
Figure 2-22 : Contours du taux de corrosion total après l'essai E-C	61
Figure 2-24 : Effet de température sur le taux de corrosion calorifuge	65
Figure 2-25 : Schéma d'un tuyau isolé typique	67
Figure 2-26 : Schéma du courant de Foucault utilisé pour inspecter la présence de corrosion sous l'isolant sur un tuyau en acier conducteur	69
Figure 2-27 : Composants de la radiographie en temps réel	70
Figure 2-28 : Fluage	71
Figure 2-29 : Différents stades de fluage	72
Figure 3-1 : (a) Diagramme Fer-Carbone, (b) Diagramme Fer-Carbone (Coté aciers)	77
Figure 3-2 : Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone.....	78
Figure 3-3 : Microstructure d'un acier hypoeutectoïde	79
Figure 3-4 : Microstructure d'un acier eutectoïdes	80
Figure 3-5 : Microstructure d'un acier hyper-eutectoïde	80
Figure 3-6 : Un schéma approximatif à l'aide de SolidWorks pour illustrer la disposition de la ligne et la position de chaque échantillon le long de celle-ci	81
Figure 3-7 : Microstructure de l'acier A106 grade B	82
Figure 3-8 : Echantillons N°1 présente une dégradation avancée	83
Figure 3-9 : Echantillon N°2 présente une dégradation partielle	83

Figure 3-10 : Echantillon N°3 présente une dégradation le moins avancé	84
Figure 3-11 : Technique découpage	85
Figure 3-12 : Les échantillons E1, E2, E3	85
Figure 3-13 : Photo de la presse d'enrobage utilisé	86
Figure 3-14 : la surface de l'échantillons à l'état miroir	87
Figure 3-15 : Eprouvette normalisé	87
Figure 3-16 : Spectromètre de fluorescence des rayons X	89
Figure 3-17 : Microscope Optique	90
Figure 3-18 : L'empreinte type Vickers.....	91
Figure 3-19 : Microduromètre utilisé	92
Figure 3-20 : Essai de dureté Brinell HB	92
Figure 3-21 : Le duromètre utilisé	93
Figure 3-22 : Allure de l'évolution de la déformation d'une éprouvette en acier doux soumise à un essai de traction	94
Figure 3-23 : Allure du diagramme de traction d'un acier doux	95
Figure 4-1 : Histogramme représente les différences de masses et de perte de masse entre les échantillons	97
Figure 4-2 : La figure illustre les étapes à suivre pour calculer la fraction surfaccique de la perlite dans E1 à l'aide du logiciel « ImageJ »	104
Figure 4-3 : La figure illustre les étapes à suivre pour calculer la fraction surfaccique de la perlite dans E2 à l'aide du logiciel « ImageJ »	105
Figure 4-4 : La figure illustre les étapes à suivre pour calculer la fraction surfaccique de la perlite dans E3 à l'aide du logiciel « ImageJ »	105
Figure 4-5 : La courbe de traction obtenu	109
Figure 4-6 : L'éprouvette après la rupture	110

Liste des Tableaux :

Tableau 1-1 : Spécifications de la nuance SA-178 Gr. A	33
Tableau 1-2 : Composition Chimique de la nuance SA-178 Gr. A	33
Tableau 1-3 : Propriétés Mécanique de la nuance SA-178 Gr. A	33
Tableau 1-4 : Spécifications de la nuance SA-192	33
Tableau 1-5 : Composition Chimique de la nuance SA-192	33
Tableau 1-6 : Propriétés Mécanique de la nuance SA-192	34
Tableau 1-7 : Spécifications de la nuance SA 213 Gr. T11	34
Tableau 1-8 : Composition Chimique de la nuance SA 213 Gr. T11	34
Tableau 1-9 : Propriétés Mécanique de la nuance SA 213 Gr. T11	34
Tableau 1-10 : Spécifications de la nuance SA 213 Gr. T91	35
Tableau 1-11 : Composition Chimique de la nuance SA 213 Gr. T91	35
Tableau 1-12 : Propriétés Mécanique de la nuance SA 213 Gr. T91	35
Tableau 1-13 : La composition chimique de SA 106 Gr. B	36
Tableau 1-14 : Propriétés Mécanique de la nuance SA 106 Gr. B	36
Tableau 1-15 : La composition chimique des nuances SA 335 Gr. P11/P91	37
Tableau 1-16 : Les Propriétés Mécanique des nuances SA 335 Gr. P11/P91	37
Tableau 1-17 : Sommaire des caractéristiques de la centrale à cycle combiné de Hadjret-Ennous	39
Tableau 2-1 : Les principaux facteurs de corrosion	41
Tableau 2-2 : Les Facteurs de corrosion par l'oxygène	55
Tableau 2-3 : La prévention de corrosion galvanique	56
Tableau 2-4 : Quelques métaux les environnements susceptibles de créer une corrosion sous contrainte	63
Tableau 2-5 : Effets de la température et de la contrainte sur le comportement en fluage ..	63
Tableau 3-1 : Les sous-familles des aciers au carbone	79
Tableau 4-1 : Représente les mesures de masses et de diamètre des échantillons Corrodés	98
Tableau 4-2 : Tableau représente la composition chimique de l'acier A 106 Gr B	99
Tableau 4-3 : Des micrographie représente la microstructure de l'acier A106 grade B en différentes zones ayant subi une attaque chimique avec du Nital 2 %	103

Tableau 4-4 : Tableau reprenant les fractions volumiques de la ferrite et de la perlite	106
Tableau 4-5 : Tableau représente les résultats des essais de microdureté	106
Tableau 4-6 : Tableau représente les résultats des essais de dureté	107
Tableau 4-7 : Tableau représente les résultats des essais de traction	109

Abréviations

CC: Cycle Combiné

CCPP: Combined Cycle Power Plant

CCGT: Combined Cycle Gas Turbine

GVR: Générateur de vapeur de récupération

TG: Turbine à gaz

HRSG: Heat Recovery Steam Generator

TV: Turbine à vapeur

HP: High Pressure (Haute Pression)

IP: Intermediate Pressure (Pression Intermédiaire)

LP : Low Pressure (Basse Pression)

CVRC : Chaudière d Vapeur à Récupération de Chaleur

SCR : Selective Catalytic Reduction (système de réduction du catalyseur)

FAC : Flow Accelerated Corrosion

CSC : Corrosion sous contrainte

CUI : Corrosion Under Insulation

TSA : Thermal Spray Aluminium

Tf : Température de fusion

Introduction Générale

Introduction

Les centrales à cycle combiné, comme celle de Hadjret-Ennous, utilisent une combinaison de turbines à gaz et de turbines à vapeur pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cette optimisation technologique place les centrales à cycle combiné au cœur de la transition vers une production d'énergie plus propre et plus efficace. Cependant, malgré leur efficacité remarquable, ces centrales doivent faire face à un défi persistant : la corrosion.

Les générateurs de vapeur à récupération de chaleur (HRSG), jouent un rôle crucial en récupérant la chaleur des gaz d'échappement des turbines à gaz pour produire de la vapeur, alimentant ainsi les turbines à vapeur. Cependant, ces environnements de haute température et de haute pression sont propices à la corrosion, en particulier la corrosion sous calorifuge. Cette corrosion peut compromettre la performance et la durabilité des composants critiques des centrales, nécessitant une attention particulière et des solutions innovantes pour garantir leur fonctionnement optimal à long terme.

Dans ce contexte, notre étude porte sur la caractérisation métallurgique comparative de la dégradation des tubes en acier A106 Gr B corrodés dans un générateur de vapeur à récupération de chaleur d'une centrale à cycle combiné., afin de comprendre les mécanismes de dégradation et de proposer des solutions pour améliorer leur résistance à la corrosion. Nous nous concentrons spécifiquement sur les échantillons prélevés à la centrale de Hadjret-Ennous, une installation représentative des défis et des opportunités rencontrés dans l'industrie de l'énergie.

Pour aborder ce problème, nous avons adopté une méthodologie rigoureuse, comprenant plusieurs étapes clés. Tout d'abord, une revue de la littérature approfondie a été réalisée pour comprendre les mécanismes de corrosion dans les HRSG et les propriétés des matériaux utilisés. Ensuite, nous avons procédé à la caractérisation de trois échantillons de tubes en acier A106 Gr B présentant différents états de dégradation par corrosion sous calorifuge. Cette caractérisation a impliqué l'utilisation de techniques analytiques avancées telles que la spectroscopie de fluorescence X (XRF), la microscopie optique, et les essais de dureté, de microdureté et les essais de traction, pour évaluer la composition chimique, la microstructure et les propriétés mécaniques des échantillons. Enfin, nous avons interprété les données obtenues pour identifier les facteurs influençant la corrosion et les variations de dureté, et proposer des solutions d'amélioration.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre offre une introduction aux technologies de centrale thermique à cycle combiné et une présentation détaillée de la centrale Hadjret-Ennous, expliquant le fonctionnement de centrale à cycle combiné, des HRSG et leurs différentes configurations.

Introduction Générale

- Le deuxième chapitre explore les phénomènes de corrosion dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur, avec un focus particulier sur la corrosion sous calorifuge, ses causes et ses impacts.
- Le troisième chapitre décrit les techniques d'étude et les procédures expérimentales adoptées pour notre caractérisation comparative, incluant les méthodes analytiques et les procédures de test utilisées
- Enfin, le quatrième chapitre présente et discute les résultats obtenus, en interprétant les données.

Ce mémoire vise à fournir des recommandations pratiques pour la gestion de la corrosion dans les GVRH, contribuant ainsi à l'optimisation de la maintenance et de l'exploitation des centrales à cycle combiné. Notre objectif est de renforcer la durabilité des composants métalliques dans des environnements industriels sévères, tout en soutenant les efforts pour une production d'énergie plus efficace et durable.

CHAPITRE 1 :

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

Introduction

La production d'électricité, qu'elle soit assurée par une ou plusieurs centrales utilisant de l'énergie renouvelable ou conventionnelle, reste l'un des plus importants segments dans l'architecture globale du secteur électrique. En Algérie, l'énergie électrique est produite, principalement, à partir du gaz naturel. La part de la puissance installée de l'ensemble des centrales utilisant cette énergie primaire dépasse les 96%, le reste des énergies employées se répartit entre le gasoil dans les centrales Diesel et l'eau dans les centrales hydroélectriques. Le gaz naturel est utilisé dans des centrales thermiques à vapeur, à gaz, ainsi que dans les centrales à cycle combiné.[1]

Ce chapitre se concentre sur deux éléments clés des centrales thermiques modernes : le cycle combiné et les générateurs de vapeur à récupération de chaleur. Ces technologies jouent un rôle crucial dans l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Nous explorerons d'abord les principes de base du cycle combiné, suivi d'une discussion sur les générateurs de vapeur. Enfin, nous illustrerons ces concepts à travers une présentation sur la centrale thermique à cycle combiné Hadjret-Ennous.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

1. Les centrales à cycle combiné :

Les centrales à cycle combiné ont un rendement net d'environ 56%. Le rendement est élevé grâce à la récupération de la chaleur des gaz d'échappement de la turbine à travers des générateurs de vapeur à récupération de chaleur, produisant ainsi de la vapeur de haute pression, servant à l'entraînement de la turbine à vapeur.

Les gaz d'échappement refroidis sont évacués dans l'atmosphère par les cheminées.

La vapeur de haute pression détendue dans la turbine à vapeur est par la suite condensée par circulation d'eau froide dans un condenseur.

Le condensat est retourné à la chaudière de récupération pour y être revalorisé, bouclant ainsi le cycle vapeur.

Pour ce type de centrale, environ deux tiers (2/3) de l'électricité est produite à partir des turbines à gaz et l'autre tiers (1/3) provient des turbines à vapeur, [2].

1.1. Qu'est-ce qu'un cycle combiné :

C'est la combinaison de deux processus thermodynamiques qui produisent de l'énergie électrique. Le premier processus consiste à brûler le gaz dans une turbine à gaz, et le deuxième processus consiste à utiliser les gaz d'échappement de la turbine à gaz pour produire de la vapeur dans une chaudière de récupération de chaleur et finalement dans une turbine à vapeur.

Le terme Cycle Combiné (CC) peut être subdivisé en (CCPP Combined Cycle Power Plant) ou CCGT (Combined Cycle Gas Turbine), qui se caractérise par un mode combiné de production d'énergie ou une centrale électrique utilisant plusieurs cycles thermodynamiques, [3].

1.2. Différents types de cycles combinés :

On distingue principalement deux types de cycles combinés :

Les cycles combinés à fort excès d'air, dits encore de récupération pure ou sans feu, qui fonctionnent uniquement par récupération de la chaleur sensible des gaz d'échappement.

Les cycles combinés à faible excès d'air, qui utilisent l'oxygène restant dans les gaz d'échappement en brûlant un complément très important du combustible dans un générateur de vapeur qui est dans ce cas appelé « Générateur de vapeur à récupération de chaleur ». On peut citer à part, les cycles de récupération, appelés toujours à fort excès d'air, mais avec feu partiel ou additionnel qui exploitent, dans la limite permise par la technologie des chaudières de récupération pure, la possibilité d'y effectuer une postcombustion d'une puissance limitée.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

Dans les cycles à fort d'excès d'air, le générateur de vapeur de récupération est simple, ne possède pas de chambre de combustion et est constitué uniquement d'un échangeur à convection.

Dans les cycles à fort excès d'air avec feu additionnel, le GVR, dont la technologie accepte des gaz de combustion dont la température peut atteindre 760°C, est muni d'un brûleur, qui permet aux gaz d'atteindre cette température limite et d'augmenter ainsi d'une façon significative la production de vapeur.

Dans le cas des cycles à faible excès d'air le GVR est carrément une chaudière classique permettant la production d'une vapeur à hautes caractéristiques.

Les cycles combinés à fort excès d'air, sans feu, à un seul et à deux niveaux de pression, sont économiquement (rendement et investissement) très intéressants, et demandent une quantité d'eau de refroidissement moitié de celle nécessaire à une centrale conventionnelle. Cet avantage joint à un délai de réalisation plus court, [4].

1.3. Configurations de cycle combiné :

Les cycles combinés peuvent se présenter selon deux configurations : single shaft ou multi-shaft.

- Un cycle combiné single shaft est constitué d'une seule turbine à gaz, d'une seule chaudière de récupération qui alimente la turbine à vapeur et d'un unique alternateur dimensionné pour les deux turbines. La configuration single shaft se caractérise par le fait que les équipements : turbine à gaz, turbine à vapeur et alternateur sont agencés selon une disposition longitudinale, pour ne constituer qu'une seule ligne d'arbre.

- Un cycle combiné multi-shaft est constitué d'une ou plusieurs turbines à gaz, d'une chaudière de récupération pour chaque turbine à gaz ou d'une chaudière commune toutes les turbines à gaz, d'une turbine à vapeur et d'un alternateur pour chaque turbine. La configuration multi-shaft se caractérise par le fait que les équipements turbo-alternateurs à gaz et à vapeur peuvent être agencés selon la forme du site.

Dans les centrales à cycle combiné qui étaient les moyens privilégiés pour répondre à la charge de base, la configuration en single shaft était la plus adéquate puisque son exploitation était plus simple et plus économique. Avec l'abondance de capacités de production atteintes et pouvant être plus importantes avec l'ouverture du marché de l'électricité, [5].

1.4. Les équipements principaux de Centrale à Cycle Combiné :

La centrale à cycle combiné comporte essentiellement une turbine à gaz, une chaudière de récupération à trois niveaux de pression, une turbine à vapeur, un condenseur refroidi par l'eau de mer, et un alternateur refroidi avec l'hydrogène.

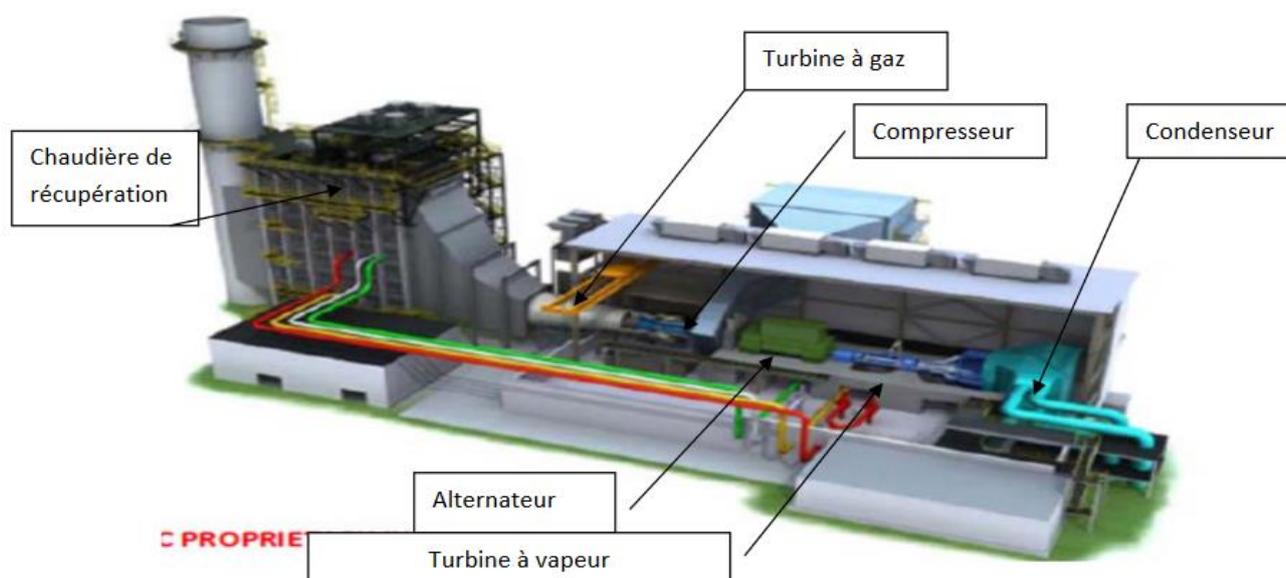


Figure 1-1 : Les équipements principaux de centrale à cycle combiné, [3].

1.4.1. Turbine à gaz (TG) :

Une turbine à gaz, appelée aussi turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz...).

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante :

- Elle extrait de l'air du milieu environnant (aspiration) ;
- Elle le comprime à une pression plus élevée par le compresseur (compression) ;
- Elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion (gaz chaud) ;
- Elle achemine le gaz chaud à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre (expansion) ; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine et, de l'autre côté à fournir l'énergie utile à la machine

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement comme par exemple un alternateur ou un compresseur centrifuge ;

- Elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression, [6].

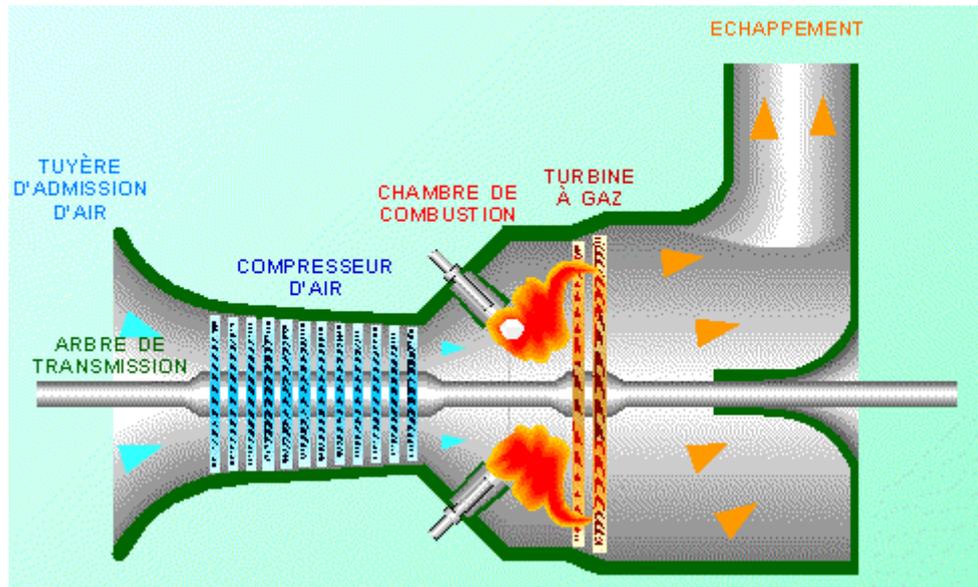


Figure 1-2 : Schéma de fonctionnement d'une turbine à combustion, [7]

1.4.2. Générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) :

La chaudière de récupération de chaleur (HRSG) (HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR), un échangeur de chaleur qui permet de récupérer l'énergie thermique d'un écoulement de gaz chaud. Elle produit de la vapeur qui peut être utilisée pour alimenter une turbine à vapeur, [5].

La chaudière de récupération de chaleur (HRSG) consiste en un ensemble d'échangeurs tubulaires de chaleur par convection (un économiseur, un évaporateur associé à un ballon (tambour) et un surchauffeur), où les gaz chauds d'échappement de la turbine à gaz, réchauffent l'eau et la vapeur qui circulent à l'intérieur des tubes, [8].

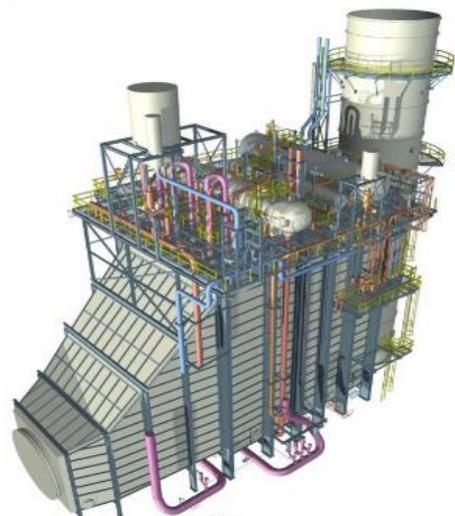


Figure 1-3 : Générateur de vapeur à récupération de chaleur, [9]

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

1.4.3. Turbine à vapeur (TV) :

La turbine à vapeur est un des matériels stratégiques des installations de production d'énergie électrique. Son indisponibilité entraîne la perte de la production d'énergie, contrairement à d'autres matériels (pompes alimentaires, pompes de circulation assistée, ventilateurs...) dont la redondance permet de poursuivre l'exploitation des installations soit à pleine charge, soit éventuellement à charge partielle.



Figure 1-4 : Turbine à vapeur, [10].

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau.

Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

- L'eau liquide est comprimée par une pompe et envoyée vers la chaudière.
- La vapeur se détend dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique.
- La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel, [4].

1.4.4. L'alternateur :

L'alternateur est une machine électrique du type génératrice à courant alternatif qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Il est constitué d'un rotor (qui tourne) et d'un stator (qui reste fixe). Lorsque le rotor tourne, il induit un champ magnétique dans le stator, ce qui génère un courant électrique alternatif.

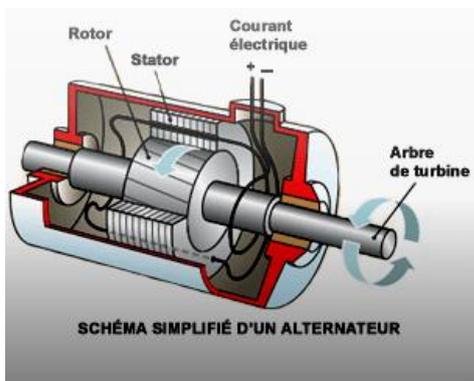


Figure 1-5 : Schéma d'un alternateur, [5].

Le courant alternatif produit par l'alternateur est ensuite envoyé à un transformateur, où sa tension est augmentée à un niveau approprié pour le transport à travers les lignes électriques. Il est ensuite distribué aux consommateurs via le réseau électrique.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

1.4.5. Le condenseur de vapeur :

Le condenseur est un échangeur thermique qui permet de condenser la vapeur en sortie de TV, pour réalimenter en eau la chaudière, [3].

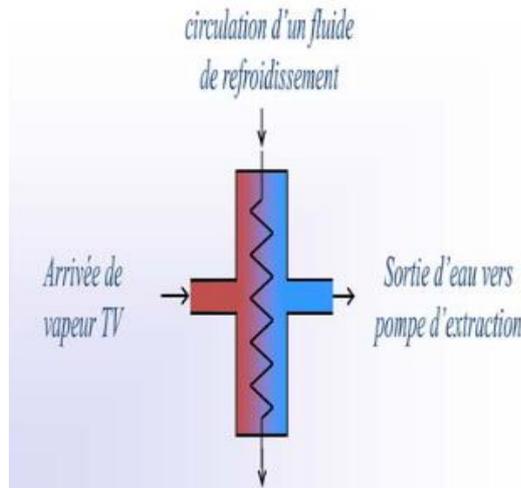


Figure 1-6 : Principe de condenseur de vapeur, [3]

1.5. Le Principe de Fonctionnement de Centrale à Cycle Combiné :

Une centrale thermique à cycle combiné gaz produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de gaz naturel. Ce type de centrales combine deux types de turbines. Une turbine à combustion et une turbine à vapeur reliées à un alternateur. Avec le même volume de combustible, ces deux turbines permettent de produire une quantité plus importante d'électricité

Dans la turbine à combustion, de l'air est injecté dans un compresseur à haute pression. L'air ainsi comprimé est ensuite propulsé dans la chambre de combustion où il se mélange au combustible. Le mélange air-gaz s'enflamme et produit des gaz d'échappement qui activent la rotation de la turbine à combustion. Cette turbine fait à son tour tourner l'alternateur.

La chaleur des gaz qui sort de la turbine à combustion est ensuite récupérée dans une chaudière tapissée de tubes dans lesquels circule de l'eau. L'eau ainsi chauffée par ces gaz est ensuite dirigée vers un ballon dans lequel elle se transforme en vapeur. La vapeur est alors envoyée vers la turbine à vapeur et la fait tourner. L'énergie produite par la rotation de cette deuxième turbine est transmise à l'alternateur et s'ajoute à celle déjà transmise par la turbine à combustion. Dans l'alternateur, l'interaction entre les électroaimants du rotor (la partie mobile) et les bobines de fils de cuivre du stator (la partie fixe) produit un courant électrique.

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

Des transformateurs élèvent la tension de ce courant à 225 000 ou 400 000 volts pour qu'il puisse être transporté plus facilement dans les lignes à très haute tension du réseau.

La vapeur qui est sortie de la turbine passe enfin dans un condenseur dans lequel circule de l'eau froide. Elle est ainsi retransformée en eau pour être renvoyée dans la chaudière.

Les fumées issues de la sont-elles filtrées avant d'être évacuées par les cheminées

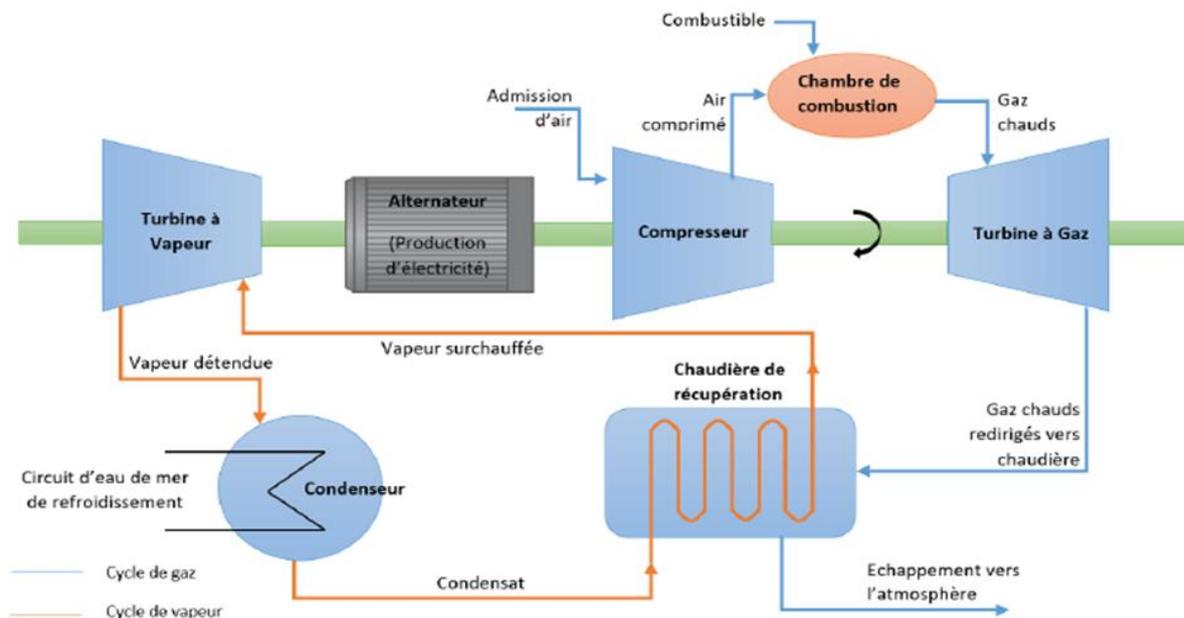


Figure 1-7 : Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné à arbre unique, [5]

1.6. Les avantages et les inconvénients du cycle combiné :

Les Avantages :

- Cette technologie demande un Investissement plus faible que d'autres type de centrales conventionnelles de puissance plus forte.
- Centrale à cycle combiné permet un meilleur rendement énergétique
- Les centrales à cycle combiné Permettent de réduire de 50% les Emissions de CO₂, de diviser par trois les Oxydes d'azotes (NO_x) et de supprimer les Rejets d'oxydes de soufre (SO₂) par rapport Aux moyens de production thermique à Flamme (classique).
- Cette technologie offre une grande flexibilité d'utilisation qui permet de répondre rapidement et précisément à la demande, [4].

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

Les inconvénients :

- Cette technologie engendre des émissions de produits polluants et des gaz à effet de serre.
- Les coûts de compensation des émissions polluants sont élevés.
- Énergie non renouvelable, [8].

2. Le Générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) de centrale à Cycle Combiné :

2.1. Présentation Générale de Générateur de vapeur à récupération de chaleur :

La chaudière de récupération, appelée aussi générateur de vapeur à récupération (GVR) d'une centrale à cycle combiné est un échangeur de chaleur à contre-courant, elle représente l'interface entre la turbine à gaz et le cycle eau/vapeur.

