



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 GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Ingénierie et gestion de l'eau

Etude de l'influence des conditions de décapage chimique des chaudières sur le comportement à la corrosion de l'acier en milieux acide et salin.

Réalisé par : - **Reguig Imane**
- **Bouraoui Djoumana**

Soutenu le 22/06/2026, devant le jury suivant :

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1	Dr Guerfi S		Université de 20 Août 1955 - Skikda	Encadrant
2	Pr Boussaha H		Université de 20 Août 1955 - Skikda	Président
3	Dr Damous M		Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examineur
4	Mr Souabaa B		Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examineur

Année Universitaire **2025- 2026.**

f Remerciement]

Nous tenons à remercier en premier lieu ALLAH tout-puissant pour le courage et la patience qui nous ont permis d'aboutir à ce modeste mémoire.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, Mme, Guerfi S pour son encadrement, sa patience et sa confiance tout au long de ce travail de recherche. Nous n'oublions pas de remercier Mr. El Hadi BOUSSAHA pour son assistance tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du Département Génie des Procédés de l'Université 20 août 1955 -SKIKDA , pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années d'études. Leur passion et leur dévouement pour la recherche m'ont inspiré et motivé à poursuivre mes propres questionnements scientifiques.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage au sein de Laboratoire de Département Génie des Procédés Faculté de Technologie– Université de SKIKDA.

Leur soutien inestimable, leur expertise et leurs encouragements ont grandement enrichi mon expérience professionnelle, Particulièrement à Mr. Djilani Abd El karim pour sa présence et son aide tout au long de notre stage.

Merci également aux membres du jury de ma soutenance de mémoire pour avoir accepté de faire partie du jury. Leurs remarques et suggestions ont été précieuses et m'ont permis d'en améliorer la qualité.

Un merci spécial à mes parents, mes camarades de classe et amis pour leurs encouragements, leurs échanges intellectuels stimulants et pour tous les moments partagés.

f Dédicace

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude à tous ceux qui se sont sacrifiés pour offrir les conditions propices à la réussite :

À mon cher père, Reguig Mohamed

A Mon père, que Dieu ait son âme, qui était plus qu'un père. C'était un éducateur, un homme de savoir, de valeurs et de principes.. Il a laissé une grande trace dans la vie de tous ceux qui l'ont connu. Même s'il n'est plus là, ses valeurs m'accompagnent toujours. Nous demandons à Dieu de lui pardonner et de lui accorder le paradis.

À ma chère mère, Rosa Kennat,

Ma Chère, Habibati ma guerrière silencieuse. Celle qui priait en cachette pendant que je pleurais mes échecs. Celle qui m'a portée dans ses bras quand je n'avais plus la force de me porter moi-même. Si aujourd'hui je suis debout, c'est parce que tu as tenu le monde pour deux. Je prie Dieu de la protéger et de lui donner santé et longue vie.

A moi-même

Tu as vécu des jours difficiles. Tu as connu la fatigue, la déception et le découragement, et entendu des mots qui t'ont blessée : « Est-ce que tu vas vraiment réussir ? Est-ce que ce chemin est fait pour toi ? » Mais tu n'as jamais abandonné. Tu as continué à essayer malgré tout. Et aujourd'hui, tu y es. Ce diplôme, c'est ton trophée de guerre.

A mes merveilleux frères et sœurs :

Pour les sourires dans les jours gris, les plats chauds quand l'âme était froide, les petites attentions qui m'ont tenue debout. Dans mes veines, c'est votre amour qui coule.

A ma binôme Djoumana:

Merci pour vos encouragements continus à faire vos efforts pour réussir notre projet.

A mes vrais amis :

Les vrais de vrais, Pour leur présence, leur soutien et les beaux moments partagés tout au long de ce parcours. En particulier merci pour votre amitié sincère, votre encouragement et votre soutien précieux qui m'ont accompagnée jusqu'au bout.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Le Professeur,

Pr Boussaha EL hadi, pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et le qu'elle m'a consacré tout au long de la réalisation de ce travail. Je la remercie sincèrement pour son encadrement et sa confiance.

À ma famille

Qui m'a toujours soutenue avec amour et encouragement. Votre aide m'a permis de continuer malgré les difficultés. Merci beaucoup.

À Mes Nieces

Djina, Rahma, Aya, Rosa, Sylva, Razane, Roukaya ghozlane.

À Mes Neveux

Malik, Khalil, Chahine, Chaher, Mohamed Zaine, Mohamed Nael

À Mes Collegues

Ce mémoire n'est pas juste un projet.
C'est le résultat de beaucoup de patience, de fatigue et de courage.
Une réponse à tous les doutes et à tous les moments difficiles.
Et derrière cette réussite... il porte vos noms en silence.

Imane

f Dédicace

Du plus profond de mon cœur,

Je dédie ce travail à ceux qui m'ont soutenu et réconforté lors de cette étape cruciale de ma vie. Je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

À la petite fille que j'étais autrefois,

Je veux aujourd'hui te dire merci. Merci pour ta patience silencieuse, pour ta force dans les moments de doute, et pour ta persévérance malgré les difficultés. Merci de ne pas avoir abandonné lorsque tout semblait flou et difficile. Chaque effort que tu as fait, chaque larme, chaque nuit de fatigue ont construit la personne que je suis aujourd'hui. Ce travail est le reflet de ton courage et de ta détermination. Je suis fière de toi, et reconnaissante envers toi, car sans toi, rien de tout cela n'aurait été possible.

À mon très cher père et ma très chère mère

Mon cœur, ma force et ma plus grande richesse et fierté, ma mère ma précieuse diamant et mon père mon précieux offre du dieu, qui m'ont tout donné dans cette vie, qui m'ont supporté et encouragé tout mon parcours scolaire.

À mes sœurs d'amour et mes frères

Nour, Amina ma jumelle et Sara, Zine eddine et Achraf, qui ont partagé avec moi beaucoup d'émotion, les petites attentions qui m'ont tenue debout.

À ma famille et mes proches

Qui m'a toujours soutenue avec amour et encouragement. Votre aide m'a permis de continuer malgré les difficultés. Merci beaucoup.

À ma chère binôme Imane

Merci pour vos encouragements continus à faire vos efforts pour réussir notre projet.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Le Professeur,

Pr Boussaha EL hadi, pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et le qu'elle m'a consacré tout au long de la réalisation de ce travail. Je la remercie sincèrement pour son encadrement et sa confiance.

À mes copines et mes cousines d'amour

Les vrais de vrais, Pour leur présence, leur soutien et les beaux moments partagés tout au long de ce parcours En particulier, merci pour votre amitié sincère, votre encouragement et votre soutien précieux qui m'ont accompagnée jusqu'au bout.

Enfin, À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la l'aboutissement de ce travail.

Je dédie ce mémoire avec respect, gratitude et affection à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont accompagnée de la réussite.

Djoumana

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'optimisation d'un protocole de décapage chimique destiné au traitement de l'encrassement des circuits de vapeur. L'enjeu principal est de concilier l'efficacité de dépose des incrustations avec la préservation de l'intégrité des matériaux métalliques, en particulier l'acier. Pour cela, un ensemble d'essais gravimétriques a été conduit sur des échantillons d'acier exposés à des solutions acides et salines, sous différentes concentrations, températures et durées d'immersion. L'analyse des résultats a montré que la corrosion dépend fortement des conditions opératoires. Les solutions d'acide sulfurique se sont révélées plus agressives que les solutions de chlorure de sodium, tandis que l'augmentation de la température a accentué la perte de masse et la vitesse de corrosion dans les deux milieux. Ces observations confirment l'importance d'un contrôle rigoureux des paramètres du décapage afin d'assurer un nettoyage efficace des dépôts sans endommager les surfaces métalliques.

Mots clés

Décapage chimique, Encrassement, circuit de vapeur, corrosion de l'acier, perte de masse, milieu acide, milieu salin.

Abstract

This study is part of the optimization of a chemical pickling protocol intended to treat fouling in steam circuits. The main challenge is to combine the effectiveness of deposit removal with the preservation of the integrity of metallic materials, particularly steel. To this end, a series of gravimetric tests was carried out on steel samples exposed to acidic and saline solutions under different concentrations, temperatures, and immersion times. The analysis of the results showed that corrosion strongly depends on the operating conditions. Sulfuric acid solutions proved to be more aggressive than sodium chloride solutions, while an increase in temperature intensified mass loss and corrosion rate in both media. These observations confirm the importance of rigorous control of pickling parameters in order to ensure effective removal of deposits without damaging the metal surfaces.

