



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de 20 août 1955 Skikda

Faculté de technologie

Département de pétrochimie

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Industries pétrochimiques

Spécialité : Génie Pétrochimique

**Etude et vérification des performances de la
peinture époxy pour la protection contre la
corrosion des chaudières industrielles.**

Soutenue le : 02/07/2025

Réalisé par :

- YOUNESSI Lina
- SAOULA Selma

Encadré par :

Dr. E. BOUSSAHA

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Avec une profonde humilité, nous rendons grâce à Dieu, source de toute bénédiction, pour la santé et la détermination qu'Il nous a octroyées tout au long de ce parcours académique.

Que Sa générosité soit éternellement louée.

*Avant toute chose, nous tenons à souligner que la richesse de ce travail et sa réalisation n'auraient pas été possibles sans le précieux soutien et l'encadrement de **Mr Boussaha El Hadi**. nous lui adressons nos plus sincères remerciements pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, sa patience, sa rigueur et sa disponibilité constante durant toute la phase de préparation de ce mémoire.*

*Nous remercions sincèrement **Mr. Bougdah Nabil** chef du département de pétrochimie pour sa contribution et son soutien.*

*Nous ne pouvons manquer de remercier vivement **Mr. Djilani Abdel Karim**, ingénieur chef et coordinateur des laboratoires du hall de technologie. Son accueil a été des plus chaleureux, et son aide matérielle et technique, accompagnée de ses vifs encouragements, nous a été d'un grand secours.*

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble de l'équipe pédagogique du département de pétrochimie de l'université du 20 août 1955 Skikda. Leur accompagnement constant et leur engagement envers notre formation ont été des piliers essentiels de notre apprentissage. Nous leur sommes reconnaissantes non seulement pour la transmission des connaissances théoriques et pratiques indispensables à notre domaine d'étude, mais aussi pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur passion communicative qui ont enrichi notre parcours académique. Leur dévouement à nous fournir un enseignement de qualité et à nous préparer aux défis futurs mérite toute notre reconnaissance et nos sincères remerciements.

Enfin, nous remercions du fond du cœur nos parents pour leur soutien indéfectible et toutes les personnes qui ont participé à ce travail par leur aide et leur bienveillance.

Dédicace

Je partage ce travail avec ceux qui occupent une place spéciale dans mon cœur.

Avec tout mon amour, à Mon Père

Papa, mon étoile dans le ciel. Ce mémoire, je te l'offre, empreint de tout ce que tu m'as donné. Que chaque mot témoigne de ma profonde affection et de l'immense fierté d'être ton enfant.

Tu me manque infiniment.

A ma très chère Mère

Ma source infinie de soutien, mon pilier, que Dieu vous garde toujours. Ce mémoire est un reflet de mon amour et de ma gratitude infinie envers vous.

A ma chère sœur Bientôt maman. Que Dieu te garde, toi et ce précieux cadeau. Merci infiniment pour ton aide durant mon parcours je t'aime mon trésor.

A mon encadrant Merci à Mr Boussaïa El Hadi pour son soutien, sa gentillesse, sa responsabilité et sa patience, qui nous ont été d'une grande aide.

A mon binôme À toi, mon amie, ma moitié de cette aventure.

Merci pour tout. Que notre lien perdure.

A ma tante Ma deuxième maman, je t'aime.

Younessi Lina

Dédicace

Je remercie en premier lieu Allah de m'avoir donné la force La volonté, et patience durant toutes mes années d'études Je dédie ce modeste travail

À mon père et à ma mère,

Ce mémoire est le fruit d'un long parcours, et il n'aurait jamais vu le jour sans votre amour, votre soutien inconditionnel et vos prières. Merci pour vos sacrifices silencieux, votre patience infinie et vos encouragements constants.

Pour mes sœurs, Chaïma et Imene.

Merci d'être mes piliers. Avec tout mon amour.

À mes frères, Badreddine et Abderahmen

Merci d'avoir été mon soutien, mes critiques et mes testeurs de patience.

À mon encadrant Mr Boussaïa El Hadî ,

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour votre soutien constant et vos passion communicative tout au long de la rédaction de ce mémoire.

A mon binôme,

Merci pour cette belle aventure ! Ta bonne humeur et ton engagement ont été précieux.

Saoula Selma

Résumé :

Tous les matériaux de construction, y compris l'acier, sont sujets à l'altération lorsqu'ils sont en contact avec des milieux corrosifs tels que le sol, l'air et les environnements marins. Nous menons des recherches pour valider l'efficacité anticorrosion des peintures et vernis, en vue de leur utilisation dans le secteur pétrochimique pour protéger les équipements des environnements agressifs. Dans un premier temps, notre étude consistera à caractériser la résistance à la corrosion de l'acier C1020 (matériau provenant d'une chaudière) dans un milieu acide (H_2SO_4) et un milieu salin (Na Cl). Nous avons utilisé la méthode gravimétrique pour étudier l'impact de plusieurs paramètres – temps d'immersion, concentration du milieu et température.

Les mots clés : Corrosion, peinture, vernis, acier, méthode gravimétrique.

Abstract :

All construction materials, including steel, are subject to alteration when in contact with corrosive media such as soil, air, and marine environments. We are conducting research to validate the anticorrosion effectiveness of paints and varnishes, with a view to their use in the petrochemical sector to protect equipment from aggressive environments. Initially, our study will involve characterizing the corrosion resistance of C1020 steel (material from a boiler) in an acidic medium (H₂SO₄) and a saline medium (NaCl). We used the gravimetric method to study the impact of several parameters—immersion time, medium concentration, and temperature.

Keywords: Corrosion, paint, varnish, steel, gravimetric method.

ملخص:

تخضع جميع مواد البناء، بما في ذلك الفولاذ، للتغيير عند ملامستها للوسائط المسببة للتآكل مثل التربة والهواء والبيئات البحرية. تقوم بإجراء أبحاث للتحقق من فعالية الدهانات والورنيشات المضادة للتآكل، بهدف استخدامها في قطاع البتروكيماويات لحماية المعدات من البيئات العدوانية. في البداية، ستتألف دراستنا من توصيف مقاومة التآكل للفولاذ C1020 (المادة القادمة من الغلاية) في وسط حمضي (H_2SO_4) ووسط ملحي (NaCl). استخدمنا الطريقة الوزنية لدراسة تأثير عدة عوامل – زمن الغمر والتركيز المتوسط ودرجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الطلاء، الورنيش، الفولاذ، الطريقة الوزنية.

Remerciements

Dédicaces

- Résumés
- Liste des figures
- Liste des tableaux
- Liste des abréviations

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les chaudières industrielles	
I.1.Introduction	2
I.2.Définition d'une chaudière	2
I.3. Rôle des chaudières	2
I.4. Types des chaudières	3
I.4.1. Les chaudières à tubes de fumées	4
I.4.2. Les chaudières à tubes d'eau	6
I.5 Comparaison entre chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées	8
I.6. Mécanisme de la chaudière	8
I.6.1. Alimentation en eau	9
I.6.2. Extraction	9
I.6.3. Purge continue	9
I.6.4. Les éléments constituant le site de la chaufferie	10
I.6.4.1. Bâche dégazant	10
I.6.4.2. Bac pour eau déminéralisée	10
I.6.4.3. Chambre de combustion (foyer)	10
I.6.4.4.Brûleurs	10

I.6.4.5.Faisceau de convection	11
I.6.4.6.Economiseur	12
I.6.4.7. Vaporisateurs	13
I.6.4.8. Surchauffeurs	13
I.6.4.9. Resurchauffeurs	14
I.6.4.10. Désurchauffeurs	14
I.6.4.11. Evaporateur	14
I.6.4.12. Ventilateur de soufflage	14
I.6.4.13. Ballons de purge	15
I.6.4.14. Appareils de sécurité	15
I.6.4.15. Autres échangeurs associés à la chaudière	16
I.6.5. Circuits d'une chaudière	17
I.7. Principe général de fonctionnement	18
I.7.1.Exploitation	18
I.7.2. Mise en service des brûleurs et fonctionnement	18
I.7.3. Approvisionnement en air de combustion des brûleurs	19
I.8. Problèmes rencontrés avec une chaudière	20
I.8.1.Manque d'eau d'alimentation	20
I.8.2. Fatigue et fragilisation du métal	20
I.8.3. Qualité d'eau	21
Chapitre II : Généralités sur les Problèmes de chaudières liés à l'eau	
II. Introduction	25
II.1. Composition des eaux naturelles	25
II.1.1. Sels minéraux	25
II.1.2. Les gaz dissous	26
II.1.3. Les matières organiques	26
II.2. Mesure de la qualité de l'eau	27

II.2.1.La turbidité	27
II.2. 2. Température	27
II.2.3. Le potentiel hydrogène pH	27
II.2.4. La conductivité électrique	28
II.2.5. La dureté	28
II.2.6.Les chlorures	28
II.2.7. La salinité	29
II.2.8. Le taux de sels dissous (TDS)	29
II.2.9. Les phosphates (PO ₄ -)	29
II.2.10. Titre hydrotimétrique (TH)	29
II.2.11. Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC)	30
II.2.12. L'Oxygène dissous	31
II.3. Ressources hydrauliques naturelles	32
II.3.1. Eaux de mer	32
II.3.2. Eaux souterraines	33
II.4. Qualité de l'eau nécessaire à l'alimentation des chaudières	34
II.5. Traitement des eaux de chaudière	36
II.5.1. Traitement de l'eau d'appoint	36
II.5.1.1. Prétraitements	36
II.5.1.2. Chloration des eaux	39
I.5.1.3. Traitement par dessalement	40
II.5.1.3.1. Distillation	41
II.5.1.3.2.Osmose inverse	42
II.6. Problèmes causés par l'eau	44
II.6.1. La corrosion	44
II.6.1.1. Types de corrosion	44
II.6.1.2. Corrosion des chaudières	47
II.6.1.3. Corrosion dans les circuits de vapeur et d'eau condensée	49

II.6.2. L'entartrage	51
II.6.3. L'encrassement biologique	51
II.6.4. Moussage et primage	52
II.7. Lutte contre les problèmes causés par l'eau	53
II.8. Conclusion	54
Chapitre III : Etude expérimentale	
III.1.Introduction	59
III.2.Objectif de l'étude	59
III.3.Composition et propriétés de l'acier au carbone	60
III.3.1. Les caractéristiques de l'acier au carbone	60
III.3.2. Analyses chimiques	61
III.4. Procédé de préparation de l'échantillon	61
III.5.Milieus de travail	62
III.5.1. Matériels et produits utilisés	62
III.5.2. Préparation des solutions corrosives	63
III.6. Essai gravimétrique	64
III.7. Milieu d'étude	65
III.7.1. Les propriétés physico-chimiques de l'acide sulfurique	65
III.7.2. Les propriétés physico-chimiques de Chlorure de Sodium	67
III.8. Méthode de caractérisation	67
III.8.1. Méthode ciseaux	67
III.8.2. Protocole expérimental	69
III.9. Resultats et discussions	70

Liste des figures

N°	Titre des figures	Page
Chapitre I : Généralités sur les chaudières industrielles		
Figure I.1	Chaudière industrielle	2
Figure I.2	Chaudière à tubes de fumées	4
Figure I.3	Schéma chaudière vapeur à tubes de fumées	5
Figure I.4	Chaudière à tubes d'eau	6
Figure I.5	Description d'une chaudière à tubes d'eau	7
Figure I.6	Vue générale des approvisionnements et des mécanismes de la chaudière	8
Figure I.7	Le bruleur	11
Figure I.8	Les ballons, supérieur et inférieur	12
Figure I.9	Schéma d'un économiseur	12
Figure I.10	Schéma des surchauffeurs	13
Figure I.11	Schéma d'un évaporateur	14
Chapitre II : Généralités sur les problèmes de la chaudière liés à l'eau		
Figure II.1	La répartition de l'anhydride carbonique dans les eaux	26
Figure II.2	Détermination de l'alcalinité	30
Figure II.3	Traitement des eaux de chaudière	36
Figure II.4	Principe de prétraitements	37
Figure II.5	Le dégrilleur	38
Figure II.6	Tambours filtrants (pour tamisage et micro-tamisage)	38
Figure II.7	Représente le système de chloration d'eau	40
Figure II.8	Procédés de dessalement	41
Figure II.9	Distillation par détente successives	41

Figure II.10	Distillation multiples effets	42
Figure II.11	Distillation MED	42
Figure II.12	Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	43
Figure II.13	Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse	44
Figure II.14	Corrosion par piqûre	45
Figure II.15	Effet d'une corrosion par piqûre	45
Figure II.16	Corrosion galvanique	46
Figure II.17	Effet d'une corrosion galvanique	46
Figure II.18	corrosion par O ₂	47
Figure II.19	Fragilisation caustique	48
Figure II.20	Effet de la corrosion caustique	49
Figure II.21	Corrosion par CO ₂	50
Figure II.22	Phénomène d'entartrage des tubes de chaudières	51
Chapitre III : Etude expérimentale		
Figure III.1	Echantillons avant polissage	61
Figure III.2	La polisseuse	62
Figure III.3	Les matériels utilisés	63
Figure III.4	Solutions de l'acide sulfurique à 1%,3% et 5%	63
Figure III.5	Chlorure de sodium	64
Figure III.6	Solution de chlorure de sodium 5%	64
Figure III.7	Balance de précision	65
Figure III.8	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 1%	71
Figure III.9	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 1%	72
Figure III.10	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 1%	72
Figure III.11	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 3%	73
Figure III.12	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 3%	74
Figure III.13	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 3%	74

FigureIII.14	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	75
FigureIII.15	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	76
FigureIII.16	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	76
FigureIII.17	Dégradation de masse de l'échantillon (4) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	77
FigureIII.18	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	79
FigureIII.19	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	79
FigureIII.20	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	80
FigureIII.21	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 10%	81
FigureIII.22	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 10%	81
FigureIII.23	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 15%	82
FigureIII.24	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 15%	83
FigureIII.25	Dégradation de masse de l'échantillon (4) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	84
FigureIII.26	Dégradation de masse de l'échantillon (5) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	85
FigureIII.27	Dégradation de masse de l'échantillon (6) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	85
FigureIII.28	Dégradation de masse de l'échantillon (8) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	87
FigureIII.29	Dégradation de masse de l'échantillon (9) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	87
FigureIII.30	Protocole du l'effet de température	88
FigureIII.31	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps	89
FigureIII.32	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps	89
FigureIII.33	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps	90
FigureIII.34	Dégradation de masse de l'échantillon (7) en fonction du temps	91

Liste des tableaux

N°	Titre des tableaux	Page
Chapitre I : Généralités sur les chaudières industrielles		
Tableau I.1	Comparaison entre les chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées	8
Chapitre II : Généralités sur les problèmes de la chaudière liés à l'eau		
Tableau II.1	Paramètres physico-chimiques et méthodes de mesure	31
Tableau II.2	Concentration des différents ions d'une eau de mer	33
Tableau II.3	Caractéristiques des eaux de chaudière (valeurs courantes)	34
Tableau II.4	Caractéristiques des eaux de chaudière (valeurs courantes)	35
Tableau II.5	Tendance de l'eau suivant IR	52
Chapitre III : Etude expérimentale		
Tableau III.1	Les caractéristiques de l'acier au carbone	60
Tableau III.2	Composition chimique de l'acier (C1020)	61
Tableau III.3	Les propriétés de l'acide sulfurique	63
Tableau III.4	Propriétés physico-chimiques de H ₂ SO ₄	66
Tableau III.5	Propriétés physico-chimiques de Na Cl	67
Tableau III.6	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 1%	71
Tableau III.7	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 1%	71

Tableau III.8	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 1%	72
Tableau III.9	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 3%	73
Tableau III.10	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 3%	73
Tableau III.11	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 3%	74
Tableau III.12	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	75
Tableau III.13	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	75
Tableau III.14	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	76
Tableau III.15	Dégradation de masse de l'échantillon (4) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	77
Tableau III.16	Les masses initiales des échantillons (1 ;2 ;3) avant l'application de peinture	78
Tableau III.17	Les masses initiales des échantillons (1 ;2 ;3) après l'application de peinture	78
Tableau III.18	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	78
Tableau III.19	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	79
Tableau III.20	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	80
Tableau III.21	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 10%	80
Tableau III.22	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 10%	81
Tableau III.23	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 15%	82
Tableau III.24	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 15%	82

TableauIII.25	Les masses initiales des échantillons (4 ;5 ;6) avant l'application de peinture	83
TableauIII.26	Les masses initiales des échantillons (4 ;5 ;6) après l'application de peinture	83
TableauIII.27	Dégradation de masse de l'échantillon (4) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	84
TableauIII.28	Dégradation de masse de l'échantillon (5) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	84
TableauIII.29	Dégradation de masse de l'échantillon (6) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	85
TableauIII.30	Les masses initiales des échantillons (7 ;8 ;9) avant le vernissage	86
TableauIII.31	Les masses initiales des échantillons (7 ;8 ;9) après le vernissage	86
TableauIII.32	Dégradation de masse de l'échantillon (8) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%	86
TableauIII.33	Dégradation de masse de l'échantillon (9) en fonction du temps dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5%	87
TableauIII.34	Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps	88
TableauIII.35	Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps	89
TableauIII.36	Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps	90
TableauIII.37	Dégradation de masse de l'échantillon (7) en fonction du temps	90

Liste des abréviations

Abréviations	Significations
UJ	unités Jackson
MES	Matière en suspension
NTU	néphélométriques
TH	titre hydrotimétrique
TAC	titre alcalimétrique complet
TDS	Le taux de sels dissous
°F	Fahrenheit
°C	Celsius
PO₄	Phosphate
SiO₂	dioxyde de silicium
Δm	La perte de masse (g)
ρ	la densité
m	la masse (g)
V	le volume
g	Gramme
h	Heure
ml	Millilitre
t	Temps d'immersion dans la solution (h)
C1020	L'acier au carbone
MPa	Méga pascal
KPa	Kilo pascal
μS	microsiemens
RA1K	Raffinerie de Skikda
CV	compression de vapeur
MED	distillation à multiples effets
MSF	distillation à détente étagées

<i>H2SO4</i>	Acide sulfurique
NaFeO2	ferrate(III) de sodium
CaCO3	carbonate de calcium
MgCl	chlorure de magnésium
H2CO3	acide carbonique
Na Cl	chlorure de sodium
HCl	Acide chlorhydrique
H2O	L'eau
mm	Millimètre
GPa	Gestation pour autrui
Ti	Titane
V	Vanadium
Cr	Chrome
Mn	Manganèse
Ni	Nickel
Nb	Niobium
Mo	Molybdène
Cu	Cuivre
pH	Potentiel hydrogène
Atm	Atmosphère
l	Litre
W	Watt
K	Kelvin

A blue graphic element resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and a horizontal strip extending to the right. The top and bottom edges of the horizontal strip are rounded. The text is centered within the horizontal strip.

Introduction générale

Introduction générale :

La corrosion constitue l'un des principaux défis auxquels sont confrontées les industries utilisant des matériaux métalliques. Elle représente une forme de dégradation insidieuse, lente mais inévitable, affectant durablement les propriétés mécaniques, chimiques et esthétiques des structures. Parmi les matériaux les plus sensibles à ce phénomène, les aciers au carbone occupent une place importante en raison de leur large utilisation dans de nombreux secteurs tels que la construction, la mécanique, la pétrochimie et le transport.

La prévention de la corrosion repose sur diverses approches, parmi lesquelles l'application de revêtements protecteurs, notamment organiques (peintures), occupe une position stratégique. Ces systèmes ont pour fonction de créer une barrière physique entre le métal et son environnement, tout en offrant parfois une protection chimique active. Dans ce contexte, notre étude vise à analyser le comportement à la corrosion des aciers au carbone protégés par des revêtements à base de peinture, soumis à deux environnements agressifs : un milieu acide (acide sulfurique) et un milieu salin (chlorure de sodium), et cela à différentes températures. L'approche expérimentale repose sur le suivi du potentiel de corrosion et du temps d'immersion, permettant d'évaluer la cinétique de dégradation et l'efficacité des revêtements appliqués.

L'objectif global est double : d'une part, approfondir la compréhension des mécanismes de corrosion en conditions contrôlées, et d'autre part, contribuer à l'optimisation des systèmes de protection de surface adaptés aux environnements industriels sévères. Ce travail s'inscrit dans une démarche à la fois scientifique et applicative, visant à améliorer la durabilité des matériaux métalliques face aux contraintes corrosives.

Chapitre I

Généralités sur les chaudières industrielles

I.1.Introduction

L'industrie utilise couramment la vapeur comme énergie nécessaire à la réalisation de nombreux et différents procédés, la vapeur est un fluide caloporteur disponible en grandes quantités, facilement transportable et non toxique. La production de vapeur, demande l'utilisation d'un combustible et d'une chaudière[1].

I.2.Définition d'une chaudière

Une chaudière (en anglais ; boiler) peut être définie comme un système dans lequel l'énergie d'un combustible (entrée) est cédée et transférée à un liquide pris dans le cas des chaudières à vapeur, l'énergie produite permet de changer l'état d'une phase liquide à une phase gazeuse (sortie). Une chaudière est un « générateurs de chaleur ». Il s'agit en effet d'un appareil ou d'une installation qui permet de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (porteur de chaleur). Ainsi, tout dispositif produisant de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, ou de l'eau surchauffée est considéré comme une chaudière[2],[3].



Figure I.1 : Chaudière industrielle.

I.3. Rôle des chaudières

Une chaudière utilise un combustible pour apporter de l'énergie à un fluide caloporteur (l'eau par exemple). Elle fournit ainsi un fluide aux caractéristiques imposées par l'utilisation prévue, ce qui explique la variété des types de chaudières (à eau chaude, à vapeur saturée, à vapeur surchauffée) [4].

L'objectif principal des chaudières est de produire la vapeur d'eau en absorbant de la chaleur avec le meilleur rendement possible. Elles sont indispensables dans les usines pour assurer de manière fiable le fonctionnement des unités de production. Elles ont pour rôle :

- D'apporter l'énergie nécessaire (vapeur de réchauffage, entraînement de turbine) ;
- D'intervenir dans les procédés (réaction chimique, vapeur de dilution, de stripping)
- De constituer un élément de sécurité (vapeur d'étouffement) [5].

I.4. Types des chaudières

Les chaudières industrielles peuvent être classées en deux catégories principales :

- Les chaudières conventionnelles, dans lesquelles la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau est fournie par combustion de liquides ou de gaz combustibles. Selon que l'eau ou les fumées de combustion circulent dans un faisceau tubulaire, on distingue les chaudières à tubes d'eau et les chaudières à tubes de fumées.
- Les chaudières de récupération, utilisent la chaleur disponible dans des fluides de procédés à haute température ou dans les fumées de fours ou de turbines à gaz. En fonction de la nature des fluides et de leurs conditions de disponibilité, les chaudières de récupération peuvent être construites comme les chaudières conventionnelles, n'en utiliser que des éléments ou encore faire l'objet d'une technologie spéciale. [6][7]

Les chaudières à tubes d'eau assurent 82% de la production totale de vapeur avec une production moyenne par chaudière de 35 t/h. Ce sont les limites de timbre, de production horaire et du type de fluide chauffé (eau chaude, vapeur saturée et vapeur surchauffée) qui orientent le choix de la chaudière.[8]

I.4.1. Les chaudières à tubes de fumées

a) Présentation

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée de 1 à 25 tonnes/heure, en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fioul.



Figure I.2. Chaudière à tubes de fumées.

b) Fonctionnement

Dans la chaudière vapeur à tubes de fumées, la flamme et les fumées qui résultent de la combustion de gaz ou de fioul, circulent du brûleur jusqu'à la cheminée dans un faisceau de tubes immergés dans une calandre formant le réservoir d'eau. La vapeur est ainsi produite en chauffant ce volume d'eau à l'aide des fumées produites dans les tubes de fumées immergés. C'est la technique la plus classique pour la production de vapeur saturée, d'eau ou de vapeur (vapeur surchauffée dans quelques installations spécifiques). Les chaudières à tubes de fumées sont installées dans des process où la pression ne dépasse pas 30 bar, comme dans l'industrie agro-alimentaire ou les blanchisseries [9].

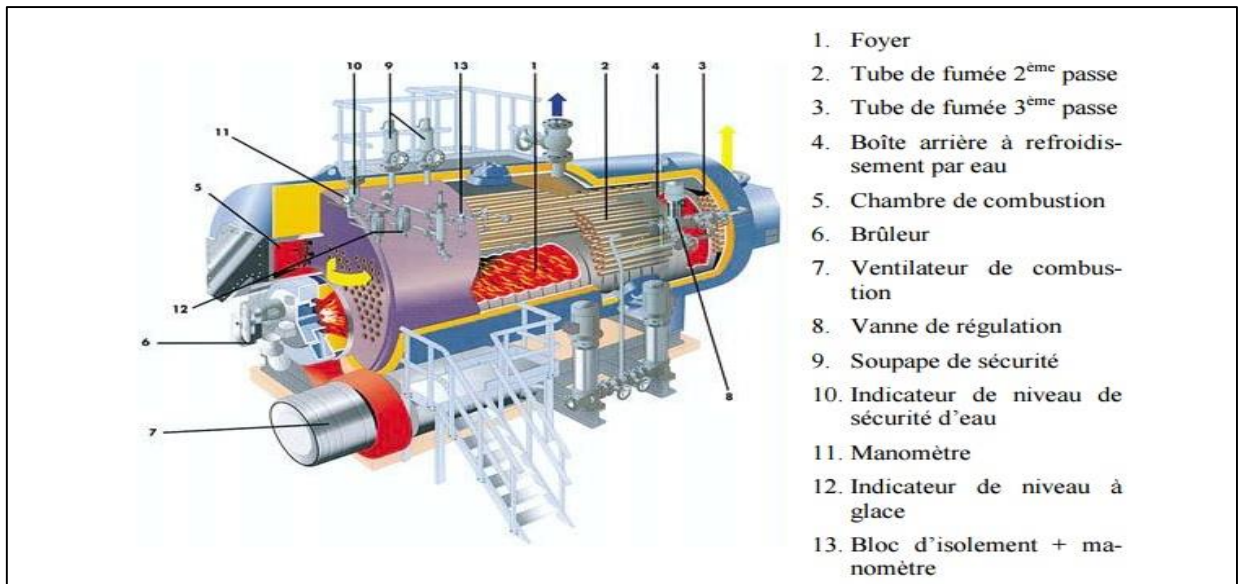


Figure I.3 : Schéma chaudière vapeur à tubes de fumées [9].