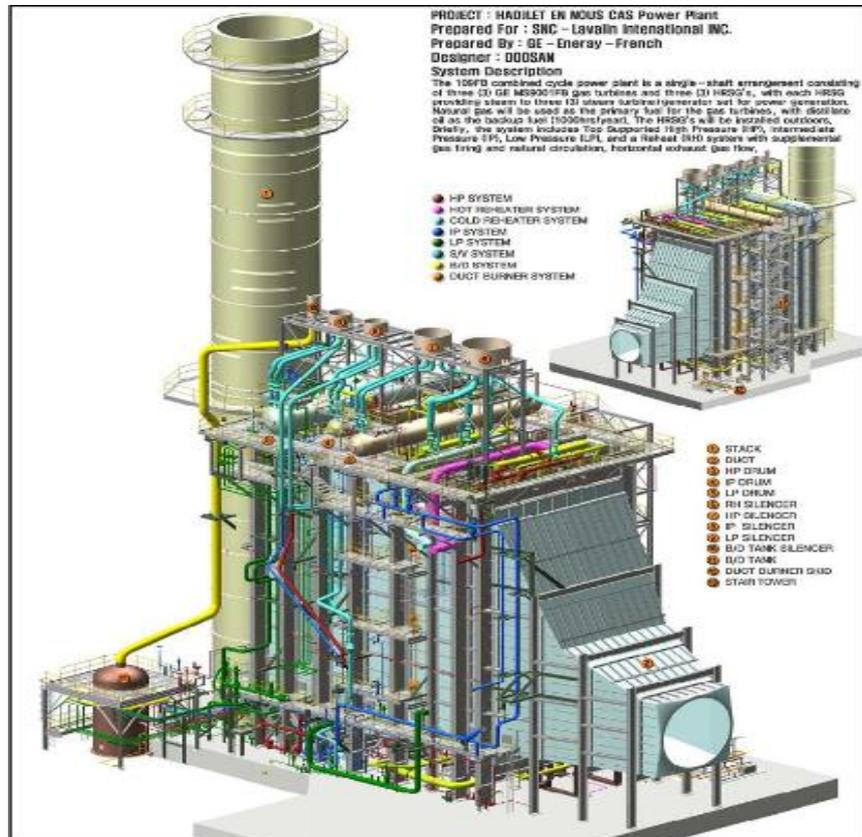


Figure 1-8 : Vue complète de Générateur de vapeur à récupération de chaleur,[11]

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

La fonction des générateurs de vapeur à récupération de chaleur est de récupérer la chaleur perdue disponible dans les gaz d'échappement d'une turbine à gaz et de transférer cette chaleur à l'eau et à la vapeur contenue dans ses tubes. La chaleur récupérée est utilisée pour générer de la vapeur à des pressions et des températures élevées, et ensuite utilisée pour générer une puissance supplémentaire dans un alternateur entraîné par une turbine à vapeur.

Elle se compose principalement d'une gaine, dans laquelle circulent les fumées d'échangeurs constitués de nappes de tubes traversés par l'eau ou la vapeur et d'un ou plusieurs ballons, [12].

Un générateur de vapeur à de récupération de chaleur HRSG typique comporte un système de vapeur à haute pression (HP), à pression intermédiaire (IP) et à basse pression (LP). Chaque système est associé à un ballon de vapeur, un économiseur, un évaporateur et un surchauffeur.

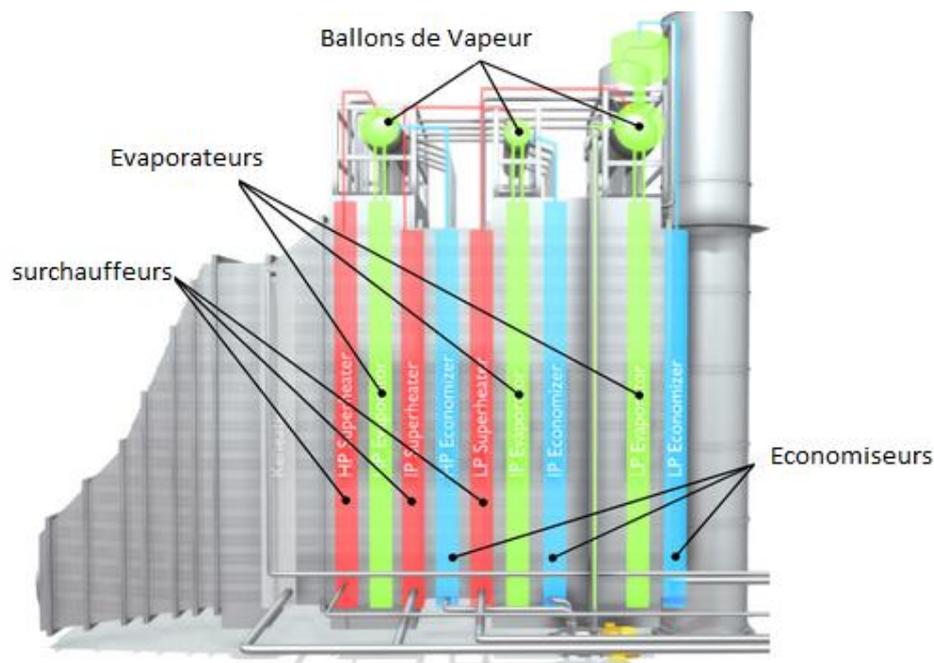


Figure 1-9 : Principaux échangeurs d'un générateur de vapeur à récupération de chaleur, [13].

- Les économiseurs réchauffent l'eau alimentaire jusqu'au voisinage de la saturation et l'envoient dans le ballon.
- Les évaporateurs puisent de l'eau dans le ballon, en vaporisent une partie et la renvoient dans le ballon. Cette circulation en boucle fermée peut s'effectuer naturellement grâce à la différence de masse entre l'eau et la vapeur ou bien nécessiter l'assistance d'une pompe de circulation.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

- La section de surchauffeur du CVRC est utilisée pour sécher la vapeur saturée. Il surchauffe la vapeur d'eau qui sort de l'évaporateur à la température de saturation jusqu'à atteindre une température limite qui ne dépasse pas la température résistée par les matériaux de la chaudière, [13].

Un générateur de vapeur typique comprend également des composants supplémentaires pour le contrôle des émissions, tels qu'un système de réduction du catalyseur (SCR), et peut contenir des brûleurs à canard qui brûlent du carburant supplémentaire pour fournir plus de chaleur afin de maximiser la production de vapeur

2.2. Le principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement du HRSG est résumé ci-dessous :

1. Récupération de chaleur - les gaz d'échappement d'une turbine à gaz ou d'une autre source de chaleur, généralement à des températures de 482°C à 593°, sont dirigés vers le générateur de vapeur à récupération de chaleur HRSG.
2. Préchauffage de l'économiseur - l'eau d'alimentation est préchauffée dans l'économiseur. Ce processus élève la température de l'eau à un niveau proche de son point d'ébullition (température de saturation), la préparant ainsi pour l'évaporateur.
3. Ballon de vapeur - l'eau provenant de l'économiseur est acheminée vers le ballon de vapeur, en passant souvent par un désaérateur. La vapeur saturée est évacuée des ballons de vapeur.
4. Production de vapeur par l'évaporateur - l'eau préchauffée circule dans les tubes de l'évaporateur et est chauffée par les gaz d'échappement chauds. La chaleur échangée fait bouillir l'eau et la transforme en vapeur. La température dans l'évaporateur peut varier de (121°C à 315°C), en fonction de la pression du système.
5. Surchauffe - la vapeur générée par l'évaporateur est dirigée vers le surchauffeur. La vapeur dans le surchauffeur est exposée à des gaz d'échappement plus chauds car elle est plus proche de la source de chaleur. Le surchauffeur peut élever la température de la vapeur jusqu'à 550°C, ce qui correspond à la température requise par une turbine haute pression typique d'une centrale électrique. Les turbines à vapeur ont besoin de vapeur surchauffée en raison de son contenu énergétique élevé et de sa teneur réduite en humidité (la vapeur surchauffée sèche est celle qui est fournie à une turbine à vapeur).

La quantité d'énergie contenue dans la vapeur correspond à la quantité d'énergie que la turbine à vapeur peut extraire.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

6. Production d'électricité par turbine à vapeur - La vapeur sèche surchauffée est évacuée de la HRSG vers une ou plusieurs turbines à vapeur. Une turbine à vapeur typique utilise de la vapeur à haute pression dans une section à haute pression de la turbine, l'échappement de cette section de la turbine contient encore une quantité importante d'énergie utile cette vapeur d'échappement, appelée vapeur de réchauffage à froid, rejoint la vapeur à pression intermédiaire produite dans HRSG. le flux de vapeur combiné est à nouveau chauffé dans la HRSG dans des sections appelées réchauffeurs et sort ensuite du HRSG sous forme de vapeur de réchauffage chaude cette vapeur de réchauffage chaude est utilisée pour alimenter la section à pression intermédiaire de la turbine à vapeur, l'échappement de la section à pression intermédiaire de la turbine à vapeur est combiné à la vapeur produite dans la section à basse pression du HRSG et alimente ensuite la section à basse pression de la turbine à vapeur

La turbine à vapeur convertit l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique et la transmet à un générateur (les deux sont installés sur un arbre commun).

Le générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique (électricité).

7. Élimination des gaz d'échappement - une fois que les gaz d'échappement ont transféré la majeure partie de leur énergie thermique aux systèmes d'eau et de vapeur, ils sont évacués dans l'atmosphère à une température comprise entre 121°C et 149°C. Il est important que le flux de gaz chauds n'ait pas une température excessivement basse, sinon de la condensation peut se produire dans la cheminée et un environnement corrosif se crée, [13].

2.3. Classification des générateurs de vapeur à récupération de chaleur :

Il existe plusieurs manières pour classer les générateurs de vapeur.

2.3.1. Selon l'arrangement des échangeurs :

Ce classement dépend de l'arrangement des échangeurs, chaudière de récupération horizontale et verticale.

- **Générateur de vapeur à récupération de chaleur horizontale :**

- ✓ Echangeur de chaleur verticale.
- ✓ Structure relativement légère et maintenance facile.
- ✓ Température non homogène dans la section.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

- ✓ Problème de dilatation thermique.
- **Générateur de vapeur à récupération de chaleur verticale :**
 - ✓ Echangeur de chaleur horizontale.
 - ✓ Structure lourde.
 - ✓ Température homogène dans la section.
 - ✓ Meilleure efficacité, [14].

2.3.2. Selon la circulation des fluides :

- **Les générateurs de vapeur à circulation naturelle :**

Dans les générateurs de vapeur à circulation naturelle, la circulation du fluide caloporteur se fait principalement par des phénomènes de convection thermique naturelle.

Dans les générateurs de vapeur à circulation naturelle, la circulation du fluide dans l'évaporateur est assurée par la différence de densité entre l'eau qui descend du ballon et le mélange eau vapeur qui remonte vers le ballon.

Les chaudières à circulation naturelle sont souvent utilisées dans les systèmes où la différence de température entre les points de récupération et de rejet de chaleur est significative.

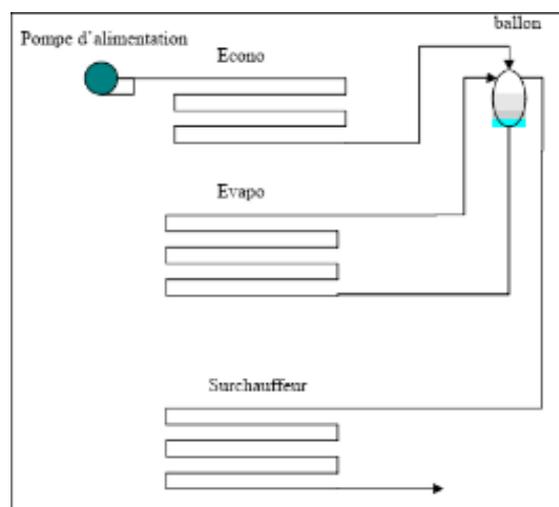


Figure 1-11 : Générateurs de vapeur à récupération de chaleur à circulation naturelle, [14].

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

- **Les générateurs de vapeur à circulation assistée :**

Les générateurs de vapeur à circulation assistée combinent à la fois la convection naturelle et une pompe de circulation est alors introduite dans la boucle de vaporisation pour vaincre les pertes de charge du mélange eau vapeur à déplacer.

Ce type de générateur de vapeur peut être utilisé lorsque la différence de température est moins importante et qu'une circulation naturelle seule ne suffit pas pour garantir un transfert de chaleur efficace.

La circulation assistée peut être utilisée pour améliorer l'efficacité de récupération de chaleur dans les systèmes où la circulation naturelle est insuffisante.

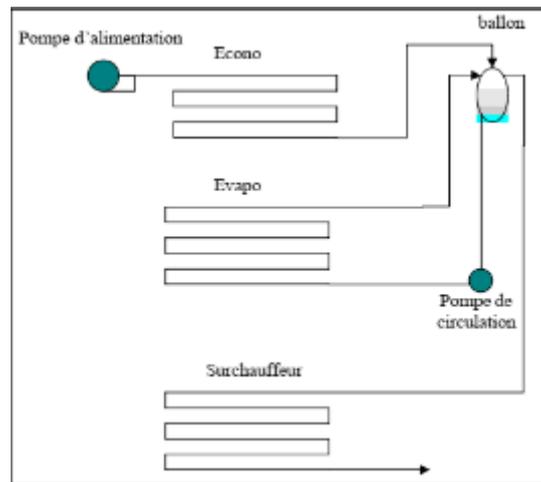


Figure 1-12 : Chaudière à circulation assistée, [14].

- **Les chaudières à circulation Forcé :**

Dans les générateurs de vapeur à circulation forcée, la circulation du fluide caloporteur est entièrement contrôlée et propulsée par des pompes ou un ballon de démarrage

Ce type de générateur de vapeur est utilisé lorsque la différence de température est faible ou lorsque des débits de chaleur élevés doivent être gérés.

La circulation forcée permet un contrôle précis du débit du fluide caloporteur, ce qui peut être essentiel pour maximiser l'efficacité de récupération de chaleur dans les systèmes complexes.

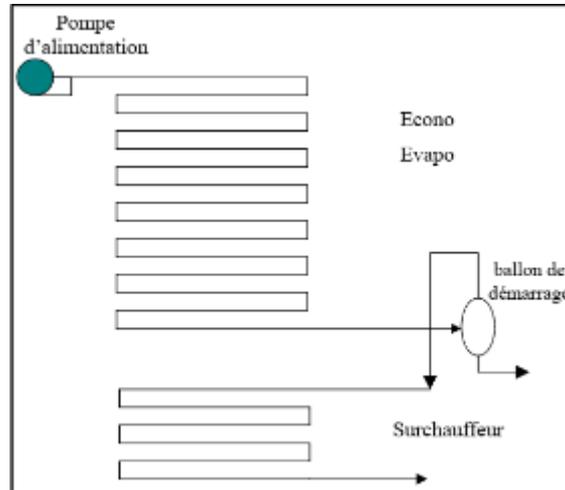


Figure 1-13 : Chaudière à circulation forcée avec ballon de démarrage, [14]

2.3.3. Selon le nombre de niveau de pression :

On parle de générateur de vapeur à un niveau de pression (1P) si elle comporte un économiseur, un évaporateur associé à un ballon et un surchauffeur (dans ce type de cycle, la température des fumées rejetées à l'atmosphère reste élevée (150 à 180°C)).

Les générateurs de vapeur à deux niveaux de pression (2P) s'il y a deux séries d'échangeurs. L'un à haute pression (HP) (il récupère la chaleur à haute température) et l'autre à basse pression (BP) (il récupère la chaleur à basse température).

On peut trouver aussi des générateurs de vapeur à trois niveaux de pression (3P), ce type est utilisé dans les grands cycles combinés modernes. Le circuit de haute pression (HP) réchauffe l'eau d'alimentation à haute pression et produit de la vapeur surchauffée (560°C) pour le corps haute pression HP de la turbine à vapeur. Depuis le ballon HP, il existe une ligne de vapeur pour alimenter le ballon MP, [12].

2.4. Les matériaux utilisés dans la construction des Générateurs de vapeur à récupération de chaleur :

Dans la construction des générateurs de vapeur à récupération de chaleur, plusieurs matériaux peuvent être utilisés en fonction des exigences spécifiques de chaque section de la chaudière notamment la température et la pression des fluides circulant à l'intérieur. Parmi ces matériaux :

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

- **Acier au carbone** : Il est utilisé dans les parties de la chaudière qui ne sont pas soumises à des températures et des pressions élevées, ainsi que pour les parties structurelles. L'acier au carbone est robuste et économique, ce qui en fait un choix populaire pour les sections de la chaudière où des températures et des pressions modérées sont rencontrées.
- **Alliages d'acier à faible et moyenne teneur en chrome-molybdène** : Ils sont utilisés pour les parties de la chaudière soumises à des températures et des pressions élevées, ainsi que pour les tubes de l'évaporateur et du surchauffeur. Ces alliages offrent une bonne résistance à la corrosion et à la déformation à haute température, ce qui les rend adaptés aux conditions sévères des chaudières de récupération.
- **Alliages à base de nickel** : Ils sont utilisés pour les parties exposées à des températures extrêmement élevées et à des environnements corrosifs, tels que les tubes de surchauffeur et les composants des chambres de combustion. Les alliages à base de nickel offrent une excellente résistance à la corrosion et à l'oxydation à haute température, ce qui en fait un choix idéal pour les sections de la chaudière soumises à des conditions extrêmes.
- **Matériaux réfractaires** : Les matériaux réfractaires, comme les briques réfractaires, sont utilisés pour protéger les surfaces internes des échangeurs de chaleur et les céramiques réfractaires sont utilisées pour isoler thermiquement les parties de la chaudière qui sont exposées à des températures extrêmement élevées. Elles sont utilisées pour protéger les composants en acier des dommages causés par la chaleur.
- **Composites polymères** : Dans certains cas, des composites polymères renforcés de fibres peuvent être utilisés pour des applications spécifiques dans les chaudières de récupération, notamment pour les isolants thermiques ou les revêtements protecteurs.

Les matériaux les plus courants utilisés à la centrale de Hadjret-Ennous d'une façon spécifique actuellement pour la plupart des parties des tubes, collecteurs, conduits et tuyauteries (pipes) des chaudières de récupération (HRSG) sont des aciers au carbone. En fonction de la susceptibilité des différentes sections aux différents mécanismes de dégradation, une grande variété de nuances est utilisée, [15].

- a. Les nuances des aciers utilisés dans les tubes de la chaudière :

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

1. SA-178 Gr. A :

Matériaux	Application	Norme
Acier à faible teneur en carbone soudés à résistance électrique	Utilisés dans les conduits, les tubes de chaudière et les conduits de surchauffeur	ASTM A178 Grade A

Tableau 1-1 : Spécifications de la nuance SA-178 Gr. A

Composition	C%	Mn%	P%	S%
Chimique	00,06 % - 00,18 %	0.27 % - 0.63 %	0.035 %	0.035 %

Tableau 1-2 : Composition Chimique de la nuance SA-178 Gr. A

Propriétés Mécanique	Résistance à la traction	Limite élastique	Dureté maximale
	325MPa	180MPa	77 HRB

Tableau 1-3 : Propriétés Mécanique de la nuance SA-178 Gr. A

2. SA-192 :

Matériaux	Application	Norme
Acier au carbone sans couture	Utilisés dans les échangeurs de chaleur, Condenseurs, et tubes du surchauffeur pour la haute pression	ASTM A192 Grade A

Tableau 1-3 : Spécifications de la nuance SA-192

Composition	C%	Mn%	Si%	P%	S%
Chimique	00,06 % - 00,18 %	0.27 % - 0.63 %	0,25%	0.035 %	0.035 %

Tableau 1-4 : Composition Chimique de la nuance SA-192

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

Propriétés Mécanique	Résistance à la traction	Limite d'élasticité	Dureté maximale
	325MPa	180MPa	77 HRB

Tableau 1-5 : Propriétés Mécanique de la nuance SA-192

3. SA 213 Gr. T11 (1.5%Cr)

Matériaux	Application	Norme
Acier allié au chrome molybdène	Utilisés dans les surchauffeurs de chaudières et échangeurs de chaleur des températures et des pression modérés	ASTM A213 Grade T11

Tableau 1-6 : Spécifications de la nuance SA 213 Gr. T11

Composition	C%	Mn%	Si%	Cr%	Mo%	P% /S%
Chimique	0.05 à 0.15	0.30 à 0.60	0.50 à 1.00	1.00 à 1.50	0.44 à 0.65	0.035 %

Tableau 1-7 : Composition Chimique de la nuance SA 213 Gr. T11

Propriétés Mécanique	Résistance à la traction	Limite d'élasticité	Dureté maximale
	415 MPa	205MPa	85 HRB

Tableau 1-4 : Propriétés Mécanique de la nuance SA 213 Gr. T11

Les tuyaux A213 sont souvent appelés tubes de molybdène chromé en raison de la composition chimique du molybdène (Mo) et du chrome (Cr). Le molybdène augmente la résistance de l'acier ainsi que la limite élastique, la résistance à l'usure, les qualités d'impact et la résistance. Le molybdène augmente la résistance à l'adoucissement, limite la croissance du grain et rend l'acier au chrome moins sensible à la fragilisation. Le molybdène est l'additif unique le plus efficace qui augmente la résistance au fluage à haute température. Il améliore également la résistance à la corrosion de l'acier et empêche la formation de piqûres. Le chrome augmente la traction, le rendement et la dureté à température ambiante, [16].

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

4. SA 213 Gr. T91 (9% Cr) :

Matériaux	Application	Norme
Acier allié martensitique	Utilisé dans les sections de la chaudière exposées aux températures supérieures à 540°C et aux pressions élevées.	ASTM A213 Grade T91

Tableau 1-9 : Spécifications de la nuance SA 213 Gr. T91

Composition	C%	Mn%	Si%	Cr%	Mo%	Ni%
Chimique	0.08 à 0.12	0.30 à 0.60	0.20 à 0.50	8.00 à 9.50	0.85 à 1.05	0.40

Tableau 1-10 : Composition Chimique de la nuance SA 213 Gr. T91

Avec V% : 0.18-0.25/ N% : 0.030-0.070/ P% : 0.02/ S% : 0.01

Propriétés Mécanique	Résistance à la traction	Limite d'élasticité	Dureté maximale
	585 MPa	415MPa	101 HRB

Tableau 1-11 : Propriétés Mécanique de la nuance SA 213 Gr. T91

Les aciers martensitiques se caractérisent par leur capacité à subir une transformation martensitique lorsqu'ils sont refroidis rapidement. Cette transformation martensitique confère à l'acier une dureté élevée et une résistance à la traction, ce qui les rend appropriés pour des applications haute température et haute pression comme les chaudières et les échangeurs de chaleur.

Il contient généralement 9% de chrome (Cr) et environ 1% de molybdène (Mo), ce qui lui confère une résistance accrue à la corrosion et à l'oxydation à haute température, [17].

b. Les nuances des aciers utilisés dans les pipes de la chaudière :

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

1. SA 106 Gr. B :

S / A 106 (également couverte dans les spécifications ASTM A106) est la spécification standard pour les tuyaux sans soudure en acier au carbone pour le service à des températures et des pressions élevées. Tuyau ASTM A106 incluant trois qualités : ASTM A106 Grade A, ASTM A106 Grade B, ASTM A106 Grade C.

Les tubes en acier au carbone (tubes A106 Gr B) sont l'un des produits les plus couramment utilisés dans l'industrie, ils équivalent à ASTM A53 Grade B et API 5L B en ce qui concerne la position chimique et les propriétés mécaniques.

-La composition chimique de SA 106 Gr. B :

C% max	Mn% max	Ni% max	Mo% max	Cr% max	Cu% max
0,30	0,29-1,06	0,40	0,15	0,40	0,40

Tableau 1-12 : La composition chimique de SA 106 Gr. B

Avec P% max : 0,035 / Si% min : 0,1 / S% max : 0,035 / V% max : 0,08

-Les Propriétés Mécanique de la nuance SA106 Gr. B

Résistance à la traction	Limite d'élasticité	Dureté maximale
415 MPa	240MPa	101HRB

Tableau 1-13 : Propriétés Mécanique de la nuance SA 106 Gr. B

2. SA 335 Gr. P11, P91 :

ASTM A335 est le tuyau en acier allié ferritique sans soudure utilisé dans les services à haute température et l'industrie de la chaudière.

Les tuyaux A335 ont un niveau élevé de présence de chrome et de molybdène. Alors que le molybdène augmente la résistance globale, la résistance, l'élasticité, la trempabilité et la qualité globale, le molybdène garantit que le matériau est plus résistant au ramollissement, limite la croissance des grains et réduit les risques de fragilisation. C'est le seul additif qui est responsable de l'augmentation de la résistance à haute température et il améliore également la résistance à la corrosion de l'acier.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

-La composition Chimique

P11	C%	Mn%	P%/S%	Si%	Cr%	Mo%
	0.05- 0.15	0.30- 0.60	0.025	0.50- 1.00	1.00- 1.50	0.44- 0.65
P91	0.08- 0.12	0.30- 0.60	0.02	0.20- 0.50	8.00- 9.50	0.85- 1.05

Tableau 1-14 : La composition chimique des nuances SA 335 Gr. P11/P91

-Les Propriétés Mécanique :

Grade	Résistance à la traction	Limite d'élasticité	Dureté maximale
P11	415 MPa	205MPa	85 HRB
P91	585MPa	415MPa	101 HRB

Tableau 1-15 : Les Propriétés Mécanique des nuances SA 335 Gr. P11/P91

Les matériaux utilisés dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur jouent un rôle crucial dans la performance, la durabilité et la fiabilité de ces systèmes. Parmi les nuances les plus importantes utilisées dans les tubes et les conduites de chaudière, on trouve le T11/P11 et le T91/P91. Ces nuances d'acier allié offrent une combinaison de résistance à la chaleur, de résistance à la pression et de résistance à la corrosion, ce qui en fait des choix populaires pour les environnements haute température et haute pression rencontrés dans les chaudières de récupération. Leur composition chimique spécifique et leurs propriétés mécaniques adaptées en font des matériaux idéaux pour garantir un fonctionnement efficace et sûr des chaudières de récupération, contribuant ainsi à maximiser l'efficacité énergétique et à réduire les émissions, [18].

3. Présentation Générale de Hadjret-Ennous :

3.1. Emplacement :

La centrale Électrique à cycle combiné 1227MW de Hadjret-Ennous, est située dans la Wilaya de Tipasa, à environ 80 km à l'ouest d'Alger. Le site, est à environ 12 km à l'ouest de Cherchell et à 4 KM de la ville de Sidi Ghiles, est limité au sud par la route nationale n°11, entre les oueds Arbal et Mokada Nazizi et au nord par la mer Méditerranée.

Le site possède une superficie d'environ 35 hectares.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

3.2. Description et Données techniques de la Centrale :

La centrale comprend trois unités de production d'électricité en cycle combiné générant 409 MW chacune (en total 1227MW).

Chaque unité comprend une turbine à combustion, un générateur de vapeur à récupération de chaleur, une génératrice, une turbine à vapeur et un condenseur de vapeur.

Les turbines à gaz General Electric brûlent en premier lieu du gaz naturel et comme alternative du gasoil. Les générateurs de vapeur à récupération de chaleur sont de type circulation naturel, offrant de la vapeur à trois pressions, et dotées de réchaud. La vapeur produite (trois pressions) est acheminée à la turbine à vapeur.

Chaque turbine à vapeur décharge sa vapeur usée dans un condenseur. L'eau de refroidissement est l'eau de mer.

Pour chaque tranche, deux pompes alimentent le condenseur d'eau de mer. De plus la génératrice est refroidie par un circuit fermé eau/gaz (H₂). Un circuit d'eau de mer/eau fraîche est également utilisé pour divers besoins.

L'eau fraîche nécessaire à l'exploitation de la centrale sera produite par la désaliénation de l'eau de mer. Deux unités de déminéralisation de 100% chaque produiront l'eau déminéralisée consommée par les équipements, [19].

Le tableau ci-dessous présente un sommaire des caractéristiques de la centrale à cycle combiné de Hadjret-Ennous, [20] :

Caractéristiques	
Type de configuration Arbre	Arbre Unique
Modèle de Turbine	PG9371FB
Puissance brute générée par les turbines à gaz (MW)	3 x 425
Puissance brute générée par les turbines à vapeur (MW)	
Puissance brute totale générée (MW)	1275
Puissance totale nette (MW) (garantie à 30°C)	1227
Consommation de gaz naturel par turbine (t/h)	57,24
Consommation de gaz naturel par brûleurs d'appoint (t/h)	7,0
Vapeur générée par les générateurs de vapeur à récupération de chaleur (t/h)	3 x 381
Débit d'eau de circulation (m ³ /h)	84000
Equipement intérieur :	
- Alternateurs	3
- Condenseur	3
- Turbines à combustion	3
- Turbine à vapeur	3

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

Autres équipements intérieurs : - Systèmes auxiliaires - Unité de déminéralisation d'eau	Oui Oui
Équipement extérieur : - Chaudières de récupération - Cheminées - Poste de départ - Transformateurs - Unité de dessalement de l'eau de mer	3 3 3 3 2
Combustible principal	Gaz Naturel
Combustible de secours	Gasoil
Energie Produite annuellement (GWhs)	900
Rendement	58%
Consommation Spécifique (kJ/kWh)	6404
Consommation de Gaz (m^3/h)	200.000

Tableau 1-16 : Sommaire des caractéristiques de la centrale

3.3. Partenaires :

Huit partenaires sont engagés dans le montage contractuel de ce projet et sont, en même temps, actionnaires dans la Société Kahraba Hadjret-Ennous (SKH, Spa). Il s'agit de Sonatrach (10%), Sonelgaz (10%) et Algerian Energy Company (AEC - société mixte Sonatrach / Sonelgaz qui détient 29% dans SKH) pour la partie algérienne, ainsi que SNC Lavalin et Mubadala pour la partie étrangère. SNC Lavalin (Canada) et Mubadala (Emirats Arabes Unis), regroupés au sein de la société mixte dénommée Algerian Utilities International Limited (AUIL), détiennent 51% de SKH.

3.4. Présentation de SNC-LAVALIN :

3.4.1. SNC Lavalin Mondial :

SNC-Lavalin Inc. est l'un des plus importants groupes d'ingénierie et de construction au monde, et un acteur majeur en matière de propriété d'infrastructures et de services d'exploitation et d'entretien.

SNC-Lavalin a des bureaux dans tout le Canada et dans plus de 35 autres pays, et travaille actuellement dans une centaine de pays. Son siège social est à Montréal, Canada. Par le nombre d'employés, elle se classe parmi les 10 plus grandes firmes du genre au monde.

SNC Lavalin créée en 1911, emploie plus de 45 000 employés à travers le monde.

CHAPITRE 1

Introduction aux Technologies de Centrale Thermique à Cycle Combiné et Présentation de la Centrale Hadjret-Ennous

3.4.2. SNC Lavalin O&M :

L'unité d'exploitation Opérations et maintenance de SNC-Lavalin regroupe plus de 1300 professionnels de haut niveau. Leur équipe, présente à l'échelle mondiale, offre toute la gamme des services d'exploitation et d'entretien pour un large éventail d'actifs, allant des plus traditionnels aux infrastructures de haute technologie. Elles œuvrent au sein de toutes les industries et de tous les secteurs d'activités, incluant notamment les autoroutes et les ponts, les transports collectifs et ferroviaires, les bâtiments et installations, la Défense et la logistique ainsi que les opérations industrielles. Elles gèrent le cycle de vie des actifs de la conception et construction jusqu'au démantèlement, et nous créons de la valeur pour nos clients à travers l'innovation, les technologies de pointe et les solutions numériques.