Keywords

Chemical pickling, fouling, steam circuit, steel corrosion, mass loss, acidic medium, saline medium.

المخلص

تتدرج هذه الدراسة ضمن إطار تحسين بروتوكول التنظيف الكيميائي المخصص لمعالجة التكلس والانساخ داخل دوائر البخار. ويتمثل التحدي الرئيسي في الجمع بين فعالية إزالة الترسبات والحفاظ على سلامة المواد المعدنية، وخاصة الفولاذ. ولتحقيق ذلك، أُجريت مجموعة من الاختبارات الوزنية على عينات فولاذية تم تحريضها لمحاليل حمضية ومالحة، تحت تراكيز ودرجات حرارة وأزمنة غمر مختلفة. وقد أظهر تحليل النتائج أن التآكل يعتمد بشكل كبير على ظروف التشغيل. حيث تبين أن محاليل حمض الكبريتيك أكثر عدوانية من محاليل كلوريد الصوديوم، بينما أدت زيادة درجة الحرارة إلى تفاقم فقدان الكتلة وسرعة التآكل في الوسطين معاً. وتؤكد هذه الملاحظات أهمية التحكم الدقيق في معاملات التنظيف الكيميائي لضمان إزالة فعالة للترسبات دون إلحاق ضرر بالأسطح المعدنية.

الكلمات المفتاحية

التنظيف الكيميائي، التكلس/الانساخ، دائرة البخار، تآكل الفولاذ، فقدان الكتلة، وسط حمضي، وسط ملحي

Liste des figures

Figure. I. 1 : La molécule de l'eau.....	3
Figure. I. 2 : Cycle biogéochimique de l'eau.....	6
Figure. I. 3 : Répartition de l'eau sur Terre.....	6
Figure. I. 4 : Répartition d'eau douce sur Terre.....	7
Figure II.1 : Les différentes couches d'encrassement.....	23
Figure.II.2 : Dégradation (encrassement sous corrosion).....	24
Figure II.3 : encrassement par entartrage.....	27
Figure II.4 : Encrassement particulaire.....	27
Figure II.5 : Nettoyage à l'aide d'un pistolet hydraulique.....	33
Figure II.6 : Outil de nettoyage mécanique.....	34
Figure III.1 : Echantillon de l'acier (fer blanc).....	41
Figure.III.2 : Balance électronique.....	42
Figure.III.3 : Chlorure de sodium.....	44
Figure.III.4 : Acide sulfurique.....	44
Figure.III.5 : pesage 3g et 5g de NaCl.....	45
Figure.III.6 : Solution de NaCl 3% et 5%.....	45
Figure.III.7 : Acide sulfurique H ₂ SO ₄	47
Figure.III.8 : Solution de H ₂ SO ₄	47
Figure.III.9 : Aspect des échantillons après immersion dans des solutions de H ₂ SO ₄ à	

différentes concentrations.....	48
Figure.III.10 : Aspect des échantillons après immersion dans des solutions de NaCl à différentes concentrations.....	48
Figure.III.10 : Les échantillons dans différentes solutions.....	49
Figure.III.11 : Les échantillons sous des différentes températures.....	49
Figure.III.12 : Aspect des échantillons après immersion dans des solutions de H ₂ SO ₄ et NaCl à différentes températures.....	49
Figure.III.13 : La perte de masse H ₂ SO ₄ 3 % en fonction de temps.....	50
Figure.III.14 : La perte de masse H ₂ SO ₄ 5 % en fonction de temps.....	51
Figure.III.15 : La perte de masse H ₂ SO ₄ 7 % en fonction de temps.....	52
Figure.III.16 : La perte de masse NaCl 3 % en fonction de temps.....	53
Figure.III.17 : La perte de masse NaCl 5 % en fonction de temps.....	54
Figure.III.18 : La perte de masse NaCl 5 % en fonction de température.....	55
Figure.III.19 : La perte de masse H ₂ SO ₄ 7 % en fonction de température.....	56
Figure.III.20 : La vitesse de corrosion NaCl 3 % en fonction de temps.....	57
Figure.III.21 : La vitesse de corrosion NaCl 5 % en fonction de temps.....	58
Figure.III.22 : La vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ à 3% en fonction de temps.....	59
Figure.III.23 : La vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ à 5% en fonction de temps.....	60
Figure.III.24 : La vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ à 5% en fonction de temps.....	61

Liste des tableaux

Tableaux.I.1 : Classification des eaux selon la conductivité	11
Tableau.I.2 : Classes de turbidités usuelles (NTU, néphélogéométrie turbidité unité).....	12
Tableau.I.3 : Relation entre dureté de l'eau et concentration équivalente en.....	13
Tableau.I.4 : Principaux constates de l'eau pure	17
Tableau III.1 : Caractéristiques des différentes couches du système d'étamage.....	42
Tableau III.2 : Données automatiques.....	43
Tableau III.3 : Données physiques.....	43
Tableau.III.4 : L'influence de la concentration des solutions de H ₂ SO ₄ à 3 %.....	50
Tableau.III.5 : L'influence de la concentration des solutions de H ₂ SO ₄ à 5 %.....	51
Tableau.III.6 : L'influence de la concentration des solutions de H ₂ SO ₄ à 7 %.....	52
Tableau.III.7 : L'influence de la concentration des solutions de NaCl à 3%.....	53
Tableau.III.8 : L'influence de la concentration des solutions de NaCl à 5%.....	54
Tableau.III.9 : l'influence de la température dans la solution NaCl (5 %).....	55
Tableau.III.10 : l'influence de la température dans la solution H ₂ SO ₄ (7 %).....	56
Tableau.III.11 : l'influence de la vitesse de corrosion NaCl 3%.....	57
Tableau.III.12 : l'influence de la vitesse de corrosion NaCl 5%.....	58
Tableau.III.13 : l'influence de la vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ 3%.....	59

Tableau.III.14 : l'influence de la vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ à 5%.....	60
Tableau.III.15 : l'influence de la vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ à 7%.....	61

Liste d'abréviation

Abréviation	Signification
H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
HCl	Acide chlorhydrique
NaCl	Chlorure de sodium
pH	Potentiel hydrogène
TH	Titre hydrotimétrique (Dureté totale)
TA	Titre alcalimétrique
TAC	Titre alcalimétrique complet
DBO ₅	Demande biochimique en oxygène sur 5 jours
MES	Matières en suspension
RS	Résidu sec
O ₂	Oxygène
CO ₂	Dioxyde de carbone
Ca ²⁺	Ion calcium
Mg ²⁺	Ion magnésium
Cl ⁻	Ion chlorure
HCO ₃ ⁻	Ion bicarbonate
CaCO ₃	Carbonate de calcium
Fe ²⁺	Ion ferreux
°C	Degré Celsius
m	Masse
T	Température
C	Concentration
h	Heure
t/h	Tonne par heure

Sommaire

Introduction générale	1
Problématique	2
Chapitre I Généralité sur L'eau	
Introduction.....	3
I.1 Définition de l'eau	3
I.2 Importance de l'eau	4
I.3 Les différents états de l'eau	4
I.3.1 L'eau sous forme solide	4
I.3.2 L'eau sous forme liquide.....	4
I.3.3 L'eau sous forme de gaz	4
I.4 Cycle naturel de l'eau	5
I.4.1 L'évaporation	5
I.4.2 La condensation	5
I.4.3 Les précipitations	5
I.4.4 L'infiltration	5
I.5 Répartition de l'eau sur terre :	6
<input type="checkbox"/> Eau douce.....	6
<input type="checkbox"/> Eau salée	6
I.6 Différentes ressources en eaux :.....	7
Les eaux de pluie	7
Les eaux souterraines	7
Nappes profondes	8
Nappes phréatiques.....	8