Les chaudières à tubes de fumées permettent d'obtenir des températures de rejet des fumées plus basses (220 à 250 °C) que les chaudières à tubes d'eau (300 °C) sans économiseur, ce qui leur confère un rendement légèrement supérieur.

En revanche, les chaudières à tubes de fumées sont limitées à des puissances plus faibles que les secondes, pour des raisons de tenue mécanique et de sécurité (très grand volume d'eau sous pression).

c) Précautions

Il est impératif de traiter l'eau de chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube foyer et des tubes de fumée. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression-température plus long, un risque de surchauffe au niveau de tube foyer, une surconsommation de combustible, une augmentation de la température des fumées au niveau de la cheminée...[10].

d) Production de vapeur surchauffée

Il est nécessaire de recourir à un surchauffeur (source de chaleur indépendante), en aval de la chaudière à tubes de fumée.

I.4.2. Les chaudières à tubes d'eau

a) Présentation

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée supérieur à 20 tonnes/heure, en moyenne et haute pression. Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets.



Figure . I.4 : Chaudière à tubes d'eau.

b) Fonctionnement

Ce type de chaudière possède deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieure) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs, dans cet ensemble circule l'eau qui se transforme en vapeur. Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs, à l'intérieur de ceux-ci se produit la vaporisation. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur. Dans le domaine des hautes pressions, une pompe peut être installée pour faciliter cette circulation du haut vers le bas.

Il y a donc circulation de l'eau dans des tubes placés à l'intérieur d'une enceinte contenant les gaz chauds.

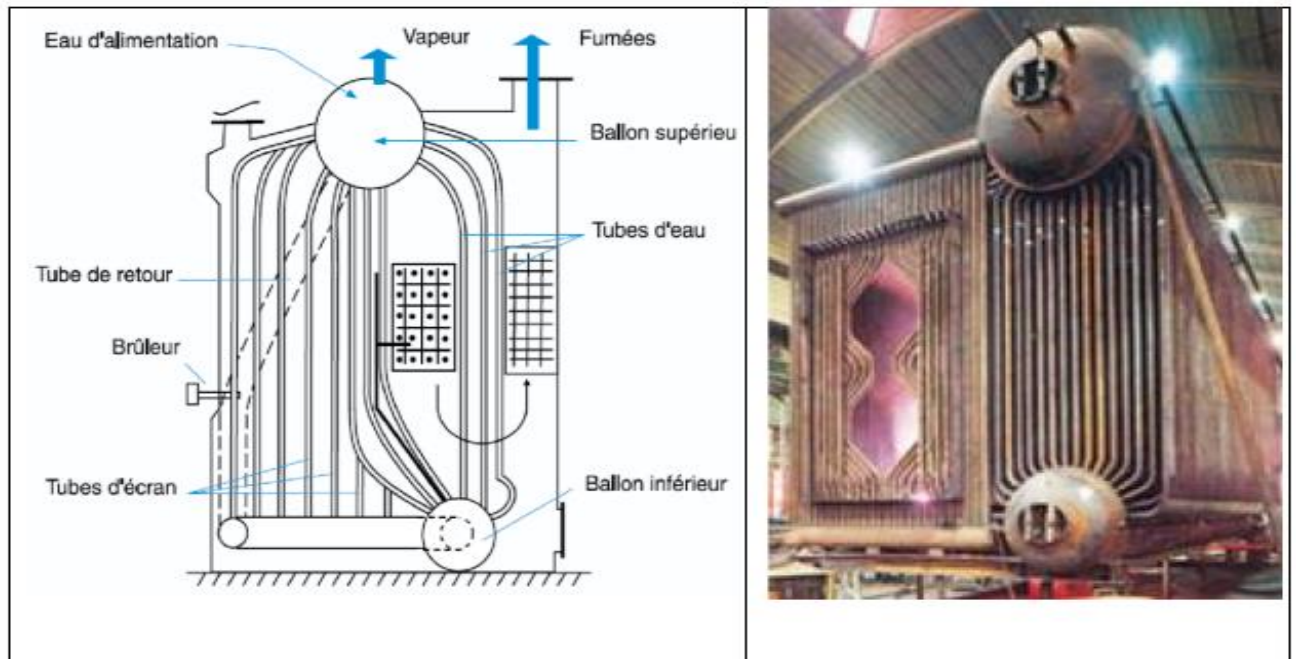


Figure. I.5: Description d'une chaudière à tubes d'eau.

c) Précautions

La formation de tartre dans les tubes serait préjudiciable au fonctionnement de la chaudière à tubes d'eau pour les mêmes raisons que celles évoquées à propos des chaudières à tubes de fumée. En outre, l'obturation des tubes pourrait se révéler dangereuse, ce qui ajoute à la nécessité de traiter l'eau de chaudière.

La paroi extérieure des tubes est exposée aux dépôts de suies et nécessite une action de ramonage pendant le fonctionnement de la chaudière. Cette action est obtenue par injection de vapeur ou d'air comprimé via un tube perforé [10].

d) Production de vapeur surchauffée

Dans une chaudière à tubes d'eau, la tuyauterie qui prend en charge la vapeur saturée retourne dans le foyer, les gaz chauds apportent à cette vapeur saturée une énergie supplémentaire qui en élève la température sans en modifier la pression. On obtient ainsi de la vapeur surchauffée à la sortie.

I.5 Comparaison entre chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées

Le tableau I.1, résume les différentes propriétés des chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumée [4].

Tableau I. 1: Comparaison entre les chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées.

Propriétés	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente)	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	Rapide
Adaptation aux changements de régime	médiocre (inertie importante)	Bonne
Surface de chauffe	moyenne	Elevée
Sécurité	médiocres	Bonne
Encombrement	faible	Fort
Prix	limité	Elevé
Applications usuelles		
<ul style="list-style-type: none"> • Puissance • Débit • Timbre (pression max. d'utilisation) 	<ul style="list-style-type: none"> • moyennement élevée • 1,5 à 25 t/h • 10 à 20 bars 	<ul style="list-style-type: none"> • Importante • 4 à 200 t/h • 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (en circulation forcée)

I.6. Mécanisme de la chaudière

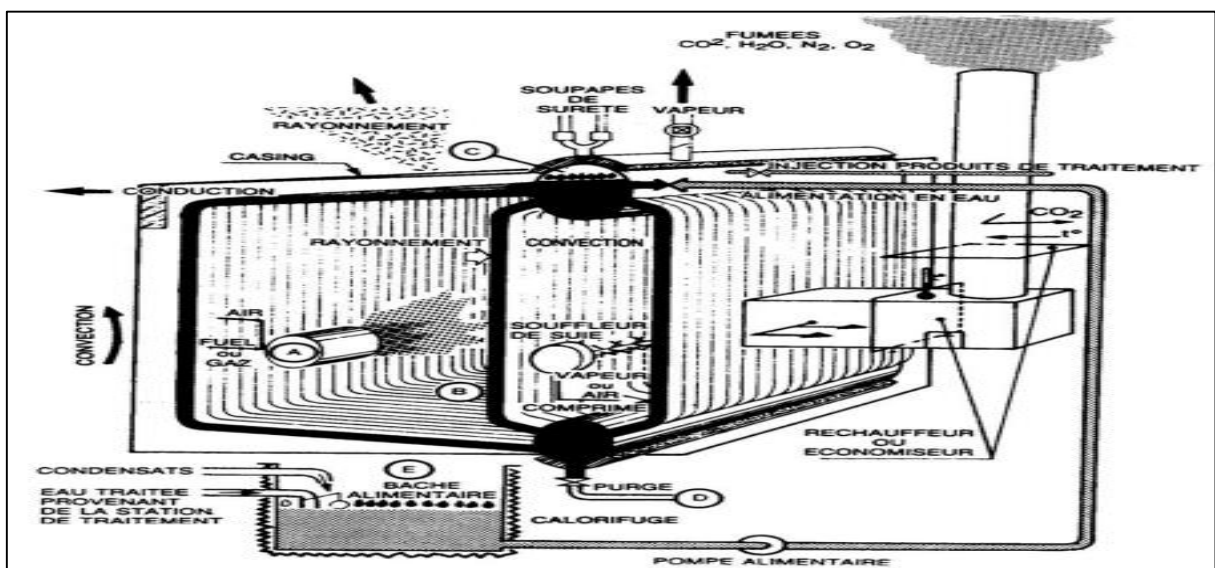


Figure I.6. Vue générale des approvisionnements et des mécanismes de la chaudière.

I.6.1. Alimentation en eau

L'eau de chaudière provient de la station de traitement, de la bache de récupération des condensas, du dégazeur, l'appoint en eau dans la chaudière est réalisé grâce à une pompe alimentaire (souvent doublée) fonctionnant à une pression légèrement supérieure à la pression interne du ballon.

Extraction et purge continue sont deux opérations contribuant à maintenir la qualité de l'eau dans la chaudière, paramètre essentiel pour le bon fonctionnement de l'installation.

I.6.2. Extraction

L'eau d'alimentation contient des traces de produits de traitement, de sels minéraux et d'impuretés diverses ; les résidus se déposent au fond du ballon sous forme de boues et doivent être évacués à l'aide d'un robinet d'extraction. Ce robinet spécial, dont la manœuvre doit être :

- brutale,
- de courte durée (afin d'éviter d'entraîner trop d'eau avec les boues),
- répétée plusieurs fois par jour,

est généralement soit un robinet manuel équipé d'un levier allongé et d'un ressort de rappel en fermeture, soit un robinet $\frac{1}{4}$ tour automatisé. Il doit supporter la pleine ΔP et ne pas être endommagé par le passage des impuretés.

Dans un souci d'économies d'énergie, la vapeur de vaporisation, qui se forme lors de l'évacuation de l'eau chaude chargée dans ce que l'on appelle le pot de débouage, peut être récupérée et envoyée dans un dégazeur, à température et pression faibles. Les boues et eau excédentaire sont par ailleurs évacuées après refroidissement.

I.6.3. Purge continue

Les produits de traitement et sels minéraux, arrivant avec l'eau d'alimentation et ne partant pratiquement pas avec la vapeur produite, ont tendance à se concentrer dans le ballon, qu'ils soient en solution ou en suspension. D'où la nécessité de procéder à une

purge de déconcentration permanente, grâce à un robinet de dégazage spécial, à très faible débit. Le prélèvement continu se fait à environ 10,0 cm sous le plan d'eau, le dispositif pourra être mis à profit pour réaliser une prise d'échantillon pour analyse, après refroidissement.

Par ailleurs, la vapeur de revaporisation pourra être récupérée et réutilisée

I.6.4. Les éléments constituant le site de la chaufferie

I.6.4.1. Bâche dégazant

Pour alimenter les deux chaudières en eau ultra pure avec une pression de service de 1.21 bar.

I.6.4.2. Bac pour eau déminéralisée

Assurer l'appoint de la bâche, d'une capacité de 300 M3 [10].

I.6.4.3. Chambre de combustion (foyer)

C'est la chambre dans laquelle se fait la combustion, les combustibles peuvent être solides, gazeux ou liquides. Elle est tapissée de tubes d'eau qui composent les surfaces de chauffe soumises au rayonnement de la flamme.

- Les brûleurs, insérés dans les parois entre des tubes dévoyés, peuvent être situés au milieu des panneaux (chauffe en façade) ou dans les angles (chauffe tangentielle) pour donner une turbulence importante aux flammes au centre de la chambre de combustion.
- L'air de combustion, poussé par un ventilateur est distribué aux brûleurs par un large caisson d'air permettant d'en assurer une bonne distribution[11].

I.6.4.4. Brûleurs

C'est l'élément mécanique qui assure la production de chaleur en assurant le mélange d'un combustible avec de l'air (comburant) produisant ainsi une combustion. Il a donc un rôle déterminant dans la qualité de la combustion, et par suite dans l'émission de polluants ou d'imbrûlés en plus ou moins grande quantité dans les fumées[11].

Le rôle du brûleur est en général double :

- Assurer le mélange carburant-comburant dans les proportions choisies (par exemple, selon un rapport air-gaz ou avec un léger excès d'air).
- Réaliser la combustion de ce mélange dans les conditions optimales (allumage et maintien de la flamme, combustion complète)

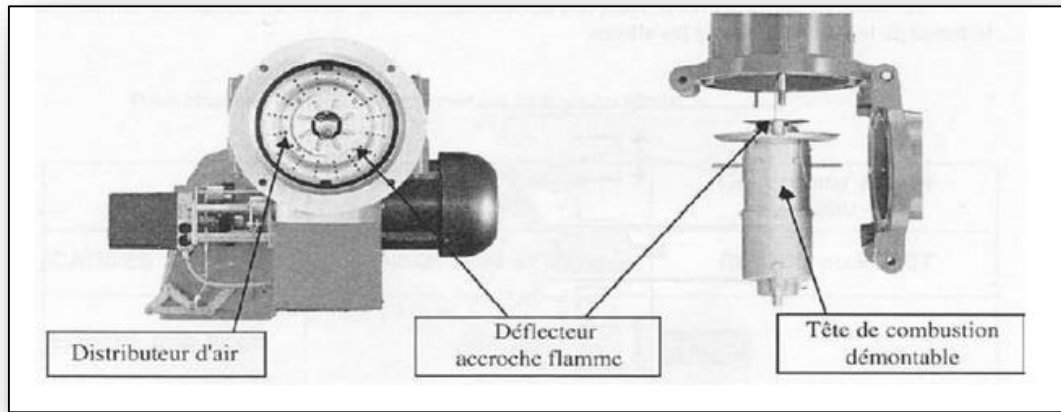


Figure I.7: Le brûleur.

I.6.4.5 Faisceau de convection

Constitué de tubes nus verticaux fixés à leurs extrémités aux ballons inférieurs et supérieurs. Des chicanes placées dans ce faisceau évitent les chemins préférentiels des fumées. Selon

la pression de fonctionnement, le faisceau vaporiseur représente une part plus ou moins importante de la surface d'échange réservée à la vaporisation de l'eau. En effet, la chaleur latente de changement d'état de l'eau étant d'autant plus faible que la pression est plus élevée, la surface totale d'échange nécessaire pour vaporiser l'eau est d'autant plus réduite que le timbre de la chaudière est plus élevé. Au-delà de 80 à 100 bar, la surface des parois de la chambre de combustion suffit à elle seule pour assurer ce service (chaudière radiantes). Comprenant deux parcours pour les fumées :

- **Le ballon supérieur** : réalise la séparation de deux phases liquide et vapeur. La vapeur saturée sort par (H) en haut du ballon avant d'alimenter les surchauffeurs.

- **Le ballon inférieur** : alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur[11].

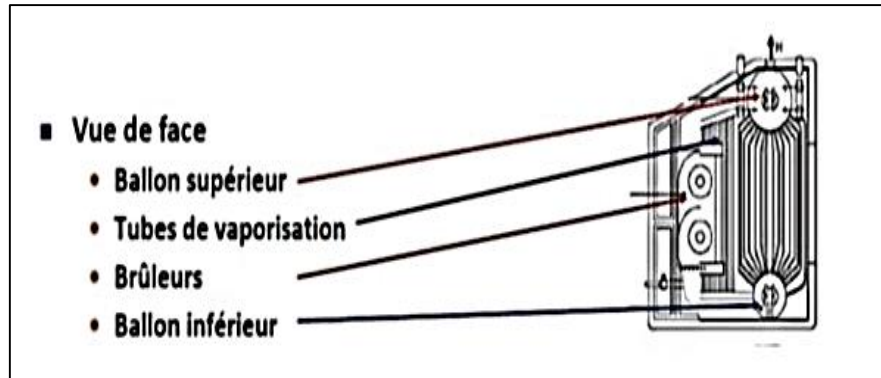


Figure I.8: Les ballons, supérieur et inférieur.

I.6.4.6. Economiseur

Il extrait des gaz d'échappement de la chaudière ; la chaleur en excès que la chaudière elle-même ne peut plus absorber [12].

L'économiseur est généralement constitué de tubes à ailettes ou de tubes lisses. Il est généralement situé sur le parcours des fumées entre le dernier surchauffeur ou resurchauffeur et le réchauffeur d'air [13].

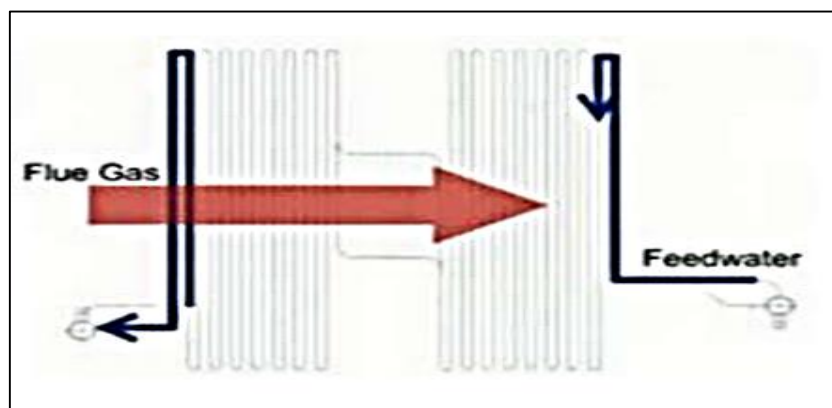


Figure I.9 : Schéma d'un économiseur.

I.6.4.7. Vaporisateurs

Ils assurent la fin de l'échauffement de l'eau et la production de la vapeur. Les vaporisateurs sont généralement constitués par les écrans soudés de la chaudière mais doivent parfois être complétés par des faisceaux. La circulation de l'eau dans ces tubes se fait naturellement à peu près en même temps que la production de vapeur. Elle repose sur la différence de poids qui existe entre le tube de descente plein d'eau et la colonne montante remplie du mélange eau –vapeur plus léger [14].

I.6.4.8. Surchauffeurs

La surchauffeur est constituée d'étages primaires et secondaires. Le surchauffeur secondaire est constituée de tronçons verticaux et horizontaux. Le tronçon vertical est situé en face de l'écran tubulaire du four alors que le tronçon horizontal dont l'écoulement de vapeur est parallèle à celui du gaz de carneau est situé en aval de la cavité de passe de retour derrière l'écran tubulaire.

Le surchauffeur primaire est situé en aval de la surchauffeur secondaire : la direction d'écoulement de vapeur s'oppose à celui de gaz de carneau. Les surchauffeurs primaire et secondaire sont reliées par une tuyauterie équipée d'un désurchauffeur à arrosage d'eau de condensation. L'eau de désurchauffe est fournie à travers le condenseur du désurchauffeur dans lequel se condense la vapeur saturée provenant du ballon de vapeur. La conception du surchauffeur tient compte d'une perte de charge de vapeur minimisant la grandeur de déséquilibre de température de vapeur, la température de calcul étant déterminée en tenant compte de la variation de débit /température de gaz [15].

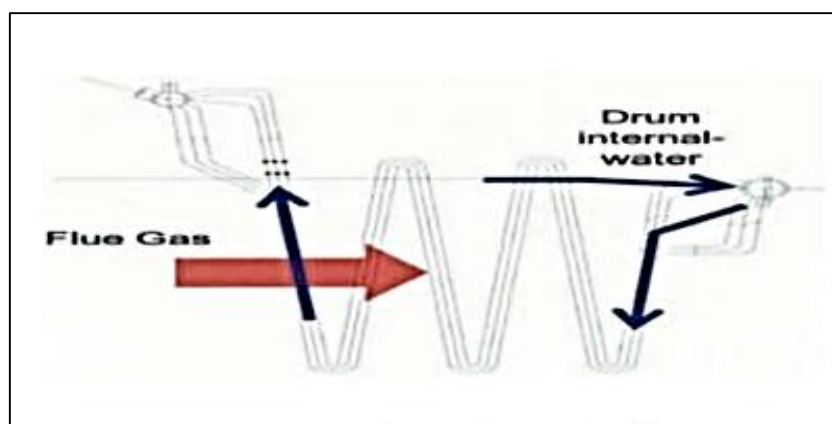


Figure I.10: Schéma des surchauffeurs.

I.6.4.9. Resurchauffeurs

Ils ont un rôle identique à celui des surchauffeurs, à savoir élever la température de la vapeur resurchauffée provenant de la turbine [15].

I.6.4.10. Désurchauffeurs

Ils sont destinés à refroidir et à moduler la température de la vapeur surchauffée ou resurchauffée, ils sont rarement tubulaires mais généralement assimilables à des échangeurs par mélange puisqu'ils procèdent par injection d'eau dans la vapeur [16].

I.6.4.11. Evaporateur

L'évaporateur sert à réchauffer l'eau à l'intérieure du ballon, il est du type circulation naturelle et est situé en aval du surchauffeur primaire dans la zone de passe de retour. Les tuyaux de descente non chauffés, les tubes en boucles inclinées et les tuyaux montants sont prévus pour maintenir la circulation appropriée et stable d'eau à toutes les allures de production de vapeur [16].

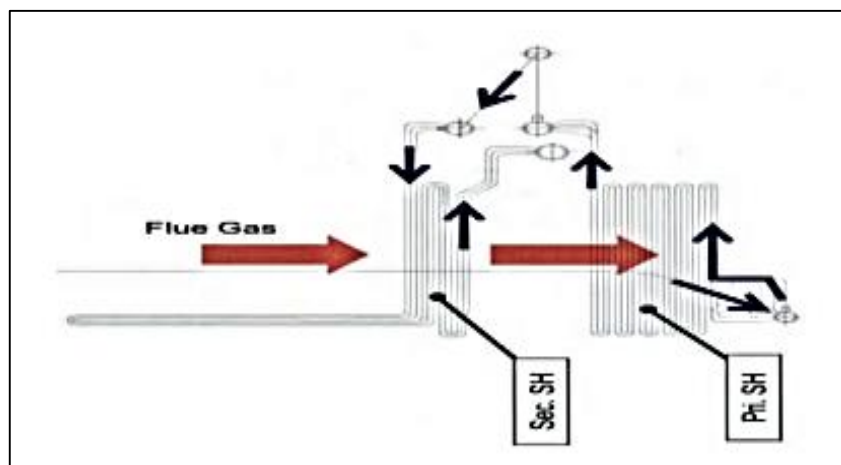


Figure I.11 : Schéma d'un évaporateur.

I.6.4.12. Ventilateur de soufflage

La chaudière fonctionne sous une pression positive (pressurisée) avec de l'air de combustion fourni par un ventilateur à tirage forcé. Ce ventilateur alimente également

la soufflante qui fournit l'air à l'allumeur. Il est entraîné par un moteur électrique alimenté par le courant électrique de secours. La quantité d'air entrant dans le ventilateur est limitée de façon à maintenir un rapport air/combustible correct au niveau du brûleur. Si la quantité d'air de combustion en excès est inférieure à 10% pour le combustible gazeux ou à 15% pour l'essence, il y aura une combustion incomplète. Les hydrocarbures non brûlés pourraient prendre feu dans la cheminée ou exploser et pourraient donc risquer d'endommager sérieusement la chaudière [11].

I.6.4.13. Ballons de purge

La chaudière est équipée :

♣ **D'un ballon de purge continue (CBD) :** l'eau de chaudière est extraite en continue à partir du ballon. Supérieur selon un débit de 2% par rapport au débit d'appoint d'eau de la chaudière. Cette extraction a pour but de maintenir la conductivité de l'eau à l'intérieur de la chaudière entre 200 à 500 ppm. Le débit d'extraction est ajusté en fonction des résultats d'analyses pour maintenir la conductivité dans cette fourchette.

♣ **D'un ballon de purge intermittente :** une à deux fois par semaine une extraction d'eau de chaudière doit être effectuée à partir du ballon inférieur de la chaudière, et ce, pour extraire les boues de sels déposées au fond de ce ballon. Durant cette opération le niveau d'eau dans la chaudière doit être surveillé avec attention [11].

I.6.4.14. Appareils de sécurité

Les causes d'explosion de la chaudière sont :

- l'élévation excessive de la pression ;
- l'abaissement du niveau d'eau.

Pour protéger la chaudière on utilise les dispositifs suivants :

- deux soupapes de sûreté au moins (installées sur le ballon supérieur), réglées de manière à s'ouvrir dès que la pression devient égale à la pression de calcul indiquée sur le timbre opposé sur la chaudière ;

- un manomètre sur le quel est clairement indiqué la valeur de la pression de calcul, permet à l'opérateur de vérifier que la pression de fonctionnement lui est effectivement inférieure;
- un autre dispositif de sécurité est installé sur la chaudière et peut provoquer l'arrêt total de l'alimentation en combustible si le niveau d'eau dans le ballon chute et cela pour éviter la déformation ou l'éclatement des tubes à cause de l'augmentation brusque de température;
- par contre un autre dispositif de sécurité permet de diminuer le débit d'eau d'alimentation en cas d'augmentation de niveau dans le ballon supérieur. Rôle de la circulation naturelle : La circulation naturelle a deux principaux objectifs :
 - assurer le refroidissement correct des tubes situés dans les zones les plus chaudes ou exposés au rayonnement direct du feu, là où ils reçoivent le flux maximal de chaleur ;
 - assurer la génération de vapeur saturée, c'est-à-dire le passage du fluide chauffé de l'état eau à l'état émulsion et vapeur [11].