3.4.3. SNC Lavalin O&M Algérie :

SNC Lavalin O&M Algérie, est chargée de l'exploitation et maintenance de trois unités de production :

- ✓ Centrale Thermique de Skikda sis Zone industrielle de Skikda (2005-2022),
- ✓ Centrale Thermique de Hadjret-Ennous sis RN 11, Commune de Hadjret-Ennous, Daïra de Cherchell (Depuis 2009)
- ✓ Usine de Dessalement d'eau de mer sis Fouka, près d'Alger (Depuis 2011),
[19]

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré les bases du fonctionnement du cycle combiné, examiné en détail le générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) et présenté brièvement la centrale Hadjret-Ennous. En se concentrant sur le générateur de vapeur, nous avons mis en évidence la complexité des composants et des fluides impliqués, ainsi que l'importance de choisir les bons matériaux en fonction des conditions de fonctionnement. Ces informations nous serviront de point de départ pour explorer en profondeur les phénomènes de corrosion dans le chapitre suivant, où nous examinerons les différents types de corrosion et d'érosion rencontrés dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur (HRSG)

CHAPITRE 2 :

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Introduction

Dans le domaine de l'ingénierie et de la maintenance industrielle, la corrosion représente un défi majeur, affectant non seulement la durabilité et la fiabilité des équipements, mais aussi la sécurité et l'efficacité des processus. Ce deuxième chapitre est dédié à une compréhension approfondie de la corrosion, un phénomène complexe qui se manifeste sous diverses formes et peut entraîner des conséquences significatives sur les infrastructures et les équipements, notamment dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur (HRSG). En débutant par une exploration des généralités de la corrosion, le contexte de ce titre établit une fondation solide sur les principes fondamentaux, les mécanismes et les différents types de corrosion. Cette base théorique est cruciale pour comprendre les enjeux spécifiques associés aux HRSG, où les conditions de température élevée, de pression, et l'exposition à des environnements potentiellement corrosifs exacerbent les risques de dégradation.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une compréhension claire des principes sous-jacents de la corrosion et de détailler les mécanismes spécifiques par lesquels la corrosion affecte les générateurs de vapeur à récupération de chaleur, afin d'identifier des stratégies de mitigation et de protection efficaces.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

1. Généralités sur la Corrosion :

1.1. Définition de la corrosion :

La corrosion est définie comme étant l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même ou du système constitué par les deux facteurs (métal + environnement), [21].



Figure 2-1 : L'interaction entre la surface de matériau et l'environnement, [22].

C'est un processus naturel dans lequel les métaux convertissent sa structure en une forme plus stable chimiquement, telle que des oxydes, des hydroxydes ou des sulfures. Tous les métaux et alliages sont sujets à la corrosion. Même les métaux nobles, tels que l'or, sont soumis à une attaque corrosive dans certains environnements, [23].

Les théories sur la corrosion sont toutes basées sur la structure atomique de la matière.

L'atome, constitué d'un équilibre entre des charges positives (protons) et des charges négatives (électrons). En raison de la répartition des électrons sur les orbitaux autour du noyau, les métaux ont tendance à perdre des électrons, créant ainsi un excès de charge positive et transformant l'atome en un ion positif.

Lorsqu'un métal est immergé dans un électrolyte, il a spontanément tendance à libérer des ions positifs dans la solution, tandis qu'il reste chargé négativement par les électrons. Cette différence de charge crée une attraction entre les ions positifs et négatifs, établissant ainsi un équilibre électrochimique. Toute perturbation de cet équilibre, notamment provoquée par la perte d'électrons, entraîne le phénomène de corrosion

La corrosion, en tant que phénomène de dégradation, est omniprésente dans les unités de procédés. Elle est parmi les causes principales de la plupart des défaillances d'équipements sous pression, soulignant ainsi l'importance de comprendre les mécanismes fondamentaux qui régissent ce processus, [24].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

1.2. Les facteurs de corrosion :

La corrosion des métaux est un processus de détérioration inévitable qui peut avoir des conséquences coûteuses et dommageables dans de nombreux domaines industriels. Pour mieux comprendre ce phénomène et élaborer des stratégies efficaces de prévention, il est essentiel d'identifier les principaux facteurs déclencheurs de ce processus.

Donc les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux (tableau 2.1), [24,25] :

Facteurs liés au milieu	Concentration du réactif. Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO_2 , NH_2 , H_2S). Acidité (pH) du milieu, salinité, résistivité. Température, Pression. Présence de bactéries Vitesse d'écoulement
Facteurs métallurgiques	Composition de l'alliage, homogénéité du métal Noblesse du métal Procédés d'élaboration. Impuretés dans l'alliage, inclusions. Traitements thermiques, mécaniques Les contraintes appliquées ou résiduelles
Facteurs définissant les conditions d'emploi	Etat de surface, défaut de fabrication. Forme de pièces. Sollicitations mécaniques. Emploi d'inhibiteurs. Procédés d'assemblage (couplage galvaniques, assemblage sous pression, soudures, ...) Force électromotrice extérieure (électrolyse).
Facteurs dépendant du temps	Vieillessement (Changement progressif des propriétés physiques, chimiques et mécaniques d'un matériau au fil du temps). Tensions mécaniques internes ou externes. Température Modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous. Modification des revêtements protecteurs. Apparition d'un dépôt (calcaire ou autre).

Tableau 2-1 : Les principaux facteurs de corrosion

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

1.3. Les paramètres influençant sur la vitesse de corrosion :

La vitesse de corrosion d'un métal dans un milieu corrosif dépend à la fois des caractéristiques de deux paramètres : la température et le pH. Ces deux paramètres ont une influence directe sur la vitesse de corrosion, ainsi qu'une influence indirecte à travers la phase aqueuse (telle que l'eau de condensation ou l'eau de production). De plus, les conditions de flux, le film formé à la surface du métal et la pression ont une influence directe via la pression partielle du CO_2 . Ces paramètres peuvent varier en fonction du système et des conditions spécifiques.

1.3.1. Effet de Température :

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion, car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère la cinétique de réaction et de transport de charge. L'importance de son influence varie en fonction du milieu corrosif dans lequel se trouve le matériau, [26].

1.3.2. Effet de pH :

L'effet du pH sur la vitesse de corrosion est un aspect crucial dans l'évaluation des processus corrosifs. Dans un milieu acide, caractérisé par un pH bas, la corrosion peut être accélérée car les ions H_3O^+ présents réagissent avec le métal pour former des ions métalliques et de l'hydrogène gazeux. À l'inverse, dans un milieu basique, où le pH est élevé, la corrosion peut être ralentie grâce à la formation d'une couche protectrice d'oxydes métalliques sur la surface du métal, résultant des réactions avec les ions OH^- . Dans un milieu neutre, la corrosion peut varier en fonction des autres composants présents, mais elle est généralement modérée.

1.3.3. Régime hydrodynamique :

L'effet du régime hydrodynamique sur la corrosion est essentiel dans les environnements fluidiques. Les variations de vitesse et de turbulence influencent la cinétique de corrosion des matériaux métalliques. Une turbulence élevée peut accélérer l'érosion-corrosion par des particules abrasives, tandis qu'un flux turbulent peut intensifier les réactions électrochimiques en transportant l'oxygène vers les surfaces métalliques. Cependant, un régime modéré peut favoriser la formation de films protecteurs. Les conditions hydrodynamiques fixent les vitesses de réactions en contrôlant le transport de matière par l'établissement d'une couche limite de diffusion des espèces, appelée couche de Nernst, ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion en laboratoire

1.3.4. La salinité :

La salinité de l'eau joue un rôle crucial dans les processus de corrosion, en particulier dans les environnements marins et côtiers. Une concentration élevée de sels dissous accroît la conductivité électrique de l'eau, favorisant ainsi les réactions électrochimiques responsables de la corrosion des métaux, [27].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

De plus, les sels dissous peuvent précipiter et former des dépôts sur les surfaces métalliques, créant des sites propices à la corrosion.

La présence d'ions dans l'eau salée peut également induire des réactions de corrosion galvanique, accélérant ainsi la détérioration des matériaux, en particulier lorsqu'ils sont en contact avec des métaux différents. En outre, la salinité peut compromettre l'efficacité des revêtements de protection contre la corrosion, exposant ainsi les surfaces métalliques à une détérioration accélérée, [28].

1.4. Processus de la corrosion :

La distinction peut être faite entre deux processus ;

La corrosion en milieu humide ou corrosion aqueuse : le milieu est constitué par un liquide ou par des vapeurs humides.

La corrosion par voie sèche ; elle est généralement associée aux hautes températures, [3].

1.4.1. Corrosion Chimique (sèche) :

La corrosion chimique (sèche) est un processus de dégradation des matériaux métalliques qui se produit en l'absence de liquides ou d'humidité et haut température, se produisant généralement dans des environnements secs ou gazeux.

La corrosion chimique (sèche) est principalement due à des réactions chimiques directes entre le métal et les composés chimiques présents dans l'air ou dans l'environnement gazeux environnant. Ce processus peut conduire à la formation de composés indésirables tels que des oxydes, des sulfures ou des chlorures, ce qui entraîne une détérioration progressive des propriétés mécaniques et structurales du matériau métallique, [27].

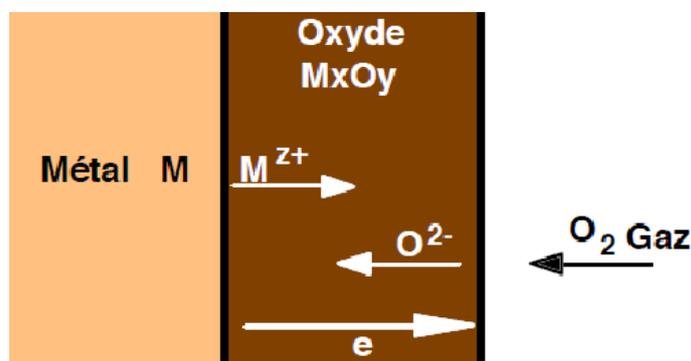


Figure 2-2 : Exemple de corrosion sèche (Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température), [29]

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

1.4.2. Corrosion électrochimique (humide) :

La corrosion électrochimique se produit lorsqu'il existe des hétérogénéités, soit dans le métal, soit dans la solution corrosive, [28].

La corrosion électrochimique (humide), prédominante dans divers milieux industriels liquides, induit la dégradation des structures métalliques en contact avec des environnements aqueux. Ces environnements, complexes du fait de la présence de diverses espèces chimiques dissoutes ou en suspension, comprennent notamment les sols humides et les gaz propices à la condensation d'eau. Le processus de corrosion humide se conforme à un schéma de pile électrochimique, requérant simultanément la présence d'une anode où se déroule la réaction d'oxydation entraînant une dissolution de cette partie sous forme de cations positif, une cathode où se produit la réduction d'espèces présentes dans l'électrolyte, un conducteur électrique assuré par le métal lui-même, et un conducteur ionique permettant la migration des ions pour maintenir la neutralité électrique et fermer le circuit électrique, souvent fourni par le milieu électrolytique lui-même, [30].

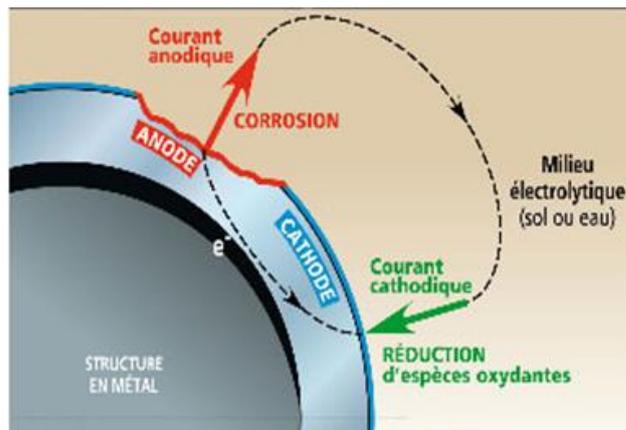


Figure 2-3 : Exemple de corrosion humide (Oxydation anodique de métal), [31].

1.5. Les Types de corrosion :

1.5.1. La morphologie de corrosion :

En prenant en considération la forme et les endroits de l'attaque, les principaux types de corrosion peuvent être catégorisés en deux grandes catégories : la corrosion généralisée (uniforme) et la corrosion localisée.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

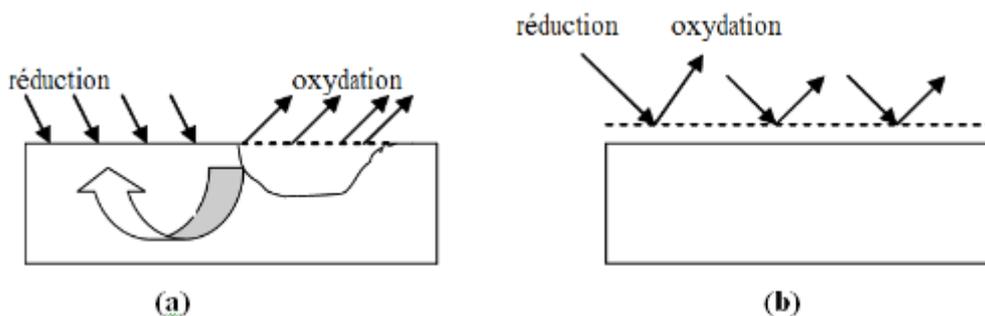


Figure 2-4 : (a) Corrosion localisée, (b) Corrosion uniforme, [29].

1.5.1.1. La corrosion généralisée (uniforme) :

La corrosion généralisée (uniforme) est la forme la plus simple de la corrosion et correspond à une attaque uniforme électrochimique ou chimique qui affecte toute la surface de métal ou de l'alliage exposée. Cette attaque conduit à une diminution de l'épaisseur de métal et cela peut aller jusqu'au percement de pièce, ce qui peut être extrêmement grave, [32].

Cette forme de corrosion se survient dans le cas d'un environnement homogène (absence de gradient de température, de pression ou de concentration le long de l'interface), distribution uniforme des agents corrosifs, les réactions chimiques qui se produisent à la surface du matériau sont généralement uniformes et dans le cas où il existe un équilibre dynamique entre la vitesse à laquelle le matériau se corrode et la vitesse à laquelle les produits de corrosion se forment, [30].

1.5.1.2. Corrosion localisée :

La corrosion localisée est un phénomène corrosif qui se produit dans des zones spécifiques d'une surface ou d'une structure métallique, différenciant ainsi de la corrosion uniforme par la distinction claire entre les zones anodiques et cathodiques.

Ce phénomène survient lorsque le matériau est exposé à un environnement qui présente un comportement sélectif. Cette sélectivité peut avoir des origines multiples tant au niveau du matériau (alliage hétéro phase, présence d'inclusions, ...) qu'au niveau de l'environnement (variation locale de composition, de pH ou de température) et si la progression des vitesses de corrosion est non homogène, [33]. Nous distinguons plusieurs types de corrosion localisée :

1) Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûres est caractérisée par une attaque très localisée en certains points de la surface et provoque des trous ou des piqûres irrégulières dont le diamètre et la profondeur varient suivant plusieurs paramètres propres au métal, au milieu et conditions de service. Elle est produite généralement par la présence d'anions agressifs notamment les halogénures et plus particulièrement les chlorures, sur des métaux protégés par des films d'oxyde très minces (aciers inoxydables, les alliages d'aluminium), [34]. Cette forme de corrosion comprend au moins deux

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

étapes, l'amorçage qui se produit lors de la rupture locale de la passivité et la croissance ou propagation, [30]

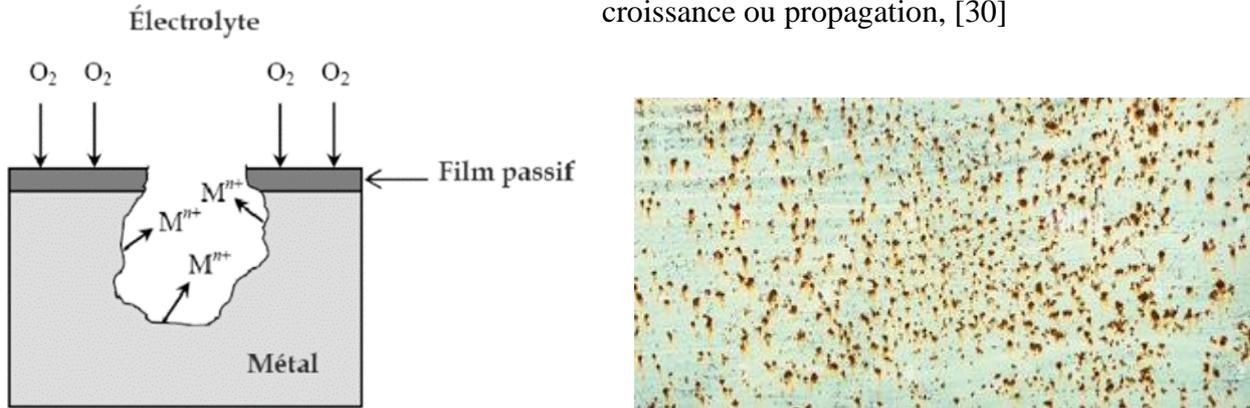


Figure 2-5 : Corrosion par piqûres, [35].

On distingue deux types de corrosion par piqûres, à savoir :

Les piqûres causées par les halogénures (généralement les piqûres de chlorure de l'acier inoxydable) et la corrosion par piqûres causée par l'attaque de l'oxygène (les piqûres de l'acier au carbone), [36].

2) Corrosion galvanique :

Dite aussi corrosion bimétallique, c'est une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. La corrosion galvanique est un processus électrochimique qui se produit lorsque deux métaux ou alliages différents, ayant des potentiels électrochimiques distincts, sont en contact physique dans la présence d'un électrolyte (une solution conductrice), [28].

Lorsque les deux métaux différents sont connectés dans un électrolyte, une cellule galvanique (ou pile électrochimique) est formée. Un métal agit comme anode (le réactif a une forte électronégativité ou le moins noble) et se corrode, tandis que l'autre métal sert de cathode (le réactif a une faible électronégativité ou le plus noble) et reste protégé de la corrosion. À l'anode, le métal se dissout dans l'électrolyte, libérant des électrons et formant des ions métalliques. Cette réaction entraîne la corrosion de l'anode, et ces électrons libérés par l'anode circulent à travers le contact métallique vers la cathode, où ils participent à une réaction cathodique, souvent la réduction des ions d'oxygène de l'air en eau ou la réduction d'ions hydrogène en hydrogène gazeux.

Le flux d'électrons du métal anodique vers le métal cathodique et le mouvement des ions dans l'électrolyte ferment le circuit électrique, permettant ainsi à la réaction de corrosion de se poursuivre, [37]

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

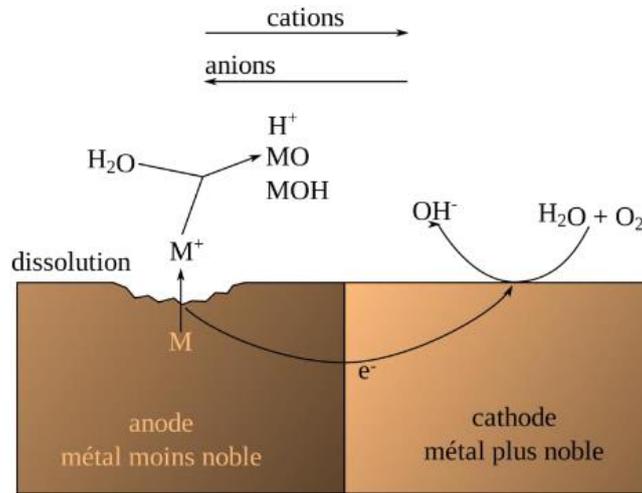


Figure 2-6 : Représentation schématique d'une pile galvanique, [37]

Plus la surface de la cathode est grande par rapport à l'anode plus la corrosion est rapide, c'est pourquoi il est dangereux de réaliser des assemblages avec des matériaux moins nobles que la structure, [38].

3) Corrosion intergranulaire :

Cette forme de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau. Ces joints de grains présentent des défauts de structure (lacunes, dislocation, ...), ce qui les rendent plus sensibles à la précipitation de phases intermétalliques ou de composés métalliques tels que les carbures, ainsi qu'à la ségrégation d'impuretés, ce qui rendent les joints de grains plus actifs chimiquement et plus susceptibles d'être attaqués dans un environnement corrosif.

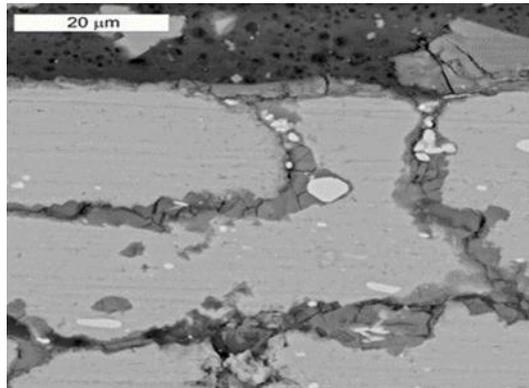


Figure 2-7 : Corrosion intergranulaire, [39].

Cette manifestation est pratiquement invisible à l'œil nu mais affecte considérablement la cohésion et les propriétés mécaniques du matériau. Ce type de corrosion est associé à la précipitation de carbures de chrome aux joints de grains qui conduit à un appauvrissement en chrome des zones alentour et les rendent plus sensibles à la corrosion.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Ce phénomène est généralement favorisé par un refroidissement lent pendant la fabrication ou les traitements thermiques, notamment dans les zones de fragilisation thermique, [30].

4) Corrosion-Érosion (Flow Accelerated Corrosion) FAC :

FAC signifie « Flow accelerated corrosion » ce qui pourrait se traduire par « corrosion induite par la turbulence ». On parle aussi « corrosion-érosion ».

Ce phénomène correspond à une dégradation de la surface sous l'effet de l'impact de particules, de gouttelettes, d'un jet, ou sous l'action d'un écoulement turbulent au voisinage d'un défaut de surface, et conduit à un amincissement local qui revêt souvent l'aspect d'une piqûre allongée, [28].



Figure 2-8 : Corrosion- Érosion dans le système d'eau, [40].

Même si l'érosion est plutôt une action mécanique. Ici, on est dans un phénomène chimique avec dissolution de la couche d'oxyde protectrice qui protège l'intérieur des tubes de la corrosion. La dissolution est accentuée par une augmentation de la turbulence, Sous l'effet de la vitesse, la turbulence du fluide dans les tubes de conduite augmente ce qui provoque la destruction du film protecteur (à l'intérieur des tubes) ce qui augmente les risques de corrosion du métal et la reconstruction de cette couche de passivation n'est pas assez rapide pour protéger le tube correctement, [19].

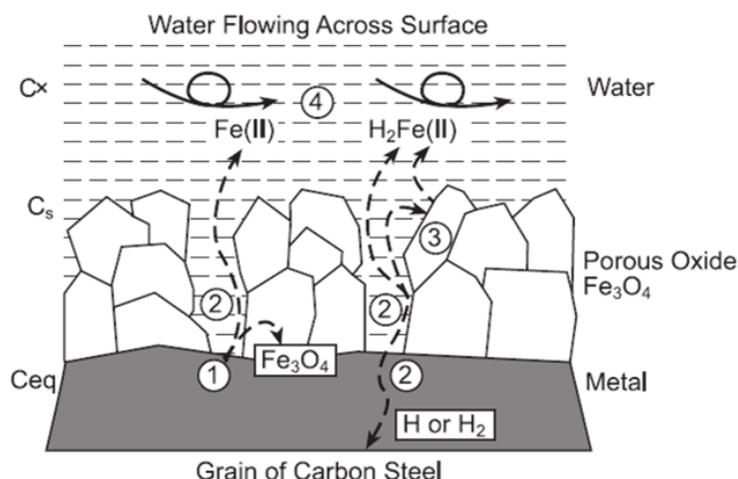


Figure 2-9 : Mécanisme de Corrosion- Érosion, [41].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Le signe indicateur de la présence de ce phénomène est l'augmentation de la concentration en fer en différents points de contrôle, et visuellement, la FAC a un aspect « grumeleux » ou « peau d'orange », [34].

5) Corrosion sous contrainte (CSC) :

La corrosion sous contrainte est une forme particulière de corrosion qui se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à rupture complète de la pièce, et qui se produit lorsqu'un matériau métallique est soumis à la fois à une contrainte mécanique et à un environnement corrosif, [42].

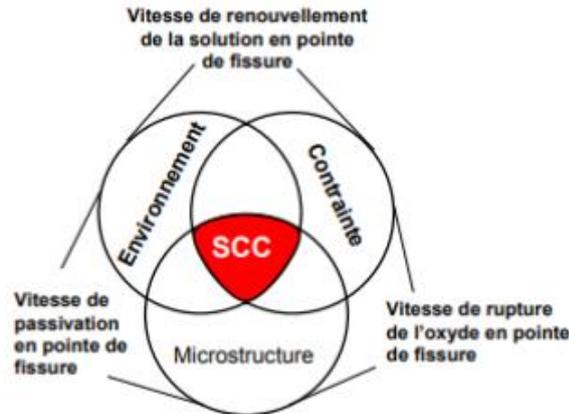


Figure 2-10 : Diagramme de Venn, représente les facteurs de CSC, [36].

Ce type de corrosion peut se manifester sous forme de fissures intergranulaires ou transgranulaire, généralement là où la contrainte est la plus élevée. Le processus début avec l'adsorption d'agents corrosifs, tels que les ions chlorure, sur la surface du métal. Ces agents chimiques, combinés à la présence de contraintes (tension, flexion, etc.), favorisent l'apparition de microfissures dans les régions les plus sollicitées du matériau. Avec le temps, sous l'effet incessant de l'attaque corrosive et de la contrainte appliquée, ces fissures débutantes s'étendent progressivement, s'approfondissent et se propagent à travers le matériau. Ce processus de propagation continue jusqu'à ce que la résistance du métal soit considérablement réduite, conduisant finalement à une rupture, [27].

6) Corrosion par crevasses (caverneuse) :

La corrosion caverneuse ou corrosion par crevasses est une forme de corrosion par aération différentielle (différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure) créant ainsi une pile électrochimique, [34]. C'est une forme courante de corrosion à laquelle les métaux actifs-passifs sont particulièrement sensibles.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

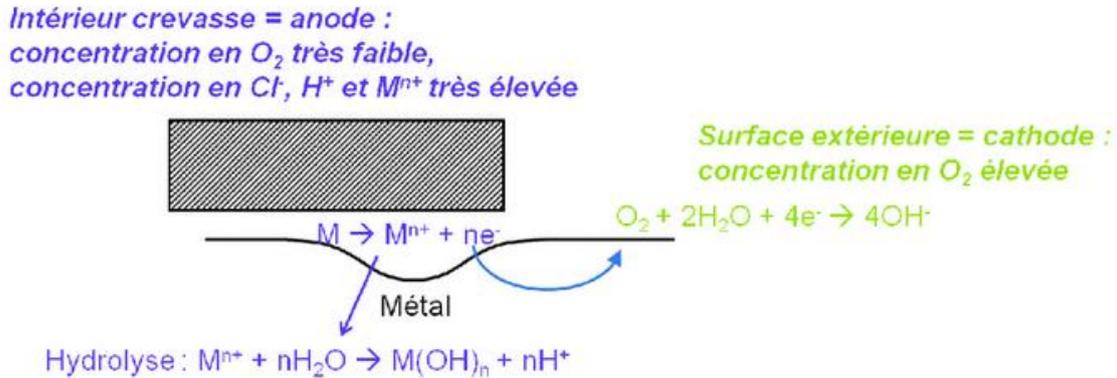


Figure 2-11 : Schéma des mécanismes de corrosion cavernueuse dans les milieux chlorurés, [43]

La corrosion cavernueuse est un processus similaire à la corrosion par piqûres, se produisant dans des cavités ou des crevasses du métal. Elle est déclenchée par la stagnation de petites quantités de solution corrosive dans ces zones, ce qui appauvrit l'oxygène et acidifie la solution. Lorsque le pH atteint un seuil critique, le film passif protecteur est détruit, accélérant la dissolution du métal dans la cavité. Ce processus est en grande partie causé par une modification locale du milieu corrosif, où l'oxydant diminue initialement par réduction, suivi d'une accumulation de produits de corrosion. Les anions migrent ensuite vers la crevasse pour maintenir la neutralité électrique, accélérant ainsi le processus de corrosion, [33].

7) Corrosion sous fatigue :

La fatigue-corrosion se distingue de la corrosion sous contrainte mécanique par le fait que les contraintes appliquées ne sont plus statiques mais cycliques, par exemple contraintes périodiques alternées, [25].



Figure 2-12 : Fissure de Corrosion fatigue, [44].

La corrosion sous fatigue est un processus dans lequel les matériaux subissent une détérioration due à la combinaison de la fatigue mécanique et de la corrosion. Tout commence par de petites fissures à la surface du matériau, généralement là où il y a des imperfections ou des points de concentration de contrainte. Ces fissures se propagent progressivement sous

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

l'effet des contraintes cycliques dues aux charges répétées. En même temps, si le matériau est exposé à un environnement corrosif, comme l'eau salée ou des produits chimiques, la corrosion peut fragiliser le matériau autour des fissures, accélérant ainsi leur propagation. Ce processus se répète continuellement, avec les fissures qui grandissent à chaque cycle de charge et de décharge, jusqu'à ce qu'elles atteignent une taille critique et conduisent à la défaillance de la structure ou du composant, [37].

1.6. Protection et lutte contre la corrosion :

La prévention de la corrosion doit être prise en compte dès la phase de conception d'une installation. En effet, l'application de mesures préventives à ce stade permet d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit d'assurer une durée de vie optimale à un équipement, en particulier dans le contexte industriel. Le choix des méthodes de protection doit être soigneusement examiné, donc les principaux procédés applicables à l'anticorrosion :

- L'isolation électrique du métal par un élément organique ou minéral (revêtement, peinture, etc.)
- Emploi d'alliage passivable (tels que les aciers inoxydables)
- L'action isolante par un métal plus noble (recouvrement du métal par un métal plus noble)
- Protection cathodique par anode sacrificielle ou la protection par courant imposé ou potentiel imposé
- Protection anodique qui s'applique aux métaux passivables, permet de déplacer le potentiel actif du métal (*E_{corr}*) dans le domaine passif. Le maintien d'une protection anodique ne nécessite donc que peu de courant
- L'action physico-chimique de substances dites inhibitrices, qui sont absorbées à la surface et la protègent du milieu, [45].