Nappes alluvionnaires	8
Nappes libres	8
Nappes captives	8
Les eaux superficielles	8
I.7 Qualité de l'eau	9
I.7.1 Qualité organoleptique	9
I.7.2 Qualité physico-chimique	10
I.7.2.1 Paramètres physiques :	10
Température.....	10
Potentiel Hydrogen.....	11
Conductivité électrique	11
Turbidité	11
Oxygène dissous.....	12
Salinité.....	12
Résidu Sec (RS)	12
Matière en suspension (MES)	13
I.7.2.2 Paramètres chimiques :	13
Chlorures (Cl-)	13
Dureté totale (TH).....	13
Titre alcalimétrique (TA).....	14
Titre alcalimétrique complet (TAC)	14
Magnésium (Mg ²⁺)	14
Calcium (Ca ²⁺).....	14
Demande biochimique en oxygène (DBO ₅).....	14
I.7.2.3 Paramètres Microbiologique :	15

Recherche des germes Totaux à 22 C° et 37 C° pathogène	15
Recherche des coliformes Totaux	15
Recherche des coliformes Thermotolérants	16
Recherche des Streptocoques Fécaux (37 C°).....	16
Recherche de Clostridium sulfito-réducteur	16
I.8 Propriétés de l'eau	16
I.8.1 Propriété physique :.....	16
I.8.2 Propriété chimique :	17
I.8.3 Propriété biologique :.....	17
I.9 Pollution de l'eau.....	18
I.9.1 Origines des pollutions des eaux.....	18
I.9.1.1 Eaux domestiques.....	18
I.9.1.2 Eaux ménagères	18
I.9.1.3 Eaux des vannes	18
I.9.1.4 Eaux pluviales	19
I.9.1.5 Eaux industrielles	19
I.9.1.6 Eaux agricoles	19
I.10 Traitement de l'eau	19
Etapes du traitement	19
Prétraitement	19
Floculation et coagulation	20
Clarification.....	20
Adoucissement	20
Filtration	20
Désinfection	20

Stockage	21
----------------	----

Chapitre II Généralités sur l'encrassement

Introduction	22
II.1 Définition d'encrassement.....	22
II.2 Les types d'encrassement.....	23
II.2.1 Encrassement par précipitation.....	23
II.2.2 Encrassement par corrosion	23
II.2.3 Encrassement biologique	24
II.2.4 Encrassement par réaction chimique	24
II.2.5 Encrassement par solidification	25
II.2.6 Entartrage.....	25
II.2.6.1 paramètres de l'entartrage	25
□ La présence de calcaire dans l'eau.....	25
□ La température de l'eau	25
□ La présence dans l'eau d'éléments favorisants	26
□ Influence de la nature de la canalisation	26
II.2.7 Encrassement particulière	27
II.3 Processus d'encrassement	27
II.3.1 L'initiation	28
II.3.2. Transfert des particules à la paroi	28
II.3.3 Fixation (ou Adhésion) des particules	28
II.3.4 Réentraînement des particules déposées.....	28
II.3.5 Vieillissement du dépôt.....	29
II.4 Classification suivant la nature du dépôt	29

II.4.1 Dépôt dur	29
II.4.2 Dépôt poreux.....	29
II.4.3 Dépôt mou.....	29
II.5 Aspect économique de l'encrassement.....	29
II.5.1 Coûts liés à la conception de l'chaudière	30
II.5.2 Coûts liés au fonctionnement de la chaudière	30
II.5.3. Coûts liés à l'arrêt de l'installation.....	30
II.6 Les paramètres influençant l'encrassement	31
II.6.1 Vitesse d'écoulement	31
II.6.2 Température	31
II.6.3 Nature de surface et de matériaux de fabrication	31
II.6.4 Nature de la charge	31
II.7 Détection des encrassements dans les chaudières.....	32
II.8 Les méthodes de nettoyage	32
II.8.1 Nettoyage mécanique.....	32
<input type="checkbox"/> II.8.1.1 Nettoyage mécanique hors ligne	32
<input type="checkbox"/> A- Nettoyage à sec	32
<input type="checkbox"/> B- Nettoyage à l'eau	33
<input type="checkbox"/> Nettoyage à l'eau sous pression	33
<input type="checkbox"/> Nettoyage à la vapeur.....	33
II.8.1.2 Nettoyage mécanique en ligne.....	34
<input type="checkbox"/> Le frappage.....	34
<input type="checkbox"/> Le grenailage.....	34
<input type="checkbox"/> Les vibrations acoustiques	34
<input type="checkbox"/> Le ramonage à la vapeur ou à l'air comprimé	35

II.8.2 Nettoyage chimique hors ligne	35
II.8.2.1 Nettoyage par circulation chimique	35
II.8.2.2 Nettoyage avec les acides	35
<input type="checkbox"/> Acide chlorhydrique (HCl)	36
<input type="checkbox"/> Acide sulfurique (H ₂ SO ₄).....	36
<input type="checkbox"/> Acide citrique	36
II.9.2.3 Nettoyage de remplissage et de trempage	36
II.9.2.4 Nettoyage chimique à la vapeur basse pression	36
II.9.2.5 Considérations importantes concernant le nettoyage chimique :	37
<input type="checkbox"/> Compatibilité des matériaux de la chaudière	37
<input type="checkbox"/> Composition des dépôts	37
<input type="checkbox"/> État de la chaudière	37
<input type="checkbox"/> Réglementations environnementales.....	37
II.9.3. Autres méthodes.....	37
II.9.3.1 Le nettoyage chimique à la mousse	37
II.9.3.2. Nettoyage chélateur	37
II.9.4 Sélection de la méthode de nettoyage.....	38
<input type="checkbox"/> Le type de chaudière	38
<input type="checkbox"/> La gravité des dépôts.....	38
<input type="checkbox"/> Le budget.....	38
<input type="checkbox"/> Les contraintes de sécurité	38
II.9.5 Action de prévention	38

Chapitre III Méthodes et préparation

Introduction.....	40
III.1 Approche d'étude.....	40

III.2 Méthodes et préparation des matériaux	40
III.2.1 Méthode gravimétrique	40
III.2.2 Matériaux utilisés	41
III.2.3 Préparation des échantillons	41
III.3 Choix des solutions	43
III.3.1 Chlorure de sodium NaCl	43
III.3.2 Acide sulfurique	44
III.4. Préparation des solutions	45
III.4.1 Chlorure de sodium NaCl	45
III.4.2 Acide sulfurique H ₂ SO ₄	46
III.5 Procédure expérimentale	48
III.5.1 Immersion en milieu acide (H ₂ SO ₄)	48
III.5.2 Immersion en chlorure de sodium (NaCl)	48
III.5.3 Immersion à différentes températures	49
III.6 Résultats et discussions	50
Introduction	50
III.6.1 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions de H ₂ SO ₄ (3 %)	50
III.6.2 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions de H ₂ SO ₄ (5 %)	51
III.6.3 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions de H ₂ SO ₄ (7 %)	52
III.6.4 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions NaCl (3 %)	53
III.6.5 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions NaCl (5 %)	54

III.6.6 Résultats et discussions l'influence de la température dans la solution NaCl (5 %)	55
III.6.7 Résultats et discussions l'influence de la température dans la solution H ₂ SO ₄ (7 %)	56
III.6.8 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion NaCl 3 %	57
III.6.9 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion NaCl 5 %	58
III.6.10 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ 3 %	59
III.6.11 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ 5 %	60
III.6.12 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion H ₂ SO ₄ 7 %	61
Comparaison	62
Conclusion	62

Introduction Générale

L'eau constitue l'une des ressources les plus importantes dans les procédés industriels, notamment dans les installations de production de vapeur. Grâce à ses propriétés thermiques et à sa disponibilité, elle est largement utilisée comme fluide caloporteur dans les chaudières et les réseaux de distribution de vapeur. Cependant, la présence de sels dissous, de matières en suspension et de gaz corrosifs peut entraîner divers phénomènes indésirables tels que l'entartrage, la corrosion et l'encrassement des équipements. [32]

L'encrassement des chaudières résulte de l'accumulation de dépôts sur les surfaces internes, ce qui réduit la transmission de chaleur et augmente la consommation de combustible. Bien que fréquent, ce phénomène dépend de la nature et de la gravité des conditions opérationnelles et des propriétés des fluides employés. Il est donc primordial de gérer efficacement l'encrassement afin de garantir le bon fonctionnement des chaudières et de prolonger leur longévité. [33]

Parmi les différentes méthodes de traitement, le décapage chimique constitue une technique efficace pour éliminer les dépôts formés à l'intérieur des conduites. Cette opération consiste à utiliser des solutions acides capables de dissoudre les couches d'oxydes et les dépôts incrustés. Toutefois, le choix du protocole de décapage doit être effectué avec précaution afin d'assurer une élimination optimale des dépôts tout en limitant l'attaque du matériau constituant les conduites.