I.6.4.15. Autres échangeurs associés à la chaudière

Non directement en liaison avec l'eau ou la vapeur du cycle, ils n'en sont pas moins indispensables au bon fonctionnement de l'installation.

▪ Le réchauffeur d'air

C'est un échangeur d'air de combustion /gaz de combustion. L'avantage technique du réchauffage de l'air réside dans le fait qu'il amoindrit la perte par la cheminée et qu'il élève en outre la valeur de la température des gaz de combustion ou du foyer [17].

▪ Le préchauffeur d'air

Dans le but principal de protéger le réchauffeur d'air et les gaines de fumées placées en aval des risques de corrosion par condensation d'acide, il est nécessaire de préchauffer de quelques dizaines de degrés l'air entrant dans le réchauffeur d'air. Cette fonction est

assurée généralement par un échangeur à tubes ailettes où l'air est réchauffé par de la vapeur ou de l'eau [17].

I.6.5. Circuits d'une chaudière

La chaudière est constituée de deux circuits :

- le circuit air-gaz de combustion (porteur des calories de la combustion auquel on s'intéresse dans notre étude) ;
- le circuit eau-vapeur (récepteur de ces mêmes calories).

a) Le circuit air-gaz de combustion

L'air destiné à la combustion est poussé par le ventilateur de soufflage, il traverse d'abord un réchauffeur où il récupère la chaleur encore contenue dans les gaz de sortie de la combustion ; ce qui a pour effet d'élever sa température. Puis l'air est envoyé aux brûleurs et participe à la production de la chaleur. Les gaz de combustion produits dans cette chambre de combustion cèdent une partie de la chaleur aux tubes vaporisateurs, ces gaz sont ensuite véhiculés au niveau des surchauffeurs où ils cèdent encore de la chaleur.

b) Le circuit eau- vapeur

L'eau d'alimentation est réchauffée dans l'économiseur avant d'être envoyé au ballon supérieur. Le ballon supérieur alimente en eau le ballon inférieur au moyen des tubes d'alimentation. Dans les tubes vaporisateurs l'eau se transforme en vapeur. La vapeur est collectée et retourne au ballon.

La circulation de l'eau dans les tubes se fait naturellement. En effet, à mesure que l'eau monte en température elle se charge de bulle de vapeur et devient de ce fait plus légère : elle a donc tendance à monter.

Par contre dans les tubes d'alimentation venant du ballon, l'eau est moins chaude, donc plus dense et de ce fait elle descend. Cette circulation naturelle est dite thermosiphon. Un schéma général de circulation eau et vapeur dans la chaudière[18].

I.7. Principe général de fonctionnement

I.7.1. Exploitation

Les appareils de contrôle et de sécurité de la chaudière fonctionnent en mode Surveillance Permanente depuis un local voisin (norme NFE 32020-1). Ce mode requiert un opérateur près de la chaudière au démarrage et en cas d'arrêt sur incident, sans séquences programmées pour ces opérations.

- **Construction et architecture**

Le brûleur est constitué de :

1. Dispositif d'alimentation en air à double flux (deux chambres).
2. Platine avant-registre à air (réglage manuel).
3. Platine avant-dispositif d'alimentation en air.
4. Platine centrale (raccordement des anneaux de distribution du gaz, tuyau pour le contrôle des flammes, trou de regard et tuyau de support pour écran d'allumage).
5. Anneau de distribution de gaz (8 lances à gaz pivotantes et extensibles).
6. Allumeurs électriques à gaz.
7. Pièce intercalaire.
8. Tuyau de support pour écran d'allumage (écran d'allumage en rotation).
9. Contrôleur de flammes compact.

I.7.2. Mise en service des brûleurs et fonctionnement

La mise en service des brûleurs est réalisée suivant des instructions et conditions :

a) Brûleurs :

Contrôler le montage correct et les connexions (contrôleur de flammes, câble électrique, raccords d'air de refroidissement, robinet tuyau optique, allumeur, câble électrique transformateur et contrôleur d'ionisation, chambres à air, commande pneumatique et interrupteur de fin de course, robinets commande pneumatique).

b) Combustion de gaz naturel :

Le gaz passe dans l'anneau de distribution du gaz (max. 6988 Nm³/h, 2,0 bars) et se répand vers 8 lances à gaz avec des tuyères obliques. Le gaz rencontre l'air de combustion déplacé par l'écran d'allumage en rotation, formant un mélange allumé par un allumeur électrique à gaz.

I.7.3. Approvisionnement en air de combustion des brûleurs

Le réglage et le mesurage de l'air de combustion sont communs pour les deux brûleurs. L'air est partagé en primaire et secondaire dans le dispositif d'alimentation (deux chambres, volet d'incidence manuelle pour l'air primaire) [18].

a) Air primaire :

Conduit sans rotation, la rotation de l'écran d'allumage stabilise la flamme. **b) Air secondaire :** Entre par un raccord, traverse le registre à air (pales directrices courbées), puis le foyer (passage annulaire). La rotation de l'air (ajustée manuellement) refroidit les bords de la flamme, réduisant les NOx. Le réglage du registre se fait à la mise en service.

b) Allumeur :

Allumage par allumeur électrique à gaz (gaz naturel comme gaz d'allumage). La flamme est contrôlée par une électrode d'ionisation et un relais de flammes.

c) Contrôle flamme du brûleur principal :

Chaque brûleur est surveillé par son propre contrôleur de flammes compact qui arrête le brûleur en cas d'absence de signal de flammes.

d) Approvisionnement en air de commande :

Nécessaire pour la manœuvre des soupapes d'arrêt d'urgence pneumatiques et des commandes pneumatiques (soupape de réglage gaz, volets d'air). L'air vient du système d'air de commande (robinet d'arrêt possible). Des dérivations vont aux différents actionneurs (soupape réglage gaz naturel, soupape pneumatique décharge pression gaz naturel, commande pneumatique régulateur soufflante, arrêts d'urgence gaz naturel spécifiques aux brûleurs, commandes volets d'air), avec des robinets d'arrêt sur les dérivations. Un manostat contrôle la pression minimale (arrêt sous 3,0 bars).

e) Démarrage depuis l'état froid :

Croissance graduelle de pression et température pour éviter les disparités et le gonflement (bulles de vapeur à 100°C sous 1 bar absolu). La vitesse d'échauffement est limitée (50/60 °C/h en circulation naturelle, doublée avec pompe). L'équilibre est atteint vers 4 ou 5 bars, permettant la fermeture progressive des événements.

f) Démarrage à chaud :

Possible après un arrêt court (reprise rapide de charge). Après un arrêt plus long, un débit minimum par by-pass est nécessaire pour réchauffer l'ensemble.

g) La combustion :

Se produit dans le foyer grâce aux brûleurs (mélange air comburant et combustible). Les produits de combustion (fumées chaudes) passent par des échangeurs (surchauffeurs, resurchauffeurs, faisceaux vaporisateurs, économiseur) avant d'être rejetés. Le gaz naturel (incolore, inodore avec ajout d'odeur) est un combustible fossile "propre" (pas de poussière, suie, fumée, mais CO₂, vapeur d'eau, un peu de NOx et très peu de SO₂), émettant moins de NOx et de CO₂ que le fioul et le charbon [19].

I.8. Problèmes rencontrés avec une chaudière**I.8.1. Manque d'eau d'alimentation**

Le manque d'eau d'alimentation est considéré comme l'accident de référence pour les installations thermiques équipées avec des générateurs de vapeur. [20] Il peut être provoqué par l'arrêt des pompes alimentaires, la rupture de la tuyauterie principale d'alimentation, le blocage de la vanne principale d'alimentation, par négligence ou encore par la défaillance de la régulation. [21] Ces accidents menacent l'intégrité structurale du système et provoque l'explosion des parties sous pression du générateur de vapeur . [22]

I.8.2. Fatigue et fragilisation du métal

Les chocs thermiques provoquent des cycles de dilatations restreintes, engendrent des gradients de contraintes qui s'initieront généralement sur les défauts géométriques des surfaces [21]. La fatigue à chaud est un autre facteur qui traduit une évolution en

fonction du temps et sous l'effet des contraintes de service qui ont la tendance à accélérer des phénomènes de précipitation [22].

I.8.3. Qualité d'eau

La qualité d'eau influe forcément sur les facteurs qui accélèrent la destruction des surfaces internes des tubes vaporisateurs [23]. Il est obligé de traiter l'eau de la chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube du foyer et des tubes de fumée. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mis en pression température plus long, un risque de surchauffe au niveau du tube du foyer, une surconsommation du combustible, une augmentation de la température des fumées à la sortie du générateur de vapeur.

Références Bibliographiques :

- [1] Goncalves, A. Mémoire d'ingénieur. « Développement d'un système de combustion pour les résidus forestiers », université du Québec, 2010.
- [2] Hatem, A. & Kaddouri, F. (2017). L'impacte De L Échangeur Rotatif Sur Le Rendement De La Chaudière Et Possibilité De Le Remplace Par Un Échangeur Fixe [Non identifié, Université M'hamed Bougara - Boumerdes].
- [3] Benadda, I. & Taiboni, H. & Barkat, S. & Amar Bouzid, D. & Bakhti, R. (2015). Analyse De La Capacité Portante Ultime [Mémoire de Master, Université Yahia Fares - Médéa].
- [4] Mehdi, A. Mémoire de master. « Influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone » Université de Skikda, 2018.
- [5] Bounab. W. Houtia M. Mémoire de master en génie des procédés. « Etude préventive sur la corrosion et disfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar » Université d'Adrar, 2020.
- [6] Chaudière un article de WIKIPEDIA
- [7] Ecole Nationale Supérieure de Pétrole et des Moteurs, formation industrie IFP training « Risques et précautions liés aux matériels, matériels thermique et description des chaudières », 2005.
- [8] Fourou, M. « Equipements de procédés » (2ème partie), Séminaire IAP. Ecole de Skikda, 2014.
- [9] Dahia, A. (2008). Modélisation Et Simulation D'un Générateur De Vapeur À Tubes De Fumée De 4.5t/h [Mémoire de Master, Université Saad Dahleb - Blida].
- [10] J.J.BARON-« chaudière-technique de l'ingénieur », Ed ISTA, 1948

- [11] Formation industrie Sonatrach, « chaudières industrielles » Institut National de pétrole école de Skikda, 2012.
- [12] Nuber, F, NuberK. « Calcul thermique des chaudières » Dunod, 1972.
- [13] Parisot,J. « Conception et calculs des chaudières échangeurs et circuit air/ fumées » Technique de l'ingénieur, traité génie énergétique.
- [14] Kharref, S. Mémoire de magister en chimie appliquée. « Comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux » Université de Skikda, 2008.
- [15] Raoult, M. « La vapeur- mode d'emploi, réseaux thermiques et équipements sous pression » Edition parisienne, 2003.
- [16] Benahmed, A. Touiker, M. « Fours et chaudières dans l'industrie pétrolière » Séminaire, IAP école de Skikda, 2013.
- [17] Bounab. W. Houtia M. Mémoire de master en génie des procédés. « Etude préventive sur la corrosion et dysfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar » Université d'Adrar, 2020.
- [18] M.PHILLIPE-« chaudière de récupération technique de l'ingénieur », génie énergétique, volume W1, Ed ISTA 1980
- [19] Abderrahmane CHABI, (2014) “ Etude thermique d'une chaudière à vapeur 4 Tonnes / Heure de l'ECFERAL” , Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [20] J. P. Ylén, M. Paljakka, T. Karhela, J. Savolainen & K. Juslin, (2005) . "Experiences on Utilising Plant Scale Dynamic Simulation in Process Industry", Proceedings 19th European Conference on Modelling and Simulation,
- [21] A. Rahmani,(2007) "Modélisation et simulation thermohydraulique d'un générateur de vapeur industriel en régime transitoire par le code RELAP5/Mod3.2", Thèse de Doctorat .

[22] Michel F. Asahby, (1991) , "Matériaux-Microstructure et mise en œuvre". Vol. 02, Edition Dunod,

[23] Choix des Alliages Métalliques Réfractaires pour Four de Traitement Thermique", centre des industries mécaniques, (CETIM-1997).



Chapitre II
Généralités sur les Problèmes de chaudières
liés à l'eau

II. Introduction

Dans les usines de production de vapeur, l'eau ne peut pas être utilisée directement pour la consommation industrielle car elle pollue et s'occupe des matières en suspension, des déchets végétaux, des gaz dissous et divers sels. La présence de ces nombreux intrants de différentes natures impose un traitement des eaux avant l'utilisation [1]. On trouvera rassemblées dans cette partie les chaînes de traitement permettant d'obtenir, à partir d'eau brute, les eaux déminéralisées de qualité suffisante pour alimenter sans problème la chaudière [2].

II .1. Composition des eaux naturelles

La composition des eaux naturelles dépend de l'altération des roches, des échanges avec l'atmosphère (oxygène et dioxyde de carbone), des interactions biologiques (photosynthèse et respiration) et de la présence de nutriments (phosphore, azote) essentiels à la vie aquatique [3].

II.1.1. Sels minéraux

La nature des terrains conditionne la composition électrolytique des eaux naturelles. Il en résulte des qualités d'eau extrêmement variées. On peut classer les constituants minéraux en deux catégories :

- Les éléments fondamentaux : ce sont ceux que l'on retrouve dans toutes les eaux naturelles ; ils représentent le système calcocarbonique associé aux ions issus de la dissociation de l'eau ; ils sont en nombre de six : H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{2+} , OH^- et H^+ .

Leur présence découle de la dissolution dans l'eau du gaz carbonique et du passage en solution sous l'effet de l'acide carbonique du carbonate de calcium .

• Les éléments caractéristiques : regroupent l'ensemble des autres ions minéraux qui résultent aussi souvent de l'action dissolvante de l'acide carbonique : Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , etc .) .

Parmi les éléments caractéristiques se situent enfin tous à l'état de traces plus ou moins importants qui peuvent jouer un rôle au niveau d'effet toxique éventuel de l'eau [4].

II. 1.2. Les gaz dissous

Au contact de l'air, l'eau naturelle dissout les gaz atmosphériques, un processus influencé par leur proportion dans l'air, leur solubilité, la température, et la turbulence de l'eau ou le vent. Cependant, l'activité biologique est souvent le facteur déterminant des concentrations de gaz dissous.

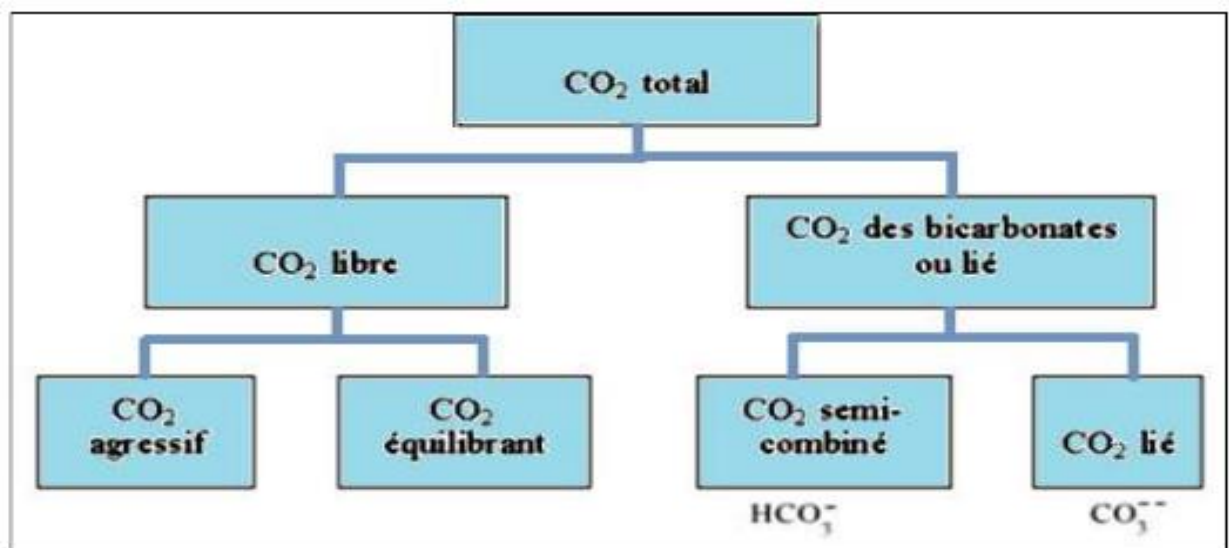


Figure II.1 : La répartition de l'anhydride carbonique dans les eaux [5].

II.1.3. Les matières organiques

Les matières organiques naturelles présents dans les eaux , sont formées par un mélange complexe de produits végétaux ou animaux à des stades de décomposition variés . Elles comprennent également des produits de synthèses , par voie chimique ou biochimique , élaborés à partir de ces éléments . Elles comprennent enfin des microorganismes (

bactérie , virus , etc .) et leurs produits de décomposition . Les matières organiques dans les eaux naturelles se divisent en plusieurs types, en fonction de leur forme, de leur origine et de leur comportement dans l'eau [6].

II.2. Mesure de la qualité de l'eau

Pour identifier la qualité d'eau, il est indispensable de connaître certains paramètres utilisés pour l'analyse de l'eau, et donc la caractériser. Les paramètres physicochimiques les plus courants sont :

II.2.1.La turbidité

La turbidité, mesurée en unités Jackson (UJ) ou néphélométriques (NTU), est le trouble de l'eau causé par des matières en suspension comme l'argile, le limon, les fibres et les particules organiques colloïdales (plancton, micro-organismes). Une turbidité de 1 UJ indique une eau très claire, tandis que les eaux riches en suspensions peuvent atteindre plusieurs centaines d'UJ [7]. On peut la mesurer sur le terrain en évaluant la profondeur de visibilité, ou par des méthodes comme celle du fil de Platine, la néphélométrie et celle des gouttes de mastic [8].

II.2. 2. Température

Il est crucial de connaître précisément la température de l'eau car elle influence la solubilité des sels et des gaz, la dissociation des sels dissous (affectant la conductivité électrique) et la détermination du pH. La température des eaux de surface dépend de leur origine et de la température de l'air [8]. De plus, les eaux plus chaudes peuvent favoriser la prolifération d'algues et d'autres végétaux, dont la décomposition réduit la quantité d'oxygène dissous dans l'eau[9].

II.2.3. Le potentiel hydrogène pH

Le pH est l'un des paramètres importants influençant la tendance entartrante ou agressive d'une eau naturelle : d'une manière générale, une baisse de pH favorise le caractère agressif et une élévation de pH favorise le caractère entartrant.

Le pH est relié à l'activité en protons par :

pH = - log₁₀ aH

aH : activité en ions H⁺ à l'équilibre, avec confusion généralement admise entre l'activité et la concentration, erreur qui peut être considérée comme négligeable en eau douce, mais qui devient significative en eau fortement minéralisée, saumâtre ou en eau de mer[10].

II.2.4. La conductivité électrique

La conductivité est la mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle varie en fonction de la présence d'ions, de leur concentration, de leur mobilité et de la température de l'échantillon. Elle est liée à la concentration et à la nature des substances dissoutes. En général, les sels minéraux sont de bons conducteurs par opposition à la matière organique et colloïdale, qui conduit peu. Par conséquent, dans le cas des eaux usées fortement chargées en matière organique, la conductivité ne donnera pas forcément une idée immédiate de la charge du milieu. Dans les autres cas, elle permet d'évaluer rapidement le degré de minéralisation de l'eau et d'estimer le volume d'échantillon nécessaire pour certaines déterminations chimiques [11].

II.2.5. La dureté

Aussi appelée le titre hydrotimétrique (TH) dont l'origine dans l'eau douce est liée aux ions de calcium et au magnésium.

On peut distinguer différents types de dureté :

- Dureté totale
- Dureté calcique
- Dureté magnésienne
- Dureté permanente ou non carbonatée
- Dureté temporaire ou carbonatée [12].

II.2.6. Les chlorures

Les chlorures sont présents en concentration faible dans les eaux de surfaces, ceci peut être attribué à la dissolution de dépôt due :

- aux effluents de l'industrie chimique
- à l'exploitation des puits du pétrole

-aux rejets des égouts -aux drainages d'irrigation, etc [12].

II.2.7. La salinité

La présence des sels dans l'eau modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température du maximum de densité). D'autres (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencées de manière significative. Enfin certaines sont essentiellement déterminées par la quantité de sel dans l'eau.

II.2.8. Le taux de sels dissous (TDS)

Le TDS représente la concentration totale des substances dissoutes, incluant des sels inorganiques (calcium, magnésium, potassium, sodium) et des carbonates (nitrates, bicarbonates, chlorures, sulfates), ainsi que certaines matières organique [11].

II.2.9. Les phosphates (PO₄ -)

Les phosphates, anions facilement fixés par le sol, se retrouvent dans les eaux naturelles en fonction des terrains traversés et de la décomposition de la matière organique, entraînant une dégradation potentiellement irréversible. Le phosphore favorise la prolifération des algues dans les réservoirs, les canalisations et les lacs, contribuant à l'eutrophisation. Il existe sous différentes formes : orthophosphates (libres), polyphosphates et phosphates organiques (phosphonates). La limite maximale autorisée est de 5 mg/L exprimée en P₂O₅ [12].

II.2.10. Titre hydrotimétrique (TH)

La dureté, ou titre hydrotimétrique (TH), d'une eau représente la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. Elle est principalement due aux ions calcium et magnésium, avec parfois des ions fer, aluminium, manganèse et strontium. Aussi appelée dureté calcique et magnésienne ou consommation de savon, elle s'exprime en milliéquivalents de concentration en CaCO₃ ou en degrés français (°F). Le TH global (TH totale) indique la teneur totale en ions alcalino-terreux (**TH = TH Ca⁺⁺ + TH Mg⁺⁺**). On distingue également la dureté calcique (TH calcique), la dureté magnésienne (TH magnésium), la

dureté temporaire (liée aux carbonates et bicarbonates de calcium précipitant à l'ébullition), et la dureté permanente (due aux sulfates et chlorures de calcium, égale à la différence entre le TH total et le TAC). Un degré français (°F) correspond à la dureté d'une solution contenant 10 mg/L de CaCO_3 [10].

II.2.11. Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC)

L'alcalinité d'une eau, contrairement à l'acidité, indique la présence de bases et de sels d'acides faibles, principalement des hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes dans les eaux naturelles. D'autres substances comme les acides humiques, phosphates, citrates, tartrates et la silice ionique (à $\text{pH} > 8,5$) peuvent aussi influencer sa mesure. On distingue deux titres, le titre alcalimétrique (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC), exprimés en degrés français (°f) ou parfois en mg/L de Ca O (ou mg/L de CaCO_3 dans les pays anglo-saxons). Le TA mesure la concentration en hydroxydes et la moitié de celle des carbonates (pour les sels fixant le $\text{pH} > 8,3$: $\text{TA} = [\text{OH}^-] + \frac{1}{2} [\text{CO}_3^{--}]$), tandis que le TAC mesure la concentration en hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes (pour les sels fixant le $\text{pH} > 4,3$: $\text{TAC} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{--}] + [\text{OH}^-]$). Ces deux valeurs permettent de déterminer les concentrations de ces trois espèces chimiques dans l'eau [13]. La détermination du TA et du TAC se fait par titrage avec un acide, on obtient un premier virage (du rouge à l'incolore) de la phénolphthaléine à $\text{pH}=8,3$ et qui correspond au TA [14].

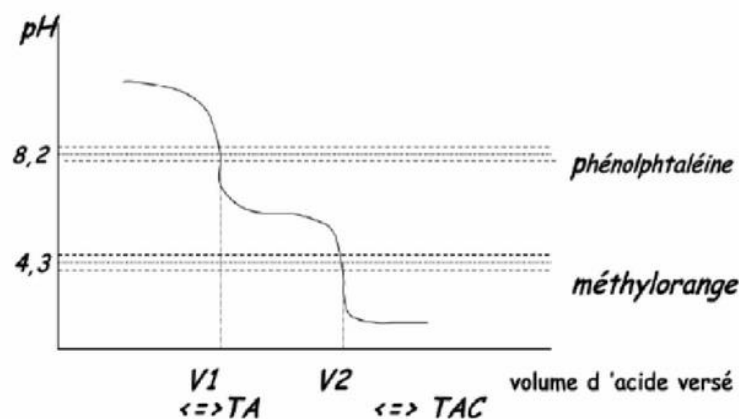


Figure II.2 : Détermination de l'alcalinité[15]

II.2.12. L'Oxygène dissous

L'oxygène dissous est la quantité d'oxygène gazeux dissous dans l'eau. L'oxygène pénètre dans l'eau de diverses manières, notamment en l'absorbant de l'atmosphère, par un mouvement rapide de l'eau ou en tant que produit de la photosynthèse [13].

Tableau II.1: Paramètres physico-chimiques et méthodes de mesure.