2. Compréhension de la corrosion dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur HRSG :

La corrosion au sein des générateurs de vapeur à récupération de chaleur représente un enjeu critique, affectant directement leur fiabilité et efficacité. En effet, ces systèmes, essentiels pour valoriser l'énergie thermique résiduelle des gaz d'échappement dans les installations de production d'énergie, sont vulnérables à divers types de dégradation corrosive. Cette vulnérabilité s'explique par l'exposition à des conditions opérationnelles complexes, incluant des variations de température, l'interaction avec des composants chimiques variés dans l'eau et les gaz, ainsi que l'usage de divers matériaux métalliques.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Dans les installations de cycle combiné équipées de générateurs de vapeur à récupération de chaleur (HRSG), deux circuits principaux, le circuit eau/vapeur et le circuit air/fumée, jouent un rôle crucial dans le fonctionnement et l'efficacité globale du système. Cependant, chacun de ces circuits est susceptible d'être affecté par la corrosion, un phénomène dégradant qui peut compromettre la performance et la durabilité des équipements.

La corrosion dans le circuit eau/vapeur est principalement due aux interactions chimiques entre l'eau ou la vapeur et les matériaux des composants, tandis que dans le circuit air/fumée, elle résulte souvent de l'exposition à des gaz d'échappement chauds et à des composés corrosifs, [15].

2.1. La corrosion de circuit eau/ vapeur :

2.1.1. Corrosion par l'oxygène :

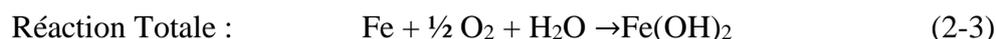
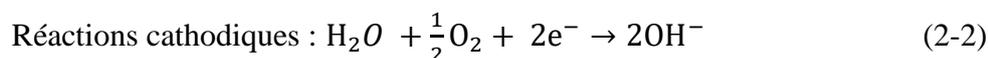
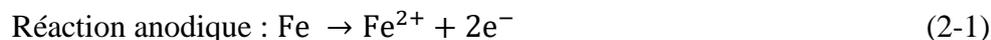
La présence de l'oxygène dans l'eau de générateur de vapeur, même à faible quantité, provoque une corrosion de surface sous forme de piqûres hémisphérique. La corrosion par l'oxygène dissous est une menace constante pour les économiseurs et les tubes écrans ; généralement, les dégâts les plus importants surviennent à l'entrée de l'économiseur et aux soudures des tubes

La réaction d'oxydation peut être activée suivant deux processus principaux



Figure 2-13 : Attaque par Oxygène, [46]

a) Mécanisme électrochimique :



Dans cette réaction, une augmentation de la température fournit assez d'énergie pour accélérer les réactions à la surface du métal, entraînant une corrosion rapide et importante tel que le taux de corrosion double avec chaque augmentation de 10 °C de la température de l'eau

b) Aération différentielle :

Une différence de concentration en oxygène sur la surface du métal engendre une pile : les parties propres, où l'oxygène a facilement accès, se comportent comme cathodes, les parties

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

recouvertes de dépôt se comportent comme anodes et il se forme une ou plusieurs pustules de corrosion. La corrosion est localisée et se traduit généralement par formation de piqûres sur le métal, [45].

Donc Un mauvais contrôle de l'oxygène engendrera une corrosion par piqûres qui peuvent rapidement « creuser » les surfaces métalliques. Ces sites affaiblis peuvent créer des éclatements dans les réchauffeurs et les économiseurs.

Le niveau acceptable d'oxygène dissous pour tous les systèmes dépend de nombreux facteurs, tels que :

Les Facteurs	
La température	Les températures élevées peuvent accélérer les réactions chimiques impliquées dans la corrosion et aggraver les dommages causés par les piqûres.
pH	Un pH bas (acide) favorise la corrosion en augmentant la réactivité des métaux avec les composants de l'eau, ce qui peut conduire à une augmentation du nombre et de la taille des piqûres.
Débit	Les zones où l'écoulement d'eau est réduit ou stagnant sont plus susceptibles de favoriser la corrosion par piqûres, car l'eau stagne, permettant ainsi une accumulation de contaminants corrosifs.
Teneur en solides dissous	Les solides dissous dans l'eau peuvent agir comme des catalyseurs ou accélérateurs de corrosion, augmentant ainsi le taux de formation de piqûres.

Tableau 2-2 : Les Facteurs de corrosion par l'oxygène, [45].

La Prévention :

- Sélectionner des matériaux résistants / Limiter les halogènes
- Contrôler l'oxygène / Contrôler le pH
- Réduire la température/ Éviter les zones stagnantes, [46].

2.1.2. Corrosion galvanique :

Ce type de corrosion galvanique le plus courant dans les systèmes de générateurs de vapeur résulte de la présence de cuivre sur le parcours de l'eau. Les ions Cu^{2+} à des teneurs inférieures au mg/l peuvent provoquer une accélération considérable de la corrosion par

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

électrodéposition de cuivre. Cette corrosion peut également se produire du fait de la différence de composition d'un même métal ou du-fait de soudure ayant transformé le métal, [47].

La Prévention	Sélectionner des métaux très près les uns des autres dans l'échelle galvanique
	Eviter de présenter une petite surface anodique en regard d'une grande surface cathodique.
	Isoler deux métaux dissemblables
	Mettre en place des parties anodiques facilement remplaçables ou les concevoir plus épaisses pour assurer une plus grande durée de vie
	Installer une électrode qui sera anodique par rapport aux deux autres métaux
	Utiliser des inhibiteurs.

Tableau 2-3 : La prévention de corrosion galvanique, [30].

2.1.3. Corrosion caustique :

La présence d'un dépôt de produits de corrosion et de soude sur la surface métallique entraîne la corrosion caustique qui apparaît quand la teneur en NaOH est trop élevée.

La concentration caustique, peut résulter d'un phénomène d'étouffement de la vapeur, favorisant l'accumulation de sels sur les surfaces métalliques des chaudières, ou de l'ébullition localisée sous des dépôts poreux présents sur les parois des tuyauteries.

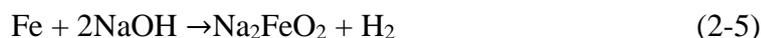


Figure 2-14 : Corrosion caustique, [46]

Ces caustiques, une fois concentrés, ont la capacité de dissoudre la couche protectrice de magnétite (Fe_3O_4), [21] selon la réaction suivante :



En formant de l'hypoferrite de sodium Na_2FeO_2 , et de la ferrite de sodium $NaFeO_2$ qui sont solubles dans NaOH concentré. De plus, les alcalins concentrés réagissent directement et plus rapidement avec le fer pour former de l'hydrogène et du ferrate de sodium.



Ce genre de réaction joue un rôle important dans le phénomène de corrosion par piqûres et la formation de trous dans les tubes de générateur de vapeur, et contribue à créer des vitesses excessives de corrosion du fer aux valeurs élevées du pH (environ pH=13), [47].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Cette forme de corrosion se produit principalement dans les zones suivantes :

- Emplacements des tubes d'évaporateur sous d'épais dépôts.
- Tubes situés dans des zones de flux de chaleur élevé.
- Tubes inclinés ou horizontaux.
- Sections avec un faible débit ou des perturbations du flux.

La prévention :

- Réduire la présence de NaOH libre :
 - Éviter les fuites accidentelles de produits chimiques de traitement de l'eau caustique et des produits de régénération du polisseur.
 - Éviter les surdosages en cas d'utilisation de traitement au phosphate.
- Prévenir les fuites du condenseur :
 - Arrêter son fonctionnement en cas de fuite.
- Maintenir la propreté de la chaudière :
 - Effectuer un nettoyage chimique lorsque nécessaire, [46].

2.1.4. Corrosion-Érosion (Flow Accelerated Corrosion) FAC :

La corrosion accélérée par l'écoulement (FAC) est un processus de corrosion chimique qui entraîne une perte de matière dans les tuyauteries.

La FAC est causée par la dissolution de la couche d'oxyde à la surface interne des tuyauteries en contact avec de l'eau en circulation ou de la vapeur humide. Ce phénomène affecte principalement l'acier au carbone ou les aciers faiblement alliés. L'épaisseur de la paroi des tuyaux peut progressivement diminuer jusqu'à atteindre le point de rupture.



Figure 2-15 : Corrosion- Érosion, [46]

La FAC est généralement associée à la turbulence, en particulier près des raccords tels que les coudes, les orifices et les vannes, [48]. Selon les experts, plus de la moitié des unités à cycle combiné sont confrontées à la FAC dans leur chaudière de récupération. Ce phénomène se produit principalement au niveau du circuit basse Pression : évaporateur et économiseur BP, du ballon BP. Quelques soucis ont été recensés au niveau des économiseur MP et HP (parties en épingle des tubes des collecteurs d'entrée), des conduites autour de la pompe alimentaire,

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

à l'entrée dégazeur, sur la ligne de désurchauffe, au niveau du système séparatif dans le ballon..., [28].

Variables Principales Impactant la FAC :

1. Compositions des matériaux :

Chrome : L'augmentation de la teneur en chrome tend à former une couche d'oxyde plus stable et protectrice à la surface du métal, ce qui réduit la vitesse de corrosion. Ainsi, une concentration plus élevée en chrome dans l'acier conduit généralement à une diminution du taux de FAC.

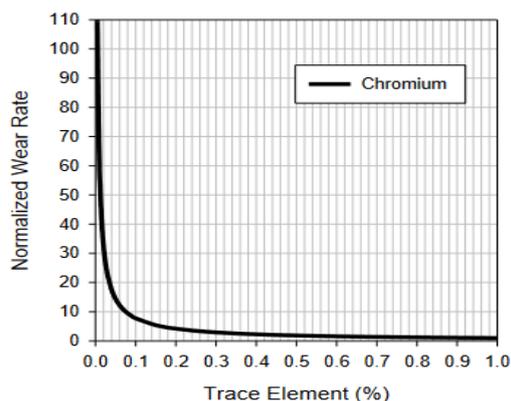


Figure 2-16 : Effet de Cr sur la FAC, [46].

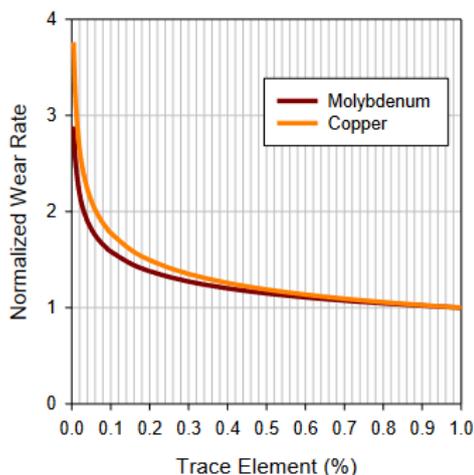


Figure 2-17 : Effet de Cu et Mo sur la FAC, [46]

Cuivre : Le cuivre a des propriétés de passivation similaires au chrome, formant une couche protectrice à la surface du métal qui réduit la corrosion. Par conséquent, une augmentation de la teneur en cuivre a tendance à diminuer le taux de FAC, mais on ne peut pas utiliser le cuivre dans les générateurs de vapeur à cause des réactions chimiques complexes qui peuvent se produire à des températures et des pressions élevées, en présence d'oxygène comme CuO_n et d'autres composés chimiques présents dans l'environnement de génération de vapeur.

Molybdène : Contrairement au chrome et au cuivre, le molybdène peut favoriser la corrosion en accélérant les réactions électrochimiques dans certaines conditions. Ainsi, une concentration accrue de molybdène peut augmenter le taux de corrosion, y compris la FAC.

Selon les experts on peut généraliser l'effet de la composition de matériaux selon la relation suivante (Figure 2-18), [49] :

$$\frac{\text{FAC rate}}{\text{Reference FAC rate}} = \frac{1}{83[\text{Cr}]^{10,89} [\text{Cu}]^{10,25} [\text{Mo}]^{10,20}}$$

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

2. Chimie de l'eau :

- Le pH :

L'effet du pH sur la corrosion-érosion est directement lié à son effet sur la solubilité de la couche d'oxyde, formée de magnétite, et l'hématite

Lorsque le pH de l'eau est élevé, cela signifie qu'il y a une concentration accrue d'ions hydroxyde (OH^-). Ces ions hydroxyde réagissent avec les ions métalliques à la surface du métal pour former une couche d'oxyde. Cette couche d'oxyde est généralement moins soluble dans l'eau à des pH élevés, ce qui la rend plus protectrice contre la corrosion.

En revanche, lorsque le pH de l'eau est bas, il y a une concentration accrue d'ions hydronium (H_3O^+). Ces ions hydroniums peuvent dissoudre partiellement ou totalement la couche d'oxyde formée à la surface du métal, ce qui rend le film d'oxyde plus soluble dans l'eau. Cela peut affaiblir la protection contre la corrosion et accélérer le processus de corrosion, [49]

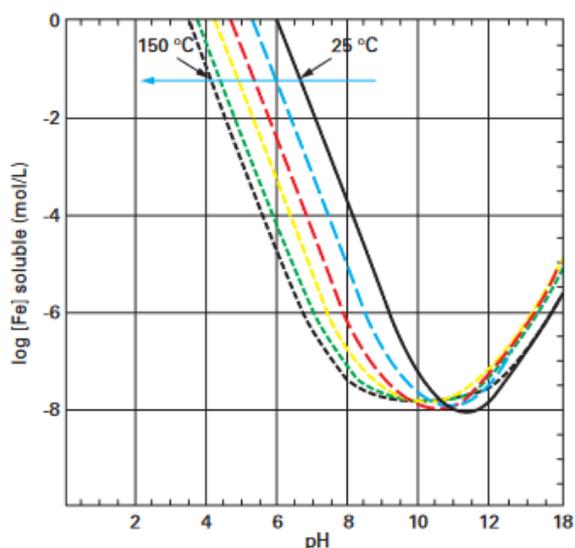


Figure 2-19 : Effet du pH sur la solubilité de la magnétite entre 25 et 150 °C

La variation de la solubilité de la magnétite en fonction du pH suit une courbe en « U ». À partir d'une certaine valeur de pH, des hydroxydes de fer solubles sont susceptibles de se former, ce qui se traduit par une augmentation de la solubilité. Dans la pratique la solubilité de l'oxyde est d'autant plus faible que le pH à chaud est élevé.

L'augmentation du pH entraîne donc une diminution de la vitesse de corrosion-érosion. La valeur optimale du pH permettant de limiter au maximum la corrosion-érosion correspond au minimum de la courbe. Cette valeur est proche de 11 à 25 °C et comprise entre 8 et 12 à 150 °C

Lorsque nous parlons de fournir la meilleure protection contre la FAC, nous voulons maintenir le pH de l'eau aussi élevé que possible. Un pH élevé crée des conditions dans lesquelles une couche d'oxyde protectrice peut se former plus efficacement à la surface du métal, réduisant ainsi le risque de corrosion.

Pour maintenir le pH de l'eau à un niveau élevé, différents réactifs peuvent être utilisés. Dans ce cas, plusieurs réactifs couramment utilisés sont mentionnés : l'ammoniaque, la morpholine, le phosphate, l'hydrazine et l'éthanolamine. Ces substances sont ajoutées à l'eau pour ajuster et maintenir le pH à un niveau optimal, ce qui favorise la formation de la couche d'oxyde protectrice et aide à prévenir la corrosion dans les systèmes de tuyauterie, [50].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

- **Concentration en O₂ :**

La concentration en oxygène dans l'eau a un impact direct sur la formation et la stabilité de la couche d'oxyde en surface, et par conséquent, sur le taux de FAC.

- L'oxygène dissous dans l'eau réagit avec le métal pour former une couche d'oxyde protectrice à la surface du métal. Cette réaction d'oxydation est essentielle pour créer une barrière entre le métal et l'environnement, ce qui réduit la corrosion.
- Des niveaux d'oxygène plus élevés augmentent la stabilité de la couche d'oxyde en surface, ce qui réduit le taux de corrosion accélérée par l'écoulement (FAC), [48].

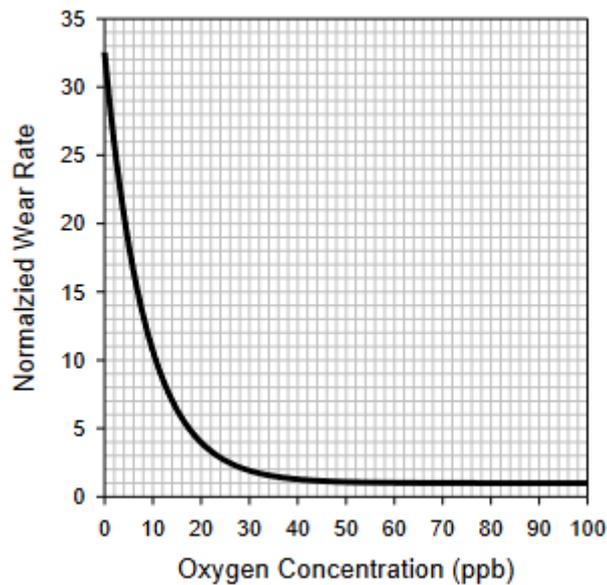


Figure 2-20 : Effet de concentration d'O₂ sur la FAC, [46]

- **Température :**

À des températures plus élevées, les réactions chimiques qui conduisent à la formation de la couche d'oxyde peuvent se produire plus rapidement (la température augmente essentiellement la probabilité de succès des collisions entre les molécules réactives, ce qui conduit à une augmentation de la vitesse des réactions chimiques). Les molécules ont plus d'énergie thermique à des températures élevées, ce qui accélère les réactions de formation de l'oxyde et les ions peuvent diffuser plus rapidement, ce qui favorise la croissance de cette couche d'oxyde.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

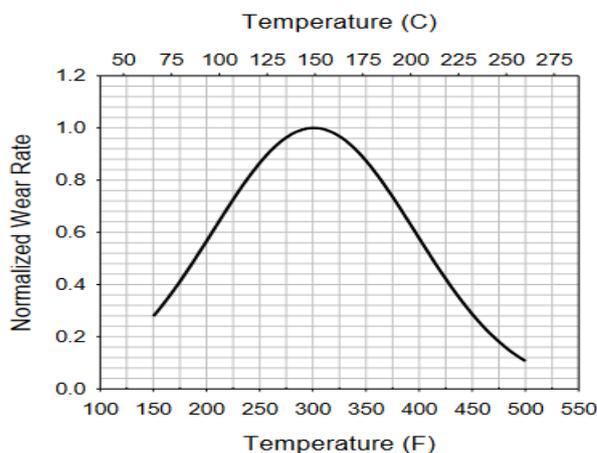


Figure 2-21 : Effet de température sur la FAC, [46].

• Géométrie et qualité de la vapeur :

Une vitesse d'écoulement plus élevée crée généralement une force mécanique qui provoque une turbulence plus importante dans le fluide. Les zones de turbulence peuvent perturber la couche d'oxyde protectrice, favorisant ainsi la corrosion en exposant le métal à des conditions corrosives plus directes.

Les transitions dans la géométrie, comme aux coudes, orifices, vannes et autres changements de direction du flux créent de la turbulence et augmentent la susceptibilité à la FAC. Lorsque le fluide rencontre ces changements de direction ou d'obstacles, il subit des variations de vitesse et de pression.

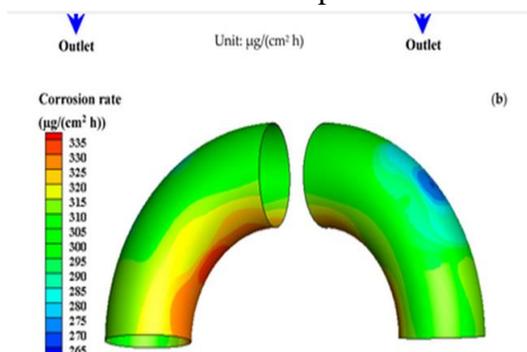


Figure 2-22 : Contours du taux de corrosion total après l'essai E-C, [51]

Cela entraîne la formation de tourbillons, de remous et d'autres mouvements turbulents dans le flux, ce qui perturbe la régularité du flux et crée de la turbulence. Cette turbulence peut ensuite agir sur la surface métallique, perturbant la couche protectrice d'oxyde et augmentant ainsi la susceptibilité à la corrosion accélérée par l'écoulement (FAC).

Les flux à la fois monophasiques (uniquement une phase, comme le liquide ou la vapeur) et diphasiques (deux phases, telles que la présence simultanée de liquide et de vapeur) peuvent provoquer la FAC, car les changements de phase peuvent entraîner une cavitation et des fluctuations de pression, ce qui peut augmenter l'érosion des surfaces métalliques exposées.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Méthodes pour atténuer les dommages causés par la FAC :

- Utiliser des matériaux améliorés (T_{11} , T_{22} , T_{91})
- Apporter des modifications à la conception du système
- Améliorer la chimie de l'eau

2.1.5. Fragilisation par l'hydrogène :

La réduction cathodique des ions H_3O^+ sur la surface du métal se traduit par une production d'atomes d'hydrogène H^* adsorbé sur cette surface. Ces atomes peuvent pénétrer dans le métal et précipiter sous forme de bulles gazeuses microscopiques sous très haute pression. La pression de ces microbulles peut alors être telle qu'elle fait éclater localement le métal, créant ainsi une fissure remplie de gaz. Les réactions se produisant avec la soude sont les suivantes :

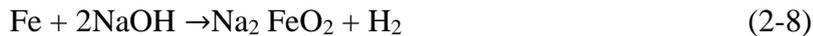
D'abord, la magnétite est dissoute par la soude :



- Puis l'eau attaque le fer :



- et



La corrosion produisant l'hydrogène s'initie sous un dépôt de tartre dur et dense à la surface du tube, l'hydrogène peut alors se concentrer sous le dépôt et pénétrer dans le métal. Un excès d'hydrazine dans l'eau peut conduire également à la formation d'hydrogène :



2.1.6. Corrosion Sous Contrainte (CSC) :

La fissuration par corrosion sous contrainte (CSC) est un type de dégradation des matériaux métalliques causé par l'interaction simultanée d'une contrainte de traction et d'un environnement corrosif. Contrairement à d'autres modes de défaillance, la CSC nécessite la présence conjointe de ces deux facteurs pour se produire. Elle se caractérise par la formation de fines fissures à travers le matériau, pouvant se propager de manière transgranulaire ou intergranulaire, [46].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur, la CSC peut se produire dans les zones où la température est élevée et où des dépôts corrosifs peuvent s'accumuler, ainsi que dans les zones soumises à des contraintes mécaniques telles que les zones de flexion ou de vibration.

Les surfaces internes des tubes de la chaudière et les pièces adjacentes, en particulier dans les zones où la température est élevée et où des contaminants corrosifs peuvent être présents, sont souvent des endroits critiques où la CSC peut se développer. En outre, les zones où des contraintes résiduelles peuvent être induites lors de la fabrication ou de l'exploitation du générateur de vapeur sont également des sites potentiels de fissuration par corrosion sous contrainte, [47].

Les facteurs de la corrosion sous contrainte :

- **Effets de contraintes :**

Les contraintes ont diverses origines (mécanique, tension résiduelle, soudage, charge appliquée, pression de service élevée...), favorise l'ouverture des microfissures déjà présentes ou l'initiation de nouvelles fissures. Cela est dû à la réduction de la résistance mécanique du matériau dans des conditions corrosives.

- **Effet du temps :**

La vitesse de propagation des fissures augmente avec le temps. Cela peut être dû à divers facteurs, tels que la croissance continue des microfissures existantes, l'accumulation de dommages causés par la corrosion, et la réduction progressive de la résistance du matériau due à l'environnement corrosif.

- **Environnements agressifs :**

L'environnement agressif peut aggraver la fissuration par corrosion sous contrainte en accélérant la propagation des fissures, en favorisant l'initiation précoce de fissures, en augmentant la sensibilité aux contraintes résiduelles et en favorisant la formation de produits de corrosion sous contrainte.

Le tableau ci-après indique pour quelques métaux les environnements susceptibles de créer une corrosion sous contrainte :

Acier au carbone	H ₂ S humide, soude, solutions de cyanures (HCN), nitrates en solution, CO ₃ ²⁻ / HCO ₃ ⁻ à pH compris entre 8.5 et 11
Aciers Inox	Chlorures, bromures, soude, potasse, eau de mer.
Laiton	Ions ammonium (NH ⁴⁺), Hg

Tableau 2-4 : Quelques métaux les environnements susceptibles de créer une corrosion sous contrainte, [30]

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Prévention de la corrosion sous contrainte

- Sélection appropriée des matériaux
- Réduction des contraintes de traction
- Contrôle de la chimie de l'eau, [46]

2.1.7. Corrosion Sous Calorifuge :

La corrosion sous calorifuge, ou CUI (Corrosion Under Insulation) est le résultat d'une réaction électrochimique entre un métal non-protégé, de l'eau et de l'oxygène. Ce type de



corrosion qui se produit sous l'isolant thermique utilisé pour protéger les surfaces métalliques contre la chaleur ou le froid. L'isolant thermique, également appelé calorifuge, est souvent utilisé pour protéger les tuyaux contre les variations de température, pour préserver la chaleur du fluide (isolation chaude), et pour éviter la formation de condensation (isolation chaude/froide)

Figure 2-23 : Corrosion sous l'isolation, [52].

La corrosion sous calorifuge peut se produire lorsque de l'humidité est piégée sous l'isolant thermique, créant un environnement favorable à la corrosion des surfaces métalliques. Les causes typiques de cette humidité peuvent inclure des fuites, des conditions météorologiques défavorables ou une mauvaise installation de l'isolant.

Le mécanisme de corrosion s'avère classique, la corrosion sur les aciers au carbone et faiblement alliés est une corrosion généralisée. Sur les aciers inoxydables, ce sont des corrosions localisées et/ou des fissures que l'on peut constater, les autres métaux et alliages sont plus rarement calorifugés et la corrosion y prend des formes diverses, [52].

Facteurs de corrosion sous calorifuge :

- **Présence d'eau liquide sous le système d'isolation :**

La condition préalable indispensable pour que la corrosion sous calorifuge se produise est la présence d'eau liquide en contact avec la surface métallique, sur une durée suffisante pour que les effets de la corrosion se manifestent. L'arrivée d'eau liquide au contact des parois métalliques calorifugées requiert généralement un défaut d'étanchéité du système d'isolation.

L'eau peut aussi arriver sous le système d'isolation à l'état gazeux et se condenser sous le calorifuge si la température est inférieure au point de rosée.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

- **Environnement corrosif :**

Bien que moins présents, les oxydes d'azote et d'autres polluants résiduels de la combustion du gaz naturel peuvent réagir avec l'humidité pour former des acides faibles. Ces acides peuvent ensuite accélérer le processus de corrosion en créant un environnement acide sur la surface métallique. Les chlorures et sulfates présents aussi dans l'environnement même en faibles quantités (par exemple, à partir des embruns marins dans les installations côtières) peuvent être concentrés par le processus de condensation et d'évaporation sous le calorifuge, exacerbant la corrosion, en particulier la corrosion par piqûres.

- **Température :**

La température joue un rôle crucial dans la corrosion sous calorifuge dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur, principalement par la gestion de la condensation et l'accélération des réactions chimiques. Des variations de température, en particulier celles inférieures au point de rosée, favorisent la condensation de l'humidité sur les surfaces métalliques, créant un milieu propice à la corrosion électrochimique. En parallèle, les températures élevées accélèrent les réactions de corrosion, et les cycles thermiques répétés peuvent induire des contraintes mécaniques, menant à des microfissures qui facilitent l'intrusion d'agents corrosifs. De plus, l'évaporation d'eau à haute température peut concentrer les sels et autres substances corrosives, exacerbant la corrosion. Ainsi, une gestion attentive de la température et de l'humidité est essentielle pour minimiser les risques de corrosion sous calorifuge dans ces systèmes, [53].

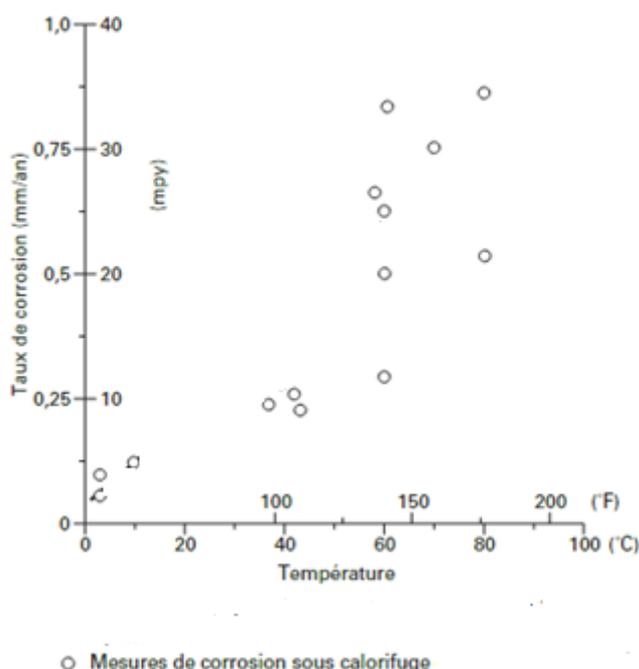


Figure 2-24 : Effet de température sur le taux de corrosion calorifuge, [53].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Aussi, sous calorifuge, l'oxygène dissous qui dégaze par augmentation de température n'est pas évacué en raison du confinement et de l'absence de renouvellement naturel de la phase gazeuse. Le milieu y est ainsi plus corrosif que le milieu ouvert, qui se traduit par une augmentation continue de la vitesse de corrosion avec la température

La prévention de la corrosion sous calorifuge dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur nécessite une approche holistique qui prend en compte plusieurs aspects, y compris :

- **Choix de matériaux :**

Pour des nouvelles installations, le choix des matériaux peut jouer un rôle important dans la prévention de la corrosion sous calorifuge, en optant pour des matériaux résistants à la corrosion et alors les nuances inoxydables peuvent souvent être préférées aux nuances non alliées en raison de leur meilleure résistance à la corrosion. Ce choix nécessite de considérer un très large ensemble de paramètres, incluant les coûts de réparation et de réfection des systèmes de peinture, l'accessibilité des équipements pour les opérations d'inspection et de maintenance... Par conséquent, dans de grandes installations, l'utilisation de l'acier inoxydable peut être évitée pour ces raisons.

Donc les matériaux doivent être sélectionnés en fonction des conditions de fonctionnement spécifiques, notamment la température, la pression, la composition chimique de l'eau et la présence de contaminants tels que les chlorures et il est important de choisir des matériaux compatibles avec les revêtements protecteurs et les systèmes d'isolation pour assurer une protection globale contre la corrosion. En outre, l'aspect économique joue un rôle important dans le choix des matériaux. Cela implique d'évaluer les coûts initiaux, mais aussi les coûts de maintenance et de réparation à long terme, [53].