Ce mémoire se propose l'étude du comportement des matériaux métalliques, notamment l'acier, dans des milieux acides et salins revêt une importance particulière. Les interactions entre le métal et le milieu agressif peuvent entraîner des phénomènes de corrosion susceptibles de compromettre l'intégrité des installations. Une caractérisation approfondie de ces phénomènes permet ainsi d'évaluer l'efficacité du protocole de décapage proposé et son impact sur la durabilité des conduites. Le présent mémoire s'articule autour de trois chapitres.

- Le premier chapitre présente une généralité sur l'eau, ses caractéristiques physico-chimiques.

- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'encrassement, ses mécanismes de formation, ses conséquences et les méthodes de prévention et de traitement.
- Enfin, le troisième chapitre expose la partie expérimentale portant sur la caractérisation du comportement de l'acier dans des milieux acides et salins afin d'évaluer l'efficacité et les limites du protocole de décapage étudié.

Problématique

L'encrassement des conduites de vapeur constitue l'une des principales causes de dégradation des performances des installations industrielles. L'accumulation de dépôts réduit l'efficacité thermique des équipements, augmente les coûts d'exploitation et favorise l'apparition de phénomènes de corrosion. Le recours au décapage chimique permet d'éliminer ces dépôts, mais l'utilisation de solutions acides peut également provoquer une attaque du matériau métallique des conduites. Dans ce contexte, il devient nécessaire de déterminer un protocole de décapage capable d'assurer une élimination efficace des dépôts tout en minimisant les risques de corrosion de l'acier. Donc, Comment optimiser un protocole de décapage chimique pour éliminer efficacement l'encrassement des conduites de vapeur tout en préservant les propriétés et l'intégrité de l'acier exposé à des milieux acides et salins ?

Chapitre I

Généralité sur L'eau

Chapitre I

Généralité sur L'eau

Introduction

L'eau est le composé chimique dominant à la surface de la Terre, couvrant environ 72% de sa superficie et justifiant l'appellation de « planète bleue ». Près de 97,2% de cette eau existe sous forme salée, principalement dans les mers et les océans, ainsi que dans certaines nappes souterraines saumâtres. Les eaux douces représentent seulement 2,8% du stock total. Parmi elles, les glaces polaires et continentales renferment près de 2,1 points de pourcentage, tandis que la part d'eau douce disponible pour les usages humains est d'environ 0,7 point de pourcentage. [1]

I.1 Définition de l'eau

L'eau est une substance chimique simple, à l'état liquide à température et pression ambiante. Sous une pression atmosphérique normale (1 atmosphère), l'eau devient gazeuse au-delà de 100°C et passe à l'état solide en dessous de 0°C. Chaque molécule d'eau contient un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène, sa formule chimique étant H₂O. Avec une masse molaire de 18 g/mol, mais ces principales caractéristiques sont qu'il est inodore, incolore et insipide. [2]

Du fait de ses caractéristiques physiques et chimiques distinctes des autres liquides, il occupe une place prépondérante dans les processus vitaux et crée les conditions appropriées. [1]

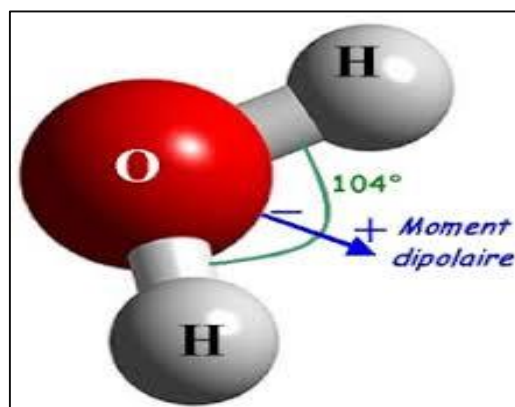


Figure. I. 1 : La molécule de l'eau [3]

I.2 Importance de l'eau

L'eau est indispensable aux êtres vivants tant pour ses caractéristiques mécaniques que pour ses qualités chimiques. [4]

L'eau, en tant que principal solvant pour de nombreux sels solides, facilite les réactions chimiques. L'organisme humain exploite ces caractéristiques pour maintenir l'efficacité de son métabolisme. Il est vrai que l'eau est souvent considérée comme un solvant utile, parfois décrite comme un solvant universel. [4]

I.3 Les différents états de l'eau

L'eau est un élément essentiel dans notre vie. Elle existe en différentes formes : solide, liquide et gazeuse. [5]

I.3.1 L'eau sous forme solide

L'eau est sous forme solide lorsque la température est inférieure à 0 °C. Il s'agit de la glace présente dans les calottes glaciaires aux pôles, celle des glaciers alpins, la neige sur laquelle nous pouvons skier, le givre qui se forme par temps froid sur les arbres en hiver. [5]

I.3.2 L'eau sous forme liquide

L'eau déversée dans les océans et les mers salées, qui représentent 97,2% de l'eau de notre planète, constitue la plus grande réserve d'eau liquide. Les autres réservoirs d'eau liquide sont les lacs, les rivières et les eaux souterraines. Ils sont constitués d'eau douce. [5]

I.3.3 L'eau sous forme de gaz

Dans l'atmosphère, l'eau se présente sous forme de vapeur. C'est la présence de la vapeur d'eau dans l'air humide. [5]

I.4 Cycle naturel de l'eau

Le cycle hydrologique résulte des interactions entre divers réservoirs d'eau tels que les océans, les fleuves, les rivières, les lacs, les glaciers, l'atmosphère, les nappes phréatiques, la végétation, etc. Ce cycle éternel comprend de multiples phénomènes : [6]

I.4.1 L'évaporation

L'évaporation est le mécanisme grâce auquel l'eau liquide se transforme en gaz ou vapeur, la chaleur fournie par le soleil, est nécessaire pour ce processus. L'évaporation des océans est la façon première pour l'eau d'entrer dans l'atmosphère. [6]

I.4.2 La condensation

La condensation est un processus de transformation de la vapeur en eau liquide. Elle est importante puisqu'elle participe à la formation des nuages. [6]

I.4.3 Les précipitations

La précipitation est la libération de l'eau des nuages sous forme de pluie, neige ou grêle. C'est le principal chemin qu'utilise l'eau de l'atmosphère pour retourner à la Terre. [6]

I.4.4 L'infiltration

L'eau sous forme de pluie ou de neige s'infiltré dans le sous-sol et les roches, une partie des eaux d'infiltration est reprise par la végétation qu'elle alimente avant d'être rejetée dans l'atmosphère. L'autre partie s'accumule dans le sous-sol pour former des nappes souterraines qui, à leur tour peuvent former des sources émergentes à la surface du sol. [6]

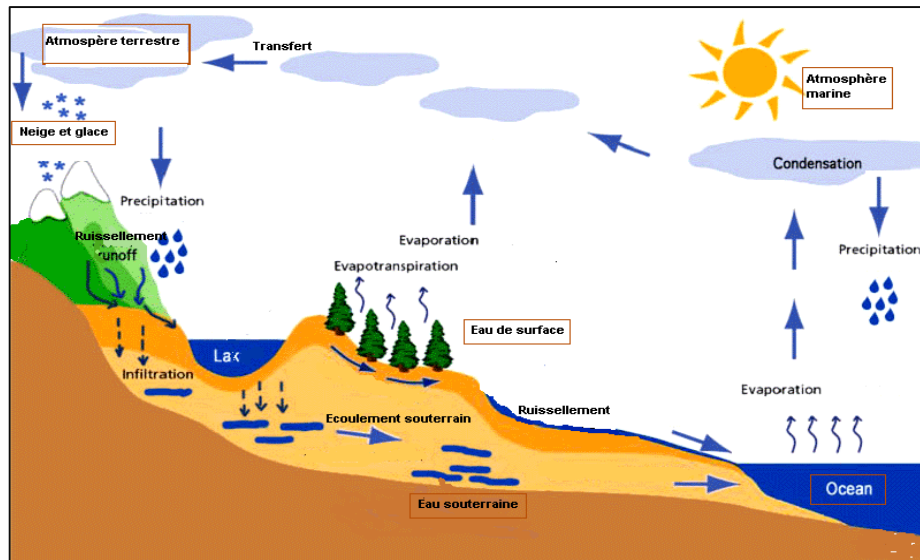


Figure. I. 2 : Cycle biogéochimique de l'eau [7]