Paramètres	Unités	Méthodes	Instruments	Normes des analyses
pH	/	Electrochimique	pH-mètre	NFT90-008
X	µs /cm	Electrochimique	Conductimètre	NFT90-031
TA	mg CaCO ₃ /L	Volumétrique : titrage acide jusqu'à pH= 8,3	/	NFT90-36
TAC	mg CaCO ₃ /L	Volumétrique : titrage acide jusqu'à pH= 4,3	/	NFT90-36
TH	mg CaCO ₃ /L	Volumétrique : complexométrie à l'EDTA avec le noir ériochrome T	/	NFT90-003
Cl	mg /L	Volumétrique : au nitrate d'argent	/	NFT90-14
MES	mg /L	Spectrophotométrie	Spectrophotomètre à 810 nm de longueur d'onde	NFT 90-105-2
NaOH	mg /L	Volumétrique	/	NFT 90-019
PO₄³⁻	mg /L	Spectrophotométrie au molybdate d'ammonium	Spectrophotomètre à 608 nm de longueur d'onde	NFT 90-105

Fer total	mg /L	Spectrophotométrie à l'orthophénanthroline	Spectrophotomètre à 510 nm de longueur d'onde	NFT 90-017
SiO²⁻	mg /L	Spectrophotométrie	Spectrophotomètre à 815 nm de longueur d'onde	NFT 90-007

II.3. Ressources hydrauliques naturelles

II.3.1. Eaux de mer

Les mers et les océans constituent les énormes réservoirs d'eau, elles représentent près de 97,4% du volume d'eau existant actuellement sur notre planète, le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraines et eaux de surface). Elles sont caractérisées par une grande salinité [16]

Tableau II.2 : Concentration des différents ions d'une eau de mer [5].

Type d'ions	Salinité (g/L)	Quantité totale de matières en solution (%)
Anions		
Chlorures	18,98	55,04
Sulfates	2,65	7,68
Bicarbonates	0,140	0,41
Bromures	0,065	0,19
Fluorures	0,0013	0,00
Acide borique	0,0260	0,07
Cations		
Sodium	10,56	30,61
Magnésium	1,27	3,69
Calcium	0,40	1,16
Potassium	0,38	1,10
Strontium	0,013	0,04
Total	34,5	99,99

II.3.2. Eaux souterraines

Les eaux qui ne sont ni ré-évaporées, ni retournées à la mer par ruissellement s'infiltrent dans le sol et le sous-sol et s'y accumulent pour constituer les eaux souterraines [17].

Tableau II.3 : Caractéristiques des eaux de chaudière (valeurs courantes).

Caractéristiques	Eaux souterraines
Température	Relativement constante
Turbidité Matières en suspension (MES)	Faible ou nulle sauf en terrain fissuré
Couleur	Liées surtout aux éléments en solution
Minéralisation globale	Sensiblement constante. En général nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région.
Fer et Manganèse dissous	Généralement présent
Gaz carbonique agressif	Souvent présent
Oxygène dissous	Généralement absent
Sulfure d'hydrogène	Souvent présent
Ammoniaque	Présent fréquemment sans être un indice systématique de pollution bactérienne
Nitrates	Teneur parfois élevée
Silice	Teneur souvent élevée
Micro-polluants minéraux et organiques	Généralement absents. Subsistent beaucoup plus longtemps en cas de pollution accidentelle
Eléments vivants Caractère eutrophe (développement exagéré des algues)	Ferrobactéries fréquentes Non

II.4. Qualité de l'eau nécessaire à l'alimentation des chaudières

L'eau est associée à la vie, elle a été depuis toujours étroitement liée à son développement et son rôle a été d'autant plus important lors de la révolution industrielle

ou jusqu'à nos jours, elle est indispensable pour le fonctionnement des usines. C'est est un composé chimique ubiquitaire sur la terre, essentielle pour tous les organismes vivants connus. La formule chimique de l'eau pure est H₂O. L'eau pure est donc dépourvue de toute impureté. La qualité et la quantité des eaux utilisées dans l'industrie sont très variables, elles dépendent du type de l'entreprise productrice et de sa taille. Une eau qui va entrer dans un cycle de refroidissement d'une chaudière est moins exigeante que l'eau utilisée dans l'industrie électronique [18].

Tableau II.4 : Caractéristiques des eaux de chaudière (valeurs courantes).

Paramètre	Eau d'appoint	Eau bêche	Eau chaudière	Vapeur condensée
pH	7,6	8,5	9,5	8,5
TH [°f]	0	traces	0	0
TA [°f]	0	10	75	Traces
TAC [°f]	20	1,5	100	1
Cl- [mg/l]	3	3,5	15	0
SiO₂ [mg/l]	7	0,06	35	0
Fe ++[mg/l]	0,06	-	0,06	0,06
PO₄	-		25	-
3- [mg/l]	1		150	10
cond[μS/cm]				

II.5. Traitement des eaux de chaudière

Selon un rapport de stage publié en 2014, l'eau utilisée pour l'alimentation des chaudières à la raffinerie RA1K de Skikda provient du barrage de Zerdaza. Cette eau est stockée dans deux réservoirs cylindriques métalliques d'une capacité totale de 70 000 m³. Une conduite de 24 pouces relie ces réservoirs au réseau de pompes anti-incendie. De plus, un autre réservoir de 20 000 m³ d'eau potable est disponible et peut être utilisé en cas de besoin pour l'alimentation en eau anti-incendie, grâce à une liaison entre les deux réservoirs permettant le transfert d'eau. L'unité de dessalement à la raffinerie RA1K de Skikda joue un rôle crucial dans le traitement de l'eau brute pour la rendre utilisable dans les installations de la raffinerie, notamment pour les chaudières. Elle permet d'éliminer les sels et impuretés de l'eau afin d'éviter la corrosion et l'entartrage des équipements thermiques [19].

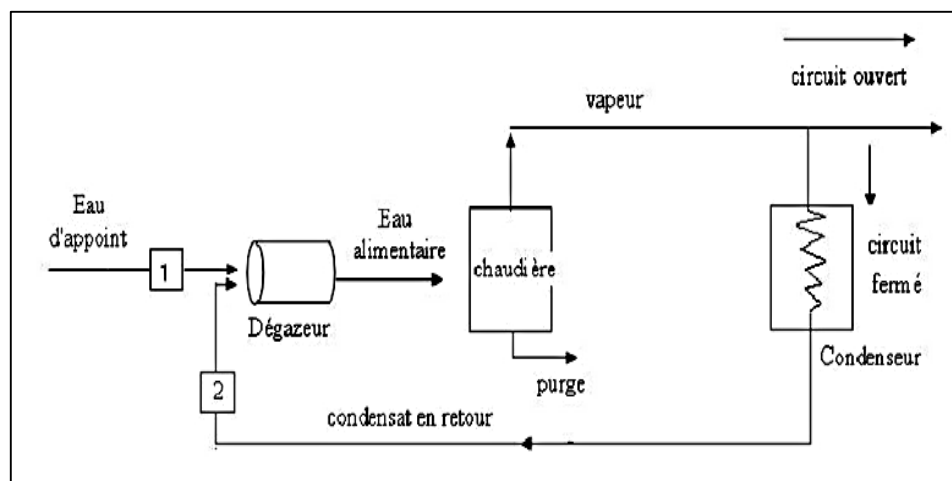


Figure II.3: Traitement des eaux de chaudière.

II.5.1. Traitement de l'eau d'appoint

II.5.1.1. Prétraitements

Les prétraitements constitués d'un ensemble d'opérations physiques et mécaniques, sont destinés à séparer l'eau :

- des matières solides volumineuses risquant d'obstruer les canalisations de l'installation de traitement.

-des matières flottantes et des huiles non miscibles à l'eau et généralement moins denses qu'elle[20].

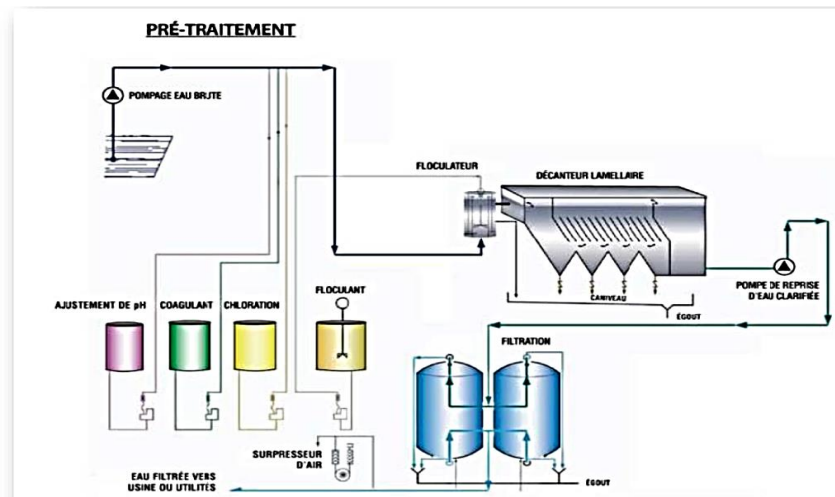


Figure II.4: Principe de prétraitements [20].

Les opérations des prétraitements sont les suivantes :

- **Dégrillage**

Le dégrillage, première étape du traitement de l'eau, a pour but de retenir les gros déchets (branches, bouteilles, etc.). Son efficacité dépend de l'espacement des barreaux de la grille, distinguant le prédégrillage (> 40 mm), le dégrillage moyen (40 à 10 mm) et le dégrillage fin (10 à 6 mm). Son fonctionnement est simple : l'eau brute traverse des grilles à barreaux verticaux ou inclinés.

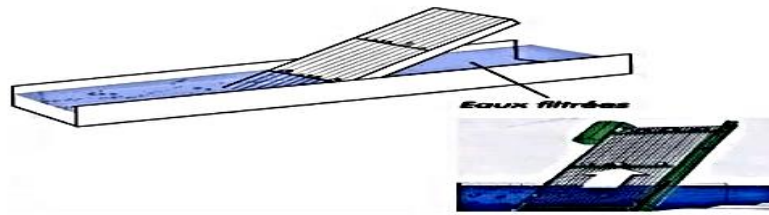


Figure II.5: Le dégrilleur [21].

- **Dessablage**

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, sables et particules minérales plus ou moins fines, ainsi que les filasses de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduits, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion [13].

- **Tamisage**

Ce dispositif a pour objectif de retenir les particules solides entraînées par l'eau et les matières en suspension dont la taille varie entre 200 et 500 μm , comme le sable, le gravier, les feuilles ou les fragments de plastique. En résumé, il permet d'éliminer des objets plus petits que ceux retirés par le dégrillage. L'eau traverse des tamis aux mailles de plus en plus fines, retenant successivement les débris végétaux et animaux, les insectes, les mollusques, les crustacés d'eau douce, les alluvions, les herbes, puis les algues et le plancton.



Figure II .6 :Tambours filtrants (pour tamisage et micro-tamisage).

- **Déshuilage**

L'opération de déshuilage consiste à séparer des produits de densité légèrement inférieure à l'eau, par effet de flottation, naturelle ou assistée (voir [flottabilité et vitesse ascensionnelle](#)), dans une enceinte liquide de volume suffisant[13].

II.5.1.2. Chloration des eaux

Pour éviter le développement d'organismes végétaux et animaux, l'injection d'eau de javel est indispensable. L'hypochlorite de sodium réagit rapidement dans l'eau pour former de l'acide hypochloreux selon la réaction :



L'acide hypochloreux est un acide faible qui réagit de la façon suivante :



HOCl = acide hypochloreux ;

H⁺ + OCl⁻ = ions hypochlorites

La distribution de HOCl et OCl⁻ varie considérablement en fonction du pH: plus le pH est élevé, plus la proportion de OCl⁻ est élevée. Il est important de tenir compte de ce phénomène car l'acide hypochloreux est un désinfectant beaucoup plus efficace que les ions hypochlorites[22].

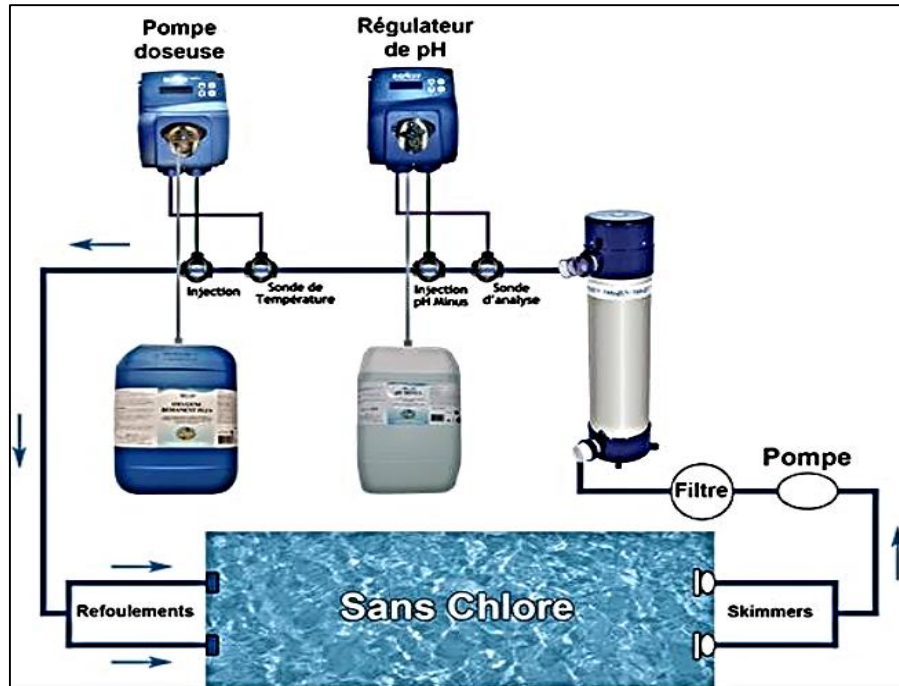


Figure II .7 : Représente le système de chloration d'eau.

I.5.1.3. Traitement par dessalement

Le dessalement extrait le sel de l'eau de mer ou saumâtre, dont la salinité varie (36-39 g/l en Méditerranée, 45 g/l en Mer Rouge, 7 g/l en Mer Baltique). Les méthodes courantes à grande échelle sont la distillation et l'osmose inverse. D'autres techniques comme la congélation et l'électrodialyse sont en développement pour de plus petites installations. Les usines actuelles utilisent principalement des procédés d'évaporation (distillation flash et à multiple effet) ou de séparation par membranes (osmose inverse) pour traiter l'eau de mer (30-50 g/l) ou les eaux saumâtres (1-10 g/l).

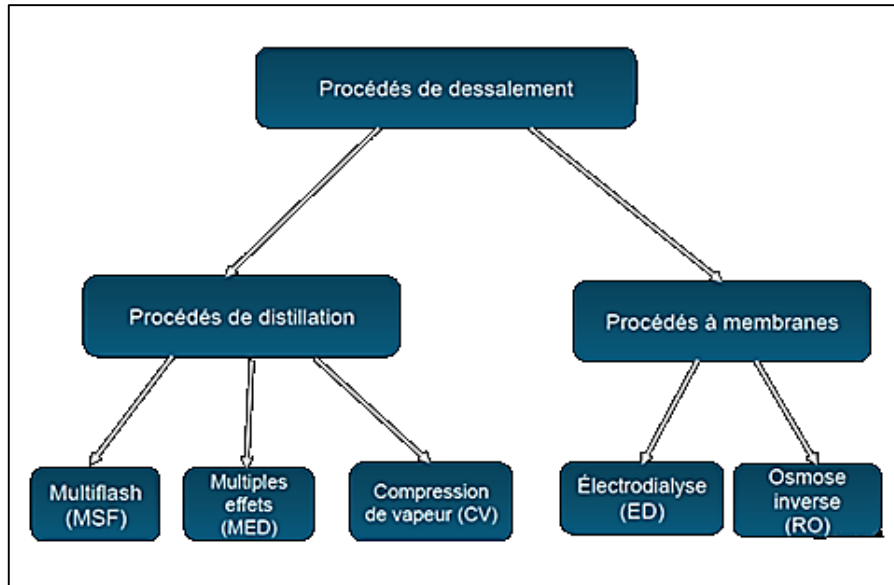


Figure II .8 : Procédés de dessalement [20].

II.5.1.3.1. Distillation

La distillation chauffe l'eau de mer pour créer de la vapeur sans sel, qui est ensuite condensée en eau douce. Ce procédé consomme beaucoup d'énergie en raison de la chaleur de vaporisation de l'eau. Pour réduire cette consommation, des techniques réutilisant l'énergie de condensation ont été développées, notamment la distillation à détente étagée (MSF), la distillation à multiples effets (MED) et la distillation par compression de vapeur (CV).

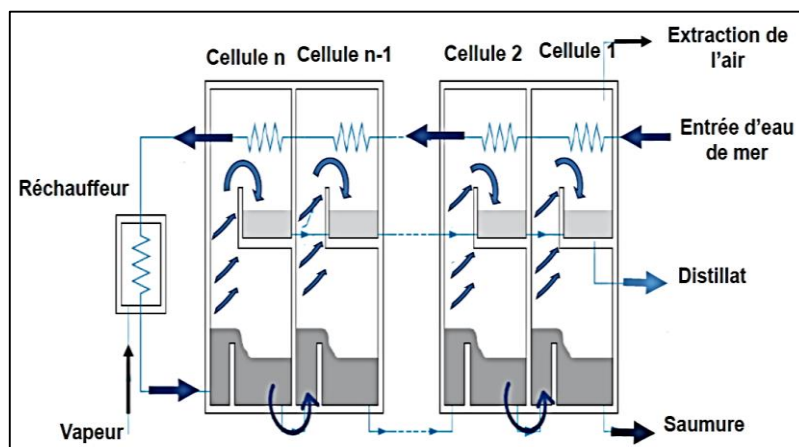


Figure II .9 : Distillation par détente successives.

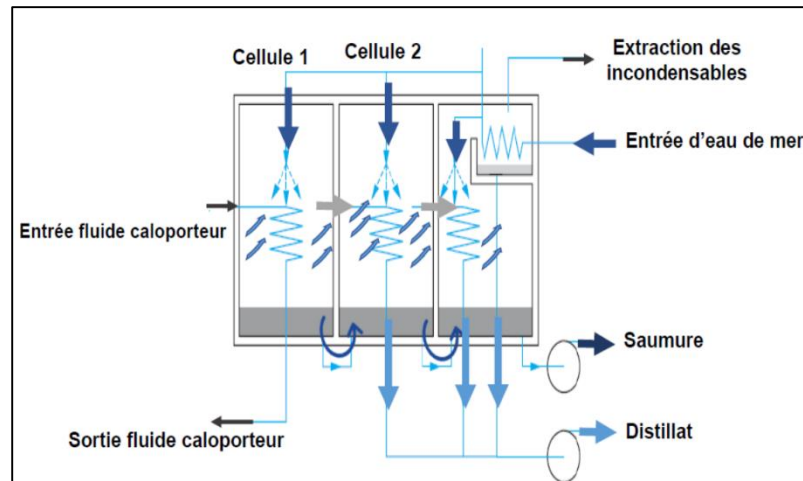


Figure II.10 : Distillation multiples effets.

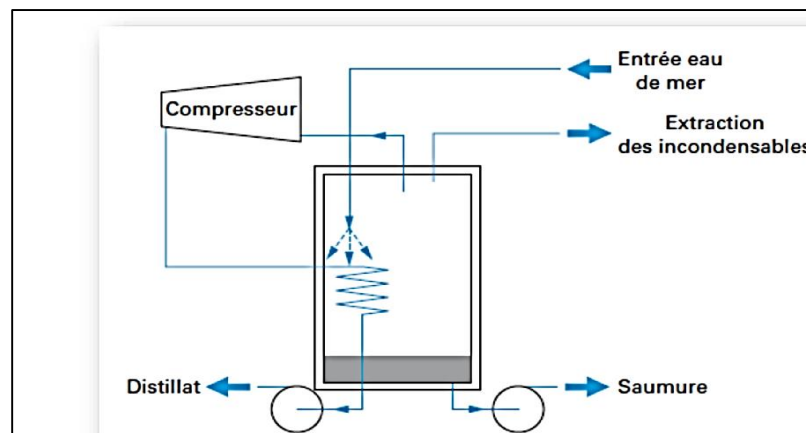


Figure II.11 : Distillation MED.

II.5.1.3.2. Osmose inverse

L'osmose inverse, une technique ancienne développée pour le dessalement, est un procédé haute pression et énergétiquement efficace. Elle sépare l'eau en concentrant les composés de faible poids moléculaire et peut aussi traiter les eaux usées ou pré-concentrer des produits alimentaires. Une membrane semi-perméable laisse passer l'eau mais bloque les sels. L'osmose est le mouvement naturel du solvant à travers cette membrane pour équilibrer les concentrations, créant une pression osmotique. Pour inverser ce flux et augmenter la concentration, une pression supérieure à la pression osmotique est appliquée (20 à 80 bars), filtrant les solutions en ne laissant passer que le

solvant et retenant les sels grâce à un mécanisme de solubilisation-diffusion à travers des membranes denses [23].

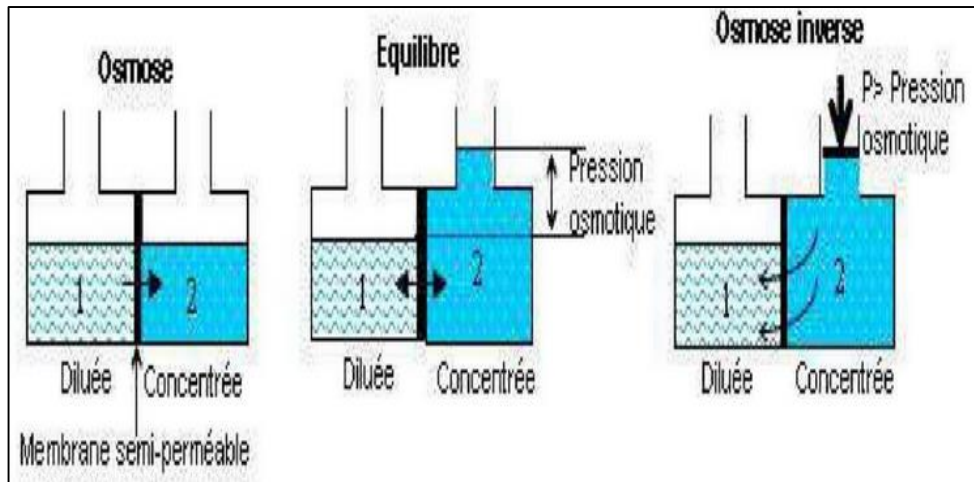


Figure II.12 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse [23].

➤ **Conception générale d'une installation d'osmose inverse :**

La pression osmotique (π) d'une solution peut être calculée par la loi de Van't Hoff :

$\pi = iMRT$. Dans cette équation, M est la molarité, R est la constante des gaz parfaits, T est la température en Kelvin, et i est le facteur de dissociation (nombre d'ions libres). Pour les solutions diluées, i correspond au nombre d'ions produits par la dissociation du soluté. En raison des difficultés de détermination de i dans les solutions concentrées, des corrélations empiriques basées sur des mesures simples comme les solides dissous ou le degré Brix sont utilisées pour estimer la pression osmotique. Une installation d'osmose inverse comprend principalement des membranes et modules, une pompe à haute pression, des cuves de stockage, des instruments de mesure (conductimètre, débitmètre, manomètre, thermomètre), des pompes doseuses, un système de prétraitement et un système de nettoyage.

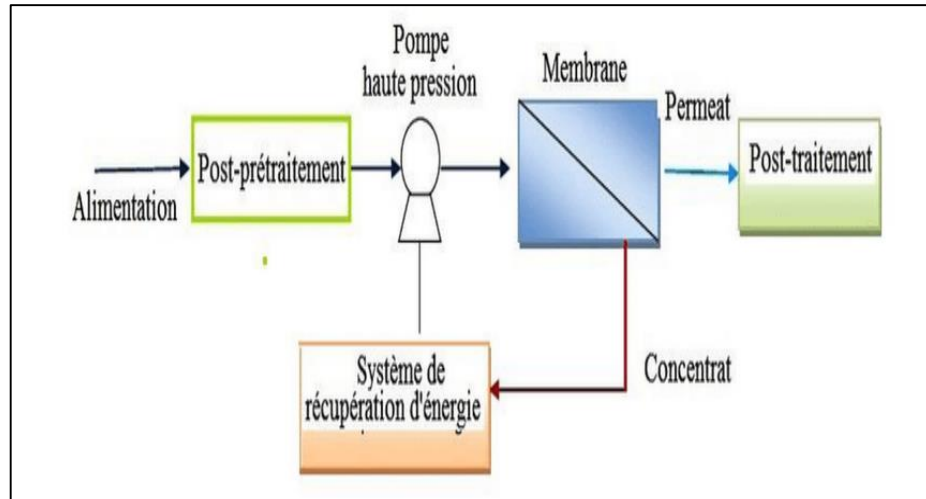


Figure II.13: Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.

II.6. Problèmes causés par l'eau

II.6.1. La corrosion

La corrosion est la destruction des métaux par des réactions chimiques ou électrochimiques au contact d'un milieu aqueux ou gazeux. C'est un phénomène naturel où les métaux industriels tendent à retourner à des composés chimiques. Elle représente une préoccupation majeure, détruisant annuellement 10 à 15% de la production mondiale d'acier. La corrosion est habituellement détectée par ses conséquences, comme la perte de poids [24].