- **Revêtements protecteurs :**

Pour certains matériaux métalliques considérés, le premier mode de prévention consiste à isoler la surface métallique du contact direct avec l'eau. Par conséquent, un revêtement est souvent appliqué sur les surfaces métalliques sous le calorifuge, [53].

L'application de revêtements protecteurs (les peintures organiques, le Thermal Spray Coating (revêtement métallique aluminium) ou TSA, les feuillards d'aluminium, le zinc) sur les surfaces métalliques exposées est une mesure essentielle pour prévenir la corrosion.

Le revêtement le plus classique consiste en des peintures essentiellement organiques et métallique comme les revêtements à base de zinc. Chaque système de peinture nécessite une préparation spécifique de la surface avant l'application des couches primaire et secondaire pour établir une barrière efficace sur la surface de l'infrastructure. Cette méthode de protection offre plusieurs avantages, tels que la facilité d'application par une main-d'œuvre relativement

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

disponible et à un coût modéré, avec une durée de vie de la protection estimée entre 10 et 15 ans. De plus, ces revêtements doivent passer des tests de qualification standardisés pour prouver leur efficacité dans diverses conditions, comme l'immersion en eau chaude.

Ces revêtements agissent comme une barrière physique contre l'humidité et les agents corrosifs, protégeant ainsi les matériaux de base des dommages. Il est crucial d'utiliser des revêtements spécifiquement conçus pour résister aux températures élevées rencontrées dans les générateurs de vapeur, afin de garantir leur efficacité dans des conditions de fonctionnement extrêmes. De plus, il est important de sélectionner des revêtements compatibles avec les matériaux de base et capables de résister aux conditions environnementales spécifiques, telles que la présence de produits chimiques corrosifs ou de températures variables. En prenant en compte ces facteurs, on peut assurer une protection optimale des surfaces métalliques et prolonger la durée de vie des équipements.

- **Choix et conception du système d'isolation :**

Le système d'isolation thermique dans le cas idéal comporte 3 parties : le revêtement anticorrosion appliqué directement sur l'ouvrage (canalisation ou autre), l'isolant thermique et la barrière extérieure, également appelée jacketing.

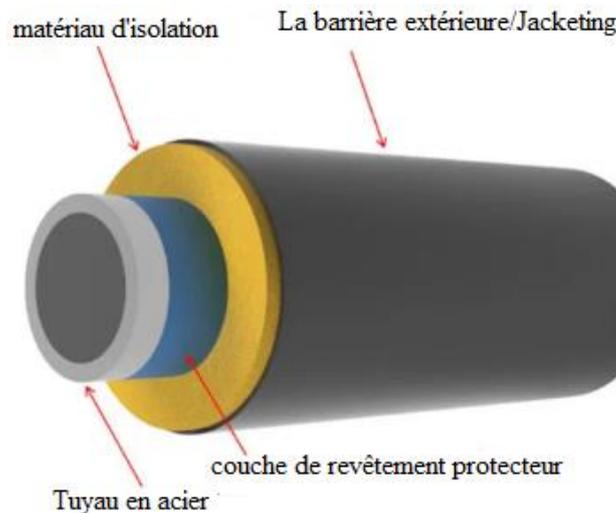


Figure 2-25 : Schéma d'un tuyau isolé typique, [54].

Cependant, il est à noter qu'à la centrale de Hadjret-Ennous, l'utilisation du revêtement anticorrosion semble être limitée en raison des considérations liées au réseau de cout. Cela signifie que le système d'isolation thermique utilisé à cette centrale se compose principalement de l'isolant thermique et de la barrière extérieure, sans la couche de revêtement anticorrosion.

Le choix des composants d'isolation répond avant tout à des critères fonctionnels, et en premier lieu à l'atteinte des performances visées d'isolation thermique. Le choix du type

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

d'isolant (laine de roche, isolant fibreux organique ou minéral, polymère, matériau cellulaire...) est ainsi dicté par ces objectifs de performance et de coût. La laine de roche est la plus utilisée, est un matériau isolant fibreux qui peut laisser passer l'eau. Cependant, elle est facile à appliquer, très flexible et peu coûteuse. En tant qu'isolant, elle est principalement utilisée dans des applications où les températures peuvent atteindre jusqu'à 500 degrés.

Un système d'isolation efficace joue un rôle crucial en réduisant les variations de température et en limitant la condensation d'eau sous le calorifuge. Lors du choix des matériaux d'isolation, il est essentiel de tenir compte de leur résistance à l'humidité et de leur capacité à maintenir leurs propriétés d'isolation thermique même dans des conditions humides. De plus, la conception du système doit permettre un drainage adéquat de l'eau pour éviter toute accumulation d'humidité sous le calorifuge, ce qui pourrait favoriser la corrosion.

Les joints et les raccords du système d'isolation doivent également être soigneusement conçus et installés pour assurer une étanchéité efficace et pour prévenir tout point d'entrée potentiel pour l'humidité, [52].

Méthodologies d'inspection et de contrôle pour détecter la corrosion sous calorifuge :

La corrosion sous calorifuge affecte grandement l'intégrité structurelle, entraînant des défaillances structurelles et, éventuellement, des accidents mortels. Les stratégies utilisées pour détecter la corrosion sous calorifuge (CUI) comprennent principalement les méthodes de test non destructif (CND) qui permettent d'identifier la présence de corrosion sans endommager l'équipement. Les méthodes de test non destructif (CND) sont largement utilisées pour éviter les arrêts désagréables et les défaillances structurelles.

a) Inspection Visuelle :

L'inspection visuelle est la technique d'inspection la plus courante et la plus utile pour la corrosion sous calorifuge (CUI), impliquant le retrait du matériau d'isolation des zones présentant une forte probabilité de corrosion afin de vérifier l'état de surface du métal. Lorsque la CUI est détectée sur une surface métallique, elle doit être immédiatement traitée en enquêtant sur les causes profondes et en prenant des mesures appropriées pour l'arrêter. Avant de remplacer l'isolation, il est fortement recommandé de nettoyer et de retirer les produits de corrosion afin de créer un bon profil de surface pour garantir une excellente adhérence entre le revêtement et la surface métallique. L'inspection visuelle est la méthode la plus coûteuse en termes de coût et prend beaucoup de temps car c'est la seule technique de CND qui nécessite le retrait du matériau d'isolation, [55].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

b) La rétrodiffusion neutronique :

La rétrodiffusion neutronique est une technique non destructive qui identifie la présence d'humidité à l'intérieur de l'isolation, un estimateur indirect du risque de corrosion sous calorifuge (CUI). Le fonctionnement de la technique de rétrodiffusion neutronique est basé sur une collision entre des neutrons de haute énergie et les noyaux du matériau spécifié (par exemple, la surface du tuyau en acier au carbone). Ces neutrons rebondiront après une collision et seront collectés par un détecteur. Il y a une perte d'énergie élevée lorsque les neutrons interagissent avec des atomes légers, tels que les noyaux d'hydrogène présents dans l'eau. La rétrodiffusion neutronique est particulièrement sensible pour détecter la présence d'eau et la quantité d'eau à l'intérieur de l'isolation, et donc, la probabilité subséquente de corrosion sous calorifuge. L'équipement peut généralement accéder aux zones congestionnées et est facile à utiliser, [54].

c) Le courant de Foucault pulsé :

Le courant de Foucault pulsé est une méthode utilisée pour déterminer l'épaisseur des parois des tuyaux, des réservoirs et des conducteurs électriques en distinguant les variations des signaux électromagnétiques. Pour ce faire, une sonde contenant une bobine émettrice est placée sur la structure isolée. Lorsque le courant électrique dans la bobine émettrice est coupé, cela provoque une chute soudaine du champ magnétique, générant ainsi des courants de Foucault qui peuvent être surveillés par la sonde. La diffusion de ces courants à travers les structures varie en fonction de leur épaisseur : plus la paroi du tuyau est épaisse, plus il faut de temps pour qu'un courant de Foucault décroisse à zéro. Ces variations sont utilisées pour évaluer la gravité de la corrosion sous calorifuge et prendre des mesures anti-corrosion appropriées, [55].

Le courant de Foucault pulsé intègre des capteurs de bobines et des capteurs de champ magnétique pour localiser la corrosion sous calorifuge, comme illustré schématiquement dans la Figure 2-26 :

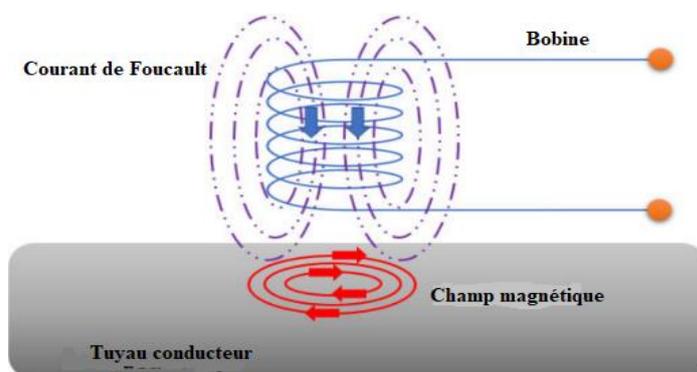


Figure 2-26 : Schéma du courant de Foucault utilisé pour inspecter la présence de corrosion sous l'isolant sur un tuyau en acier conducteur, [54].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

d) Radiographie aux rayons X :

L'un des avantages de cette technique est que la détection de la CUI peut être réalisée de différentes manières.

▪ Radiographie calculée :

Le principe de cette méthode est très similaire à la radiographie conventionnelle. Cependant, elle n'utilise pas de film pour créer l'image ; à la place, elle utilise une plaque d'imagerie composée de phosphore photostimulable. Une cassette peut être placée sous le tuyau ou le récipient à examiner, puis les rayons X seront exposés à la structure isolée. Après cela, la plaque d'imagerie peut être passée à travers un scanner laser qui lit l'image et la rend numérique. Elle peut ensuite être visualisée à l'aide d'un logiciel à travers lequel le contraste, le zoom et la luminosité peuvent être contrôlés. Une analyse rapide de la CUI peut être réalisée avec cette technique, [56].

▪ Radiographie en temps réel :

Cette technique est composée de la source de rayonnement et du détecteur d'image qui est relié à un bras en C (voir Figure 2-25). La source de rayonnement peut être soit une source de rayons X, soit une source radioactive ; chacune a ses avantages et inconvénients. Cette dernière n'est pas préférable en raison des risques pour la santé et la sécurité.

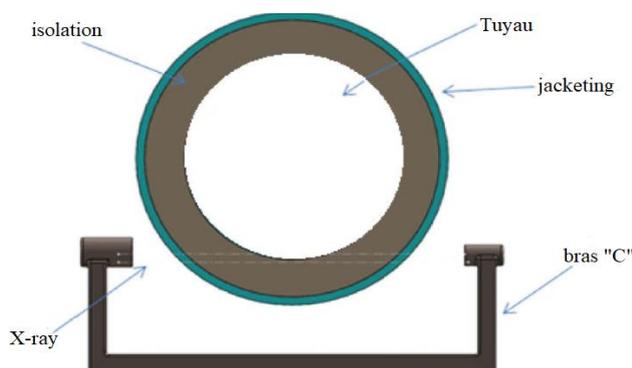


Figure 2-27 : Composants de la radiographie en temps réel, [57].

Le choix entre elles dépend généralement de ce que l'utilisateur final recherche, par exemple si une très haute résolution est requise, le système de rayons X peut être le meilleur choix. En utilisant cette technique sur un tuyau isolé, un profil du diamètre extérieur du tuyau peut être obtenu, qui peut ensuite être utilisé pour déterminer les changements causés par la CUI. Une image de la surface extérieure du tuyau peut être visualisée sur un moniteur de type télévision. Par conséquent, une analyse rapide peut être réalisée. Il convient de mentionner que cette technique est limitée à de petites zones. De plus, la sensibilité diminue à mesure que l'épaisseur de la paroi augmente. Un maximum de 75 kV peut être utilisé pour faire fonctionner la fluoroscopie numérique aux rayons X, mais la tension peut être ajustée pour obtenir l'image la plus précise ; cet avantage permet une utilisation sûre sans interruption de l'unité même si utilisée dans de petites zones. Il est essentiel de savoir que la radiation ne peut pas pénétrer la paroi du tuyau comme dans le cas des rayons X puissants ou des rayons γ ; au lieu de cela, elle

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

ne pénètre que l'isolation et image le profil de la surface extérieure. Un autre avantage est que la radiation est générée électriquement, ce qui signifie que la technique est sûre lorsque le courant est coupé. D'autre part, lors de l'utilisation de l'iridium 192, les prises de vue murales produisent continuellement une puissante radiation γ , même lorsqu'elles sont protégées à l'intérieur de la caméra. Cela nécessite une supervision et un contrôle attentifs et continus même pendant le transport et l'expédition. Par conséquent, il sera plus pratique et sûr d'utiliser le système de rayons X généré électriquement. L'utilisateur doit être prudent pour assurer la sécurité de ceux qui travaillent à proximité, [57]

2.1.8. Fluage :

Le fluage ce n'est pas un phénomène de corrosion mais est un dommage et une fissuration résultant des effets synergiques des contraintes cycliques et de l'exposition à un environnement à température élevée. Les sources de tension incluent la pression interne, les gradients thermiques, et la contrainte pendant l'expansion thermique. La formation et la fracture de la couche d'oxyde formée par la chaleur à la surface peuvent fortement influencer la durée de vie relative à la fatigue-fluage, [22].



Figure 2-28 : Fluage, [46].

Sous l'effet de la chaleur, les atomes à l'intérieur de la structure cristalline des matériaux métalliques commencent à se déplacer, créant des imperfections appelées dislocations. Ces dislocations facilitent le mouvement des atomes et permettent la déformation plastique des matériaux. En plus des températures élevées, les matériaux métalliques sont soumis à des contraintes mécaniques, telles que la pression de l'eau ou de la vapeur et les forces exercées par les composants adjacents. Ces contraintes contribuent à l'initiation du fluage en facilitant le mouvement des dislocations.

Les dislocations se déplacent lentement à travers la structure cristalline, provoquant une déformation lente et permanente donne lieu à des endommagements qui peuvent finalement entraîner une rupture. Les ruptures causées par le fluage se rencontrent essentiellement dans les tubes fonctionnant à haute température et des sections des économiseurs

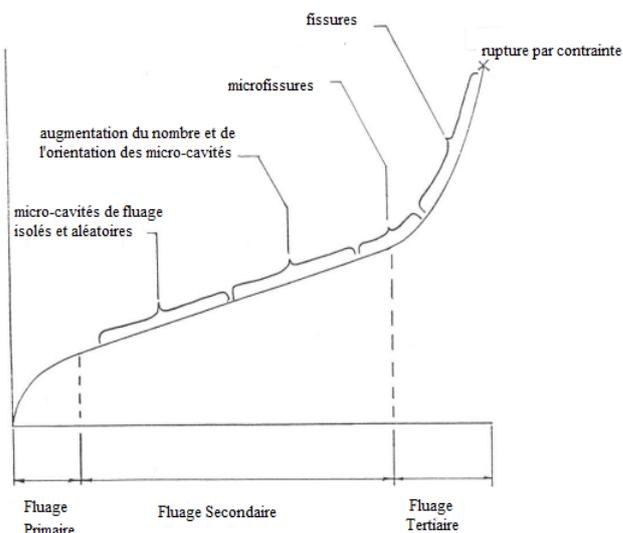
Avec le temps, le fluage peut entraîner une détérioration des propriétés mécaniques des matériaux, y compris leur résistance et leur ductilité. Cela peut compromettre l'intégrité

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

structurelle des composants du générateur de vapeur et affecter leur durabilité et leur fiabilité, [47].

En général, pour des températures supérieures à $0,3 T_f$, il existe trois stades de fluage :



-Le fluage primaire, la déformation initiale rapide ralentit en raison du durcissement par déformation.

- Le fluage secondaire, Stade quasi linéaire où il y a un équilibre relatif entre le durcissement du matériau et son recuit, ce qui se traduit par une augmentation progressive de la résistance du matériau.

-Le fluage tertiaire, pendant lequel la vitesse de déformation croît jusqu'à la rupture, un phénomène de striction pouvant apparaître au cours de ce stade

Figure 2-29 : Différents stades de fluage, [46]

Effets de la température et de la contrainte sur le comportement en fluage :

Température	<ul style="list-style-type: none"> • Plus la température est élevée, plus le taux de fluage est élevé. Les températures élevées facilitent la diffusion des atomes, ce qui favorise le mouvement des dislocations et entraîne une déformation plastique plus importante des matériaux. • À des températures proches ou supérieures à une certaine fraction de la température de fusion du matériau, le fluage devient significatif. Cela peut entraîner une déformation permanente des composants du générateur de vapeur, ce qui peut à terme compromettre leur intégrité structurelle.
Contrainte	<ul style="list-style-type: none"> • Les contraintes mécaniques, telles que la pression de l'eau ou de la vapeur, ainsi que les forces exercées par les composants adjacents, peuvent accélérer le processus de fluage en facilitant le mouvement des dislocations dans la structure cristalline des matériaux.

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

	<ul style="list-style-type: none">• Des contraintes élevées peuvent augmenter la vitesse de fluage, entraînant une déformation accélérée des composants du générateur de vapeur.• Les contraintes résiduelles ou les contraintes de relaxation peuvent également influencer le comportement en fluage en modifiant les chemins de glissement des dislocations et en affectant la cinétique de la déformation plastique
--	---

Tableau 2-5 : Effets de la température et de la contrainte sur le comportement en fluage

D'une manière générale, la vitesse de fluage augmente avec la contrainte σ et la température T . La durée du fluage primaire et tertiaire augmente avec σ et T , tandis que celle du fluage secondaire diminue, [58].

2.2. La corrosion du circuit air/fumée :

Les conditions de service du circuit air/fumée créent un environnement corrosif qui conduit à la dégradation des matériaux des échangeurs de la chaleur. L'utilisation d'un combustible qui a des caractéristiques chimiques corrosives peut provoquer plusieurs problèmes :

2.2.1. Oxydation du vanadium et du sodium :

Dans certains cas, les combustibles utilisés pour la combustion peuvent contenir des concentrations variables de vanadium et de sodium, ces éléments se combinent avec l'oxygène de l'air pour former des composés volatils, tels que les oxydes de vanadium (tri-oxyde de vanadium (V_2O_3) et le tétra-oxyde de vanadium (V_2O_4)) et de sodium (NaO_x). Ces composés sont transportés par les gaz de combustion à travers les générateurs de vapeur. Lorsque les gaz de combustion refroidissent, les oxydes de vanadium et de sodium peuvent se condenser et se déposer sur les surfaces métalliques des générateurs de vapeur. En présence d'humidité, ces dépôts peuvent réagir pour former des composés corrosifs, comme les acides vanadique et sulfurique en présence de dioxyde de soufre. Ces composés corrosifs peuvent alors attaquer les surfaces métalliques des générateurs de vapeur, entraînant une dégradation prématurée des matériaux. Ce processus d'oxydation et de corrosion peut être exacerbé par des températures de combustion élevées et des conditions de fonctionnement prolongées des générateurs de vapeur, [59].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

2.2.2. Sulfuration :

Dans les générateurs de vapeur, la sulfuration se produit lorsque les métaux ou les alliages présents dans le système réagissent avec des composés soufrés, généralement sous forme de sulfure d'hydrogène (H₂S) ou d'oxydes de soufre (SO₂ et SO₃), issus de la combustion de combustibles contenant du soufre.

Ce processus commence par la diffusion de ces composés soufrés à travers le flux de gaz jusqu'à la surface du métal, où ils réagissent chimiquement pour former des couches de sulfure métallique. Cette réaction est facilitée par la présence de températures élevées, typiques des opérations de combustion, accélérant ainsi la diffusion des composés soufrés et leur interaction avec les surfaces métalliques. Les couches de sulfure ainsi formées peuvent compromettre l'intégrité structurelle des composants du générateur de vapeur en réduisant leur résistance mécanique et en accélérant la dégradation matérielle, conduisant potentiellement à des défaillances prématurées des équipements.

La présence de soufre dans le combustible, l'excès de l'air et la température de service créent un environnement néfaste qui conduit à l'apparition de l'anhydride sulfurique (SO₃). Lors d'une basse température (point rosée), le SO₃ réagit avec l'eau en donnant l'acide sulfurique (H₂SO₄), [47].



2.2.3. Encrassement :

L'encrassement dans les générateurs de vapeur à récupération de chaleur se forme principalement dans le circuit air/fumée, où les gaz de combustion sont en contact avec les surfaces internes des échangeurs de chaleur et des conduits. Ce phénomène résulte de plusieurs processus. Tout d'abord, lors de la combustion des combustibles fossiles, une partie du carbone contenu dans le combustible n'est pas entièrement brûlée et se condense sous forme de particules de suie (agrégats de carbone finement dispersés). Ces particules de suie, ainsi que les cendres (résidus solides qui restent après la combustion complète) volantes provenant des impuretés minérales présentes dans les combustibles, sont transportées par les gaz de combustion et se déposent sur les surfaces internes.

De plus, des impuretés sous forme de vapeurs ou de gaz présentes dans les gaz de combustion peuvent se condenser lorsque la température diminue, formant ainsi des dépôts solides. Enfin, des réactions chimiques entre les composants des gaz de combustion et les matériaux des échangeurs de chaleur peuvent également contribuer à la formation d'encrassement, [60].

CHAPITRE 2

Phénomène de Corrosion dans les Générateurs de Vapeur à Récupération de Chaleur

Conclusion

La corrosion, un fléau inévitable dans les équipements industriels tels que les générateurs de vapeur à récupération de chaleur (HRSG), impose des défis majeurs en termes de maintenance, de coût et de sécurité. Ce chapitre a mis en lumière les mécanismes fondamentaux de la corrosion et ses impacts spécifiques sur ces systèmes, soulignant l'importance cruciale de stratégies de prévention et de mitigation adaptées. En concluant, il est clair que la compréhension approfondie de la corrosion et l'application de mesures proactives sont essentielles pour garantir la durabilité, la performance, et la fiabilité des générateurs de vapeur à récupération de chaleur

CHAPITRE 3 :

Technique d'étude et procédure expérimental

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les procédures expérimentales et les techniques de caractérisation utilisées dans notre étude pour évaluer les propriétés des échantillons métalliques corrodé. Les méthodes de caractérisation jouent un rôle crucial dans la compréhension des effets de la corrosion sur les matériaux et permettent de déterminer les changements dans leur composition chimique et leurs propriétés mécaniques.

Nous avons utilisé plusieurs techniques avancées, notamment la spectroscopie de fluorescence des rayons X (XRF), le microscope optique, les tests de dureté et de microdureté, ainsi que l'essai de traction.

Ce chapitre décrit en détail chaque technique, les étapes de préparation des échantillons, et les procédures spécifiques suivies pour obtenir des résultats précis et fiables.

1. Généralités sur les aciers au carbone :

L'acier est un alliage à base de fer et d'un rajout de carbone en proportions restreinte ne dépasse pas 2,1% (limite théorique). Au-delà de cette teneur d'alliage est nommée fonte. Les aciers sont décrits par le diagramme métastable fer—Cémentite uniquement (il n'y a pas de graphite dans les aciers), [61].

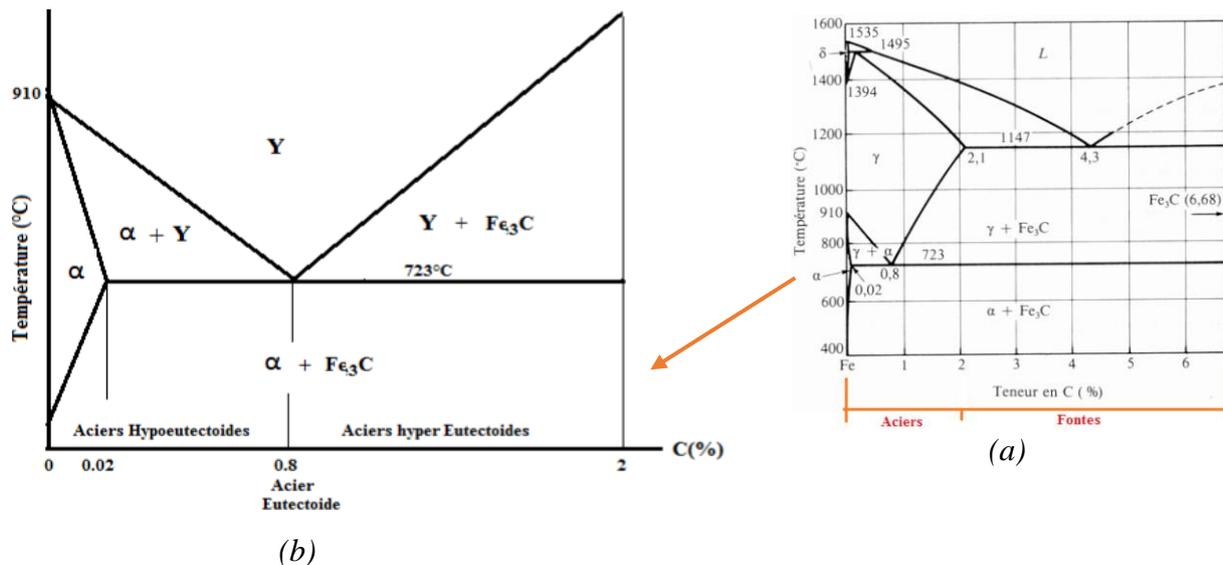


Figure 3-1 : (a) Diagramme Fer-Carbone,

(b) Diagramme Fer-Carbone (Coté aciers), [61]

Ce diagramme est caractérisé essentiellement par l'existence de deux solutions solides distinctes, la solution solide (ferrite) et la solution solide (austénite), et d'un composé défini Fe₃C (cémentite) qui donnant avec l'austénite un eutectique, la limite de 2,1% est l'extrémité du palier eutectique. A l'équilibre les aciers se solidifient sans apparition de cette phase (absence de carbures Fe₃C primaires) inversement aux fontes.

Et par transformation de phase importante à 720°C pour une composition de l'austénite de 0.8% C. C'est la transformation eutectoïde ou perlitique.



Le mélange Ferrite et Cémentite obtenu est appelé perlite. La proportion massique des deux phases dans la perlite est de 88% pour la Ferrite et de 12% pour la Cémentite, [62].

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

1.1. Définition des aciers au carbone :

Les aciers au carbone sont des aciers de haute qualité élaborés avec un soin particulier, en général au four à arc et calmés au silicium dont la teneur en carbone peut aller de 0,005 à 1,3%. Caractérisés par une faible pénétration de trempe, ils peuvent être considérés comme les représentants classiques des aciers fins

Les aciers au carbone sont des matériaux polyvalents et essentiels dans de nombreuses industries en raison de leurs propriétés variées et de leur coût relativement faible, ils représentent environ 90 % en volume de l'acier utilisé. La classification en fonction de la teneur en carbone permet de choisir le type d'acier le mieux adapté à chaque application spécifique, qu'il s'agisse de construction, de fabrication d'outils ou d'équipements industriels, [63].

1.2. Les principales propriétés des aciers au carbone :

Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- ✓ La résistance mécanique à l'état normalisé ou à l'état recuit,
- ✓ La trempabilité,
- ✓ La soudabilité
- ✓ La tenue à chaud,
- ✓ La résistance à l'usure et à la corrosion, [12]

Les propriétés des aciers restent modifiables en ajoutant d'autres éléments surtout métalliques, et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer amplement leurs propriétés par des traitements thermiques prenant en surface ou à cœur de la matière, on parle alors d'aciers traités

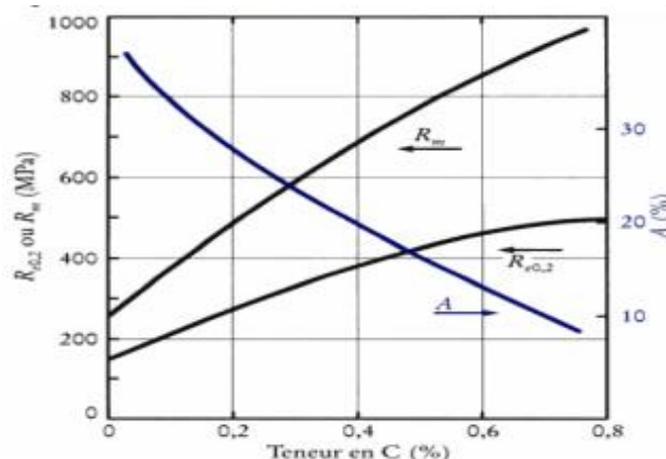


Figure 3-2 : Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone, [64].

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

1.3. Les sous-familles des aciers au carbone :

Les aciers au carbone se divisent en trois sous-familles selon le teneur de carbone

Nuance	Pourcentage de Carbone (C)	Résistance Rm (MPa) État recuit	Emplois
Extra doux	$C < 0,15$	330-420	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
Doux	$0,15 < C < 0,20$	370-460	Charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires
Demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	480-550	Pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
Demi dur	$0,30 < C < 0,40$	550-650	Petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission
Dur	$0,40 < C < 0,60$	650-750	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées
Extra-dur	$0,60 < C$	>750	Outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts

Tableau 3-1 : Les sous-familles des aciers au carbone, [65].

1.4. Différentes structures des aciers au carbone :

Dans la partie aciers du diagramme, selon la composition en carbone, les aciers sont classés en trois catégories (figure3-1) :

- **Les aciers hypoeuctoïdes** : (%C 0.20% - 0.80%). Ils sont formés de perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans une phase ferritique

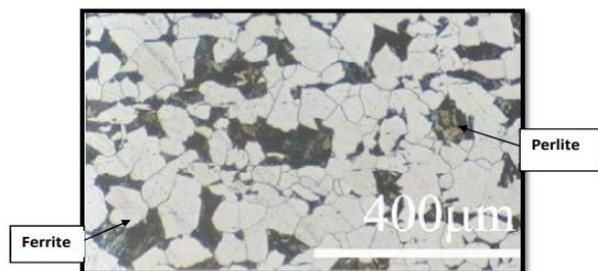


Figure 3-3 : Microstructure d'un acier hypoeuctoïde, [66]

- **Les aciers eutectoides** : Le %C = 0,80% ils sont formés de 100% perlite (ferrite α + Fe₃C) caractérisée par une structure en lamelle

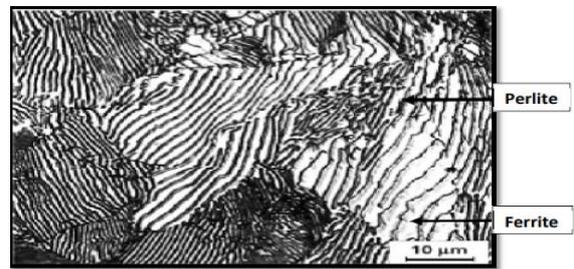
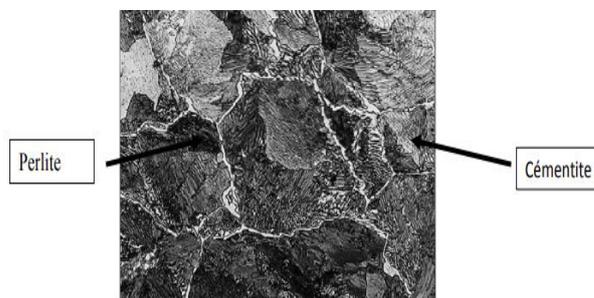


Figure 3-4 : Microstructure d'un acier eutectoides, [66].