I.5 Répartition de l'eau sur terre :

On peut identifier deux catégories distinctes :

- **Eau douce :** L'eau que nous consommons.
- **Eau salée :** L'eau qui remplit nos océans. Pour être qualifiée d'eau salée, son taux de sels doit se situer entre 3% et 5%. [8]

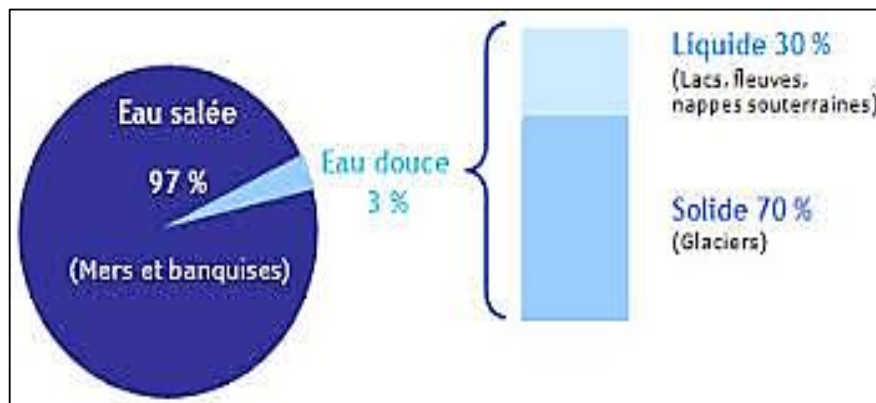


Figure. I. 3 : Répartition de l'eau sur Terre [9]

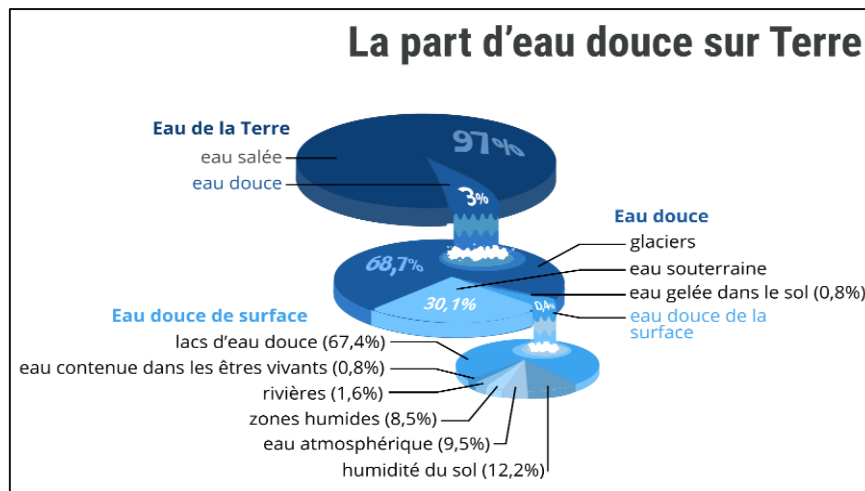


Figure. I. 4 : Répartition d'eau douce sur Terre [10]

I.6 Différentes ressources en eaux :

L'eau se trouve presque partout sur la terre et elle est vitale pour tous les organismes vivants connus. Près de 70% de la surface de la terre est recouverte d'eau essentiellement sous forme d'océans. Une étendue d'eau peut être un océan, une mer, un lac, un étang, une rivière, un ruisseau, un canal. La circulation de l'eau au sein des différents compartiments terrestres est décrite par son cycle biogéochimique, le cycle de l'eau. [11]

❖ Les eaux de pluie

L'eau de pluie peut être considérée comme l'eau naturelle la plus pure, tout au moins loin des Centre sur bains et des sources de pollution atmosphérique. [12]

❖ Les eaux souterraines

Ce sont les plus potables, souvent de meilleure qualité du moins celles provenant de puits profonds. Cependant, les eaux d'infiltration qui alimentent les nappes souterraines se chargent de matière organique en traversant les couches supérieures des sols et s'enrichissent en sels minéraux provenant de terrains rencontrés sur leurs parcours. [12] il existe plusieurs types :

- *Nappes profondes*

Peuvent fournir des eaux naturellement peines utilisables à leur émergence naturelle (source) soit par forage ou par puits, sous réserves que soient protégés contre les infiltrations superficielles. [13]

- *Nappes phréatiques*

Couramment exploitées en milieu rural par les puits, Malheureusement l'infiltration est importante et la nappe est souvent contaminée. [13]

- *Nappes alluvionnaires*

Ce sont des eaux qui circulent dans les alluvions des grands

Oueds qui peuvent alimenter en eau les nappes phréatiques situées au niveau des berges des Oueds. Mais il y a possibilité de contamination par les infiltrations superficielles. [13]

Les nappes d'eau souterraines peuvent se présenter en deux types, qui sont :

- *Nappes libres*

Elles sont directement alimentées par infiltration des eaux de ruissellement, donc elle très sensible à la pollution de surface. [13]

- *Nappes captives*

Elles sont séparées de la surface du sol par une couche imperméable. Elles ne sont pas alimentées directement par le sol. Par conséquence elles ne sont pas sensibles aux pollutions de surface. [13]

- ❖ **Les eaux superficielles**

Elles sont constituées par toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents. Elles ont pour origine les eaux de ruissellement ou les nappes profondes dont l'émergence constitue une source de ruisseau puis de rivière. [2]

Ces eaux se rassemblent en cours d'eau caractérisés par une surface de contact eau-atmosphère en mouvement et une vitesse de circulation appréciable. Elles peuvent se

trouver stockées en réserves naturelles (étangs, lacs) ou artificielles (retenues, barrages) caractérisées par une surface d'échanges eau-atmosphère quasiment immobile, une profondeur qui peut être importante et un temps de séjour souvent élevé. Il s'agit d'une ressource facilement accessible mais, malheureusement, fragile et vulnérable, qui doit être protégée contre les divers facteurs de pollution qui la menacent. Ces facteurs résultent, pour la plupart, de l'activité humaine et industrielle, mais aussi de processus naturels (eutrophisation : développement excessif d'algues et de plancton) qui peuvent dégrader la qualité de l'eau. [2]

La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants ou hydrologiques. Au cours de son cheminement, l'eau dissout et se charge des différents éléments constitutifs des terrains. Par échange à la surface eau-atmosphère, l'eau va se charger en gaz dissous (oxygène, gaz carbonique, azote). Ce qui caractérise les eaux superficielles ce sont : Les variations saisonnières (car climatiques) et à degré moindre, journalières des paramètres physiques : température, turbidité et coloration. [2]

I.7 Qualité de l'eau

I.7.1 Qualité organoleptique

Les facteurs organoleptiques (couleur, saveur, turbidité et odeur) constituent souvent les facteurs d'alerte pour une pollution sans présenter à coup sûr un risque pour la santé. [14]

- *Couleur*

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparentes sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité. [12]

- *Odeur*

Toute odeur est un signe de pollution ou de présence de matières organiques en décomposition. L'odeur peut être définie comme :

- L'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles.
- La qualité de cette sensation particulière est provoquée par chacune de ces substances. [15]

- *Goût et saveur*

Le goût n'a aucun appareil pour le mesurer. C'est l'ensemble des sensations gustatives, olfactives et de sensibilité chimique commune perçue lors de la boisson ou l'aliment est dans la bouche selon les physiologistes, il y a trois saveurs principales :

- Le salé
- Le sucré
- L'amer.

La saveur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues à la suite de la stimulation par certaines substances solubles des bourgeons gustatifs. [12]

I.7.2 Qualité physico-chimique

I.7.2.1 Paramètres physiques :

- *Température*

C'est un facteur important pour l'activité biologique, il influence la solubilité de l'oxygène du milieu récepteur, donc son pouvoir auto épurateur.