II.6.1.1. Types de corrosion

Les différents types de corrosion sont :

a) Corrosion uniforme

Le métal se dissout uniformément, causant une baisse proportionnelle de la résistance mécanique par la réduction de l'épaisseur et du poids. Cette corrosion, dite généralisée car les parois des tubes s'amincissent de façon uniforme, est généralement contrôlable en mesurant la perte d'épaisseur et en analysant les fluides [25].

b)Corrosion localisée

L'attaque de la surface métallique se produit localement sur des zones sensibles ayant des caractéristiques différentes du reste de la surface. Cette attaque, initiée en surface, progresse en profondeur, rendant la perte de poids inefficace pour le suivi. Le contrôle de ce type de corrosion est plus complexe que celui de la corrosion uniforme [26].

c)Corrosion par piqûre

C'est une forme de corrosion des plus insidieuses et des plus destructives. L'attaque se limite à des trous ou piqûres très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste intact. L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte de poids appréciable de l'ensemble n'apparaisse [27].

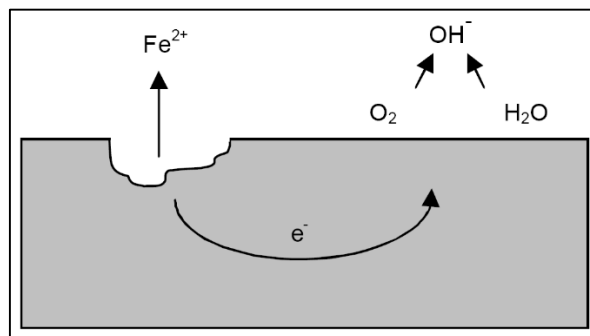


Figure II.14: Corrosion par piqûre.



Figure II.15 : Effet d'une corrosion par piqûre.

d) Corrosion galvanique

La corrosion galvanique a lieu quand deux métaux distincts sont en contact dans une solution conductrice de courant électrique. Dans les chaudières, la présence de cuivre dans le circuit d'eau est une cause fréquente de ce type de corrosion, car même de faibles concentrations d'ions Cu^{++} accélèrent la corrosion par dépôt électrolytique de cuivre. Cette corrosion peut aussi résulter de différences de composition au sein d'un même métal ou de modifications du métal dues à la soudure [28].

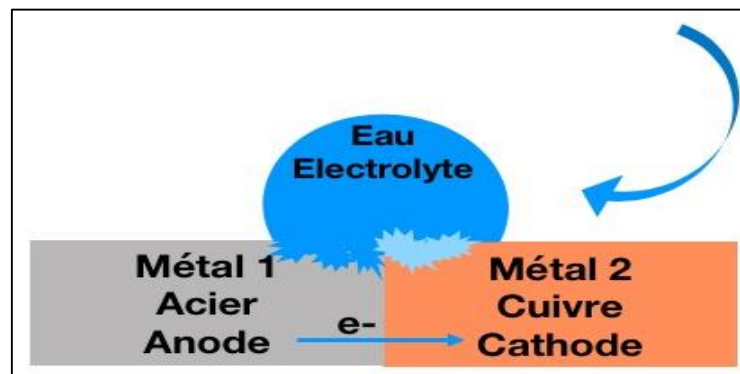


Figure II.16: Corrosion galvanique.

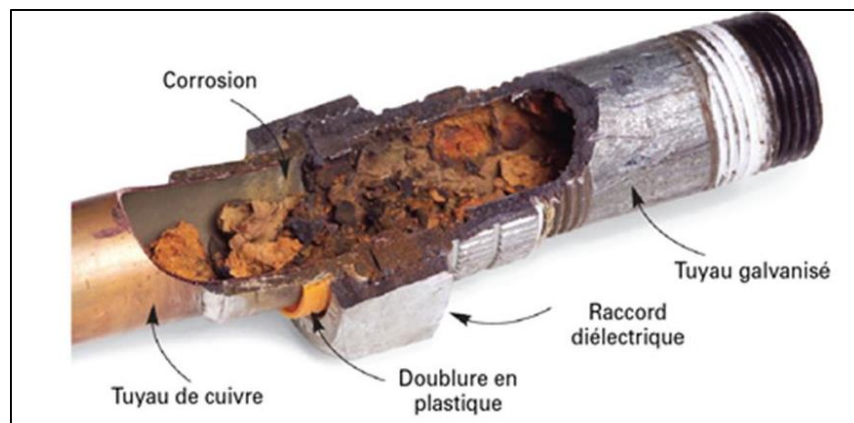


Figure II.17: Effet d'une corrosion galvanique.

II.6.1.2. Corrosion des chaudières

Dans la chaudière proprement dite les facteurs de corrosion sont nombreux, mais les principaux sont incontestablement l'eau elle-même, l'oxygène dissous et à un degré moindre, la soude caustique et la salinité. [29]

+ L'eau

L'eau pure désaérée attaque lentement le fer à la température ambiante selon la réaction suivant :



Aux températures plus élevées, telle que celles rencontrées dans les générateurs de vapeur, l'attaque s'accélérait par l'augmentation de la dissociation des molécules d'eau.

+ Oxygène dissous

La corrosion due à l'oxygène est le problème le plus grave lors de l'inspection d'une chaudière. Un mauvais contrôle de l'oxygène provoque une corrosion par piqûres qui peut rapidement endommager les surfaces métalliques, entraînant des ruptures dans les réchauffeurs et les économiseurs. L'oxygène dissous est très nocif pour la corrosion du fer par l'eau, et sa présence simultanée avec l'eau favorise la corrosion électrochimique[30].



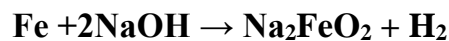
Figure II.18 : corrosion par O₂.

✚ La soude 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 Na OH est trop élevée. En effet un excès d'alcali, peut lentement dissoudre le film de magnétite suivant la réaction :



En formant de l'hypo ferrite de sodium Na_2FeO_2 , et de la ferrite de sodium NaFeO_2 qui sont solubles dans Na OH concentrée. De plus, les alcalis concentrés réagissent directement et plus rapidement avec le fer pour former de l'hydrogène et du ferrate de sodium[31].



Ce genre de réaction joue un rôle important dans le phénomène de corrosion par piqûres et la formation de trous dans les tubes de chaudières, et contribue à créer les vitesses excessives de corrosion du fer aux valeurs élevées de pH (environ pH=13) [32].

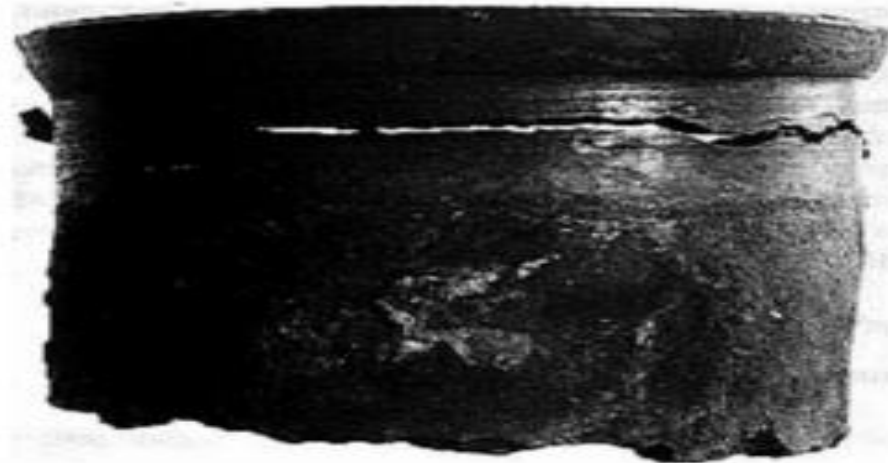


Figure II.19: Fragilisation caustique.

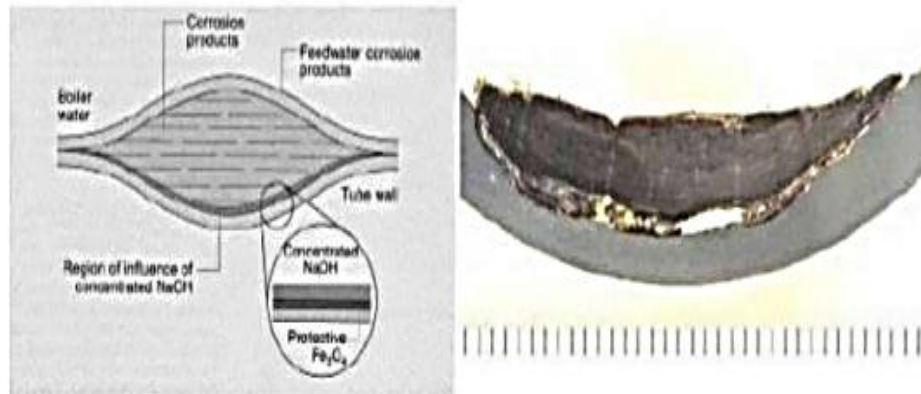


Figure II.20: Effet de la corrosion caustique.

+ Salinité

Il arrive par fuite d'eau de mer aux condensateurs, l'introduction des sels (chlorure de magnésium et de calcium) de s'hydrolyser pour former l'acide chlorhydrique [33].



L'acide formé attaque le métal selon la réaction suivante :



II.6.1.3. Corrosion dans les circuits de vapeur et d'eau condensée

Dans le réseau de vapeur et de retour d'eau condensée, la corrosion est due essentiellement à l'oxygène, au gaz carbonique et à l'ammoniaque. Les effets de ces gaz se font toutefois sentir qu'en présence d'humidité, ce qui explique l'absence de corrosion dans les parties du circuit véhiculant de la vapeur surchauffée chargée d'oxygène et de gaz carbonique, et sa présence à un degré plus ou moins accentué dans les parties en contact avec la vapeur saturée ou humide et l'eau de condensation.

➤ **Action de l'oxygène**

L'oxygène joue un rôle considérable dans les phénomènes de corrosion, qui se trouvent activés suivant deux processus principaux. [33]

➤ **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 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 [29].

➤ **Action du gaz carbonique**

Le dioxyde de carbone dissous (acide carbonique) est la principale cause de corrosion dans les circuits de vapeur et d'eau condensée. Bien qu'il puisse être éliminé par dégazage avant d'entrer dans la chaudière, lors de la condensation de la vapeur, une partie du CO_2 se dissout et forme de l'acide carbonique (H_2CO_3), qui se dissocie en libérant des ions H^+ , abaissant le pH et créant des conditions plus corrosives.

La décomposition des bicarbonates peut avoir lieu aussi dans la chaudière par suite de l'élévation de température [34].

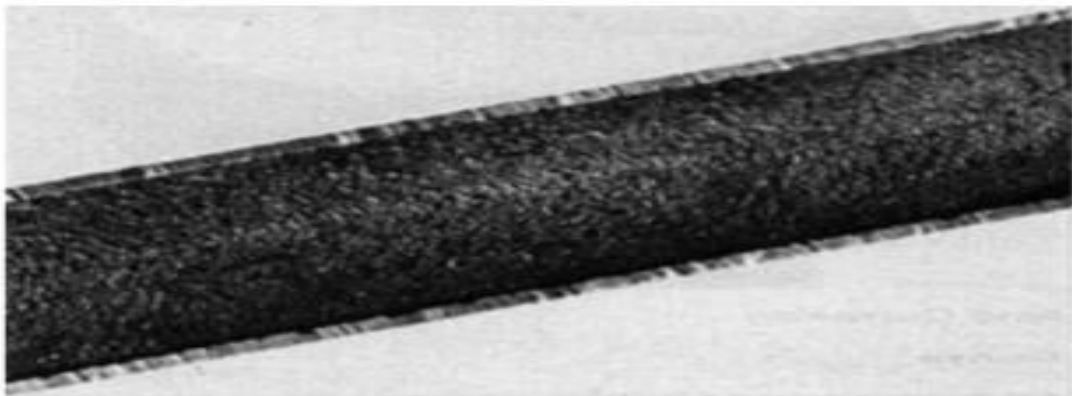


Figure II.21: Corrosion par CO_2 .

II.6.2. L'entartrage

L'encrassement de la chaudière résulte de la précipitation d'impuretés ou du dépôt de solides en suspension sur les surfaces de transfert de chaleur, où ils durcissent et adhèrent. L'évaporation concentre ces impuretés, qui nuisent au transfert de chaleur et peuvent causer des points chauds et une surchauffe localisée lorsque la température et la concentration de solides dépassent la limite de solubilité des minéraux à l'interface tuyau/eau. Ces dépôts réduisent le transfert de chaleur, augmentant le risque de surchauffe. Sans traitement, l'entartrage diminue progressivement le rendement de la chaudière en agissant comme isolant et peut ultimement provoquer une surchauffe et une rupture en raison de la composition du tartre [35].



Figure II.22: Phénomène d'entartrage des tubes de chaudières.

II.6.3. L'encrassement biologique

Les algues, champignons et bactéries filamenteuses présents dans l'eau de refroidissement recyclée piègent les matières minérales en suspension, formant des masses gélatineuses volumineuses qui adhèrent aux surfaces, réduisant le transfert de chaleur et le débit d'eau. Les circuits de refroidissement sont des environnements propices au développement de ces organismes grâce à la présence d'air, de chaleur et de lumière.

Le pH est un facteur crucial, utilisé dans le calcul de l'indice de RYZNAR (IR), une méthode privilégiée pour déterminer le caractère d'une eau, particulièrement les eaux

bicarbonatées calciques. L'IR permet d'évaluer empiriquement la tendance d'une eau à la corrosion ou à l'entartrage, et sa formule pour une eau aérée est $IR = 2pH_s - pH \text{ réel}$. Le pH_s (pH théorique de saturation) est calculé selon le tableau de TILLMANS en fonction du CO_2 semi-combiné et du titre alcalimétrique complet (TAC), tandis que le pH réel est mesuré à la température considérée.

Tableau II.5: Tendance de l'eau suivant IR [5].

Les valeurs de l'indice de RYZNAR	Le caractère de l'eau
$IR < 3.7$	Très entartrant
$3.7 < IR < 6.4$	Moyennement entartrant
$6.4 < IR < 6.65$	Légèrement entartrant
$IR = 6.65$	A l'équilibre
$6.65 < IR < 6.9$	Légèrement corrosif
$6.9 < IR < 8.7$	Moyennement corrosif
$IR > 8.7$	Très corrosif

II.6.4. Moussage et primage

- a) **Moussage** : Le moussage est la formation de bulles ou de mousse à la surface de l'eau des chaudières, qui sont entraînées avec la vapeur. Il est principalement causé par une forte concentration de solides dans l'eau de la chaudière. Des substances spécifiques comme les savons alcalins, les huiles, les graisses, certaines matières organiques et les solides en suspension favorisent particulièrement le moussage. Les solides en suspension se rassemblent sur le film entourant les bulles de vapeur, le rendant plus résistant à l'éclatement et entraînant l'accumulation de mousse. Plus les particules sont fines, plus leur accumulation autour des bulles est efficace.
- b) **Primage** : Le primage est le transport de grandes quantités de gouttelettes d'eau dans la vapeur, ce qui réduit l'efficacité énergétique de la vapeur et provoque des

dépôts de cristaux de sels sur les surchauffeurs et dans les turbines. Il peut être causé par une conception inadéquate de la chaudière, des charges excessives ou des variations brusques de la demande de vapeur. La présence d'impuretés dans l'eau de la chaudière peut parfois aggraver le primage [36].

II.7. Lutte contre les problèmes causés par l'eau

La croissance démographique mondiale augmente la demande en eau potable, où l'industrie est un consommateur majeur avec des besoins de qualité variables selon l'usage. Alors que les PME peuvent utiliser l'eau potable ou des forages, les grandes usines se tournent vers des sources moins chères comme l'eau de mer, surtout en Méditerranée où la demande future croît. L'industrie utilise généralement les eaux de surface, moins coûteuses, pour diverses applications comme le refroidissement, les besoins industriels et commerciaux, la production d'énergie et l'alimentation des chaudières. Pour les chaudières, la qualité de l'eau est cruciale : elle doit contenir des impuretés à des concentrations raisonnables, sans dépasser les seuils de tolérance, et être idéalement exempte de matières en suspension, avoir un faible résidu sec et de faibles teneurs en oxygène dissous, fer, cuivre et silice.

a) Protection contre la corrosion

Les méthodes de lutte contre la corrosion, les plus utilisées sont :

- La protection active : protection cathodique et anodique ;
- L'emploi d'inhibiteur de corrosion ;
- La protection passive par revêtement ;
- La protection par modification du milieu.

c) Protection contre l'entartrage

Les solutions les couramment appliqués sont :

- Décarbonatations à la chaux ;
- Décarbonatations sur les résines carboxyliques ;
- Injection des acides (lessivage) ;
- Séquestration par polyphosphate ;
- Adoucissement sur résines échangeuses d'ions.

c) Protection contre le moussage et le primage

Pour prévenir le moussage et le primage, il est essentiel de maintenir une faible concentration de solides dans l'eau des chaudières, d'éviter les charges excessives et les variations soudaines de charge. Les condensats contaminés doivent être rejetés temporairement jusqu'à l'élimination de la source de contamination. Des agents chimiques anti-moussage et anti-primage, à base de tensioactifs, peuvent être très efficaces. Les chaudières nécessitent une eau d'alimentation de qualité, car la production de vapeur concentre les sels dissous, formant des dépôts qui réduisent le transfert de chaleur et l'efficacité. Les gaz dissous comme l'oxygène et le dioxyde de carbone provoquent la corrosion. Pour protéger la chaudière, ces contaminants doivent être contrôlés ou éliminés par des traitements externes (réduction des impuretés hors chaudière, utilisé en cas de forte concentration d'impuretés) ou internes (traitement des impuretés à l'intérieur de la chaudière, seul ou combiné au traitement externe, visant à traiter la dureté, éliminer les boues, réduire l'oxygène et prévenir le moussage).

II.8. Conclusion

La conclusion que l'on peut tirer de cette partie est qu'il est bien connu qu'un conditionnement soit possible, mais il doit être contrôlé avec une grande rigueur. Les chaudières elles-mêmes semblent avoir quelques peines à établir les spécifications de l'eau d'appoint, car il est inconvenable d'avoir une chaudière en zéro absolu en sodium, chlorure ou silices. Seul un conditionnement correct de l'eau d'appoint, à l'aide des

additifs chimiques et des bons matériels nous permettent d'avoir une qualité d'eau optimale pour l'alimentation des chaudières.

Les références bibliographiques :

- [1] Deffaf Wiam.2023. Etude de la Qualité de l'eau d'alimentation de Chaudière du Complexe CONDOR Electronics. Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj
- [2] Revue de l'institut Algérien du Pétrole. « Chaudière industrielle » janv-juin, 2001
- [3] Ait Zai, N. & Ben Hounet, Y. & Moutassem-mimouni, B. (2021). Les Parentalités En Algérie : Intérêt De L'enfant, Monoparentalité Et Kafâla [Articles Scientifiques Et Publications, Université Abou El Kacem Saâdallah - Alger 2].
- [4] Jean Rodier et coll L'analyse de l'eau , 8ème édition , Eau naturelles . Eau résiduaire . Eau de Environmental Protection Agency (EPA) /February 12, 2025mer.
- [5] Mémoire HAMROUCHE BELBALI Université de Skikda, 2022
- [6] Oliver atteia , Chimie et pollution des eaux souterraines
- [7] B.LEGUBE, N.MERLET & COLL, « L'analyse de l'eau, techniques modernes d'analyse chimiques, biologiques et microbiologiques des eaux », Ed 9e, Dunod-Paris, 2009.
- [8] F.Imken, « Les étapes de traitement des eaux et contrôle de qualité».Mémoire de licence. UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH, 2015
- [9] Amel, F. (2021). See Discussions, Stats, And Author Profiles For This Publication At: <https://www.researchgate.net/publication/350567414> Surface Water Quality Assessment In Semi-arid Region (el Hodna Watershed, Algeria) Based On Water Quality Index (wqi) [Articles Scientifiques Et Publications, Université Mohamed Boudiaf - M'sila].
- [10] Z.BOUZELIFA et S.MEDJANI. « Analyse et contrôle de la qualité de l'eau adoucie de refroidissement de l'ACO1 (MITTAL STEEL) ». Mémoire de fin d'études. Département génie des procédés, Université BADJI MOKHTAR-Annaba, 2005.
- [11] R.DJEBABLIA et W.MESSIKH. « Etude et impact de la qualité de l'eau de refroidissement du circuit semi-ouvert de la centrale et utilités II FERTIAL-ANNABA » Mémoire de fin d'études. Département génie des Procédés, Université BADJI MOKHTARAnnaba, 2008.
- [12] W.Bouridi, S.Fardjallah, N.Saaidia. « Traitement et critères de potabilité de l'eau (les normes) ».Mémoire de master. Université 8 Mai 1945 Guelma, 2017).

- [13] Tebessi Alima, B. (2014). Caractérisation Des Eaux Usées Épurés De La Vile De Guelma Et Leur Aptitude À L'irrigation [Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 - Guelma].
- [14] Dr. Yamina BOUDINAR. IAP Skikda / Traitement des Eaux /
- [15] IAP Skikda / Traitement des Eaux / Nov 2014
- [16] Jean Rodier et coll. L'Analyse de l' eau, 8eme édition. Eau naturelle, Eau [résiduaire, Eau](#)
- [17] N. Atamenia, W. Ziaya « Traitement et analyses des eaux du barrage de Hammam Debagh ». Mémoire de master. Université 08 Mai 1945 Guelma, 2020.
- [18] Revue de l'institut Algérien du Pétrole. « Chaudière industrielle » janv-juin, 2001.
- [19] Joseph Merlin, "Rapport de stage RA1K Skikda Algérie", publié le 29 décembre 2014.
- [20] ANKIK Soraya. Utilités et traitements des eaux. IAP 2020.
- [21] M. Boumaaza, traitement et épuration des eaux , université 8 Mai 1945 , Guelma , 2019.
- [22] V. RENAUDIN. « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres » 18 novembre, 2003.
- [23] F. TAKABAIT « Traitement de l'Eau de Forage par Osmose Inverse au Niveau du Complexe Agroalimentaire Cevital ». Mémoire de fin d'études. Département de chimie, Université ABDERRAHMANE.MIRA - Béjaïa, 2012.
- [24] Document du complexe GL1/Z, objet : « Suivi des chaudières combustion et rendement » 18 fév, 1992
- [25] C. CHAUSSIN ; G .HILLY. « Métallurgie- alliages métalliques », édition Dunod, 1976.
- [26] W. BOUNAB; M. k, HOUTIA. Mémoire de master en génie des procédés « Etude préventive sur la corrosion et dysfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar » Université d'Adrar, 2020.

- [27] N. DEGHFEL; R. REHAMNIA. « Introduction à la corrosion et aux inhibiteurs de corrosion » Université Mohamed Boudiaf, M'SILA, 2013.
- [28] R. BOUIGE ; D. COUILLARD. « Traité pratique de chauffage » Edition de l'école Polytechnique de Montréal ,2ème édition.2009.
- [29] J. RODIER. « Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer : chimie physique – chimie, bactériologie », 7ème édition, 1987.
- [30] L. HAMADI. Mémoire de magister « Etude comparative de la corrosion localisée d'un acier ordinaire et d'un acier inoxydable » Université Hadj Lakhdar, Batna, 2014.
- [31] J.J RAMEAU. « Corrosion dans les chaudières générateurs d'énergie thermique » 3ème école Magrébine de corrosion 'KENITA', mars, 1995.
- [33] A. MEHDI. Mémoire de master « L'influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone » Université de Skikda, 2018.
- [32] H. UHLIG. « Corrosion et protection » Edition DUNOD, 1970.
- [34] J. J. LAMOUREUX. « Précis de corrosion ». Edition Masson, 1994.
- [35] W.Bounab, M.Kalil houtia, « étude préventive sur la corrosion et dysfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'adrar », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master, ADRAR, université Ahmad Draia, 2019.
- [36] F.Chrif youcef, « étude du comportement électrochimique de l'acier A106 B d'un évaporateur de chaudière sous l'influence d'inhibiteurs de corrosion », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en métallurgie, algérie, école nationale polytechnique, 2013.



Chapitre III
Etude expérimentale

III.1 Introduction

La corrosion représente une menace majeure pour la durabilité et la sécurité des constructions métalliques, rendant impératif son contrôle. Parmi les stratégies de protection, l'utilisation d'inhibiteurs se distingue par son efficacité.

Ce chapitre sera consacré à la méthode gravimétrie qui est mise en œuvre pour évaluer le pouvoir inhibiteur contre la corrosion de l'acier en milieu acide. Pour se faire elle sera appliquée en présence et en absence de l'inhibiteur industriel chimique.

Au cours de cette étude expérimentale, le système (Substrat/solution) est résumé dans le tableau suivant :

<i>Substrat</i>	<i>Solution (milieux)</i>
<i>Acier C1020</i>	Acide sulfurique (H_2SO_4) 1% ; 3% ; 5%
	Chlorure de sodium (Na Cl) 5%
	Peinture (XF-13865 WHITE LACQUER)
	Vernis (VARNISH X EXT 0576 /0)

III.2 Objectif de l'étude

Notre objectif est de confirmer les performances anticorrosion des peintures utilisées pour pouvoir les adoptées dans le secteur pétrochimique pour protéger les équipements contre les milieux agressifs. Pour ce faire nous allons :

Caractériser dans un premier temps le comportement à la corrosion du matériau de l'étude, récupérer à partir d'une chaudière dans deux milieux agressifs distincts acide et salin :

- Solution corrosive d'acide sulfurique ;
- Solution saline de chlorure de sodium.

III.3 Composition et propriétés de l'acier au carbone

l'acier C1020 est un matériau polyvalent et économique, privilégié pour les applications industrielles nécessitant une bonne formabilité, soudabilité et usinabilité, ainsi qu'une résistance mécanique modérée. Sa capacité à être cémenté élargit encore son champ d'application pour des pièces nécessitant une résistance à l'usure superficielle.