- **Les aciers hyper-eutectoides** : (%C 0,85%, 2,1%) ils sont formés de perlite (Ferrite α + cémentite Fe₃C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans de la cémentite

Figure 3-5 : Microstructure d'un acier hyper-eutectoïde, [66]

2. Présentation des échantillons :

Nous avons retenu dans cette étude trois échantillons corrodés de longueur de 10 cm de même ligne situé à l'extérieur d'un générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) fabriqué en acier au carbone de nuance A106 Gr B. Ce matériau nous a été fourni par la centrale thermique de Hadjert-Ennous /SNC-LAVALIN. Sa composition chimique, ses propriétés mécaniques sont données dans les tableaux 1-12 et 1-13 respectivement dans le chapitre 1, ces échantillons sont dégradés par la corrosion sous calorifuge.

Cette ligne est une sortie de purge du réchauffeur. Elle transporte de la vapeur sèche vers un collecteur Sarco. De là, la vapeur est envoyée au condenseur.

Cette ligne de purge est distincte de la ligne principale qui transporte la vapeur d'échappement de la turbine vers le condenseur. Elle sert à évacuer les impuretés et à maintenir l'efficacité et la sécurité du système de réchauffement.

Nous avons réalisé un schéma approximatif à l'aide de SolidWorks pour illustrer la disposition de la ligne et la position de chaque échantillon le long de celle-ci. Ce schéma vise à fournir une représentation visuelle claire de la localisation spécifique de chaque échantillon sur la ligne, ainsi qu'à expliquer le processus global. Cela facilite la compréhension du contexte et des conditions spécifiques auxquelles chaque échantillon a été exposé.

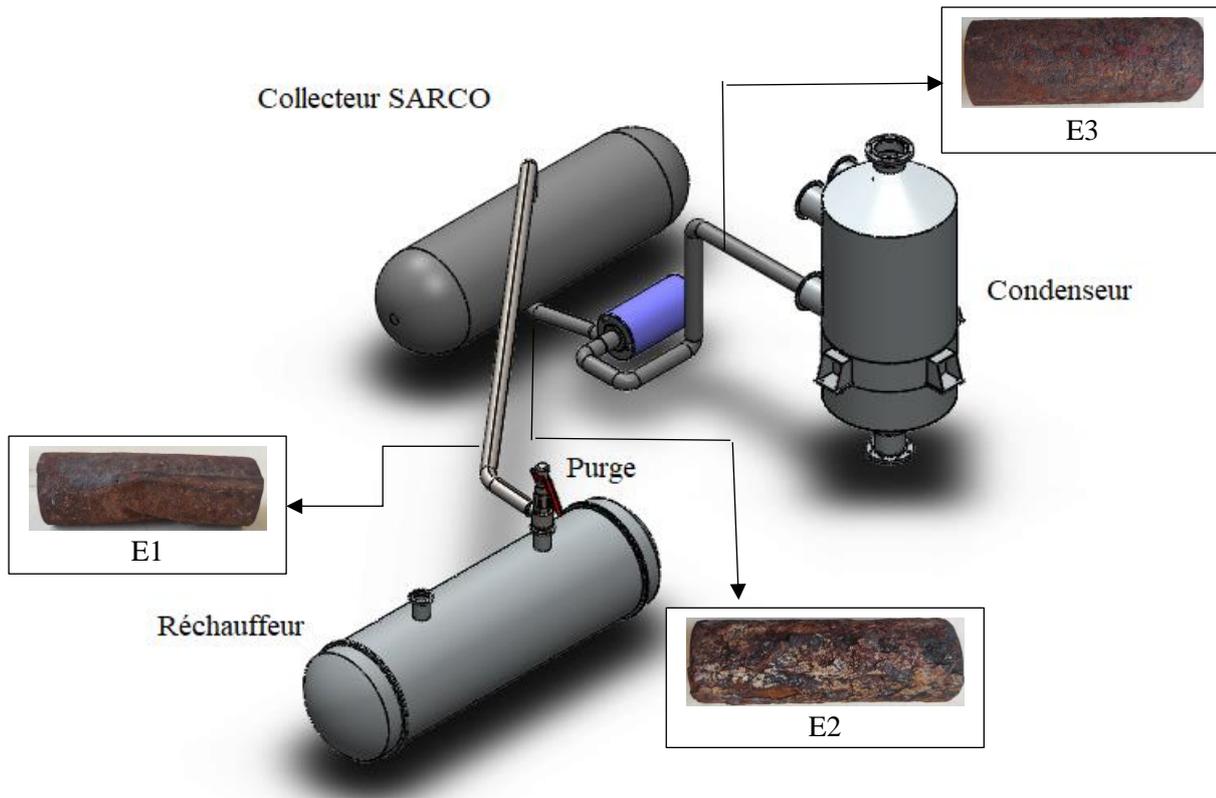


Figure 3-6 : Un schéma approximatif à l'aide de SolidWorks pour illustrer la disposition de la ligne et la position de chaque échantillon le long de celle-ci

La vapeur qui est redirigée vers le condenseur par cette vanne de dérivation est désurchauffée, c'est-à-dire qu'elle est refroidie à des niveaux de pression et de température acceptables pour entrer dans le condenseur.

La possibilité de dériver la vapeur de réchauffage vers le condenseur pendant les démarrages ou arrêts réduit les pertes d'énergie. En évitant d'envoyer de la vapeur superflue ou mal gérée vers la turbine, on protège l'équipement et améliore l'efficacité globale.

2.1. Le matériau utilisé :

L'acier A106 Gr B est un acier hypoeutectoïde doux possède une structure cristalline cubique centrée (CC). Dans cette structure, les atomes de fer sont disposés aux coins d'un cube avec un atome de fer au centre. Cette structure confère à l'acier une combinaison de robustesse et de ductilité.

L'acier au carbone A106 Gr B est un matériau largement utilisé dans l'industrie pour la fabrication de tuyaux sans soudure destinés à des applications à haute température et haute pression. Il est reconnu pour sa robustesse, sa résistance à la traction et sa capacité à supporter des conditions extrêmes, ce qui le rend idéal pour les industries pétrolière, gazière, chimique et énergétique

2.1.1. Microstructure :

L'acier au carbone a une structure ferrito-perlitique, sans aucune transformation structurale. Les zones blanchâtres correspondent à la phase α (ferrite) est une phase molle et ductile avec une faible teneur en carbone et les zones foncées correspondent au mélange eutectoïde (perlite) composé de lamelles de phase (α) et de cémentite (Fe_3C) qui améliore la résistance et la dureté du matériau.

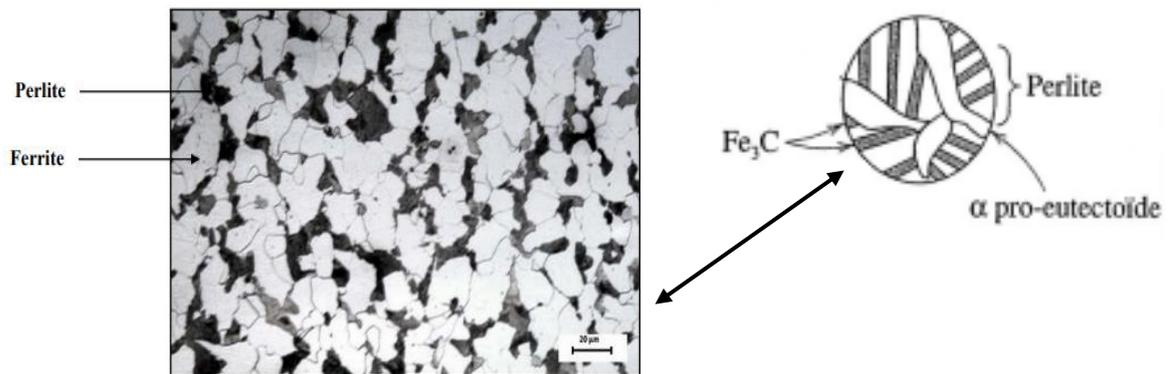


Figure 3-7 : Microstructure de l'acier A106 grade, [64].

2.2. Description sur les échantillons :

Dans cette étude, nous nous intéressons spécifiquement à la caractérisation de la corrosion sous calorifuge sur des échantillons d'acier au carbone A106 Gr B. Ces échantillons, prélevés sur un même tube, présentent différents niveaux de dégradation

2.2.1. L'état de dégradation de chaque échantillon :

➤ Echantillon N°1 :

État de dégradation : Perte de matière totale jusqu'à la rupture.

Cet échantillon présente un niveau avancé de dégradation, témoignant d'une exposition prolongée à la corrosion sous calorifuge caractérisé par une perte de matière importante qui a abouti à la rupture complète du matériau.

À première vue, la surface de l'échantillon révèle des signes alarmants de fragilisation et de détérioration structurale prononcés. Des zones de corrosion étendue sont visibles sur sa surface comme la formation de rouille, des piqures, avec des déformations marquées parsèment la surface, révélant l'altération significative des propriétés mécaniques du matériau. La texture de la surface est irrégulière, avec des zones rugueuses et des zones lisses, traduisant les effets inégaux de la corrosion sur la structure

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental



Figure 3-8 : Echantillons N°1 présente une dégradation avancée.

➤ **Echantillon N°2 :**

État de dégradation : Perte de matière partielle.

Cet échantillon montre une dégradation moins avancée par rapport à l'échantillon 1, avec une perte de matière partielle mais notable sur sa surface. Des signes de corrosion sous calorifuge sont visibles comme la formation de cloques sur la surface résultant de la libération de gaz ou de produits de corrosion. Des déformations mineures, telles que des ondulations et des plis, sont visibles, reflétant une perte de matière partielle et une altération des propriétés mécaniques locales. La texture de la surface est également altérée, avec des zones de rugosité et des variations de couleur indiquant des zones de corrosion localisée. Des traces de produits de corrosion peuvent être observées



Figure 3-9 : Echantillon N°2 présente une dégradation partielle

➤ Echantillons N°3 :

État de dégradation : Perte de matière négligeable par rapport aux deux autres. Cet échantillon présente le stade de dégradation le moins avancé des trois, avec une perte de matière négligeable par rapport aux échantillons 1 et 2. La surface de l'échantillon révèle des signes de fragilisation et de détérioration structurelle, bien que moins prononcés.



La texture de la surface est généralement altérée, avec peu de déformations ou d'irrégularités notables. Des traces de corrosion sont présentes comme la rouille, mais limitées, indiquant une perte de matière négligeable par rapport aux autres échantillons. En général, cet échantillon semble être le moins affecté par la corrosion sous calorifuge, bien que des investigations plus approfondies puissent être nécessaires pour évaluer pleinement son état.

Figure 3-10 : Echantillon N°3 présente une dégradation le moins avancé

2.2.2. Les principaux facteurs et phénomènes responsables de la dégradation des échantillons

À partir des observations précédentes, il est possible déduire les principaux facteurs et phénomènes responsables de la dégradation des échantillons par corrosion sous calorifuge. Premièrement, la présence de zones de corrosion étendues, telles que la formation de rouille, de piqures et de déformations marquées sur la surface de l'échantillon N°1, indique une exposition prolongée à des conditions corrosives. Ce phénomène est probablement amplifié par la combinaison de chaleur et d'humidité sous le calorifuge, favorisant ainsi la corrosion sous-calorifuge.

De plus, les zones de corrosion localisée, comme les cloques et les déformations mineures observées sur l'échantillon N°2, suggèrent que des variations locales dans les conditions environnementales ou dans la composition du matériau peuvent contribuer à des formes spécifiques de corrosion. Ces variations peuvent être causées par des défauts dans l'application du calorifuge, des différences de composition chimique ou des contraintes mécaniques locales.

Enfin, l'observation d'une perte de matière négligeable sur l'échantillon N°3, malgré la présence de traces de corrosion et de dégradations mineures, suggère que certains facteurs, tels que la composition du matériau ou l'épaisseur du calorifuge, peuvent jouer un rôle dans la résistance à la corrosion. Cette observation souligne l'importance de comprendre les propriétés des matériaux et leur interaction avec l'environnement pour prévenir la corrosion sous calorifuge.

3. Préparation des échantillons :

3.1. Préparation les échantillons pour la caractérisation par perte de masse :

La préparation des échantillons a été réalisée avec soin et précision afin de garantir des résultats fiables pour les différentes analyses prévues dans cette étude. Pour ce faire, nous avons utilisé la tronçonneuse de Laboratoire de génie mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique pour découper les échantillons en dimension d'épaisseur de 5 mm.

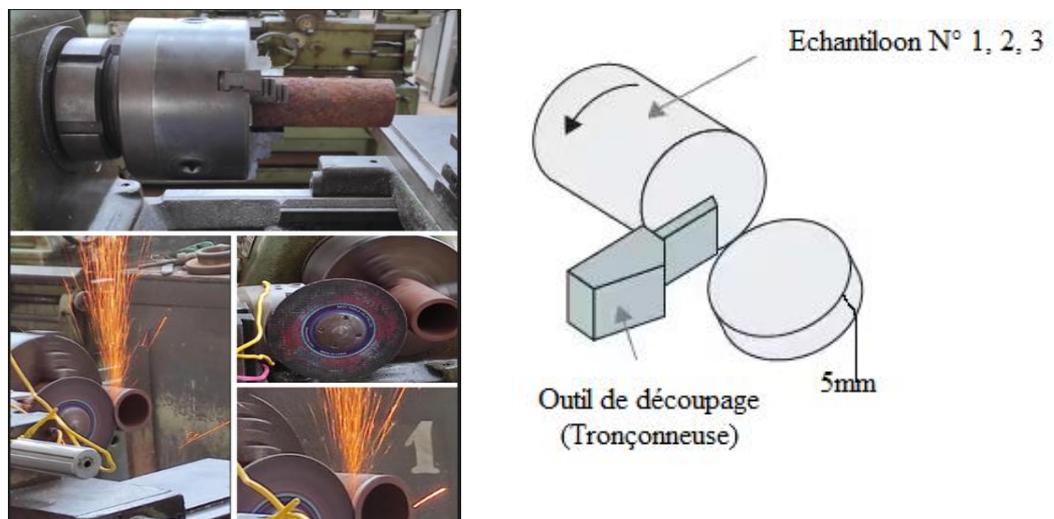


Figure 3-11 : Technique découpage.



Figure 3-12 : Les échantillons E1, E2, E3

À partir de chaque échantillon initial (échantillon 1, 2 et 3), nous avons découpé un autre échantillon d'épaisseur 5 mm (E1, E2, E3 successivement) sous forme de disque spécialement pour la caractérisation par perte de masse.

3.2. Préparation les échantillons pour la métallographie optique :

Nous avons découpé des autres échantillons pour l'observation optique et la caractérisation de microstructure. Lors du prélèvement, des précautions doivent être prises pour ne pas favoriser une modification de la structure du métal, résultant soit d'un échauffement, soit d'une déformation de ce dernier entraînant un écrouissage.

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

Après le découpage des échantillons, trois étapes cruciales ont été menées pour préparer les échantillons à l'analyse : l'enrobage à chaud, le polissage et l'attaque chimique. Ces procédures ont été réalisées au Laboratoire de science et génie des matériaux de l'Ecole Nationale Polytechnique.

3.2.1. L'enrobage à chaud :

L'enrobage à chaud est un processus utilisé dans la préparation des échantillons métalliques pour diverses analyses, telles que la métallographie. Cette opération consiste à revêtir les échantillons par une résine thermodurcissable à chaud afin de :

- Faciliter la manipulation de l'échantillon lors du polissage et de l'observation microscopique.
- Protéger l'échantillon contre les altérations chimiques externes.

L'enrobage à chaud est réalisé dans une presse d'enrobage où l'échantillon est placé au centre d'un cylindre d'enrobage puis on verse la résine adéquate dessus jusqu'à immersion totale, Après un laps de temps approprié, la substance se durcit ainsi l'échantillon est enrobé

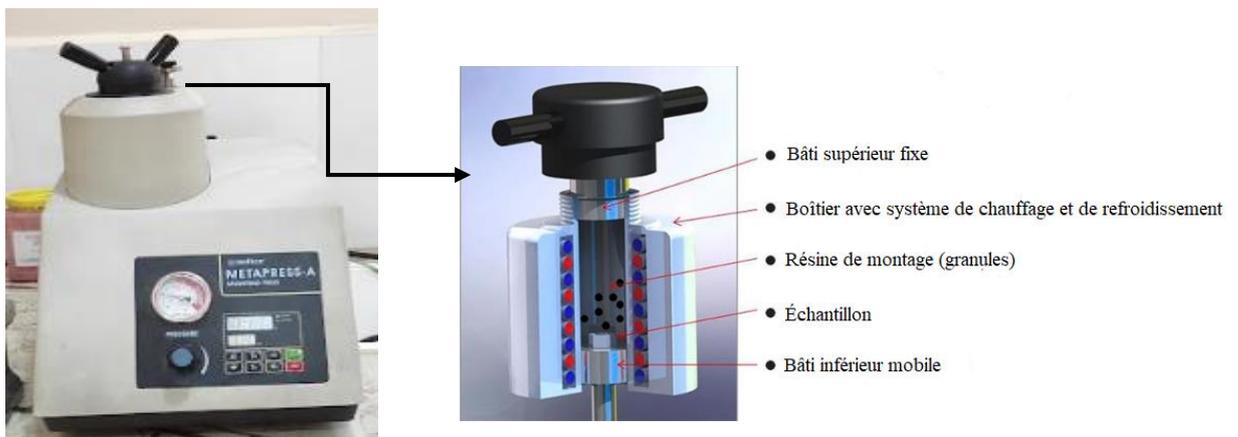


Figure 3-13 : Photo de la presse d'enrobage utilisée

3.2.2. Polissage :

Le polissage revêt une grande importance dans la caractérisation microstructurale. Son objectif principal est de produire une surface plane avec une rugosité minimale et l'élimination des contaminations.

Il est effectué en deux étapes :

- ✓ Polissage grossier en utilisant une série de papier abrasif de granulométrie variant de 120 à 1200 particules abrasives.mm⁻².
- ✓ Polissage de finition pour l'obtention d'une surface miroir est réalisé sur un papier feutre imbibé d'une poudre d'alumine mélangée avec de l'eau distillée.

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

3.2.3. Attaque chimique :

Après le polissage, les surfaces préparées subissent une attaque chimique pour sa préparation aux observations microscopiques, déterminer les différentes phases présentes dans les échantillons obtenus et également révéler les joints de grains et le cordon de soudeur.

L'attaque est effectuée avec une solution est le Nital à 2% de HNO_3 et 98% d'Ethanol pendant une durée d'environ 5 secondes. Les microstructures obtenues ont été observées par microscope optique et électronique à balayage selon le besoin.



Figure 3-14 : la surface de l'échantillons à l'état miroir

3.3. Préparation d'une éprouvette plate pour essai de traction :

Le découpage a été effectué au laboratoire de science et génie des matériaux mais l'usinage de l'éprouvette a été réalisé au niveau de département génie mécanique

Dans le processus de préparation des échantillons pour les essais de traction, la sélection de l'échantillon le moins corrodé est une étape cruciale pour garantir des résultats précis. Une fois l'échantillon choisi, il est découpé en deux parties égales à l'aide d'une tronçonneuse, l'une des parties découpées est ensuite aplatie à l'aide d'une presse, pour assurer une surface plane et régulière pour les essais ultérieurs.

Après le processus d'aplatissement, l'échantillon est nettoyé en profondeur pour éliminer toute contamination présente à sa surface. Pour ce faire, un solvant tel que l'esprit de sel est utilisé pour dissoudre les contaminants et assurer une surface propre et exempte de toute interférence lors des essais.

Enfin, les dimensions de l'éprouvette sont mesurées selon les spécifications de la norme ASTM A370, garantissant ainsi la conformité aux exigences standardisées pour les essais de traction.

$L=90\text{mm}$ / $L_C=60\text{mm}$ / $L_0=50\text{mm}$ / $B=20\text{mm}$

$S_0 = l.e / l=12.5\text{mm}$ / $e=3.5\text{mm}$ / $R=1\text{mm}$

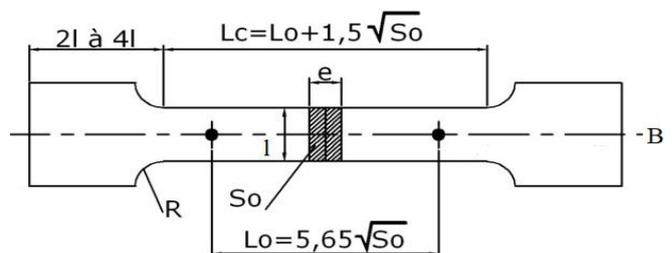


Figure 3-15 : Eprouvette normalisé, [67].

4. Les Techniques de Caractérisation :

Dans le cadre de cette étude, la caractérisation des échantillons corrodés revêt une importance primordiale pour comprendre les mécanismes de dégradation et évaluer les performances des matériaux dans des conditions d'exposition spécifiques.

Les techniques de caractérisation utilisées ont été sélectionnées avec soin pour leur capacité à fournir des informations cruciales sur la structure, la composition chimique et les propriétés mécaniques des échantillons étudiés.

4.1. Caractérisation par perte de masse :

Le principe de la technique de caractérisation par perte de masse réside dans la mesure de la quantité de matière perdue par un échantillon en raison de la corrosion. Cette méthode repose sur le fait que la corrosion entraîne la dissolution du matériau, ce qui se traduit par une diminution de sa masse.

Le processus implique généralement les étapes suivantes :

- i. Préparation des échantillons : Voir 2.1. Page 64.
- ii. Mesure de la masse : La masse de chaque échantillon est mesurée avec précision à l'aide d'une balance analytique. La masse initiale de l'échantillon non corrodé $m_0 = 13,5\text{g}$, avec un diamètre intérieur $d_0 = 37\text{mm}$ et un diamètre extérieur $D_0 = 50\text{mm}$.
- iii. Comparaison des masses : Pour chaque échantillon, la différence de masse par rapport à l'échantillon de référence est calculée. Cette différence représente la perte de masse due à la corrosion pour chaque échantillon.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer et de comparer le niveau de corrosion entre différents échantillons présentant des états de dégradation variables. En mesurant la perte de masse de chaque échantillon, nous pouvons quantifier l'ampleur de la corrosion et établir des comparaisons significatives entre les échantillons. Cela nous permettra de mieux comprendre les mécanismes de corrosion sous calorifuge et d'identifier les facteurs qui influent sur la dégradation des matériaux, ce qui est essentiel pour développer des stratégies de prévention et de protection contre la corrosion dans des environnements similaires.

4.2. Caractérisation par la spectrométrie par fluorescence X (XRF) :

La spectrométrie par fluorescence X (XRF) est une technique analytique globale non-destructive qualitative et quantitative utilisée pour déterminer la composition élémentaire des matériaux. Cette méthode autorise la mesure d'échantillons très variés comme les alliages métalliques, les roches ou encore les biens culturels (peintures, céramiques, fresques, sculptures...), [68]. Le principe repose sur l'excitation des atomes dans un échantillon par un rayonnement X primaire, ce qui entraîne l'émission de rayons X secondaires ou fluorescents

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

caractéristiques de chaque élément présent dans l'échantillon. L'analyse de ces rayons fluorescents permet d'identifier et de quantifier les éléments présents, [69].

Dans notre étude cette caractérisation a été réalisée au Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) en utilisant un spectromètre de fluorescence des rayons X de marque Siemens, modèle SRS 3000.



Figure 3-16 : Spectromètre de fluorescence des rayons X

Les échantillons doivent être propres et avoir une surface lisse et uniforme pour assurer une analyse précise. Le polissage est souvent nécessaire pour enlever les produits de corrosion et obtenir une surface homogène donc l'échantillon enrobé et poli est placé dans le spectromètre XRF où il est irradié par un faisceau de rayons X primaire, les atomes de l'échantillon absorbent cette énergie et émettent des rayons X fluorescents caractéristiques de leurs éléments constitutifs.

Un détecteur analyse les rayons X fluorescents émis et produit un spectre, où chaque pic correspond à un élément spécifique, l'intensité des pics est proportionnelle à la concentration des éléments présents, permettant ainsi une quantification précise.

L'objectif principal de l'utilisation de la spectrométrie XRF dans cette étude est de déterminer la composition chimique des échantillons de matériaux corrodés. Cette technique permet d'identifier les éléments présents, y compris les contaminants et les produits de corrosion, ainsi que les éléments de base du matériau.

4.3. Caractérisation par microscopie optique :

La caractérisation par microscopie optique est une technique fondamentale dans l'analyse des matériaux, permettant d'observer et d'étudier la structure microscopique des échantillons. Dans le cadre de notre étude, cette technique est utilisée pour examiner la microstructure des échantillons préparés (Voir 2.2 pages 64-66).

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

L'objectif principal est d'identifier les changements microstructuraux induits par la corrosion sous calorifuge et de comparer ces modifications avec l'échantillon non corrodé.

L'observation des microstructures a été réalisée à l'aide d'un microscope métallographique de marque « EUROMAX » qui permet l'observation des échantillons, avec différents grossissements. Ce microscope est connecté à un ordinateur muni d'une caméra numérique CMEX1300x, en utilisant le logiciel « ImageFocus version 0.3 » de traitement d'image.

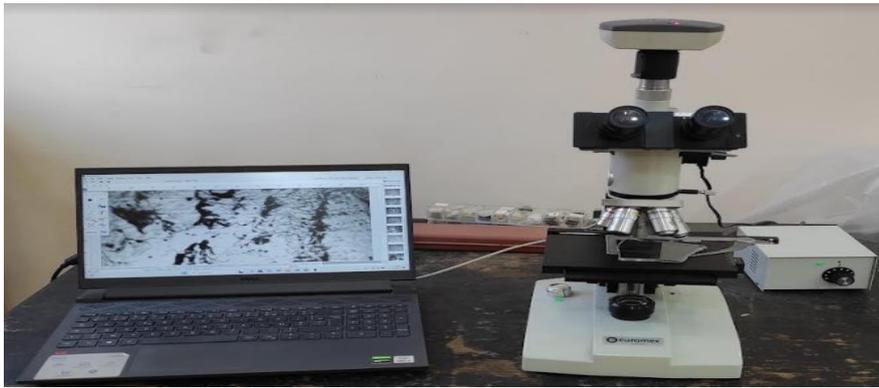


Figure 3-17 : Microscope Optique

Nous pouvons observer les caractéristiques telles que la taille et la forme des grains, la distribution des phases, les défauts de la structure cristalline, ainsi que la présence de fissures, de pores ou d'inclusions. Ces observations nous fournissent des informations précieuses sur l'impact de la corrosion sur la microstructure de l'acier A106 Gr B.

La microscopie optique nous permettra également d'examiner le cordon de soudure présent dans les échantillons, ce qui est important pour évaluer l'intégrité de la soudure et son comportement face à la corrosion.

4.3.1. Analyse d'image :

Après observation au microscope optique, nous transférons l'image obtenue vers l'ordinateur pour la traiter à l'aide d'un logiciel de traitement d'image. Pour ce traitement, nous utilisons le logiciel « ImageJ ».

Le logiciel « ImageJ » permet de calculer la fraction volumique des phases existantes, il aide à déterminer la proportion de différentes phases présentes dans le matériau et mesurer la taille moyenne des grains dans la microstructure.

4.4. La Microdureté :

La microdureté est une technique essentielle pour évaluer les propriétés mécaniques locales des matériaux, cette méthode permet de mesurer la dureté sur des zones très précises de l'échantillon, comme les différentes phases, les grains individuels, ou les zones affectées par la corrosion.

La microdureté est mesurée en appliquant une charge faible et précise, le pénétrateur est en général de type Vickers. La méthode Vickers consiste à appliquer, sur la zone à analyser, un indenteur en diamant de forme pyramidale à base carrée dont l'angle au sommet de la pyramide fait 136° durant un temps et sous une charge donnée P , [70].

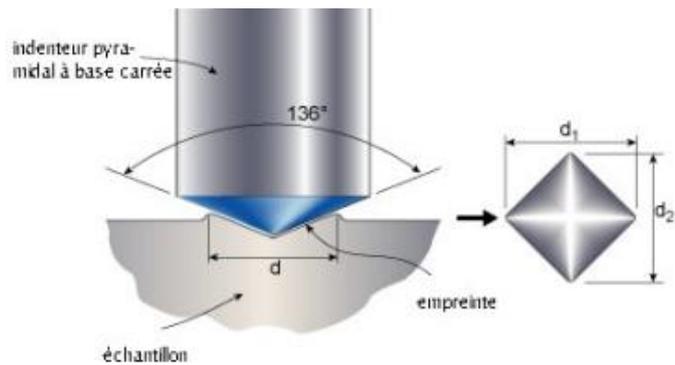


Figura 3-18 : L'empreinte type Vickers, [71]

L'épaisseur de l'échantillon doit être 1,5 fois supérieure à la diagonale, d , de l'empreinte et pour des essais successifs on choisira une distance entre empreintes d'environ 2.5 fois supérieure à la diagonale, d , pour les aciers, [70]. La taille de l'empreinte laissée par l'indenteur est mesurée au microscope optique intégré au microduromètre et la dureté est calculée à partir de la charge appliquée sur la surface de contact et de la surface de l'empreinte.

Selon Vickers d'après la norme NF A 03-154 :

$$H_V = \frac{2F \sin(x/2)}{d^2} = \frac{1,854}{d^2} F$$

Avec :

x : Angle au sommet de la pyramide ($x = 136^\circ$)

P : la charge en grammes.

d : la valeur moyenne de la diagonale de l'empreinte en microns, [71].

Dans notre étude, nous avons réalisé l'essai de microdureté au Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) pour mesurer la dureté des différentes phases présentes. Pour cela, nous avons utilisé un microduromètre de marque Buehler Micromet 3. Les échantillons ont été découpés et enroulés, puis soigneusement polis pour obtenir une surface lisse et exempte de rayures, ce qui est nécessaire pour une mesure précise de la microdureté. Ensuite, les échantillons ont été attaqués chimiquement avec une solution de 2% HNO_3 pour révéler les phases métallurgiques.

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

Lors de la mesure, une charge de 0,1 Kgf a été appliquée, permettant à l'indenteur de pénétrer la surface du matériau, et la dureté a été calculée en fonction de la taille de l'indentation.