La température de l'eau dépend d'une série de facteurs

- Situation géographique, la saison

- Situation géographique, la saison La profondeur (la température des profondeurs est généralement plus faible qu'en surface)
- La couleur de l'eau (une eau sombre absorbe plus fortement la chaleur)
- Le volume de l'eau (plus le volume est élevé moins importantes sont les fluctuations de température). [16]

- **Potentiel Hydrogen**

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acidité carbonique, et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates. [16]

- **Conductivité électrique**

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. L'unité de mesure de la conductivité est siemens/cm (S/cm) : $1S/m = 104\mu S/cm$. La minéralisation de l'eau (teneur globale en espèces minérales) peut entraîner selon les cas, un goût salé (variable selon la nature des sels présents), une concentration de la corrosion, et les dépôts dans les tuyauteries (entartrage). [2]

Tableaux.I.1 : Classification des eaux selon la conductivité. [15]

Type d'eaux	Conductivité ($\mu S/cm$)	Résistivité ($\Omega. m$)
Eau pure	< 23	> 30000
Eau douce peu minéralisée	100 à 200	5000 à 10000
Eau de minéralisation moyenne	250 à 500	2000 à 40000
Eau très minéralisée	1000 à 2500	1000400

- **Turbidité**

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau. La turbidité de l'eau a pour origine la présence de matières en suspension (argile, limons, particules fibreuses ou organique, micro-organismes...), étant souvent lié à des phénomènes pluviométriques dans les eaux superficielles et dans certaines eaux

souterraines (nappes peu profondes). La turbidité se mesure sur le terrain à l'aide d'un turbidimètre. Et sont exprimées en unités et correspondent à une mesure optique de passage de lumière. D'autres unités comparables sont employées, l'unité néphélogéométrie de turbidité ou NTU. [17]

Tableau.I.2 : Classes de turbidités usuelles (NTU, néphélogéométrie turbidité unité). [17]

NTU<5	Eau Claire
5<NTU<30	Eau légèrement trouble
NTU>50	Eau trouble

- ***Oxygène dissous***

L'oxygène est toujours présent dans l'eau. Sa solubilité est fonction de la pression partielle dans l'atmosphère et de la salinité. La teneur de l'oxygène dans l'eau ne dépasse rarement 10 mg/L. Elle est fonction de l'origine de l'eau ; l'eau usée domestique peut contenir de 2 à 8 mg/l. [18]

- ***Salinité***

C'est la masse de sels (composés ioniques) dissous dans 1L d'eau. Elle s'exprime en g par kg d'eau. Un composé ionique ou solide ionique cristallin est constitué de cations (ions chargés positivement) et d'anion (ion chargés négativement) régulièrement disposés dans l'espace. Globalement, un cristal ionique est électriquement neutre. Chaque solide ionique cristallin possède une formule statistique qui indique la nature et la proportion des ions présents sans en mentionner. [16]

- ***Résidu Sec (RS)***

Le résidu Sec donne une information sur la teneur en substances dissoutes non volatiles (le taux des éléments minéraux). Suivant le domaine d'origine de l'eau cette teneur peut varier de moins de 100 mg/l (eaux provenant de massifs cristallins) à plus de 1000 mg/l. [16]

- *Matière en suspension (MES)*

Les matières en suspension contenues dans les eaux résiduaires constituent un paramètre important qui marque généralement le degré de pollution. Ce sont des matières qui ne sont ni colloïdales, ni solubilisés et elles-peuvent être organique ou minérales. La présence des matières en suspension, diminue la concentration en oxygène dissous, ce qui rend les activités des microorganismes faibles et par conséquent diminution du phénomène d'autoépuration. [18]

I.7.2.2 Paramètres chimiques :

- *Chlorures (Cl-)*

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux. [16]

- *Dureté totale (TH)*

La dureté de l'eau est due à la présence de calcium et dans une moindre mesure, de magnésium. On l'exprime généralement en quantité équivalente de carbonate de calcium. [16]

Tableau.I.3 : Relation entre dureté de l'eau et concentration équivalente en. [16]

Dureté de l'eau	Concentration en mg/l
Eau douce	0 à 60
Eau moyennement douce	60 à 120
Eau dure	120 à 180
Eau très dure	Plus de 180

Une dureté supérieure 200 mg/L peut provoquer l'entartrage CaCO₃ (excès calcaire) du système de distribution et entraîner une consommation excessive de savon avec

formation d'écume. La concentration du calcium dans l'eau de consommation n'est pas généralement élevée par rapport au besoin journalier (2 g/j). [16]

- **Titre alcalimétrique (TA)**

La teneur en hydroxyde (OH), est la moitié de la teneur en carbonate CO_3^{2-} et un tiers environ des phosphates présents. [12]

- **Titre alcalimétrique complet (TAC)**

Le titre alcalimétrique complet ou TAC c'est le volume d'acide (exprimé en ml à 0.02mol. L⁻¹ en ions H^+ nécessaire pour doser 100ml d'eau en présence de méthyl orange le TAC s'exprime en F°. Le TAC correspond à la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et hydrogénocarbonates. [12]

- **Magnésium (Mg^{2+})**

Le magnésium est plus abondant après le calcium par rapport au sodium et au potassium. Le Magnésium peut avoir deux gains : Les calcaires dolomitiques qui libèrent le magnésium par dissolution, en présence du gaz carbonique. La dissolution du MgSO_4 des terrains gypseux du Trias situés au Sud. [19]

- **Calcium (Ca^{2+})**

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Est un composant majeur de la dureté totale de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Il existe surtout à l'état d'hydrogénocarbonates et en quantité moindre, sous forme de sulfates, chlorure etc. les eaux de bonne qualité renferment de 250 à 350 mg/l les eaux qui dépassent les 500 mg/l présente de sérieux inconvénient pour les usages domestique et pour l'alimentation des chaudières. [19]

- **Demande biochimique en oxygène (DBO5)**

La DBO5 est la quantité d'oxygène requise par les micro-organismes. Milieu qui oxyde (dégrade) la matière organique dans les échantillons d'eau Conserver à l'obscurité pendant 5 jours. Ce paramètre est un bon indicateur. [16]

Le contenu organique biodégradable de l'eau naturelle ou de l'eau contaminée restant. Deux échantillons sont nécessaires : le premier sert à mesurer la concentration Oxygène initial, concentration en oxygène résiduel à la fin de la deuxième mesure 5 jours. La DBO5 est la différence entre ces deux concentrations. Plus la différence est grande L'environnement a besoin de plus d'oxygène, donc le bilan est mauvais, car les déchets à transformer Trop important. [16]

I.7.2.3 Paramètres Microbiologique :

L'eau ne doit contenir ni microbes, ni bactéries pathogènes, ni virus qui pourraient entraîner une contamination biologique et être la cause d'une épidémie.

Le dénombrement bactérien consiste à la recherche des bactéries aérobies, c'est-à-dire celles qui pourraient se développer en présence d'oxygène :

- Coliformes fécaux
- Coliformes totaux
- Germe totaux
- Streptocoques fécaux [16]

Les micros organismes à dénombrer ou à rechercher dans l'eau sont d'origines diverses :

- *Recherche des germes Totaux à 22 C° et 37 C° pathogène*

Certaines maladies infectieuses sont transmises à l'homme par absorption d'eau ou d'aliments pollués par une eau contenant des micro-organismes pathogènes. Les plus redoutables d'entre eux sont les salmonelles, responsables de la fièvre typhoïde et le vibron cholérique responsable du choléra. [2]

- *Recherche des coliformes Totaux*

Selon l'organisation internationale de standardisation, il s'agit de bacilles gram négatifs (BGN) non sporulés oxydase négative aérobies ou anaérobies facultatifs, capables de fermenter le lactose avec production d'acide et de gaz en 24 à 48 heures à une température comprise entre 36 C° et 37 C°. [20]

- ***Recherche des coliformes Thermotolérants***

Il s'agit des coliformes possédant les mêmes caractéristiques que les coliformes mais à 44 C°, ils remplacent dans la majorité des cas l'appellation : (coliformes fécaux) on cite là l'exemple de E. coli qui produisent de l'indole à partir du tryptophane, fermentent le lactose ou le mannitol avec production d'acide et de gaz. Elle ne peut pas en général se reproduire dans les milieux aquatiques, leur présence dans l'eau indique une pollution fécale récente. [21]