III.3.1 Les caractéristiques de l'acier au carbone

Tableau III.1. Les caractéristiques de l'acier au carbone.

Caractéristique	Valeur Typique	Unité
Propriétés Mécaniques (état recuit, valeurs approximatives)		
Résistance à la traction	380 – 480	MPa
Limite d'élasticité	205 – 275	MPa
Allongement à la rupture (50 mm)	25 – 35	%
Réduction de section	50 – 60	%
Dureté Brinell (HB)	111 – 143	
Propriétés Physiques (approximatives à température ambiante)		
Densité	7.87	g/cm ³
Module d'élasticité (Young)	200 – 210	GPa
Conductivité thermique	51.9	W/(m·K)
Coefficient de dilatation thermique	11.7 x 10 ⁻⁶	/°C
Autres Caractéristiques		
Soudabilité	Excellente	
Usinabilité	Bonne	
Trempabilité	Faible	
Traitements thermiques typiques	Recuit, Normalisation, Cémentation, Nitruration	

III.3.2 Analyses chimiques

Le matériau utilisé dans notre étude est l'acier de carbone (C1020) qui est utilisé pour la construction, le tableau ci-dessous représente la composition chimique du matériau qui obtenu à partir d'un instrument OXFORD X-MET 7000 :

Tableau III.2 .composition chimique de l'acier (C1020).

Elément	Ti	V	CR	MN	Fe	Ni	Cu	Nb	Mo	C
Teneur %	<0.00	0.03	0.01	0.49	98.13	<0.00	<0.00	0.00	<0.00	0.230

III.4 Procédé de préparation de l'échantillon



Figure.III.1 : Echantillons avant polissage.

➤ Le polissage

Le polissage mécanique des échantillons est distribué avec du papier abrasif (grains de carbure de silicium Sic). Une polisseuse rotative, minuscule avec un disque abrasif de différentes granulométries cent quatre-vingts, 800, 1000 et 1200, rincé au H₂O à chaque modification du papier, de manière à se débarrasser des rayures et des défauts dus à l'usinage des pièces. Les échantillons sont ensuite rincés avec H₂O et ainsi séchés et ainsi conservés dans un dessiccateur excessivement. A été utilisé (FigureIII.1)



Figure III.2 : La polisseuse.

➤ **Nettoyage et séchage**

- Les échantillons sont rincés à l'eau distillée après l'abrasion mécanique ;
- Utilisation de l'alumina poudre pour obtenir une bonne surface de finition après polissage ;
- Séchage a l'air libre.

III.5 Milieux de travail

III.5.1 Matériels et produits utilisés

Le Matériel et produits utilisés sont résumés comme suit :

Matériels	Produits
Balance	L'eau distillée
Pipette	L'acide sulfurique
Eprouvette	Chlorure de sodium
Béchers	
Fiole (100 ml)	
Entonnoir	



Figure III.3 : Les matériels utilisés.

III.5.2 Préparation des solutions corrosives

Dans notre travail on a utilisé 2 milieux corrosifs préparés au laboratoire

- + Une solution de l'acide sulfurique H_2SO_4 à 1% ,3% et 5%
- + Une solution de chlorure de sodium $Na Cl$ à 5%

Tableau III.3. Les propriétés de l'acide sulfurique.

La masse molaire	La densité	La pureté %
98.08	1.849	98

- **La solution 1** : On a obtenu la solution de H_2SO_4 à 1% par la prise de 5.71 ml de l'acide sulfurique et on a complété le volume jusqu'à 1000ml avec l'eau distillée.
- **La solution 2** : On a obtenu la solution de H_2SO_4 à 3% par la prise de 17.40 ml de l'acide sulfurique et on a complété le volume jusqu'à 1000 ml avec l'eau distillée.
- **La solution 3** : On a obtenu la solution de H_2SO_4 à 5% par la prise de 29.23ml de l'acide sulfurique et on a complété le volume jusqu'à 1000 ml avec l'eau distillée.



Figure III.4 :Solutions de l'acide sulfurique à 1%,3% et 5%.

La solution 4 . On a obtenu la solution de **Na Cl** à 5% par la dissolution de 50g de Na Cl dans un 1000 ml de l'eau distillée.



Figure III.5. Chlorure de sodium.

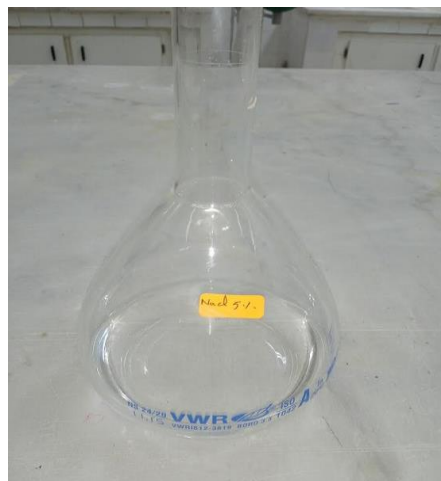


Figure III.6. Solution de chlorure de sodium 5%.

III.6 Essai gravimétrique

L'essai de perte de masse est une méthode utilisée pour mesurer la quantité de matière perdue par un matériau lors d'un traitement thermique ou d'une réaction chimique. Cette méthode permet d'évaluer la résistance d'un matériau à ces différents types de dégradation.

Nous avons effectué l'essai perte de poids au niveau du laboratoire de département, en utilisant des solutions contenant différentes concentrations d'acide sulfurique H_2SO_4 , une solution de Na Cl et sous l'influence de température dans les différents solutions de H_2SO_4 dans le but de comparer le comportement, en corrosion dans les solutions acides et la solution saline des différents échantillons préparés.

Après chaque période de test choisie, nous avons retiré l'échantillon puis nous l'avons nettoyé avec de l'eau distillé et nous l'avons bien séché après nous l'avons repesé et les nouvelles masses ont été enregistrées pour la pesée de poids des échantillons, on a utilisé une balance électronique montrée dans la figure (III.7).

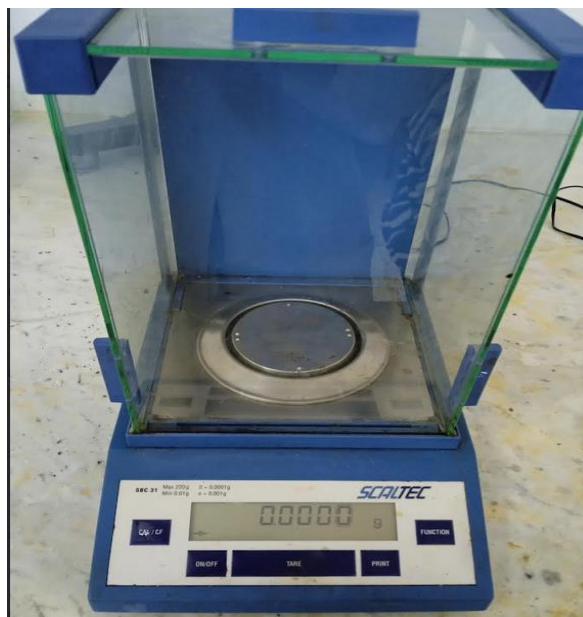


Figure III.7 : Balance de précision.

III.7 Milieu d'étude

- + Le milieu agressif utilisé dans cette étude est constitué principalement de l'acide Sulfurique H_2SO_4 ;
- + Nous préparons une solution de H_2SO_4 , à partir de la solution mère sa pureté (95 – 97)% pour les concentrations 1%, 3%, 5%, 10%, 15% ;
- + Parmi les solutions utilisées figure également le chlorure de sodium $NaCl$ à 5% ;
- + L'eau déminéralisée (1000ml).

III.7.1 Les propriétés physico-chimiques de l'acide sulfurique

- **Propriétés physiques**

L'acide sulfurique pur est un liquide huileux incolore, inodore et hygroscopique qui vire au jaune-brun lorsqu'il est exposé à des impuretés.

Il est miscible à l'eau. La dissolution dans l'eau ou les mélanges eau-alcool s'accompagne d'une exothermie importante et d'un retrait liquide (voir aussi propriétés chimiques).

L'acide sulfurique est disponible dans le commerce à diverses concentrations, la concentration d'acide sulfurique concentré est d'environ 98%.

- **Propriétés chimiques**

Sous l'action de la chaleur, à une température supérieure à son point d'ébullition, l'acide sulfurique se décompose en trioxyde de soufre et en eau. La réaction est complète à environ 450°C.

L'acide sulfurique concentré agit comme un agent oxydant. Il est hautement hygroscopique et est un puissant agent déshydratant. Il détruit la matière organique (déshydratation et carbonisation).

La dissolution de l'acide sulfurique dans l'eau est fortement exothermique. C'est dangereux, très violent, et vient avec une éclaboussure de liquide si vous versez de l'eau sur l'acide concentré.

L'acide sulfurique réagit violemment avec de nombreux produits poudres métalliques, certains combustibles, agents réducteurs, bases fortes, agents oxydants, ces réactions peuvent être explosives.

Les métaux communs primaires sont corrodés par l'acide sulfurique et dégagent de l'hydrogène gazeux. La corrosivité de l'acide sulfurique vis-à-vis des métaux dépend notamment de sa concentration et de sa température.

Tableau III.4. Propriétés physico-chimiques de H₂SO₄.

Forme brute	H ₂ SO ₄
Masse molaire	98.08 g/mol
Point d'ébullition à 1 atm	335°C (98%) ,290C° (92%)
Densité relative (eau=1)	1.84 à 20°C (93 à 100%)
Densité de vapeur (air =1)	3.4
pH de la solution	très acide < 1 (94 à 98%)
Viscosité à 25°C	21 mPa.S
Pureté	95 - 97%

III.7.2 Les propriétés physico-chimiques de Chlorure de Sodium

- **Propriétés physiques**

Le chlorure de sodium, un solide cristallin blanc contient une densité de 2,165 g/ml, un point de fusion de 801 C° et un point d'ébullition d'environ 1413 C°. Le chlorure de sodium est également disponible sous forme de solutions aqueuses à différentes concentrations appelées solutions salines.

- **Propriétés chimiques**

Le chlorure de sodium est un composé facilement soluble dans l'eau et d'autres solvants polaires et est un solide stable. Le chlorure de sodium se décompose uniquement à des températures élevées pour produire des fumées toxiques d'oxyde disodique (Na₂O) et d'acide chlorhydrique (HCl)

Tableau III.5 .Propriétés physico-chimiques de Na Cl.

Forme Brute	T° de Fusion	T° d'ébullition	Densité relative (eau =1)	Densité de Vapeur	pH
Na Cl	801°C	1413°C	2.17 à 25°C	0.1KPa	pH=6

III.8 Méthode de caractérisation

III.8.1 Méthode ciseaux

Cette méthode est relativement simple et ne nécessite aucun équipement, ce qui permet de calculer le volume à utiliser, elle est basée sur le principe de la loi de la masse volumique ($\rho = m/V$).

ρ : peut être exprimé en (g/ml) ;

m : masse exprimé en (g) ;

V : volume en (ml) ;

➤ **Calcul du Volume H_2SO_4 :**

D'après la relation suivante :

$$V_{solution} = V_{soluté} + V_{solvant} \text{ et } V_{soluté} = m/\rho$$

Application numérique :

➤ **Pour 5%**

$$V_{solvant} = 95 - 5 = 90$$

$$V_{soluté} = 5 / 1.84 = 2.71 \text{ ml}$$

$$V_{solution} = 2.71 + 90 = 92.71 \text{ ml}$$

$$\text{Le volume : } V = 2.71 \times 1000 / 92.71 = \mathbf{29.23 \text{ ml}}$$

➤ **Pour 3%**

$$V_{solvant} = 95 - 3 = 92$$

$$V_{soluté} = 3 / 1.84 = 1.63 \text{ ml}$$

$$V_{solution} = 1.63 + 92 = 93.63 \text{ ml}$$

$$\text{Le volume : } V = 1.63 \times 1000 / 93.63 = \mathbf{17.40 \text{ ml}}$$

➤ **Pour 1%**

$$V_{solvant} = 95 - 1 = 94$$

$$V_{soluté} = 1 / 1.845 = 0.54 \text{ ml}$$

$$V_{solution} = 0.54 + 94 = 94.54 \text{ ml}$$

$$\text{Le volume : } V = 0.54 \times 1000 / 94.54 = \mathbf{5.71 \text{ ml}}$$

➤ **Calcul du Volume Na Cl (5%) :**

On pèse 50g de la poudre solubilisée dans 1000ml d'eau distillé.

III.8.2 protocole expérimental

Après la découpe de l'acier au carbone en trois échantillons, et le poids initial de chaque échantillon est mesuré à l'aide d'une balance. Nous les plaçons dans une solution contenant différentes concentrations d'acide sulfurique dans 1000 ml d'eau distillée.

De telle sorte que :

- Les trois échantillons sont placés dans une concentration estimée à 1 % d'acide sulfurique ; après dans une concentration estimée à 3% et enfin à 5% .

Laissons ensuite les échantillons dans la solution pendant 1heure, 3 heures, 5 heures, 7 heures et jusqu'à 9 heures d'immersion.

À chaque fois, après avoir retiré l'échantillon, on le nettoie avec de l'eau distillée, on le pèse et puis le remettre dans la solution pour la période de temps spécifiée.

On place trois autres échantillons à part de l'acier au carbone dans 1000 ml d'eau distillée contenant une solution de Na Cl à 5% et on le laisse de 1 heure à 9 heures , le poids initial étant mesuré au préalable.

Ensuite, nous mesurons le poids de l'échantillon à chaque fois, comme indiqué précédemment, après l'avoir nettoyé avec de l'eau distillée.

L'étude sous l'influence des solutions H_2SO_4 et Na Cl montre que leur effet diminue progressivement.

Après nous avons fait un test de peinture sur les six échantillons et on les met dans les mêmes solutions précédentes à 5% .

Laissons ensuite les échantillons dans la solution pendant 1heure, 3 heures, 5 heures, 7 heures et jusqu'à 9 heures d'immersion.

Après nous voulions enlever la peinture des deux premiers échantillons donc on les place dans une solution d'acide sulfurique dans une concentration estimée à 10% après à 15% et on les laisse dans une période de 1 heure , 3 heures , 5 heures.

On a fait un test de température sur le troisième échantillon , on le place dans un bain marie à une température estimée à 80 C° et on le laisse dans une période d'une heure jusqu'à 9 heures.

Ensuite nous avons fait un test de vernissage sur trois nouveaux échantillons pour connaître leur développement dans des conditions différentes .

On a mis le premier échantillon dans une solution de H₂SO₄ 5% , le deuxième dans une solution de Na Cl 5 % et le dernier dans un bain marie à une température estimée à 80 C° et on les laisse dans une période d'une heure jusqu'à 9 heures.

Un autre test a été fait sur les deux échantillons qui sont déjà immergés dans la solution de H₂SO₄ à 15%. On les applique 2 couches de peintures puis on les met dans le bain marie à une température estimée à 80C°.

III.9 Résultats d'essai

- Effet de Temps d'immersion sur l'efficacité du revêtement

Afin de comprendre le comportement de l'acier au carbone dans l'H₂SO₄ en présence de peinture et vernis sur toutes les surfaces des échantillons.

On a d'abord vérifié l'effet de la durée d'immersion sur la corrosion de l'acier au carbone dans le milieu acide, une série d'expériences a été menée en utilisant trois concentrations de H₂SO₄.

Trois autres échantillons sont testés dans un milieu salin de 5% Na Cl. L'évolution des pertes de masse en fonction de temps d'immersion est illustrée pour chaque milieu dans les tableaux ci-dessous.

D'abord en milieu acide

- **Pour 1% de H₂SO₄**

Les dégradations de masse obtenue sont données dans le tableau (III.5) et la figure (III.8).

Tableau III.6. Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 1 %.

Echantillon 1 : m ₀ = 63,3308					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm(g)	63,3172	63,2917	63,2499	63,1970	63,1551

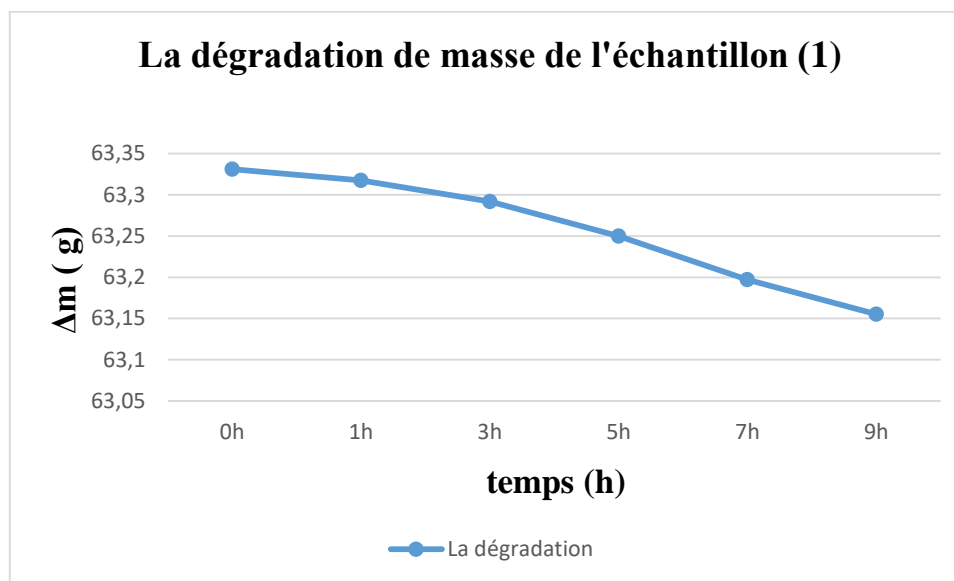


Figure III.8 : Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 1%.

Tableau III.7. Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 1 %.

Echantillon 2 : m ₀ = 73,8247					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm(g)	64,6066	64,5546	64,4910	64,4221	64,3564

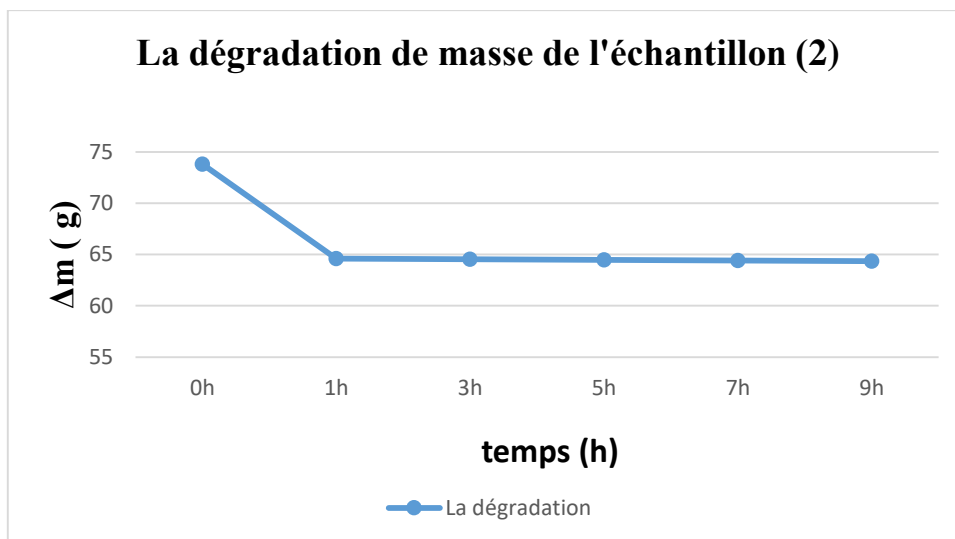


Figure III.9 : Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 1%.

Tableau III.8. Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 1 %.

Echantillon 3 : m ₀ = 73,8245					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm(g)	73,7761	73,7195	73,6529	73,5900	73,5395

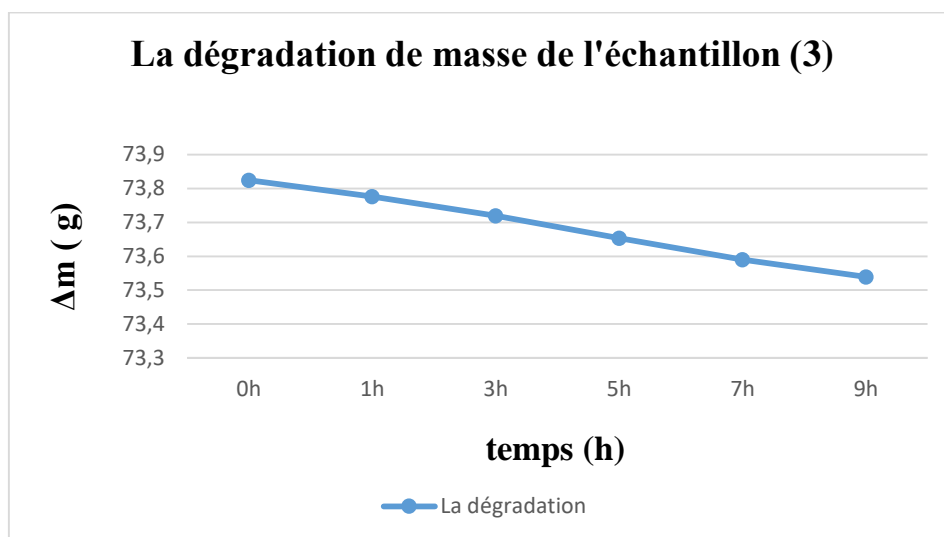


Figure III.10 : Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 1%.

Pour 3% de H₂SO₄

Les dégradations de masse obtenue sont données dans les tableaux (III.8 ; III.9 ; III.10) et la figure (III.11 ; III.12 ; III.13)

Tableau III.9. Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 3 %.

Echantillon 1 : m₀ = 63,1551					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	63,1284	63,0356	62,9511	62,8345	62,7446

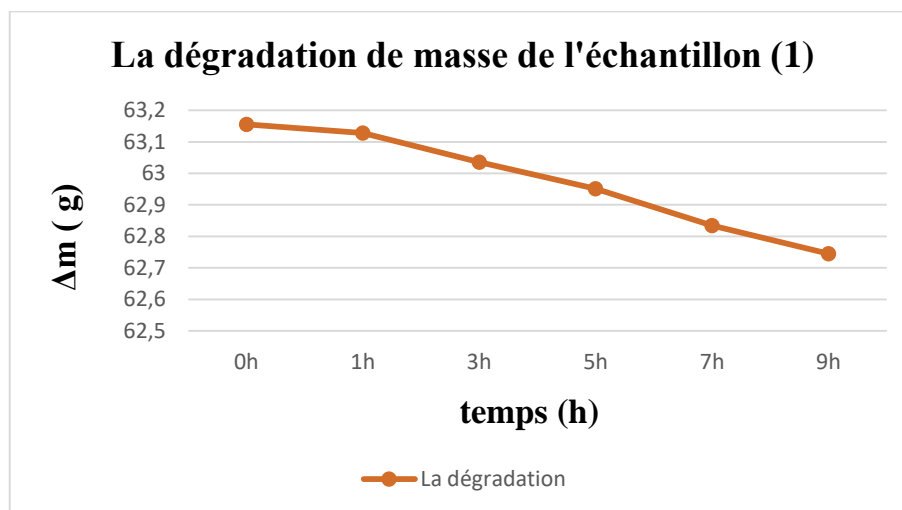


Figure III.11 : Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 3%.

Tableau III.10 . Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 3 %.

Echantillon 2 : m₀ = 64,3564					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	64,2970	64,1927	64,0795	63,9649	63,8406

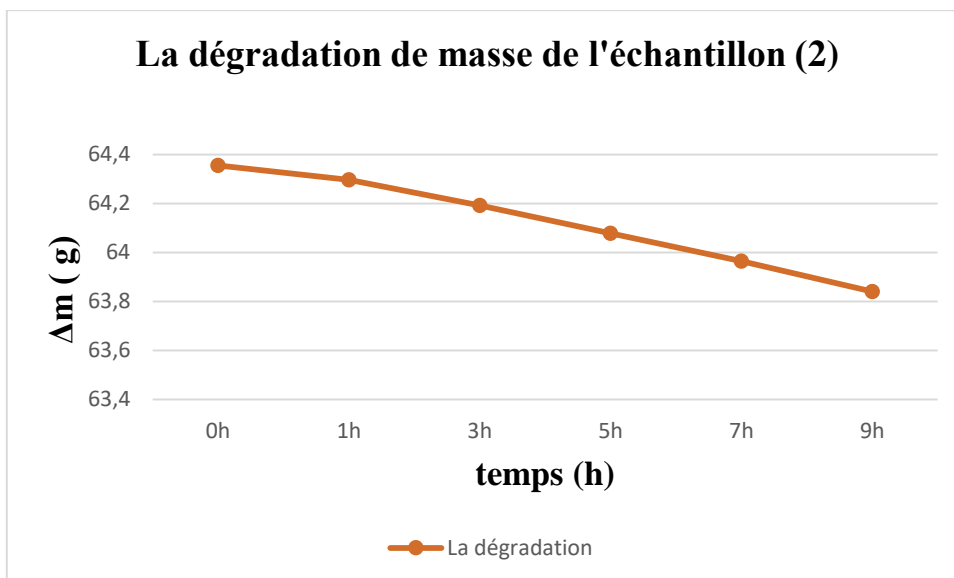


Figure III.12 :Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 3%.

Tableau III.11. Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 3 %.