Figure 3-19 : Microduromètre utilisé.

4.5. La dureté :

La dureté est l'une des caractéristiques mécaniques importantes du matériau tandis que le test de dureté est la méthode de test la plus rapide et la plus économique. La dureté est une mesure de la résistance à la déformation irréversible d'un matériau.

On peut définir l'essai de dureté par deux critères, (H= Hardness), une seconde lettre indiquant le type d'essai de dureté (Vickers (V), Brinell (B), Rockwell(R)...etc.). L'essai de dureté est une méthode essentielle dans le domaine des matériaux pour évaluer la résistance d'un matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur. Cette technique est largement utilisée pour différencier les matériaux, analyser leurs propriétés mécaniques, et les développer pour diverses applications industrielles, [72].

Donc les essais de dureté sont d'une grande utilité pour le métallurgiste à cause de leur simplicité et leur caractère peu destructif, [70].

Dans notre étude nous avons effectué trois mesures d'essai de dureté BRINELL (HB).

Cet essai consiste à imprimer dans la pièce, une bille de diamètre D , sous une charge P , et à déterminer le diamètre moyen d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

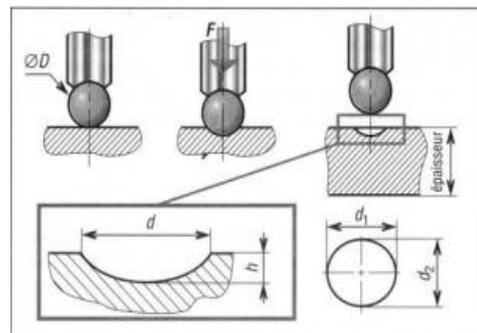


Figure 3-20 : Essai de dureté Brinell HB, [72].



Figure 3-21 : Le duromètre utilisé

A l'aide d'un duromètre automatique de marque « INNOVA », au niveau de laboratoire de département de génie des matériaux à l'école nationale polytechnique, ces essais de dureté ont été réalisés sur les surfaces des trois échantillons E1, E2 et E3, tel que la surface à tester doit être plane et nettoyée (sans lubrifiant, oxyde ou calamine). Il est nécessaire d'avoir une épaisseur suffisante afin que la pénétration de la bille ne déforme pas le matériau.

Lors de la mesure, une charge de 187,5 Kgf a été appliquée pendant 15 secondes

L'objectif principal de la mesure de dureté est d'évaluer la résistance des matériaux à la déformation permanente sous une charge.

4.6. Essai de traction :

L'essai de traction est une méthode fondamentale et la plus pratique, permet de déterminer les propriétés mécaniques des matériaux :

1. Limite apparente d'élasticité ou Limite d'élasticité « σ_e » :

C'est la contrainte maximale pouvant être appliquée dans un essai de tension pure, tel qu'après suppression de la charge il ne subsiste aucune déformation permanente, $\sigma_e = F_e/S_0$ avec F_e = charge à la limite apparente d'élasticité et S_0 = aire initiale de la section droite de l'éprouvette.

2. Résistance à la traction ou Résistance limite ou Résistance à la rupture « σ_r » :

C'est le quotient de la Force maximum F_m que peut supporter l'éprouvette par l'aire initiale S_0 de la section droite de l'éprouvette, $\sigma_r = F_m/S_0$.

C'est la plus forte contrainte supportée pendant l'essai mais n'est pas la contrainte de rupture de l'éprouvette.

3. Module d'élasticité longitudinale ou Module de Young ou coefficient de Hooke « E » :

Il caractérise la résistance que le matériau oppose à son allongement élastique. E définit la pente de la droite de Hooke $\sigma = E \epsilon$, il se détermine à partir du diagramme conventionnel de traction $\sigma = f(\epsilon)$, avec ϵ est la déformation.

4. Allongement pour cent après rupture ou allongement à la rupture « A% » :

C'est la déformation résiduelle moyenne qui a lieu au moment de la rupture, rapportée à une longueur déterminée standard de l'éprouvette.

$$A\% = \frac{Lu - L_0}{L_0} \times 100$$

L_0 = Longueur initiale entre repères,

Lu = Longueur ultime entre repères ou Longueur après rupture de l'éprouvette, [73].

L'essai consiste à appliquer une force de traction à une éprouvette cylindrique ou prismatique, généralement jusqu'à sa rupture, afin de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. Conformément à la norme NF EN 10002, une déformation croissante est imposée à l'éprouvette, sur laquelle deux repères, initialement distants de L_0 , ont été tracés, et on mesure simultanément l'effort F et l'allongement $A = Lu - L_0$.

L'éprouvette, qui peut être obtenue par usinage ou moulage, est normalisée et comporte une partie calibrée de longueur L_c , raccordée par un congé aux têtes d'amarrage, [74].

Au cours de l'essai de traction l'éprouvette est placée dans la machine d'essai. L'une des têtes est fixée dans une mâchoire fixe et l'autre dans une mâchoire mobile. La machine fournit un effort de traction F variable dont l'action s'exerce jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La vitesse de mise en charge ou vitesse de traction doit être assez faible ; elle est de l'ordre de $10\text{N/mm}^2\text{s}$. Des appareils de mesures installés sur la machine permettent de connaître à chaque instant l'effort appliqué F sur l'éprouvette et la variation de longueur $\Delta L = L - L_0$ de cette éprouvette.

F est mesuré par un indicateur de force et ΔL correspondante est mesurée par un extensomètre mécanique.

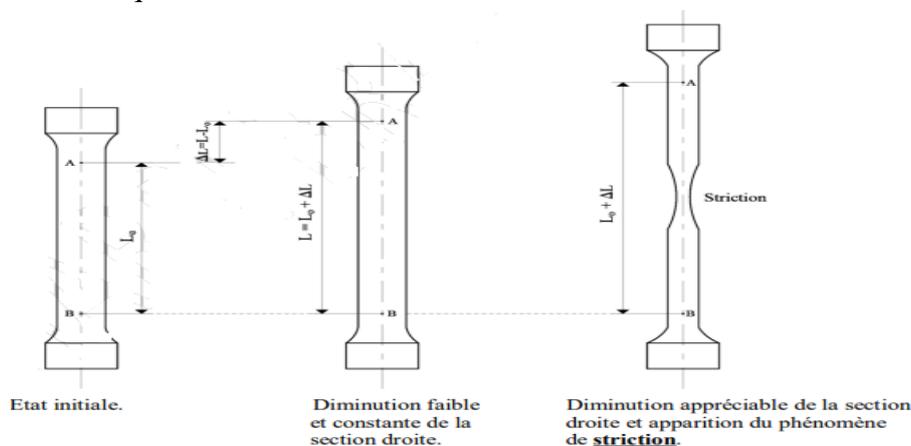


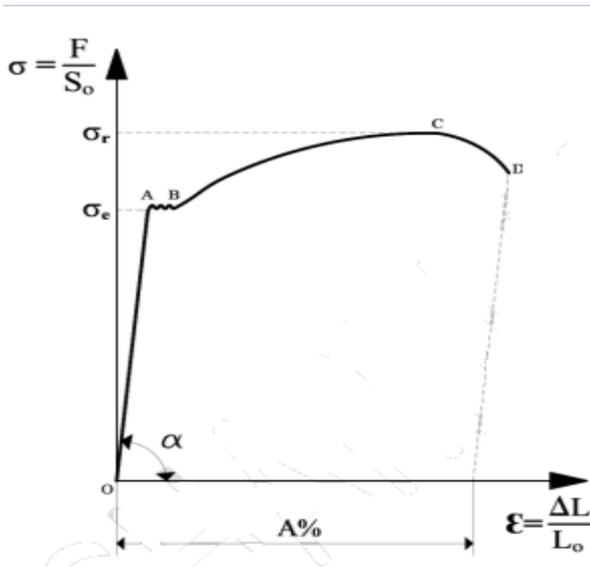
Figure 3-22 : Allure de l'évolution de la déformation d'une éprouvette en acier doux soumise à un essai de traction, [73]

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

On peut dire que ce graphe se divise en 3 domaines :

OA : domaine élastique à déformation réversible, le point A marque la limite du domaine élastique ;



AC : domaine de déformation permanent homogène ou de déformation plastique répartie ; le point C se situe à charge maximale et au début de la striction ;

CD : domaine de striction ou de déformation plastique localisée ; D point de rupture de l'éprouvette ;

ABC-Phénomène d'écrouissage : la densité de dislocation et leur enchevêtrement devenant de plus en plus élevée quand la déformation plastique croît, il faut appliquer une contrainte sans cesse croissante pour suivre la déformation plastique, [74].

Figure 3-23 : Allure du diagramme de traction d'un acier doux, [74].

Dans notre étude l'essai est réalisé sur une machine de traction au niveau de département de génie mécanique à l'école nationale polytechnique, nous avons appliqué progressivement et lentement (essai de traction monotone quasi-statique) (sans choc) à une éprouvette prismatique (plate) de section rectangulaire de forme et de dimension normalisés (Fig : 3-15) un effort de traction croissant dont l'intensité varié entre 0 et F

CHAPITRE 3

Technique d'étude et procédure expérimental

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté les diverses techniques de caractérisation employées pour analyser les échantillons métalliques soumis à des conditions de corrosion. La spectroscopie de fluorescence des rayons X (XRF) a permis d'identifier et de quantifier les éléments chimiques présents, tandis que le microscope optique a offert une visualisation détaillée de la microstructure des échantillons. Les tests de dureté et de microdureté ont fourni des informations sur la résistance des différentes phases présentes dans les matériaux, et l'essai de traction a évalué les propriétés mécaniques globales des échantillons. La préparation méticuleuse des échantillons, incluant la découpe, le polissage et l'attaque chimique, a été essentielle pour garantir des résultats précis. Les données obtenues à partir de ces techniques fourniront une base solide pour l'interprétation des résultats et la compréhension des mécanismes de dégradation causés par la corrosion, qui seront abordés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 4 :

Résultats et Discussion des résultats

Introduction

Le chapitre 4 est dédié à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus lors des différentes étapes de caractérisation et d'analyse des échantillons de matériaux.

Ce chapitre comprend une évaluation approfondie de la dégradation par corrosion à travers la caractérisation par perte de masse, des analyses chimiques détaillées, des observations métallographiques ainsi que des essais de microdureté, de dureté Brinell et des essais de traction. En combinant ces différentes techniques, nous avons pu obtenir une vue globale des effets de la corrosion et des conditions environnementales sur les propriétés mécaniques et microstructurales des échantillons.

Cette approche intégrée permet de comprendre les facteurs sous-jacents influençant la performance des matériaux en service et de tirer des conclusions sur leur résistance à la corrosion et leurs caractéristiques mécaniques.

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

1. Résultats de la caractérisation par perte de masse :

La caractérisation par perte de masse est une méthode essentielle pour évaluer l'étendue de la corrosion sur les échantillons de matériaux. En mesurant la masse initiale et finale des échantillons, nous pouvons quantifier la perte de masse due à la corrosion et par conséquent, évaluer la dégradation des matériaux. Voici les résultats obtenus pour les trois échantillons analysés présentés dans le tableau suivant :

Echantillon	E1	E2	E3
La masse m_i	$m_1=4,948\text{g}$	$m_2=8,348\text{g}$	$m_3=13,132\text{g}$
Perte de masse $m_0 - m_i$	$m_0 - m_1 = 8,552\text{g}$	$m_0 - m_2 = 5,152\text{g}$	$m_0 - m_3 = 0,368\text{g}$
Pourcentage de perte de masse $\frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100$	$\frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 = 63,35\%$	$\frac{m_0 - m_2}{m_0} \times 100 = 38,16\%$	$\frac{m_0 - m_3}{m_0} \times 100 = 2,73\%$
Diamètre intérieure d_i	$d_1= 37\text{mm}$	$d_2= 37\text{mm}$	$d_3= 37\text{mm}$
Diamètre extérieure D_i	$D_1= 42\text{mm}$	$D_2= 45\text{mm}$	$D_3= 48\text{mm}$
Avec $m_0=13,5\text{g}$ $d_0= 37\text{mm}$ $D_0= 50\text{mm}$			

Tableau 4-1 : Représente les mesures de masses et de diamètre des échantillons Corrodés

Pour visualiser ces données, un graphique comparatif de la perte de masse des trois échantillons a été réalisé. Le graphique ci-dessous illustre clairement les différences de perte de masse entre les échantillons, facilitant ainsi la comparaison et l'interprétation des résultats.

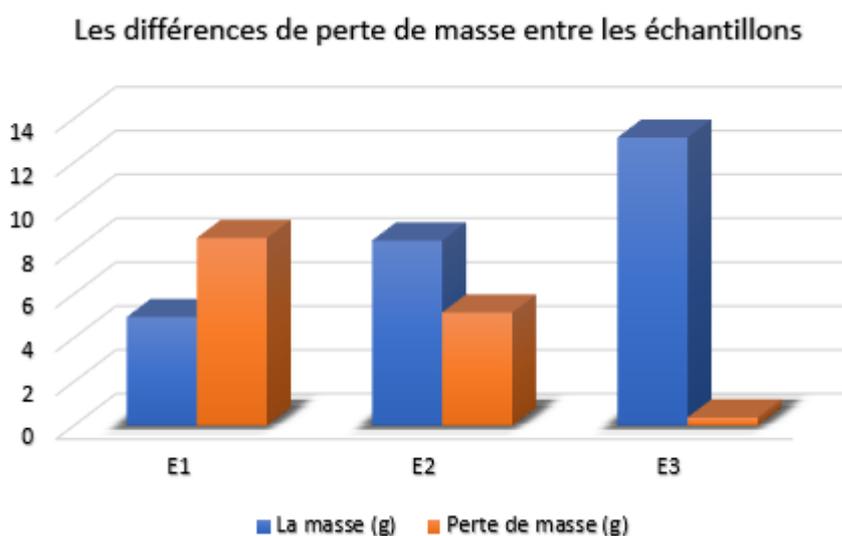


Figure 4-1 : Histogramme représente les différences de masses et de perte de masse entre les échantillons

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

- **L'interprétation :**

Les résultats montrent une corrélation directe entre la perte de masse et le niveau de dégradation par corrosion des échantillons

L'échantillon E1 a subi la plus grande dégradation, suivi de l'échantillon E2, tandis que l'échantillon E3 a montré une résistance significative à la corrosion.

La divergence dans la perte de masse entre ces échantillons peut être imputée à plusieurs facteurs environnementaux et opérationnels qui influencent la corrosion sous calorifuge.

Premièrement, la longueur de la ligne de laquelle les échantillons ont été prélevés est critique. Des parties différentes de la ligne, plus éloignées ou plus proches de la source de chaleur, peuvent être exposées à des températures différentes. Cette variation thermique peut entraîner des gradients de corrosion, les zones les plus proches de la source de chaleur étant susceptibles de subir une corrosion plus intense en raison de températures plus élevées.

De même, les échantillons découpés à partir de différentes zones le long de la ligne peuvent être soumis à des conditions d'humidité différentes en raison de variations locales dans l'environnement de la centrale. Ces différences d'exposition à l'humidité peuvent affecter la vitesse de corrosion, certaines zones étant plus sujettes à la formation de condensation ou à des niveaux d'humidité plus élevés tels que cette humidité due aux infiltrations d'eau de pluie, les fuites provenant d'installations voisines ou les projections d'eau provenant des systèmes anti-incendie.

De plus, les différences de vitesse d'écoulement du fluide à travers la ligne peuvent également influencer la distribution de la corrosion, les zones avec un débit plus lent étant potentiellement plus susceptibles de retenir des contaminants corrosifs.

2. Résultats d'analyse chimique :

La composition chimique des échantillons est vérifiée par une analyse chimique à l'aide d'un spectromètre, le tableau suivant regroupe les résultats de l'analyse chimique

Elément chimique	E1	E2	E3
C%	0,25%	0,23%	0,22%
Fe%	97,86%	97,84%	98,17%
Mn%	0,82%	0,78%	0,72%
Si%	0,26%	0,30%	0,34%
Cu%	0,17%	0,14%	0,17%
Ni%	0,05%	0,08%	0,04%
W%	0,04%	0,01%	0,05%
V%	0,04%	0,03%	0,04%
P%	0,02%	--	0,02%
Nb%	0,02%	0,01%	0,01%
Cr%	0,14%	0,12%	0,11%

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

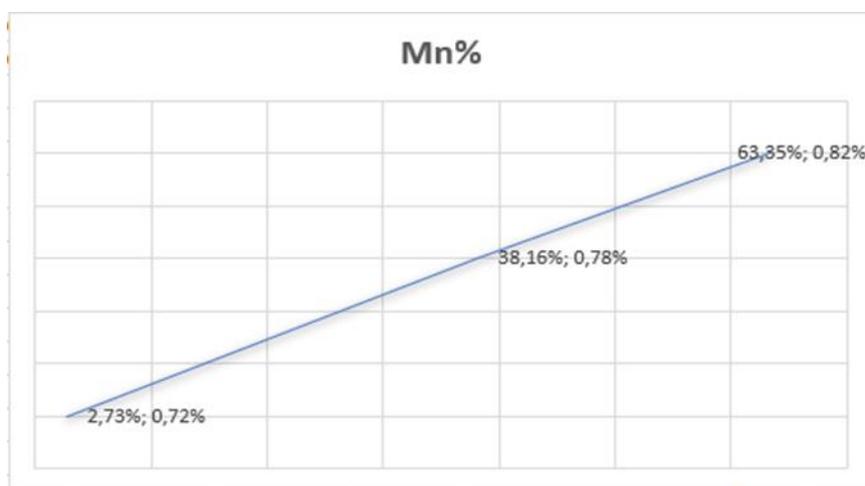
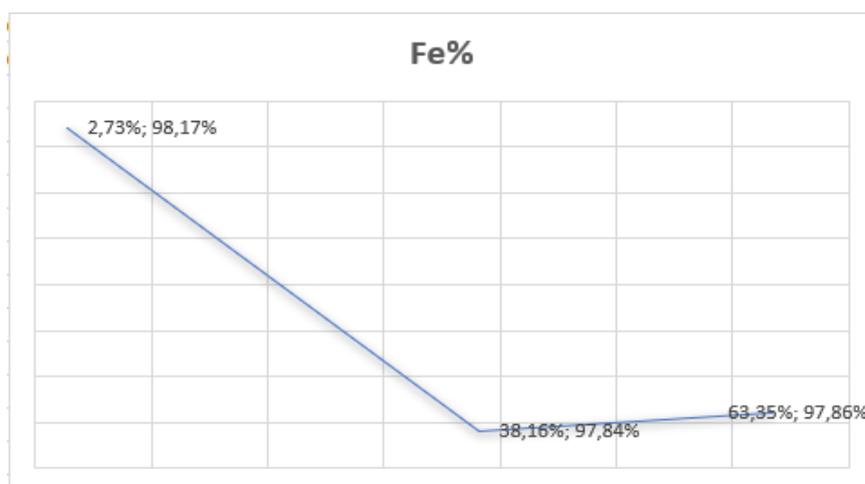
Mo%	0,035%	0,034%	0,034%
Pb%	--	0,05%	0,06%
Ti%	--	0,05%	--

Tableau 4-2 : Tableau représente la composition chimique de l'acier A 106 Gr B

- **L'interprétation :**

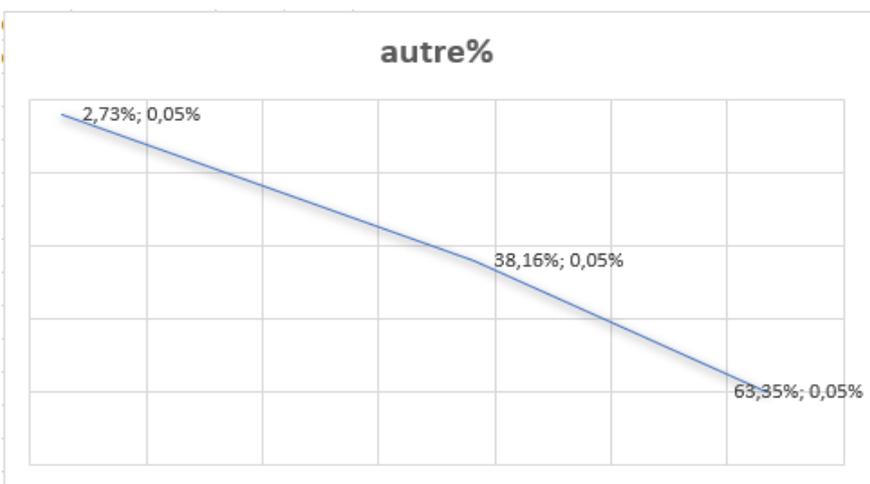
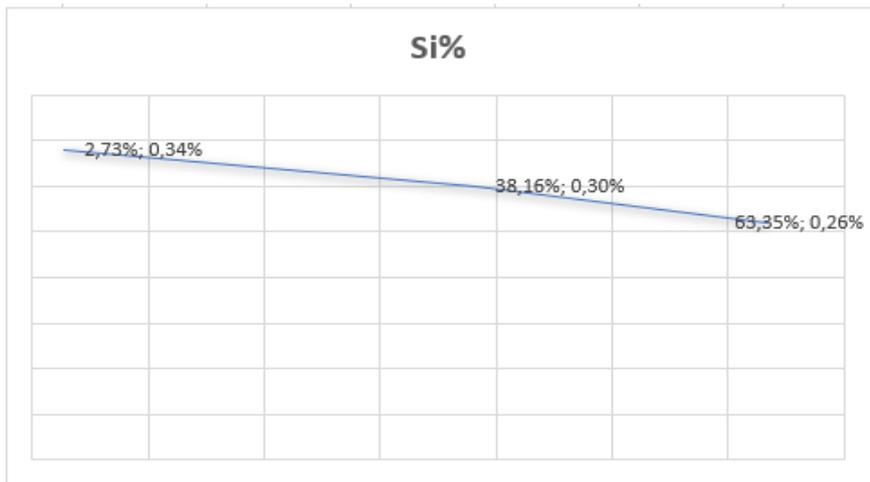
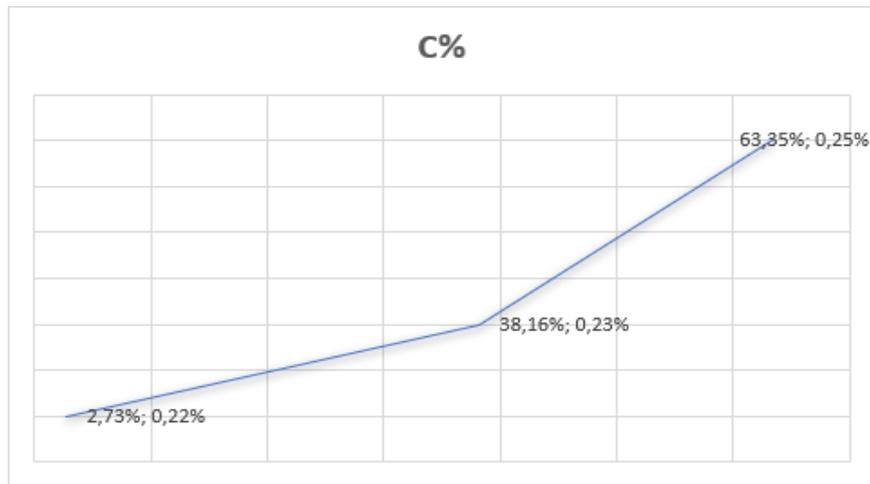
Les résultats de l'analyse chimique des échantillons E1, E2 et E3 montrent des variations notables dans la teneur en carbone, fer, manganèse, silicium et autres éléments d'alliage, malgré leur origine commune.

Nous avons tracé des courbes pour chaque élément (Fe, Si, Mn, C) en fonction du pourcentage de perte de masse trouvé dans le tableau 4-1, afin de permettre une interprétation plus approfondie.



CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats



CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

- **L'interprétation :**

Les teneurs en carbone diminuent légèrement de E1 (0,25%) à E3 (0,22%). La teneur en fer est légèrement plus élevée dans E3 (98,17%), tandis que les variations dans la teneur en manganèse, avec E2 ayant la plus haute teneur (0,82%) et E3 la plus faible (0,72%), influencent la dureté et la résistance à la corrosion.

Le silicium, augmentant de E1 (0,26%) à E3 (0,34%), compense en partie la réduction de carbone en améliorant la résistance et la dureté. Le cuivre, constant dans E1 et E3 (0,17%), et le nickel, plus élevé dans E2 (0,08%), affectent la résistance à la corrosion et la ténacité.

Les autres éléments, comme le chrome, le molybdène et le vanadium, bien que présents en faibles quantités, contribuent à des variations dans la résistance à l'usure et la solidité.

Ces différences peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, notamment l'inhomogénéité du matériau de base, les variations dans les processus de fabrication et de traitement thermique, ainsi que les conditions environnementales et de service auxquelles les échantillons ont été exposés, par exemple, la corrosion sélective et l'usure localisée peuvent modifier la composition chimique en surface, tandis que des différences dans les températures de chauffage et les taux de refroidissement lors de la fabrication peuvent également influencer la distribution des éléments d'alliage.

De plus, les méthodes d'analyse et d'échantillonnage peuvent introduire des légères variations dans les résultats.

Ces différences dans la composition chimique contribuent à expliquer les variations observées dans les propriétés mécaniques et microstructurales des échantillons, telles que la dureté et la fraction volumique des phases.

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

3. Résultats de l'observation métallographique :

L'observation métallographique des 3 échantillons réalisé a montré l'existence d'une structure en bande biphasique (ferrite et perlite), a cet état, aucune forme de précipité n'a été observé.

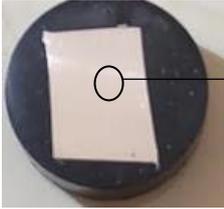
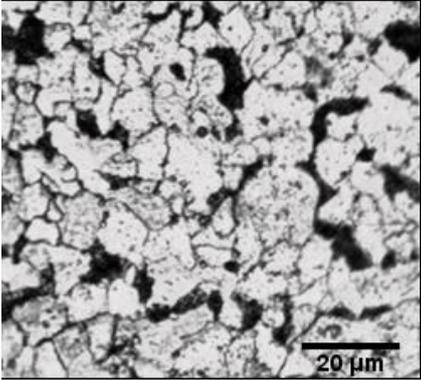
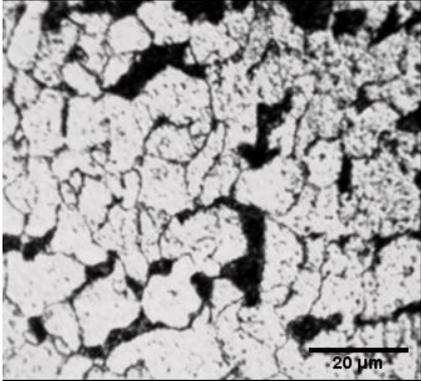
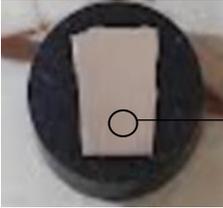
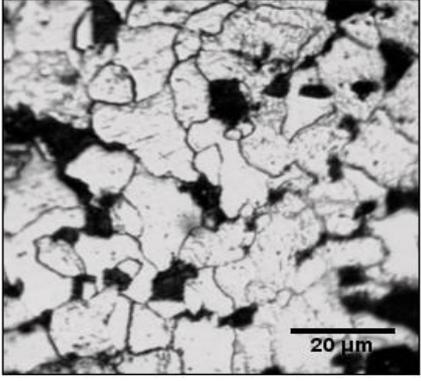
Echantillon	Micrographie
 <p>E1</p>	 <p>20 µm</p>
 <p>E2</p>	 <p>20 µm</p>
 <p>E3</p>	 <p>20 µm</p>

Tableau 4-3 : Des micrographie représente la microstructure de l'acier A106 grade B en différentes zones ayant subi une attaque chimique avec du Nital 2 %

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

La microstructure de l'acier étudié observé par microscopie optique montre une structure ferrito-perlitique.

Les zones blanchâtres correspondent à la ferrite, les zones foncées correspondent à la perlite (mélange de ferrite et de cémentite).

Les grains de ferrite sont de forme cellulaire plus ou moins arrondie. Les grains perlitiques sont relativement plus fins et se développent préférentiellement aux joints de grains ferritiques.

3.1. Traitement d'image :

Dans notre étude, nous avons utilisé le logiciel "ImageJ" pour analyser la microstructure des échantillons. ImageJ est un outil de traitement d'image puissant et polyvalent, largement utilisé dans le domaine des sciences des matériaux pour quantifier diverses caractéristiques microstructurales. En particulier, nous avons employé ce logiciel pour mesurer la taille des grains de ferrite et calculer la fraction volumique des phases ferrite et perlite.