- ***Recherche des Streptocoques Fécaux (37 C°)***

Il s'agit de Cocci à gram positif (CGP) de forme sphérique ou ovoïde, se présentant en chainettes Pius ou moins longues, non sporulées aéro-anaérobies facultatives, ne possédant ni catalase ni oxydase, ce sont des hôtes normaux d'homme, et ne sont pas considérés comme pathogène. [20]

- ***Recherche de Clostridium sulfito-réducteur***

En dehors des streptocoques fécaux et E. coli qui sont des indices de contamination fécale récente, du fait que leur survie dans l'eau peut être très courte, les clostridium sulfito-réducteurs représentent l'indice d'une contamination fécale ancienne, ils sont résistants aux conditions défavorables grâce à la sporulation, ils sont des bactéries anaérobies strictes, sporulés, Gram positif réduisent les sulfites en sulfures et dont la plupart des espèces est mobile. [2]

I.8 Propriétés de l'eau

L'eau possède un ensemble exceptionnel de caractéristiques physiques, chimiques et biologiques :

I.8.1 Propriété physique :

Les constantes principales dans les trois états de l'eau révèlent les propriétés physiques qui sont les plus captivantes :

Tableau.I.4 : Principaux constantes de l'eau pure

eau liquide	
T °C d'ébullition sous (101325.02 Pa)	100°C
Capacité thermique massique à 15°C	4.1868 J/g
Enthalpie de vaporisation à 100°C	2252.5 J/g
Conductivité thermique à 20°C	5.98 mw/cm.k
Résistivité à 20°C	23.8 MΩ.cm
Permittivité relative ε à 20°C	80
Indice de réfraction pour la raie D à 10°C	1.33300
Masse volumique à 4°C	1 g/cm ³
EAU SOLIDE	
T °C de fusion	0°C
Capacité thermique massique	2.0934 J/g
Enthalpie de fusion sous 760m.mHg	333.27 J/g
Tension de vapeur à 0°C	877.128 Pa
Permittivité relative ε	3.26
Indice de réfraction pour la raie D	1.30907
Densité (par rapport à l'eau à 4°C)	0.91649 ± 0.0007
EAU VAPEUR	
Conductivité thermique à 100°C	0.23 mw/cm.k
Densité par rapport à l'air	0.62337
Indice de réfraction pour la raie D à 100°C	1.00259
Permittivité relative ε	Elle est particulièrement élevée

I.8.2 Propriété chimique :

Grâce à ses caractéristiques électriques et sa structure moléculaire, l'eau est particulièrement efficace pour dissoudre de nombreux corps gazeux, liquides polaires et surtout des solides. Il y a la solvation (processus d'hydratation par l'eau). Il s'agit du résultat d'une destruction totale ou partielle des divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules d'eau, processus de solvation achevé (dissolution).

I.8.3 Propriété biologique :

L'eau, O₂ et CO₂ participent à établir un environnement favorable la croissance des êtres vivants. Il y a un cycle biologique, dans lequel se déroule une série d'échanges d'eau, qui constitue une partie importante de la composition des êtres vivants.

Pour ce qui concerne l'homme, on a :

-Nouveau-né.....66 à 74 d'eau.

-Adulte.....58 à 67 d'eau.

I.9 Pollution de l'eau

La pollution des eaux est définie comme toute modification physique ou chimique de la qualité des eaux, qui a une influence négative sur les organismes vivants ou qui rend l'eau inadéquate aux usages souhaités. [22]

L'eau est polluée, lorsque sa composition ou son état est directement ou indirectement modifié par l'action de l'homme. [22]

I.9.1 Origines des pollutions des eaux

La pollution des eaux provient essentiellement des activités domestiques et industrielles ainsi que des précipitations, elle perturbe les conditions de vie de la flore et la faune aquatiques, elle compromet également l'utilisation de l'eau et l'équilibre du milieu aquatique. [22]

On distingue quatre grandes catégories d'eaux usées : les eaux domestiques, les eaux pluviales, les eaux industrielles et les eaux agricoles. [22]

I.9.1.1 *Eaux domestiques*

Dans les eaux domestiques on distingue les eaux ménagères et les eaux vannes. [22]

I.9.1.2 *Eaux ménagères*

Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Les eaux des cuisines contiennent des matières insolubles (terre, débris divers), des matières extraites des aliments (organiques ou minérales) ainsi que les graisses provenant de la cuisson, par exemple : les eaux des salles de bains, les eaux des machines à lessiver qui renferment des savons et des détergents et des eaux de lavages des locaux qui sont riches en particules solides (terre, sable,...etc.) et surtout en détergents et désinfectants (eaux de javel, produit de base de chlore ou d'ammoniaque,...). [22]

I.9.1.3 *Eaux des vannes*

Il s'agit des rejets de toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et des germes fécaux. [22]

I.9.1.4 Eaux pluviales

Elles peuvent constituer la cause de pollution importante des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumée industrielles), puis en ruissellent, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles des vidanges, carburants, résidus de pneus et métaux lourds...). [22]

I.9.1.5 Eaux industrielles

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques, leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre en plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micros polluants organiques des hydrocarbures. Certaines d'entre elles doivent faire l'objet d'un pré traitement de la part des industries avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte, elles sont mêlées aux eaux domestiques que l'or qu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des usines de dépollution. [22]

I.9.1.6 Eaux agricoles

Sont particulièrement chargées en nitrates et phosphates qui provoquent l'eutrophisation des cours d'eau entraînant la prolifération des algues qui, lors de leur putréfaction, consomment l'oxygène dissous dans l'eau ce qui va perturber l'autoépuration. [22]

I.10 Traitement de l'eau

➤ Etapes du traitement

- **Prétraitement**

Avant de procéder au traitement proprement dit, l'eau va subir différents prétraitements (physiques, chimiques ou mécaniques). Il s'agit, par exemple, de : - Retenir à l'aide de grilles des déchets solides plus ou moins volumineux tels que des pierres, branches, feuilles, etc. - - Ajouter des produits chimiques pour prévenir ou limiter la croissance

d'algues ; Effectuer une sédimentation de matériaux légers tels que sable, gravier, ... [23]

- ***Floculation et coagulation***

Pour faire débarrasser des matières légères en suspension telles que les microorganismes, on procède à un traitement chimique. On ajoute des produits chimiques comme l'alun ou le chlorure de fer puis on procède à une agitation rapide de l'eau dans un grand bassin. Les particules légères coagulent en plus grosses particules appelées floc. Lors de la coagulation, une partie du floc va se déposer. Puis, assez lentement, ce processus va se poursuivre : c'est la floculation. [23]

- ***Clarification***

En laissant couler l'eau lentement dans de grands bassins, un résidu de boues et d'eau s'accumule au fond. Ce résidu est ensuite recueilli et éventuellement stocké. Ce processus est également appelé décantation. [23]

- ***Adoucissement***

Une eau dure (c'est à dire assez riche en calcium, en magnésium, ...) peut à la longue causer des problèmes aux canalisations (dépôt calcaire) ou, encore, diminuer l'efficacité des savons et détergents. Par contre, les canalisations peuvent être corrodées par une eau trop douce. L'établissement d'un juste équilibre entre ces deux excès est le but de cette étape. [23]

- ***Filtration***

Arrivée à ce stade, l'eau peut paraître trouble (on parle de turbidité) à cause de la présence de matières encore en suspension (algues, micro-organismes, fer, substances utilisées dans les processus précédents, ...). L'eau est alors filtrée par passage à travers des couches de matériaux divers (sable, gravier, charbon, ...). [23]

- ***Désinfection***

Il est communément admis que le fluor protège l'émail des dents. Son apport alimentaire étant insuffisant, on y supplée en l'ajoutant dans l'eau de distribution. En

ajoutant du chlore (efficace et économique) dans l'eau, on détruit les organismes pathogènes. [23]

- *Stockage*

Finalement, l'eau propre à la consommation sera stockée dans le but de satisfaire la demande. [23]

Chapitre II

Généralité sur L'encrassement

Chapitre II

Généralités sur l'encrassement

Introduction

L'encrassement des chaudières est un phénomène courant mais problématique, affectant leur efficacité et leur durabilité. Ce chapitre examine l'histoire, les processus et les effets économiques de l'encrassement. Le texte détaille aussi les diverses techniques de nettoyage et les critères de sélection adéquats. L'objectif est de comprendre les causes et les conséquences de l'encrassement pour optimiser la gestion et éviter cette problématique.