Echantillon 3 : m ₀ = 73,5395					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm(g)	73,4969	73,4439	73,3091	73,1839	73,0334

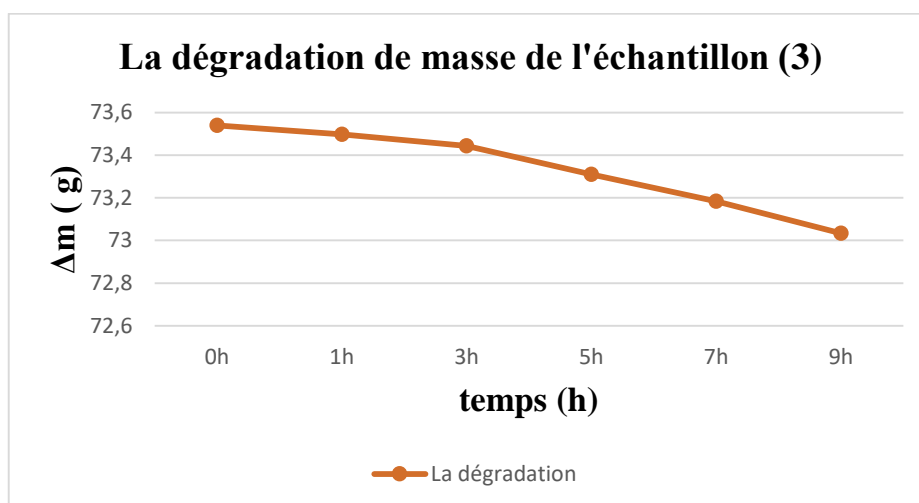


Figure III.13 :Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 3%.

Pour 5% de H₂SO₄

Les dégradations de masse obtenue sont données dans le tableau (III.11 ; III.12 ; III.13) et les figures (III.14 ; III.15 ; III.16)

Tableau III.12. Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5%.

Echantillon 1 : $m_0 = 73,0334$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	62,6407	62,5254	62,3418	62,1436	61,9670

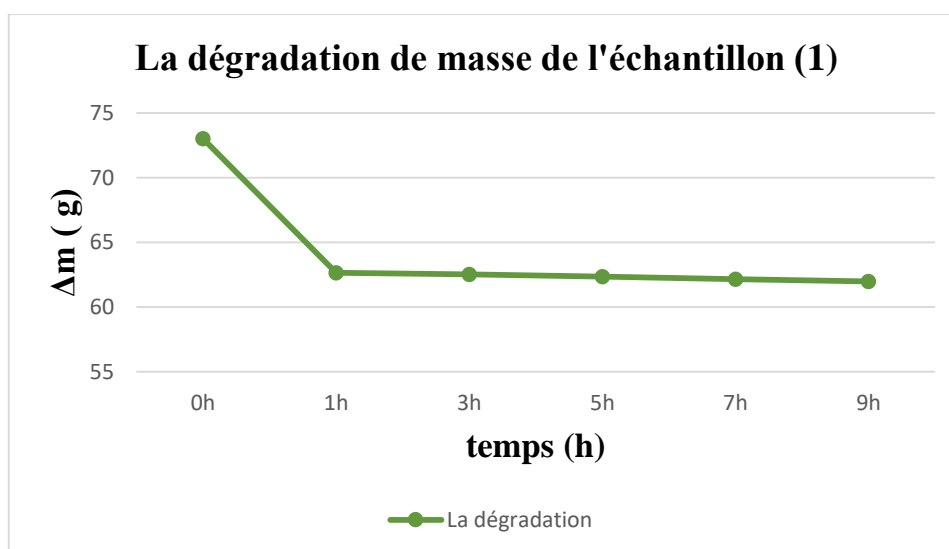


Figure III.14 : Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5%.

Tableau III.13. Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5%.

Echantillon 2 : $m_0 = 63,8406$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	63,6949	63,4537	63,2157	63,0002	62,8800

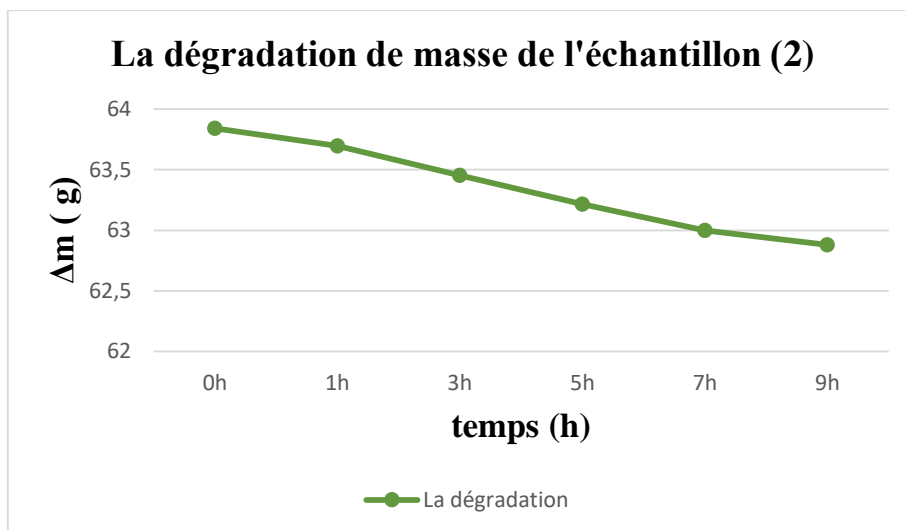


Figure III.15 : Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 5%.

Tableau III.14. Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 5%.

Echantillon 3 : $m_0 = 73,0334$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	72,8546	72,6138	72,3130	72,0373	71,7787

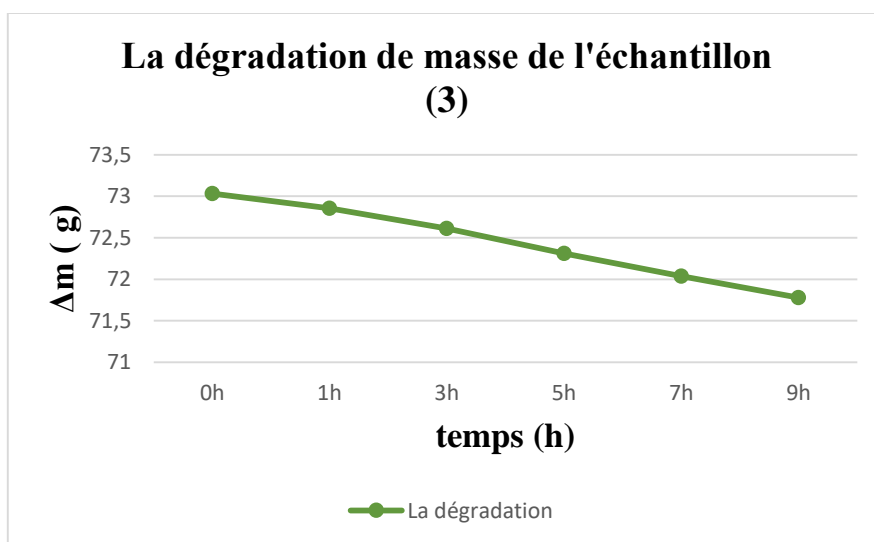


Figure III.16 : Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 5%.

Dans un milieu salin :

➤ Pour 5% de Na Cl

Les dégradations de masse obtenues sont données dans le tableau (III.15) et la figure (III.17). **Tableau III.15.** Dégradation de masse de l'échantillon (4) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%.

Echantillon 4 : $m_0 = 66,5925$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	66,5922	66,5916	66,5908	66,5899	66,5856

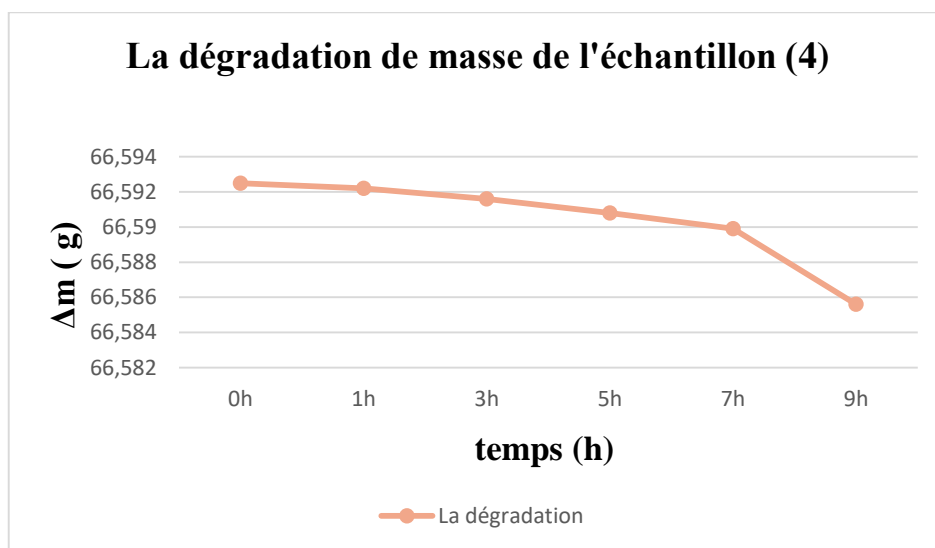


Figure III.17 : Dégradation de masse de l'échantillon (4) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%.

❖ **Application manuelle :**

✓ **Sans peinture:**

Les masses initiales (m_0 ; m_1 ; m_2) des échantillons (1 ; 2 ; 3) avant l'application du peinture manuellement (sans peinture) sont donnés dans le tableau (III.16)

Tableau III.16. Les masses initiales des échantillons (1 ; 2 ; 3) avant l'application de peinture.

Temps (h)	m ₁	m ₂	m ₃
Δm (g)	61,9593	62,8692	71,7616

✓ **Avec peinture :**

Les masses initial (m₁' ; m₂' ; m₃') des échantillons (1 ; 2 ; 3) après l'application de peinture manuellement (Avec peinture) sont donnés dans le tableau (III.17)

Tableau III.17. Les masses initiales des échantillons (1 ; 2 ; 3) après l'application de peinture.

Temps (h)	m ₁ '	m ₂ '	m ₃ '
Δm (g)	62,4176	63,2591	72,2925

Les dégradations de masse obtenue pour l'échantillon (1) en fonction du temps sont données dans le tableau (III.18).

Tableau III.18. Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5 %.

Echantillon 1 : m ₀ = 62,4176					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	62,4131	62,4054	62,4039	62,3892	62,3884

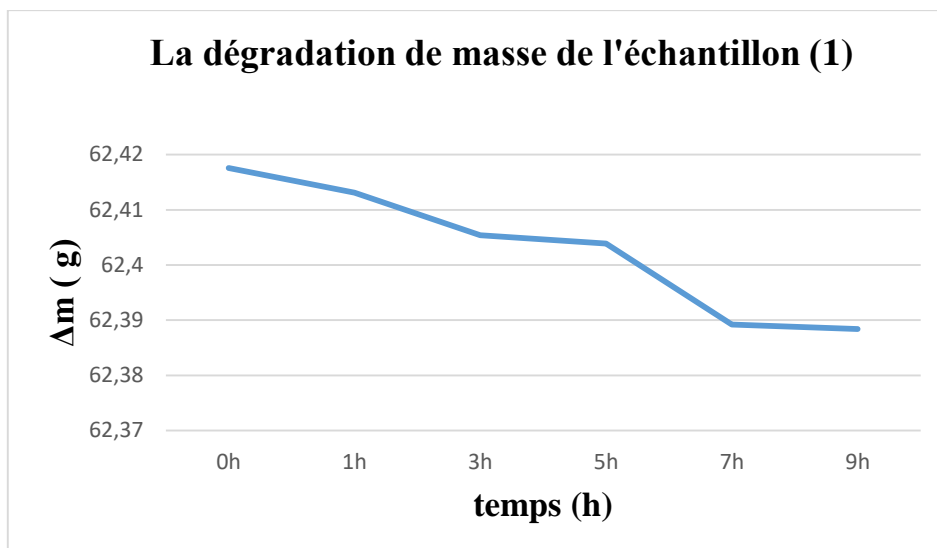


Figure III.18 : Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5%.

Tableau III.19. Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5 %.

Echantillon 2 : m ₀ = 63,2591					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	63,2581	63,2501	63,2483	63,2348	63,2338

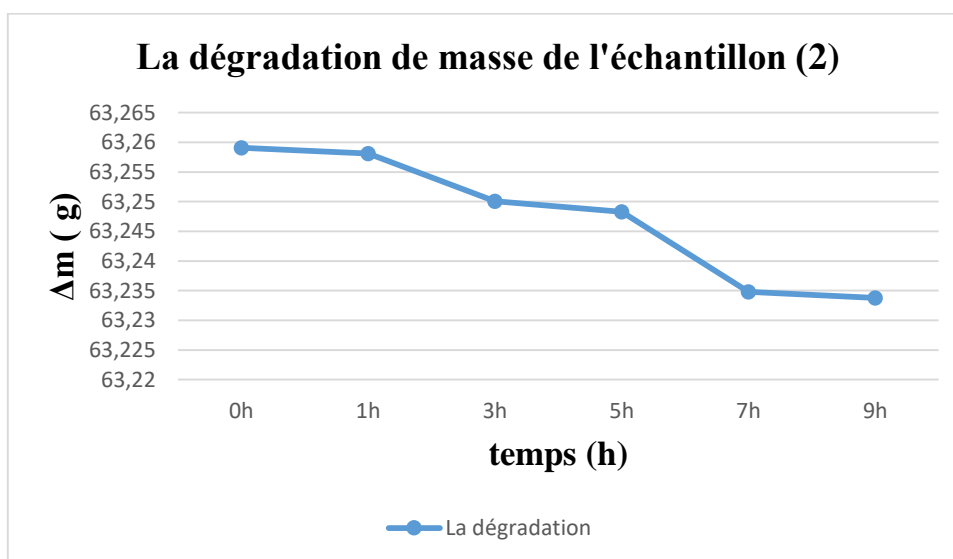


Figure III.19 : Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5%.

Tableau III.20. Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 5 %.

Echantillon 3 : $m_0 = 72,2925$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	72,2914	72,2843	72,2814	72,2539	72,2527

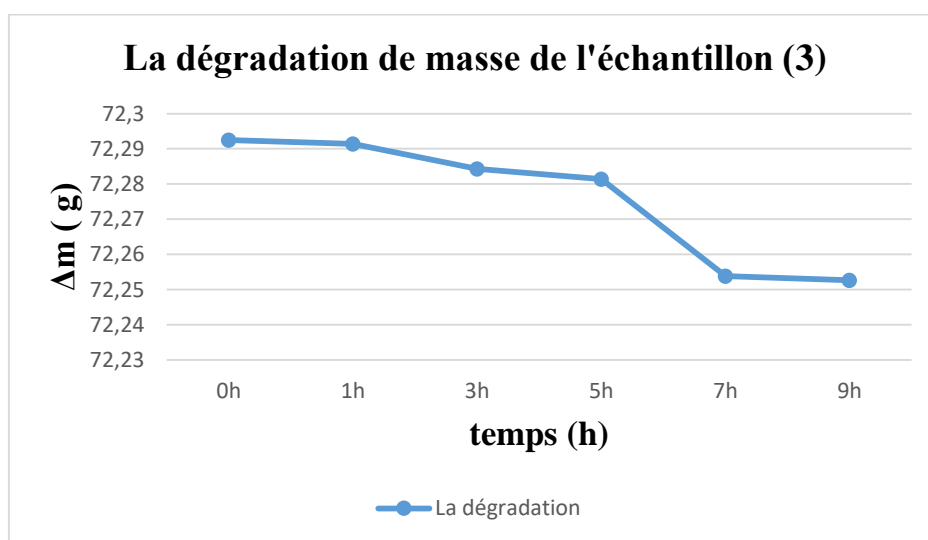


Figure III.20 : Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 5%.

Tableau III.21. Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 10 %.

Echantillon 1 : $m_0 = 62,3833$			
Temps (h)	1h	3h	5h
Δm (g)	62,3822	62,3803	62,3751

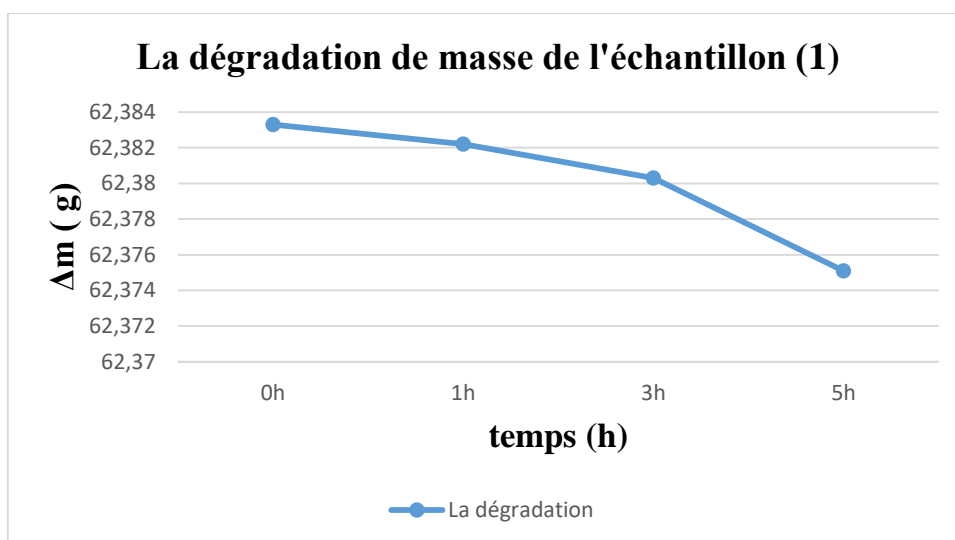


Figure III.21 : Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 10%.

Tableau III.22. Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 10 %.

Echantillon 2 : $m_0 = 63,2298$			
Temps (h)	1h	3h	5h
Δm (g)	63,2279	63,2220	63,2139

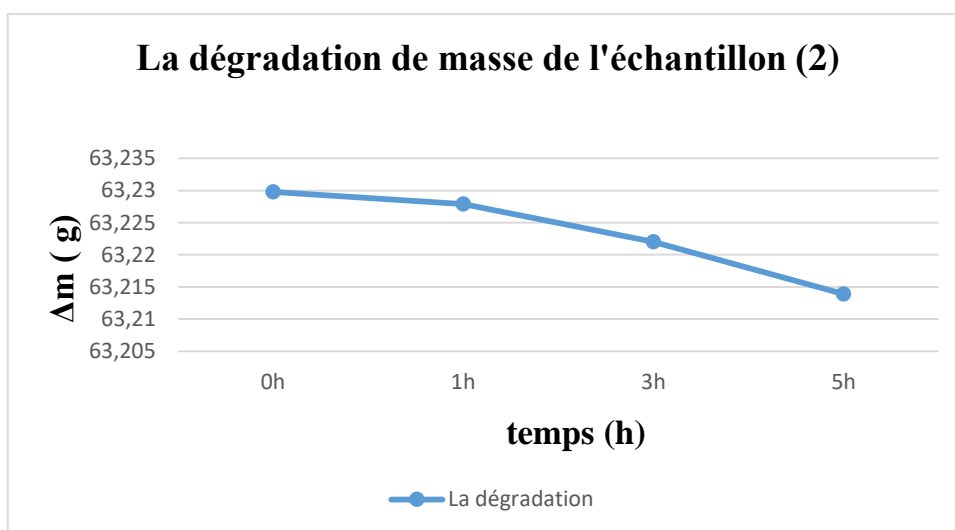


Figure III.22 : Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 10%.

Tableau III.23. Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 15 %.

Echantillon 1 : $m_0 = 62,3751$			
Temps (h)	1h	3h	5h
Δm (g)	62,3664	62,3532	62,3416

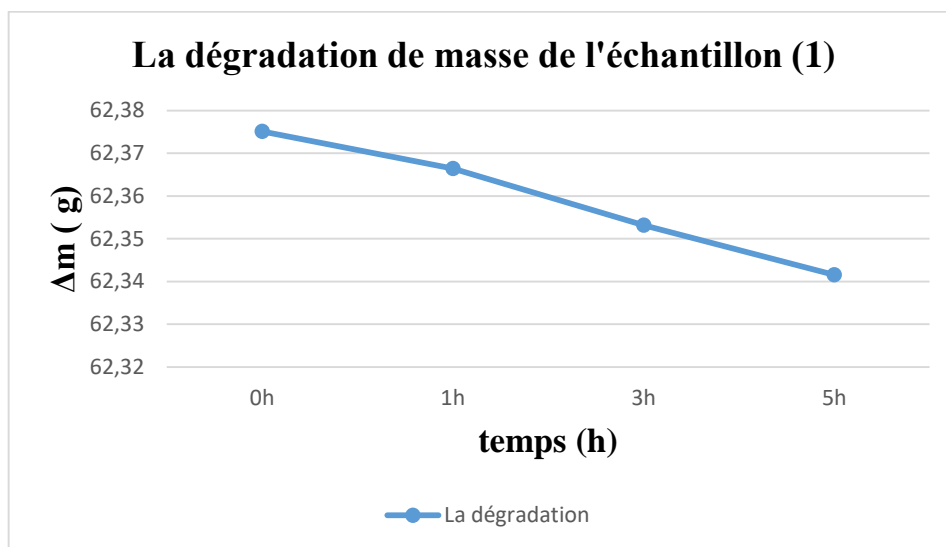


Figure III.23 : Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 15%.

Tableau III.24. Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 15 %.

Echantillon 2 : $m_0 = 63,2139$			
Temps (h)	1h	3h	5h
Δm (g)	63,1858	63,1534	63,1195

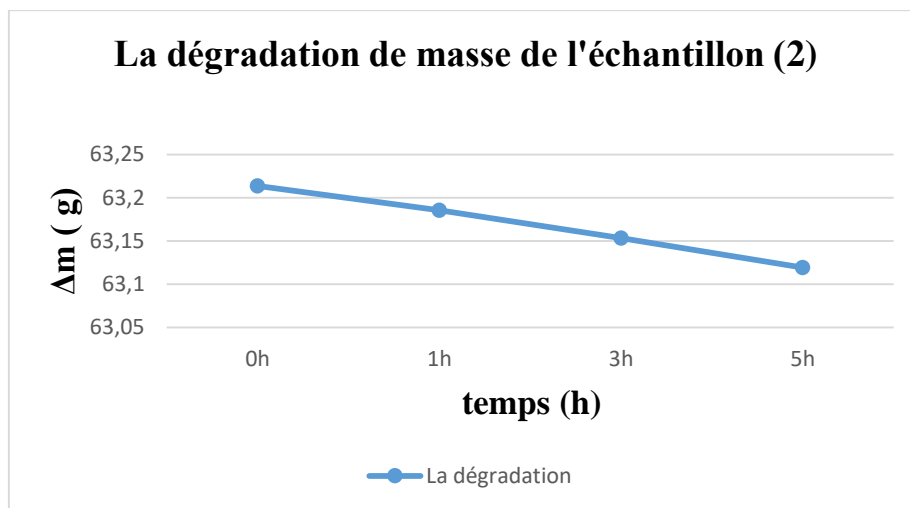


Figure III.24 : Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 15%.

✓ **Sans peinture :**

Les masses initiales (m_4 ; m_5 , m_6) des échantillons (4 ; 5 ; 6) avant l'application de peinture manuellement (sans peinture) sont donnés dans le tableau (III.25)

Tableau III.25. Les masses initiales des échantillons (4; 5,6) avant l'application de peinture.

Temps (h)	m_4	m_5	m_6
Δm (g)	66,5856	72,9583	68,3077

✓ **Avec peinture :**

Les masses initial (m_4' ; m_5' , m_6') des échantillons (4 ; 5 ;6) après l'application du peinture manuellement (Avec peinture) sont donnés dans le tableau (III.26).

Tableau III.26. Les masses initiales des échantillons (4 ; 5 ; 6) après l'application de peinture.

Temps (h)	m_4'	m_5'	m_6'
Δm (g)	67,3078	73,5913	69,1316

Les dégradations de masse obtenue pour l'échantillon (4) en fonction du temps sont données dans le tableau (III.27).

Tableau III.27. Dégradation de masse de l'échantillon (4) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5 %.

Echantillon 4 : $m_0 = 67,3078$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	67,2922	67,2850	67,2829	67,2733	67,2640

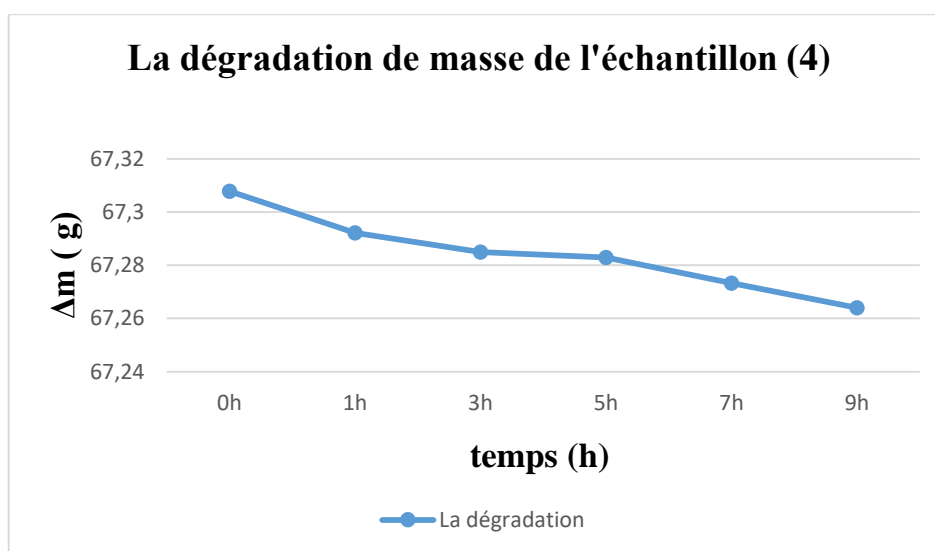


Figure III.25 : Dégradation de masse de l'échantillon (4) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%.