➤ Les fractions volumiques de ferrite de perlite :

La surface en rouge représente la surface de la perlite, et le logiciel calcule la fraction volumique de cette zone, fournissant ainsi une mesure précise de la proportion de perlite dans l'échantillon.

a. Echantillon E1

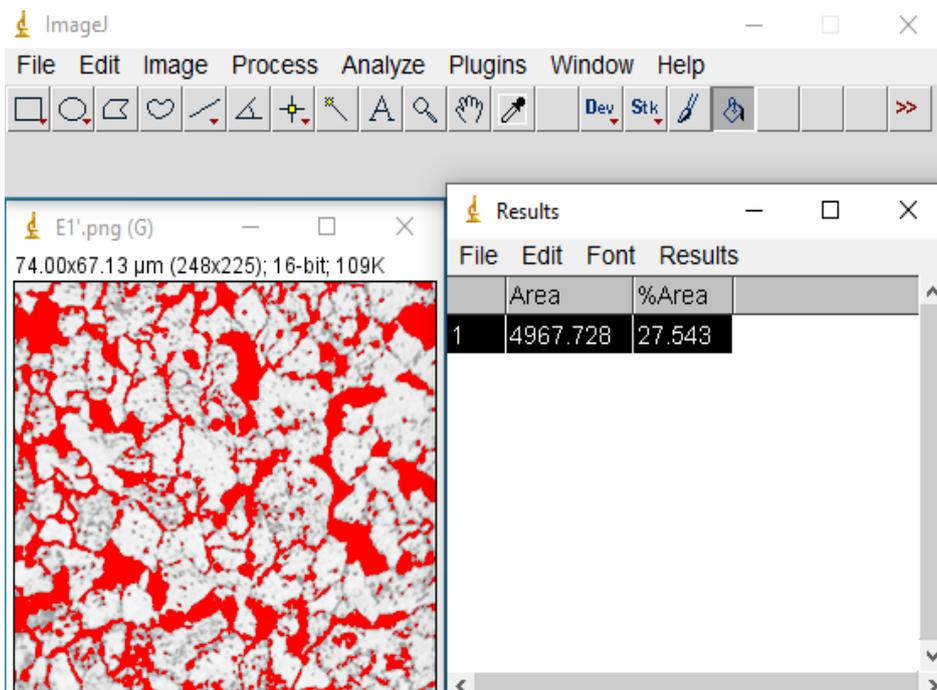


Figure 4-2 : La figure illustre les étapes à suivre pour calculer la fraction surfacique de la perlite dans E1 à l'aide du logiciel « ImageJ »

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

b. Echantillon E2 :

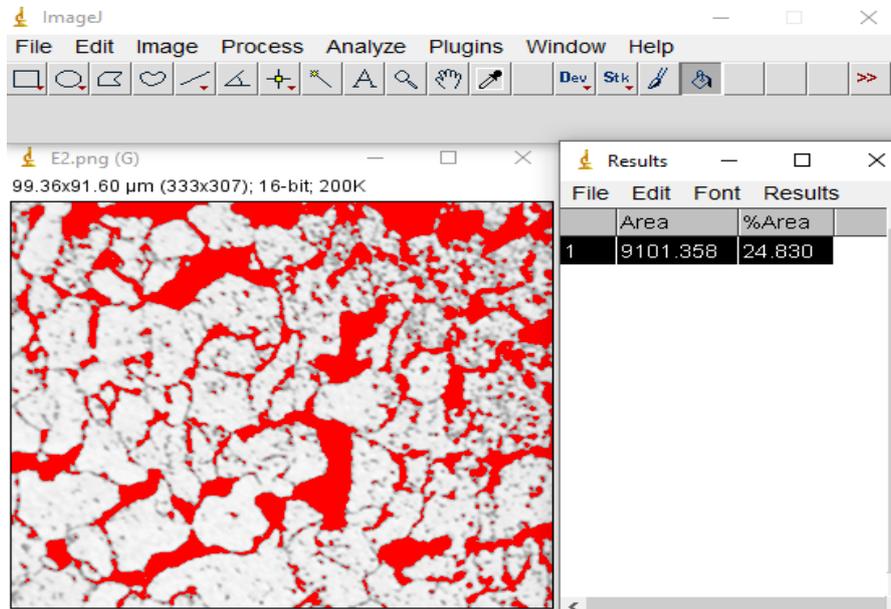


Figure 4-3 : La figure illustre les étapes à suivre pour calculer la fraction surfacique de la perlite dans E2 à l'aide du logiciel « ImageJ »

c. Echantillon E3 :

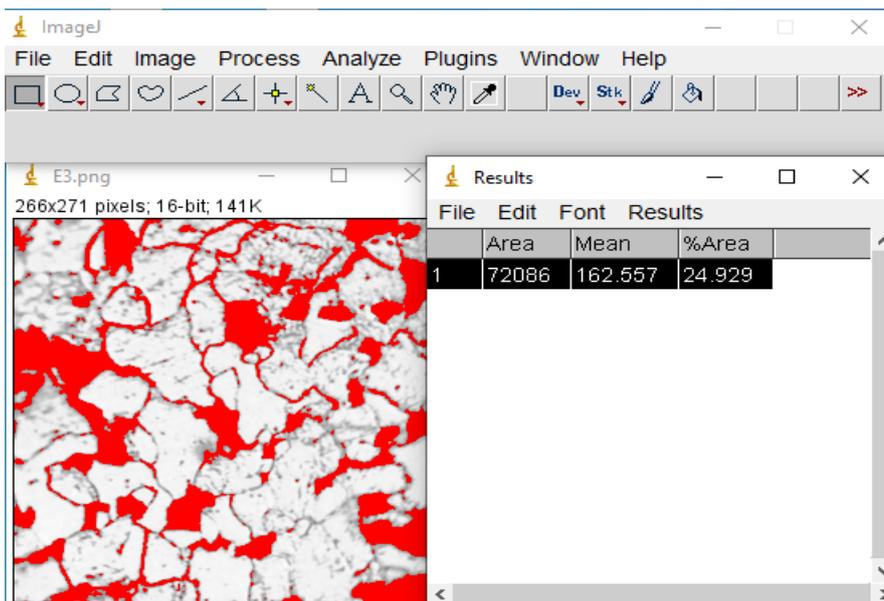


Figure 4-4 : La figure illustre les étapes à suivre pour calculer la fraction surfacique de la perlite dans E3 à l'aide du logiciel « ImageJ »

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

On résume les résultats dans le tableau suivant :

Echantillon	La fraction volumique de la perlite%	La fraction volumique de la ferrite%
E1	27,543%	72,457%
E2	24,830%	75,170%
E3	24,929%	75,071%

Tableau 4-4 : Tableau des fractions volumiques de la ferrite et de la perlite

Les résultats montrent des variations modestes dans les fractions volumiques de la perlite et de la ferrite entre les différents échantillons. Bien que ces différences ne soient pas importantes, elles peuvent fournir des informations utiles sur les conditions locales du matériau.

Les différences modestes peuvent être dues à des variations mineures dans les conditions de refroidissement pendant la fabrication ou le traitement thermique du tube, car la vitesse de refroidissement du matériau après le traitement thermique ou lors de la solidification initiale influence fortement la proportion de phases formées. Un refroidissement plus rapide favorise la formation de ferrite, tandis qu'un refroidissement plus lent permet la formation de perlite.

Les différences de température locales peuvent influencer la distribution des phases en modifiant la diffusion des atomes pendant l'utilisation ou le traitement.

Même si la corrosion semble uniforme à grande échelle, des variations locales peuvent exister. Par exemple, des zones protégées de l'humidité par l'isolation peuvent moins corroder et ainsi mieux conserver leurs phases initiales.

4. Résultats expérimentaux d'essai de microdureté :

Nous avons réalisé des essais de microdureté avec une charge $F=0,1\text{Kg}$ f, et nous avons utilisé pour chaque échantillon 3 essais, puis nous avons calculé la moyenne. Les résultats des essais sont représentés dans le tableau suivant :

Echantillon	E1		E2		E3	
Les phases	Ferrite	Perlite	Ferrite	Perlite	Ferrite	Perlite
La dureté Hv	90 Hv	220 Hv	80 Hv	200 Hv	70 Hv	150 Hv

Tableau 4-5 : Tableau des résultats des essais de microdureté

- **Interprétation :**

L'échantillon E1 présente la plus haute dureté parmi les trois échantillons, pour les phases de ferrite et de perlite. Les valeurs de dureté élevées pour l'échantillon E1 peuvent s'expliquer par un durcissement superficiel dû à l'effet des contraintes résiduelles introduites par la corrosion.

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

Bien que la corrosion n'affecte pas directement les phases, elle peut induire des microstructures fines à la surface qui augmentent la dureté mesurée.

La dureté élevée de la perlite, en particulier, indique que les lamelles de cémentite sont encore bien définies et n'ont pas été significativement altérées.

L'échantillon E2 montre des valeurs de dureté intermédiaires. Cela peut être dû à une moindre quantité de contraintes résiduelles et à une structure de grains plus relâchée comparée à E1. La corrosion modérée a peut-être créé des changements mineurs dans la microstructure de surface.

Les valeurs de dureté les plus basses pour l'échantillon E3 reflètent l'état le plus proche de la structure métallique d'origine sans influence significative de la corrosion. Cet échantillon, étant le moins corrodé, a une microstructure plus uniforme et moins de contraintes résiduelles.

Les variations de dureté entre les échantillons, bien que provenant du même matériau, peuvent être expliquées par plusieurs facteurs liés à l'impact de la corrosion et aux conditions environnementales spécifiques de chaque échantillon.

La corrosion peut introduire des microfissures, des contraintes résiduelles et des altérations superficielles qui modifient localement la dureté. Ces effets varient selon l'intensité et la localisation de la corrosion. La corrosion peut également générer des contraintes résiduelles à la surface du matériau, durcissant ainsi les phases de ferrite et de perlite, avec des différences d'un échantillon à l'autre en fonction des conditions locales.

Les variations de température et d'humidité le long de la ligne peuvent créer des conditions de corrosion inégales, affectant la dureté des phases. Les zones plus chaudes ou plus exposées à l'humidité pourraient présenter une corrosion plus agressive, augmentant la dureté superficielle. La vitesse de l'écoulement de la vapeur peut également influencer la corrosion ; des vitesses plus élevées peuvent entraîner une érosion-corrosion, modifiant davantage la surface et influençant la dureté locale des phases.

Enfin, même si le matériau est le même, des variations locales dans la microstructure et la composition chimique à petite échelle peuvent exister. Lors des mesures de microdureté, ces inhomogénéités locales peuvent entraîner des variations dans les valeurs de dureté observées.

5. Résultats de l'essai de dureté :

Les résultats de dureté Brinell (HB) obtenus pour les échantillons E1, E2, et E3 montrent dans le tableau suivant :

Echantillon	E1	E2	E3
Dureté HB	118,1 HB	111,9 HB	101,4 HB

Tableau 4-6 : Tableau des résultats des essais de dureté

- **L'interprétation**

Cette variation de dureté peut être interprétée à la lumière de plusieurs facteurs influençant les matériaux soumis à la corrosion :

Les légères variations dans la composition chimique des échantillons peuvent expliquer les différences de dureté. Par exemple, de petites variations dans les pourcentages de carbone, manganèse, et silicium peuvent modifier les propriétés mécaniques du matériau, notamment la dureté. E1, avec une dureté de 118,1 HB, pourrait avoir une composition légèrement plus favorable à une plus grande dureté, possiblement en raison d'une teneur marginalement plus élevée en éléments d'alliage durcissants.

Même après polissage, la microstructure interne du matériau peut varier. Les différences dans la fraction volumique de phases telles que la ferrite et la perlite, ainsi que la taille des grains, peuvent influencer la dureté.

Les échantillons pourraient avoir subi des traitements thermomécaniques différents au cours de leur service, même s'ils proviennent du même matériau. Des variations locales de la température et des contraintes mécaniques peuvent altérer la dureté, par exemple, des zones soumises à des températures plus élevées peuvent entraîner un durcissement par précipitation ou des transformations de phase qui augmentent la dureté.

Bien que le matériau soit nominalelement le même, des inhomogénéités microscopiques peuvent toujours exister. Ces inhomogénéités peuvent résulter de la fabrication initiale du matériau ou de son histoire de service, influençant les mesures de dureté. Les variations de dureté observées pourraient refléter des différences subtiles dans la distribution des éléments d'alliage et des phases métallurgiques.

Les différences dans les conditions de mesure ou dans l'équipement utilisé peuvent également introduire des variations. Bien que les procédures soient standardisées, de petites variations dans l'application de la charge ou la lecture des indentations peuvent influencer les résultats.

6. Résultats de l'essai de traction :

Lors de l'essai de traction, nous avons uniquement testé l'échantillon E3. Les autres échantillons, étant corrodés et extrêmement fragiles, n'ont pas pu être usinés pour former des éprouvettes conformes aux normes. La corrosion avancée de ces échantillons a rendu leur manipulation et leur préparation impossibles sans compromettre leur intégrité structurelle.

Par le logiciel lié (adéquate) à la machine de traction nous avons obtenus cette courbe de traction :

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

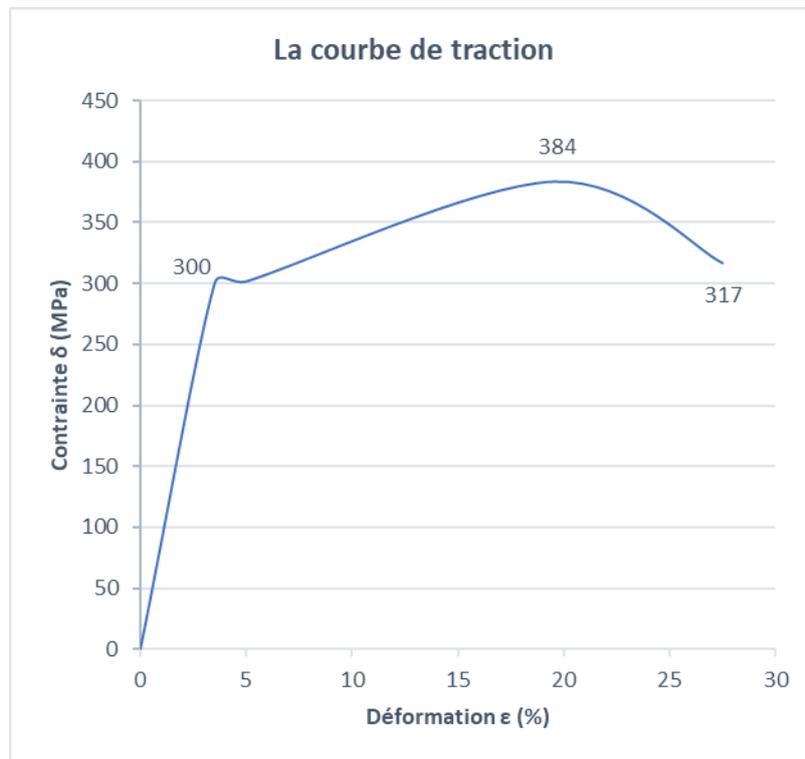


Figure 4-5 : La courbe de traction obtenue

À partir de cette courbe de traction, nous avons déterminé les paramètres suivants :

La limite élastique σ_e	La contrainte maximale σ_m	La résistance à la rupture σ_r
300 MPa	384 MPa	317 MPa

Tableau 4-7 : Tableau des résultats des essais de traction

Ces paramètres sont essentiels pour évaluer les propriétés mécaniques de l'échantillon testé et pour comprendre son comportement sous contrainte.

Lorsque nous comparons ces résultats avec les valeurs d'un échantillon non corrodé et non utilisé, présentées dans le tableau 1-14 du chapitre 1, nous pouvons observer les différences notables en termes de performance mécanique.

CHAPITRE 4

Résultats et Discussion des résultats

- **Interprétation :**

L'échantillon E3 montre une limite élastique de 300 MPa, une contrainte maximale de 384 MPa, et une résistance à la rupture de 317 MPa, alors que l'échantillon non utilisé présente respectivement 240 MPa, 450 MPa, et 415 MPa. Les résultats de l'échantillon E3 indiquent une augmentation de 25% de la limite élastique par rapport à l'échantillon non utilisé. Cette augmentation peut être attribuée au phénomène d'écrouissage causé par le planage à froid pendant l'usinage de l'éprouvette de traction. Le planage à froid est une technique de déformation plastique à basse température, utilisée pendant l'usinage, qui entraîne un écrouissage du matériau. Ce processus augmente la densité de dislocations dans le matériau, rendant le déplacement des dislocations plus difficile et accroissant ainsi la résistance à la déformation plastique ultérieure. En conséquence, le matériau montre une limite élastique plus élevée. Cependant, la contrainte maximale et la résistance à la rupture de l'échantillon E3 sont inférieures de 14.7% et 23.6% respectivement, par rapport à l'échantillon non utilisé.

Cette réduction peut être due à la fragilisation du matériau causée par la corrosion, qui génère des microfissures et des points de faiblesse structurels. En conséquence, même si la corrosion peut augmenter temporairement la limite élastique, elle réduit considérablement la capacité de l'acier à supporter des charges élevées et à résister à la rupture.

Les résultats montrent un allongement à la rupture élevé $A\% = 20\%$, une longue région de déformation plastique sur la courbe de contrainte-déformation et à partir de la figure 4-6 on a observé une fracture fibreuse avec des signes de déformation plastique, on peut conclure que le matériau testé est ductile.

Typiquement, un matériau avec un allongement à la rupture supérieur à 5-10% est considéré comme ductile.



Figure 4-6 : L'éprouvette après la rupture

Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre révèlent des variations significatives dans la dégradation des échantillons soumis à la corrosion, comme illustré par les différences dans la perte de masse, la composition chimique, la microstructure et la dureté.

L'échantillon E1, ayant subi la plus grande perte de masse et présentant la dureté la plus élevée, illustre l'impact de conditions environnementales plus sévères et des contraintes résiduelles induites par la corrosion. En comparaison, l'échantillon E3, moins affecté par la corrosion, montre des propriétés mécaniques plus proches de l'état d'origine du matériau.

Les analyses chimiques et métallographiques ont mis en évidence des variations dans la composition élémentaire et la distribution des phases, influençant les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion des échantillons.

Ces résultats soulignent l'importance de la caractérisation multi-technique pour une compréhension complète des matériaux en conditions de service, et fournissent des informations essentielles pour l'amélioration de la durabilité et de la fiabilité des matériaux dans des environnements corrosifs.

Conclusion Générale

Conclusion

Notre étude sur la caractérisation métallurgique des tubes en acier A106 Gr B corrodés dans un générateur de vapeur à récupération de chaleur d'une centrale à cycle combiné a permis d'identifier et de comprendre les mécanismes de dégradation par corrosion sous calorifuge. En analysant trois échantillons d'acier présentant des degrés variés de corrosion, nous avons observé des différences significatives en termes de perte de masse, de composition chimique, de microstructure et de dureté. Ces résultats ont révélé que, bien que l'acier A106 Gr B soit généralement approprié pour de nombreuses applications industrielles, il présente des vulnérabilités face à la corrosion, en particulier dans des environnements humides et thermiquement variés.

Les variations constatées dans la teneur en éléments d'alliage, la microstructure et la dureté suggèrent que la corrosion a un impact différentiel sur les propriétés mécaniques du matériau. Les échantillons les plus corrodés montrent une perte de masse significative et une altération de leurs caractéristiques mécaniques, ce qui pourrait compromettre la fiabilité et la sécurité des systèmes dans lesquels ces matériaux sont utilisés.

Pour atténuer les effets de la corrosion et améliorer la durabilité des tubes en acier A106 Gr B, plusieurs solutions pratiques et économiques peuvent être mises en place. D'abord, il est crucial d'améliorer les pratiques d'isolation en utilisant des matériaux résistants à l'humidité et en optimisant la conception de l'isolation pour éviter les zones de piégeage d'humidité. Ensuite, la mise en place de systèmes de surveillance continue, tels que des capteurs d'humidité et des sondes de corrosion, permettrait de détecter les signes précoces de dégradation et d'intervenir avant que des dommages significatifs ne se produisent.

Par ailleurs, l'établissement de programmes de maintenance préventive et l'utilisation de techniques d'inspection non destructives peuvent contribuer à la détection précoce des problèmes de corrosion et à la réduction des coûts de réparation. La formation et la sensibilisation du personnel de maintenance et d'exploitation aux meilleures pratiques pour la gestion de la corrosion sont également essentielles pour assurer une gestion efficace des risques associés.

En conclusion, bien que l'acier A106 Gr B présente certaines vulnérabilités face à la corrosion sous calorifuge, il reste un matériau viable pour les applications dans les centrales thermiques, à condition que des mesures adéquates de prévention et de gestion de la corrosion soient mises en place. L'adoption de solutions pratiques et économiques, telles que l'application de revêtements protecteurs, l'amélioration de la ventilation et la réalisation d'inspections régulières, peut prolonger la durée de vie des tubes et améliorer la fiabilité des générateurs de vapeur à récupération de chaleur. Ces mesures contribueront non seulement à réduire les coûts d'exploitation, mais aussi à optimiser les performances et la sécurité des centrales à cycle combiné.

Références Bibliographique

- [1]. **A. ZEMMOURI. S. TOUATI. A. HAOUAM.** « EFFET DE LA QUALITE DE L'EAU SUR LES PERFORMANCES DE CENTRALE THERMIQUE ». 3ème Conférence Internationale de Mécanique. 2017
- [2]. **M.S. BOUCHAMA.** « Dimensionnement du condenseur de la centrale thermique de, Hadjret Ennousse ». Université BADJI MOKHTAR ANNABA.2017
- [3]. **A. OUACHOUACH.** « Contribution à l'étude d'impact de la corrosion marine sur les installation, Etude du cas et proposition des solutions ». Université BADJI MOKHTAR ANNABA.2017
- [4]. **Janusz K., Marcin J, Mateusz B.** (2015). The characteristics of ultramodern combined cycle power plants. Energy, 92, 197-211.
- [5]. **La Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz (STEG).** « Etude énergétique de cycle vapeur ». 2015
- [6]. **A. BEN ALLA.** « Evaluation des performances d'une centrale thermique à cycle combiné ». Université BADJI MOKHTAR ANNABA. 2020.
- [7]. **D. BONNERUE.** « Fonctionnement d'une turbine à gaz à compresseur axial ». France. 2006.
- [8]. **A. AZEB. R. AZEB.** « Analyse métrologique de la composition du gaz combustible et de son impact dans la centrale 1227 MW, SKH ». Université SAAD DAHLAB BLIDA. 2017.
- [9]. **La société de construction Nirro Va Tavan Co.** « Heat Recovery Steam Generation HRSG ».
- [10]. **GE Generators.** « Les turbines à vapeur de réchauffage STF-D650 ». 2014.
- [11]. **HRSG BU/Power Plant GB Doosan Heavy Industries and Construction Co.LTD.** «Operation Training Manual For Hadjret HRSG ». 2008.
- [12]. **B. LAOUAMEUR.** « Etude du système contrôle commande d'une centrale électrique à cycle combiné ». Université KASDI MERBAH OUARGLA. 2020
- [13]. <https://www.savree.com/en/encyclopedia/heat-recovery-steam-generator-hrsg> Consulté le 8/03/2024
- [14]. **L.BOUSSOUAR. S. NEDJIMI.** « Etude de la transformation du groupe n°1 de la centrale de Cap-Djenet en cycle combiné ». Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou. 2015
- [15]. **O. MANZOOR. H. ANSAR.** « Heat Recovery Steam Generator (HRSG) failures and Inspection Techniques ».2016
- [16]. https://fr.made-in-china.com/co_cnyoufasteel/product_ASTM-A213-Same-SA213-T5-T9-T11-T12-T21-T22-High-Quality-Heat-Exchanger-Alloy-Seamless-Round-Steel-Pipe-Boiler-Straight-Tu2bes_ysenroohhg.html Consulté le 10/03/2024

Références Bibliographique

- [17]. <https://www.worldironsteel.com/heat-resistant-steel-pipe/t91-p91-steel-pipe-for-exchanger.html> Consulté le 11/03/2024
- [18]. <https://fr.czyzindustry.com/> Consulté le 11/03/2024
- [19]. Document de SNC-LAVALIN
- [20]. **W. BOUGHABA.** « Etude comparative du comportement à la corrosion de deux aciers HLE avec l'étude de l'influence de la température dans H₂ SO₄ ». Université BADJI MOKHTAR ANNABA. 2017
- [21]. **P. BESLU.** « Corrosion des circuits primaires dans les réacteurs à eau sous pression ». Analyse historique. p 25. Mars 2014.
- [22]. **L.HATTALI.** « Mise en oeuvre et comportement des matériaux, Corrosion mécanismes et préventions ». Université de Paris Sud.
- [23]. **Département Américain de l'énergie.** « Science des matériaux, DOE, Fundamentals ». Vol. 1, 2. Janvier 1993.
- [24]. **D.SI-SALAH.** « Différents types de corrosion ». Algerian Petroleum Institute. Décembre 2010.
- [25]. **H. Boulmeche.** « Etude de l'efficacité du revêtement de machine du secteur humide de la Tannerie de Jijel ». Université de SKIKDA, 2006.
- [26]. **P. OLAV GARTLAND.** « Choosing the right positions for corrosion monitoring on oil and gas pipelines ». Corr-ocean, USA, paper, NACE, Houston.1998.
- [27]. **S. Payan.** « Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium renforcée par des fibres de carbone haut-module ». Université de Bordeaux, France.2001.
- [28]. **G. DAUFIN, J. TALBOT.** « Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière ». Janvier 1971.
- [29]. **M. HELIE.** « Matériaux métalliques phénomènes de corrosion ». Université d'Evry - Val d'Essonne Département Sciences des Matériaux.
- [30]. **M.C.BOUKABACHE, M.TOUIKER.** « Séminaire corrosion et protection ». Algerian Petroleum Institute. Avril 2008.
- [31]. **Cefractor Certification Protection Cathodique.** « La Corrosion Aqueuse ». 2011.
- [32]. **P. BESLU.** « Corrosion des circuits primaires dans les réacteurs à eau sous pression ». Analyse historique. p 27. Mars 2014.

Références Bibliographique

- [33]. **C.DEFONTAINE.** « Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré », 2011.
- [34]. **H. ELBAKOURI.** « Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique ». Université MOHAMMED 1 – OUAJDA MAROC. 2000.
- [35]. **P. MARCUS, V. MAURICE.** « Comparaison of Atomic Structures of Passive Films on Chromium and on Ferritic Stainless Steels », Laboratoire de Physico-chimie des Surfaces CNRSURA, Paris.1997.
- [36]. **P. EVERT, D. DURING.** « Corrosion Atlas ». 2018.
- [37]. **I. BOUALI.** « Étude d'inhibiteurs de corrosion métallique à base d'orthophosphates de zirconium lamellaires fonctionnalisés : synthèse, caractérisations et applications ». Université CADDI AYYAD - MARRAKECH, MAROC. 2018.
- [38]. **S.J. KETCHAM, I.S. SHAFFER.** « Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys ». ASTM, STP 516, pp.3-16, 1972.
- [39]. **A. BRAHAMI.** « Etude de l'influence du couplage entre les caractéristiques mécaniques et les sollicitations appliquées sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium ». Université DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES.
- [40]. **R.W. STAEHLE, J.A. GORMAN.** « Quantitative Assessment of Sub modes of Stress Corrosion Cracking on the Secondary Side of Steam Generator Tubine in Pressurised Water Reactors: Part 1 » ,CORROSION, Vol. 59, No. 11, November 2003, pp 931-994
- [41]. **WebCorr.** Corrosion Education and Structured Training Courses for NACE Certification Application
- [42]. **H. NIAZI, R. EADIE, W.CHEN HAO ZHANG** « High pH corrosion cracking in buried steel pipelines initiation and crack evolution ». University of Alberto, Canada.
- [43]. **J. PELLIER.** « Rôle de la force ionique, de l'albumine et du pH sur la dégradation par fretting-corrosion d'un contact acier inoxydable/PMMA. Application aux implants orthopédiques ». Saint-Etienne, EMSE. 2012.
- [44]. **D. STAVREV, T. DIKOVA.** « CORROSION OF Cr-Mn-Ni HEAT-RESISTANT STEEL UNDER THERMOCYCLIC AND MECHANICAL IMPACT IN FURNACE MEDIA КОРОЗИЯ НА Cr-Mn-Ni »
- [45]. **P. BOMMERSBACH.** « Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques : caractérisation par

Références Bibliographique

techniques électrochimiques ». Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France .2005.

[46]. **M. TAYLOR, J. MALLOY.** « Boiler and HRSG Water Chemistry and Corrosion Control ». SNC Lavallin Hadjret-Ennous. Juillet 2018.

[47]. **S. LOUAH.** « Étude et analyse des causes de la corrosion des échangeurs de chaleur et proposition d'amélioration ». Université MOULAY ISMAIL. Maroc. 2014.

[48]. **LUCIUS.** « Flow Accelerated Corrosion Solution ». Lucius Pitkin inc. 2010.

[49]. **R. SRUTHI, B. TECH.** « Flow Accelerated Corrosion ».Thangal Kunju Musaliar College Of Engineering. India. 2015.

[50]. **C. MANSOUR, S. TREVIN.** « Corrosion-érosion des aciers ferritiques dans les centrales nucléaires ». Juillet 2014.

[51]. **Li Zeng, Geng Chen, Hanxin Chen.** « Comparative Study on Flow-Accelerated Corrosion and Erosion–Corrosion at a 90° Carbon Steel Bend ». School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology. China. 2019.

[52]. **A.SURBLED, V. LALANNE, F. DUPOIRON.** « LA CORROSION SOUS CALORIFUGE, LA PRÉVENIR ET LA RALENTIR ». 2020.

[53]. **J.KITTEL, F.ROPITAL.** « Corrosion sous calorifuge ». Janvier 2016.

[54]. **Q.CAO, T.POJTANABUNTOENG, M. ESMAILY, S.THOMAS, M.BRAMELD,**

A. AMER, N. BIRBILIS. « A Review of Corrosion under Insulation: A Critical Issue in the Oil and Gas Industry ». 7 January 2022.

[55]. **O. ELTAI F. MUSHARAVATI, M. EL-SADIG.** « Severity of corrosion under insulation (CUI) to structures and strategies to detect it ». From the journal Corrosion Reviews. 2018.

[56]. **M. RAKVIN, D. MARKUCIC, B. HIZMAN.** « Evaluation of pipe wall thickness based on contrast measurement using computed radiography (CR) ». 2014.

[57]. **Y. XIAOKANG, AH. DAVID, C. GUOMING, L. Wei.** « Detecting surface features on conducting specimens through an insulation layer using a capacitive imaging technique ». 2016.

[58]. **F. SAINT-ANTONIN.** « Essais de fluage ». juillet 1995.

[59]. **E. REMITA .** « Étude de la corrosion d'un acier faiblement allié en milieu contenant CO2 ». Université Pierre et Marie Curie. 2007.

Références Bibliographique

- [60]. **D. LANDOLT.** « Corrosion et chimie de surface des métaux ». Polytechniques romands
- [61]. **J. BARALIS, G. MAEDER.** « Précis de Métallurgie, (élaboration, structures-propriétés et normalisation) ». 5^{ème} édition, Nathan, 1990.
- [62]. **H. MAROUF.** « Caractérisation structural et mécanique du joint de soudé de la liaison bimétallique Acier ordinaire E36/Acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'unité Grue de bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation ». Université MOULOUD MAMMERI. TIZI OUZOU, (2012).
- [63]. **A. ROSS, B. MILOT,** « Précis de métallurgie appliquée ». Dunod, paris 1982.
- [64]. **C.W. KOVACH,** « High performance stainless steel, Technical marketing resources ». Inc, Pittsburg, PA, USA.
- [65]. **M. COLOMBIE, COLL.** « Matériaux industriels, matériaux métalliques ». Dunod, Paris. 2000.
- [66]. **R. LE GOUIC.** « Précis de soudage brassage et techniques connexes ». Eyroles, (1978).
- [67]. **C. DERAGO.** « Read acier », page 74. 2017.
- [68]. **A. ADAM.** 1994.
- [69]. **J.-M. MUSSINI.** « Mesures expérimentales et simulation Monte Carlo de la fonction de réponse d'un détecteur Si(Li): application à l'analyse quantitative multi élémentaire par XRF et PIXE, Physique Nycléaire théorique,» Thèse de doctorat en science, Université de Strasbourg, 2009.
- [70]. **J. PAULO.** « Design of Experiments in production ». University of aveiro. Portugal.
- [71]. Rapport scientifique « Microdureté Vicker ». 2016.
- [72]. **M. HABAK.** « Etude de l'Influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement100Cr6 », Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris ,2006.
- [73]. **B. GHARBI.** « Essai de traction ». UNIVERSITE DE BATNA 2. 2020.
- [74]. **M. PERNOT.** « Etude de la conception et de la réalisation des ensembles mécaniques ». 2010.