Tableau III.28. Dégradation de masse de l'échantillon (5) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5 %.

Echantillon 5 : $m_0 = 73,5913$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	73,5777	73,5711	73,5700	73,5640	73,5550

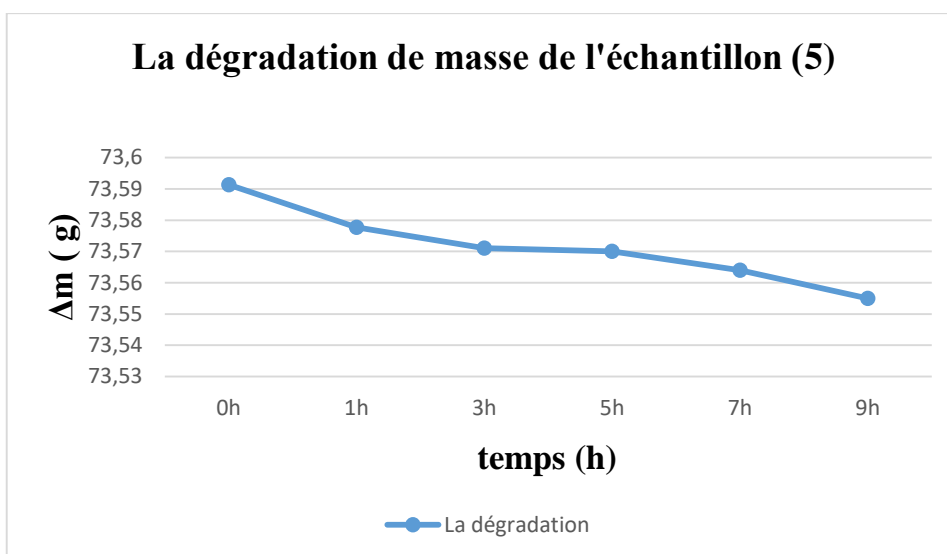


Figure III.26 : Dégradation de masse de l'échantillon (5) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%.

Tableau III.29. Dégradation de masse de l'échantillon (6) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5 %.

Echantillon 6 : $m_0 = 69,1316$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	69,1104	69,1019	69,1013	69,0904	69,0800

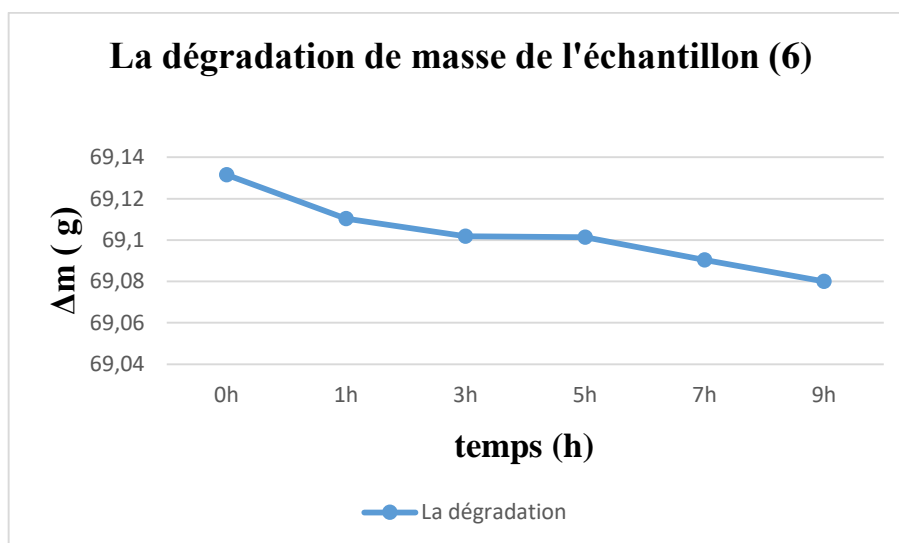


Figure III.27 : Dégradation de masse de l'échantillon (6) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%.

✓ **Sans vernis:**

Les masses initiales (m_7 ; m_8 , m_9) des échantillons (7 ; 8 ; 9) avant le vernissage manuellement (sans vernis) sont donnés dans le tableau (III.30)

Tableau III.30. Les masses initiales des échantillons (7 ; 8,9) avant le vernissage

Temps (h)	m_7	m_8	m_9
Δm (g)	16,3679	17,3696	19,8656

✓ **Avec vernis:**

Les masses initial (m_7' ; m_8' , m_9') des échantillons (7; 8 ;9) après l'application du vernis manuellement (Avec vernis) sont donnés dans le tableau (III.31).

Tableau III.31. Les masses initiales des échantillons (7 ; 8 ; 9) après le vernissage.

Temps (h)	m_7'	m_8'	m_9'
Δm (g)	17,2679	18,2696	20,7656

Les dégradations de masse obtenue pour l'échantillon (8) en fonction du temps sont données dans le tableau (III.32).

Tableau III.32. Dégradation de masse de l'échantillon (8) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5 %.

Echantillon 8 : $m_0 = 18,2696$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	17,9267	17,4254	17,4243	17,4238	17,4226

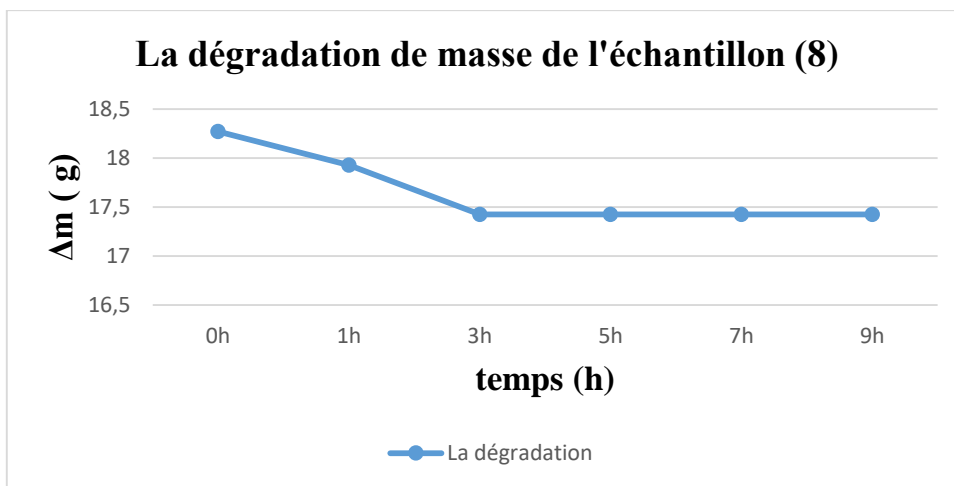


Figure III.28 : Dégradation de masse de l'échantillon (8) en fonction du temps dans une solution de Na Cl à 5%.

Tableau III.33. Dégradation de masse de l'échantillon (9) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5 %.

Echantillon 9 : m ₀ = 20,7656					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	19,9234	19,9230	19,9228	19,9224	19,9219

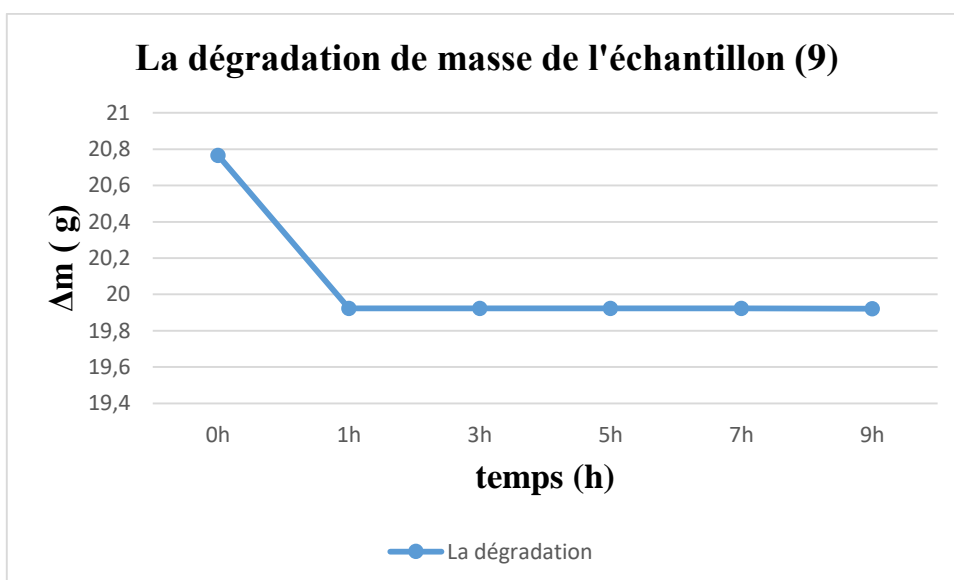


Figure III.29 : Dégradation de masse de l'échantillon (9) en fonction du temps dans une solution de H₂SO₄ à 5%.

- **Influence de température :**

Cette technique est réalisée pour évaluer l'effet de la température sur les échantillons revêtus, où un dispositif appelé bain-marie est utilisé l'eau pour chauffer le milieu réactionnel. L'eau est-elle même chauffée par une résistance.

Nous avons effectué le test de température au niveau du laboratoire universitaire, en utilisant l'échantillon (3) qui a été immergé dans une solution d'acide sulfurique à 5% dans une température fixée à 80C°.

Pour cela on a utilisé un bain-marie (Figure III.30). Après chaque période de test choisie, qui est estimée à 2 heures On mesure la masse de l'échantillon, dans le but de comparer les changements d'état des échantillons peints dans les solutions acides et salins et sous l'effet de la température et afin de connaître la stabilité de la peinture et du verni.



Figure III.30 : Protocole du l'effet de température.

Les dégradations de masse obtenue pour l'échantillon (3) en fonction du temps sont données dans le tableau (III.27).

Tableau III.34. Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps.

Echantillon 3 : $m_0 = 72,2448$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	72,2051	72,1959	72,1825	72,1790	72,1735

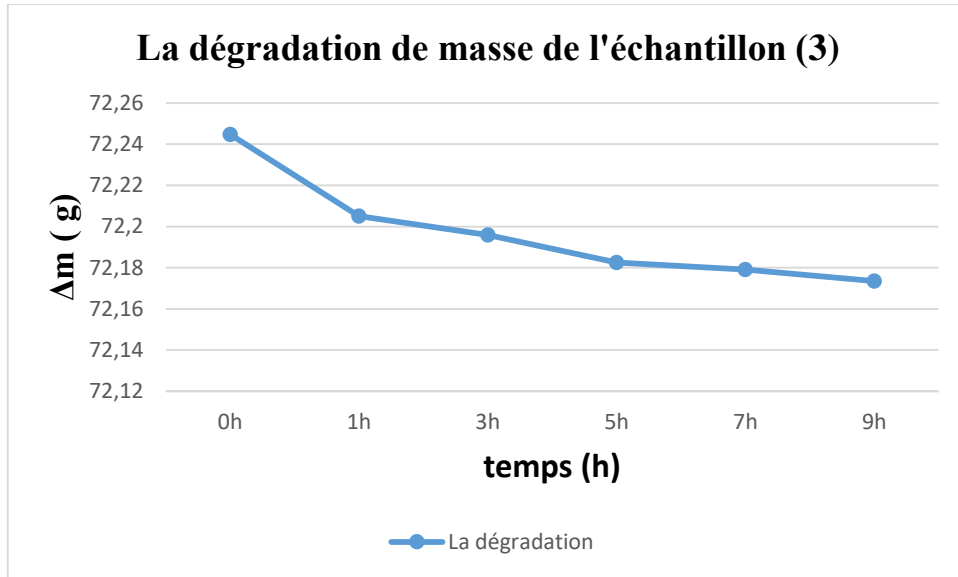


Figure III.31 : Dégradation de masse de l'échantillon (3) en fonction du temps.

Les dégradations de masse obtenues pour les échantillons (1,2) ceux qui nous avons appliqué deux couches de peinture après avoir été immergés dans une solution acide à 15% en fonction du temps sont données dans le tableau (III.35).

Tableau III.35. Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps.

Echantillon 1 : $m_0 = 62,5314$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm(g)	62,4263	62,4093	62,3920	62,3685	62,3392

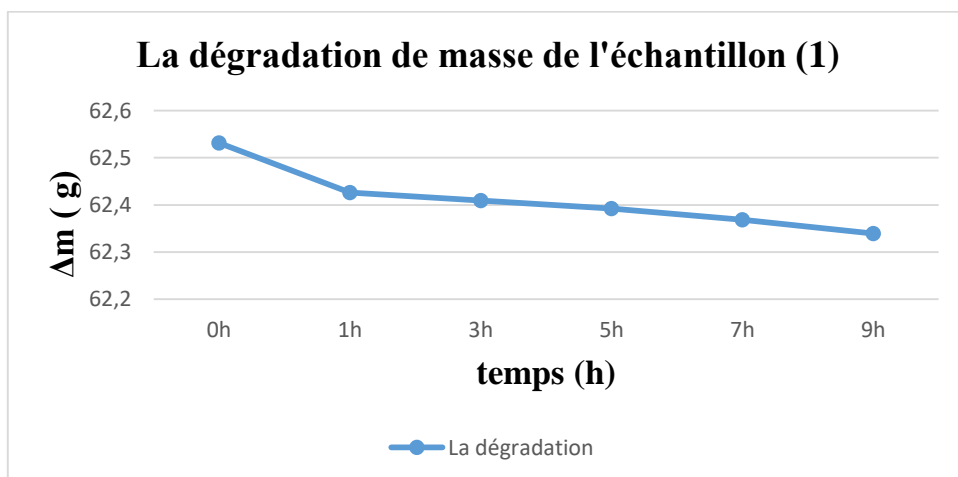
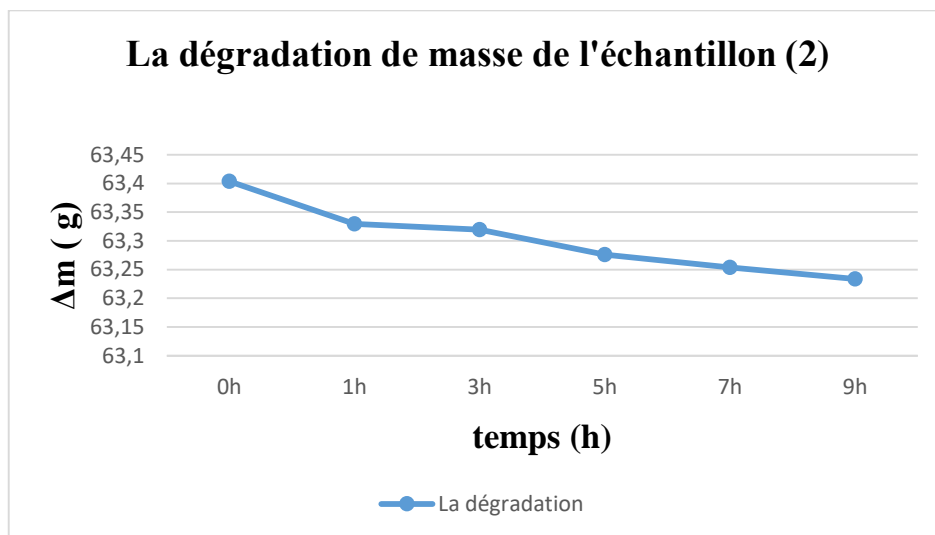


Figure III.32 : Dégradation de masse de l'échantillon (1) en fonction du temps.

Tableau III.36. Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps.

Echantillon 2 : $m_0 = 63,4040$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	63,3295	63,3196	63,2760	63,2540	63,2338

**Figure III.33 :** Dégradation de masse de l'échantillon (2) en fonction du temps.

Les dégradations de masse obtenue pour l'échantillon (7) ce qui nous avons appliqué une couche de vernis en fonction du temps sont données dans le tableau (III.30).

Tableau III.37. Dégradation de masse de l'échantillon (7) en fonction du temps.

Echantillon 7 : $m_0 = 17,2679$					
Temps (h)	1h	3h	5h	7h	9h
Δm (g)	16,4241	16,4163	16,4156	16,4083	16,4062

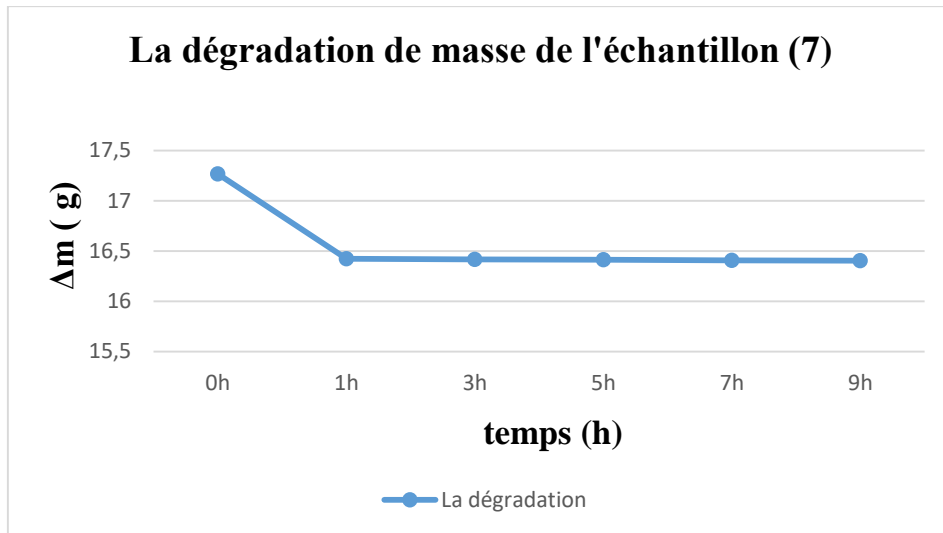


Figure III.34 : Dégradation de masse de l'échantillon (7) en fonction du temps.

➤ Les interprétations

• Résultats d'essai Effet du temps d'immersion sur l'efficacité du revêtement

Pour comprendre le comportement de l'acier au carbone dans l'acide sulfurique (H_2SO_4) en absence et en présence de peinture et de vernis sur les surfaces des échantillons, une série d'expériences a été menée pour vérifier l'effet de la durée d'immersion sur la corrosion de l'acier au carbone en milieu acide, en utilisant trois concentrations de H_2SO_4 (1%, 3%, 5%). Trois autres échantillons ont été testés dans un milieu salin de 5% Na Cl. L'évolution des pertes de masse en fonction du temps d'immersion est illustrée pour chaque milieu dans les tableaux.

✚ Sans Revêtement

Les graphiques montrent comment la masse des échantillons (1, 2, 3) se dégrade au fil du temps dans des solutions de H_2SO_4 à diverses concentrations.

• En milieu acide

L'analyse des résultats gravimétriques montre que l'allure des courbes est similaire pour les échantillons 1 et 2 et 3 dans les concentrations 1% et 3% et 5% de H_2SO_4 . La perte de masse se produisant toutes les deux heures suggère une évolution continue de la

corrosion. Ce phénomène est attribué à une réaction chimique entre l'acier au carbone et l'acide sulfurique, entraînant une perte de matière de 0,0001 g/h.

- **En milieu salin**

La masse de l'échantillon 4 diminue très légèrement. Cela indique une corrosion beaucoup plus faible en milieu salin qu'en milieu acide.

- **Avec Peinture (Application Manuelle)**

- **Pour 5% de H₂SO₄ (échantillons revêtus):**

La masse diminue très peu montrant une légère dégradation ce qui suggère une bonne protection par la peinture.

- **Revêtement Peinture pour des concentrations de 10% et 15% de H₂SO₄**

La masse des échantillons (1,2) diminue, ces résultats indiquent que la peinture offre une certaine protection, mais la dégradation augmente avec la concentration d'acide.

- **En milieu salin (Na Cl 5%) (échantillons revêtus).**

La masse diminue très légèrement ces résultats montrent que la peinture offre une excellente protection contre la corrosion en milieu salin.

- **Revêtement Vernis (Application Manuelle)**

- **Pour 5% de Na Cl (échantillon vernis):**

La masse de l'échantillon 8 diminue. Cette dégradation est plus importante que pour les échantillons revêtus en Na Cl, mais toujours relativement faible par rapport à l'acier nu en milieu acide.

- **Pour 5% de H₂SO₄ (échantillon vernis):**

La masse de l'échantillon 9 diminue très légèrement. Il est surprenant que cet échantillon verni en H₂SO₄ montre une perte de masse plus faible que l'échantillon verni en Na Cl.

Cela pourrait indiquer une meilleure performance du vernis dans cet acide spécifique ou des variations dans l'application/épaisseur du vernis.

Influence de la température

- Un test sous variation de température a été réalisé pour évaluer l'effet de la température sur les échantillons revêtus, en utilisant un bain-marie chauffé à 80°C.

- **Échantillon 3 ($m_0 = 72,2448$ g), immergé dans H_2SO_4 à 5% et 80°C :**

La masse de l'échantillon 3 diminue. Bien qu'il y ait une perte de masse, elle est relativement faible, suggérant que la peinture conserve une bonne partie de sa protection même à température élevée.

- **Échantillons 1 et 2**

Revêtement en double couche de peinture après immersion dans 15% H_2SO_4

- **Sous température élevée (80°C):**

La masse des échantillons (1 ; 2) diminue. L'application de deux couches de peinture après une exposition initiale à un acide fort (15% H_2SO_4) puis à haute température montre que la protection est maintenue, bien qu'une légère dégradation continue se produise.

- **Échantillon 7 (avec une couche de vernis) sous température élevée (80°C):**

La masse de l'échantillon 7 diminue. La perte de masse est relativement importante au début, puis se stabilise, ce qui indique que le vernis pourrait être affecté initialement par la température mais offre ensuite une protection stable.

- **Analyse comparative :**

Les résultats confirment que les revêtements (peinture et vernis) améliorent considérablement la résistance à la corrosion de l'acier C1020, en particulier en milieu acide et salin.

La peinture semble offrir une protection très efficace, même si l'augmentation de la concentration d'acide entraîne une légère augmentation de la dégradation. Le vernis

montre également une bonne performance, avec des observations intéressantes en fonction du milieu (Na Cl et H₂SO₄).

Malgré l'avantage offert par la température pour augmenter la vitesse de corrosion les revêtements présente même sous ces conditions une résistance très appréciable.

- **Discussion**

Une concentration plus élevée de H₂SO₄ entraîne une dégradation plus soutenue, alors qu'une concentration plus faible montre une tendance à la stabilisation après une dégradation initiale rapide. Ainsi, la peinture organique offre une certaine protection contre la corrosion, mais son efficacité est fortement dépendante de la concentration de l'acide. Dans des environnements moins corrosifs (égale ou inférieure 10% H₂SO₄), la peinture peut fournir une barrière suffisante pour ralentir ou arrêter la progression de la corrosion après une dégradation initiale tandis que dans des milieux plus corrosifs (contient un maximum de 15% H₂SO₄), l'efficacité de peinture diminue, ce qui se traduit par une dégradation continue de la masse de l'échantillon. La solution Na Cl peut agir aussi comme un agent corrosif ou un solvant qui provoque une dégradation physique ou chimique de l'échantillon mais la protection par revêtement de l'échantillon affecte également sa résistance à la dégradation dans ce milieu salin. À des températures plus élevées les réactions chimiques y compris les réactions de corrosion s'accroissent généralement. Cela peut entraîner une dégradation plus rapide de l'échantillon. Ces résultats sont cruciaux pour des applications industrielles où la corrosion peut affecter la durabilité des matériaux. Un suivi attentif de la concentration d'acide, de milieu salin, l'application des vernis et peintures et du temps d'exposition est essentiel pour prédire et contrôler les taux de corrosion afin de mettre une politique de maintenance préventive et éviter les risques de fuites et dysfonctionnement des systèmes en cours de production.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

À l'issue de cette étude, nous avons pu mettre en évidence le rôle crucial des conditions environnementales – notamment la nature du milieu, la température et la durée d'exposition – dans les mécanismes de corrosion des aciers au carbone, ainsi que l'efficacité relative des revêtements organiques appliqués.

L'analyse bibliographique a permis de confirmer que la corrosion est un phénomène complexe, multiforme, et qu'elle représente un enjeu de taille pour la pérennité des structures métalliques. Parmi les solutions disponibles, les revêtements à base de peinture apparaissent comme une méthode efficace, à condition que leur formulation et leur application soient rigoureusement adaptées aux contraintes du milieu.

Sur le plan expérimental, nos résultats montrent que :

- Le processus de corrosion présente une phase initiale d'accélération, suivie d'un ralentissement lié à l'appauvrissement du milieu réactif ;
- L'intensité du phénomène est proportionnelle au temps d'immersion et à la température du milieu ;
- Le milieu acide (H_2SO_4) engendre une corrosion plus rapide et plus agressive que le milieu salin, simulant des conditions extrêmes souvent rencontrées dans les environnements industriels.

Ces constats confirment l'importance d'une sélection rigoureuse des systèmes de protection en fonction des conditions d'usage. L'étude met également en lumière la nécessité d'intégrer des critères thermochimiques et cinétiques dans la conception des solutions anticorrosion.

En définitive, ce travail apporte une contribution utile à la compréhension des interactions entre les revêtements protecteurs et les environnements corrosifs. Il ouvre également la voie à des recherches complémentaires, notamment sur les revêtements hybrides, les traitements de surface avancés ou l'application de techniques électrochimiques de monitoring in situ.



Annexes