II.1 Définition d'encrassement

L'encrassement des dispositifs de transfert thermique se caractérise par l'accumulation progressive de substances indésirables à la surface des zones d'échange de chaleur.

[24]

Ces dépôts peuvent être de la rouille, du tartre, de la vase, du coke, des cristaux, des résidus biologiques, des réactions chimiques ou la combinaison de plusieurs de ces éléments. [25]

Le dépôt qui s'établit sur un ou les deux côtés de la surface d'échange a une conductivité thermique inférieure à celle du métal constituant cette surface, ce qui engendre l'augmentation considérable de la résistance au transfert et donc, une diminution des performances du réchauffement. Par ailleurs, le dépôt réduit l'espace de circulation du fluide, entraînant ainsi une augmentation des pertes de charge dans l'équipement. Cela nécessite un sur dimensionnement de l'équipement, une dépense d'énergie supplémentaire, une puissance de pompage importante et une réduction du taux de marche de l'unité sans oublier l'énorme perte économique due au démontage et nettoyage et/ou rebutage. [25]

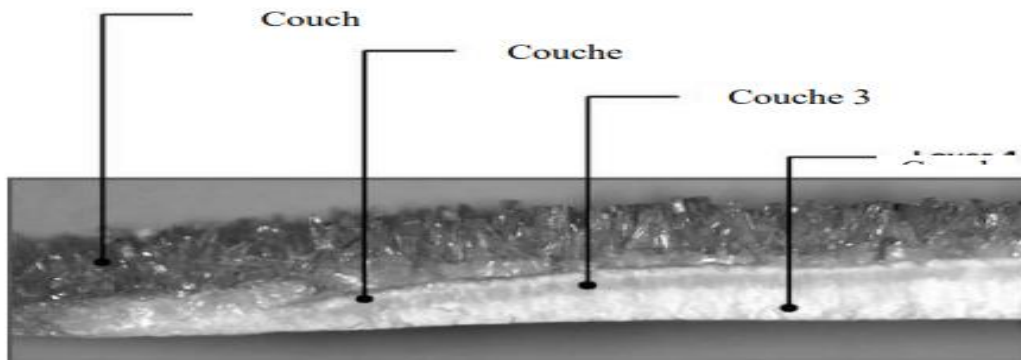


Figure II.1 : Les différentes couches d'encrassement [26]

II.2 Les types d'encrassement

II.2.1 Encrassement par précipitation

L'encrassement d'une surface d'échange de chaleur par précipitation est généralement associé à la production et la déposition d'un solide cristallin à partir de sels inorganiques présente dans une solution liquide d'alimentation et ayant une solubilité inverse avec la température. Ce type d'encrassement est principalement composé de carbonate de calcium, de sulfate de calcium, de phosphate de calcium et de divers composants de l'eau dure et de l'eau de mer.

Le terme entartrage est souvent utilisé pour décrire un dépôt cristallin dur et dense, bien entreposé sur une surface métallique. [24]

II.2.2 Encrassement par corrosion

C'est le produit d'une réaction chimique ou électrochimique qui se déroule entre la surface permettant le transfert thermique et le fluide qui circule. Les produits de corrosion encrassent la surface et peuvent stimuler l'attachement d'autres matières encrassant. La corrosion est un promoteur potentiel pour tous les autres types d'encrassement. Les produits de corrosion peuvent en effet servir de germes de nucléation pour des solutions sursaturées, piéger les particules en suspension, d'abris pour le développement de micro-organismes et même catalyser certaines réactions.

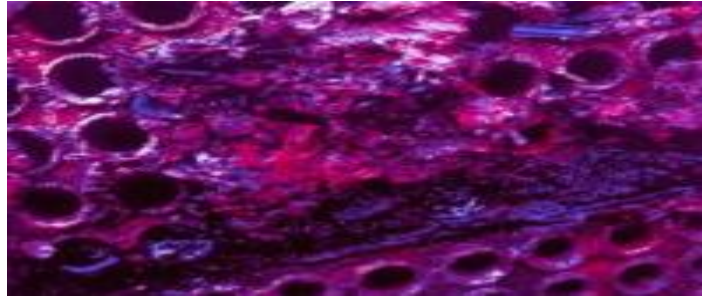


Figure.II.2 : Dégradation (encrassement sous corrosion) [26]

II.2.3 Encrassement biologique

Il est généré par les éléments biologiques qui se fixent à la surface de transfert de chaleur et qui sont également capables de produire des boues en s'y fixant. Cela est dû à la croissance de trois principaux types de micro-organismes, à savoir : les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif tel que les hydrocarbures ou l'ammoniaque, les algues qui se développent en présence de l'énergie solaire, et les champignons dont la croissance est surtout due aux changements de conditions physiques ambiantes (pH, humidité, température). Ces micro-organismes se fixent sur la surface de transfert thermique et forment un film. [24]

II.2.4 Encrassement par réaction chimique

Les dépôts sont des produits solides découlant de réactions chimiques se produisant près de la surface de transfert thermique. Le matériau n'est pas participant à la réaction, mais peut jouer le rôle de catalyseur. On observe fréquemment des réactions de polymérisation dans ce contexte. Il peut être affecté par les conditions opératoires (vitesse, température et concentration) ainsi que par la composition du fluide c.-à-d. le constituant principal et les constituants secondaires même à l'état de trace tels que les oléfines, l'oxygène moléculaire et l'air, les composés oxygénés soufrés et azotés, les sels inorganiques, l'eau, les impuretés métalliques libres et les produits de corrosion. Selon EPSTEIN, les traits généraux de la cinétique chimique du dépôt par réaction chimique sont caractérisés comme une réaction de polymérisation par auto-oxydation qui se propage comme une réaction en chaîne à radicaux libres, où l'oxygène joue un rôle prépondérant. [24]

Le principe du schéma réactionnel serait le suivant :

-Initiation $RH + Z^* \rightarrow R^* + HZ \dots\dots R^* + O_2 \rightarrow ROO^*$

-Propagation $ROO^*+RH \rightarrow ROOH + R^* \dots\dots R^*+R^* \rightarrow RR$

-Terminaison $ROO^*+R^* \rightarrow ROOR$

Où :

RH : est une molécule d'hydrocarbure

Z* : Un radical libre réactif provenant des traces même infimes d'ion métalliques et de composés soufrés ou azotés. [24]

II.2.5 Encrassement par solidification

Cela se rapporte à la solidification d'un liquide pur lorsqu'il entre en contact avec une surface d'échange refroidie (production d'une couche de glace à l'intérieur des conduites) ou au dépôt d'un composant à point de fusion élevé d'un liquide lorsqu'il est en contact avec une surface de transfert thermique froide (formation des hydrocarbures paraffiniques). [24]

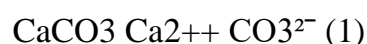
II.2.6 Entartrage

L'eau est principalement caractérisée de dure par la concentration d'ions Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}) et Bicarbonate (HCO_3^-) qu'elle contient. Une eau dure peut poser des problèmes d'entartrage des appareils et des canalisations d'eau chaude. On peut diminuer la dureté de l'eau grâce à l'adoucissement, par exemple, en utilisant un système d'échange d'ions. [24]

II.2.6.1 paramètres de l'entartrage

- **La présence de calcaire dans l'eau**

L'aspect encrassant de l'eau est principalement attribué à la présence de sels de calcium et, dans une mesure moins significative, de magnésium. Par conséquent, plus la dureté de l'eau est élevée, plus il y a prédisposition au dépôt de calcaire (en fait, du carbonate de calcium $CaCO_3$ (1)) sur les parois en contact avec l'eau. Cependant, la simple présence de sels de calcium dans l'eau ne suffit pas pour provoquer le phénomène de l'entartrage.



- **La température de l'eau**

L'augmentation de température favorise considérablement la réaction chimique qui provoque la précipitation du carbonate de calcium, car elle provoque la libération de gaz carbonique, ce qui accélère le processus de précipitation du tartre. Il n'y a pas ou

très peu d'entartrage sur les canalisations d'eau froide. Cependant, les circuits d'eau chaude sanitaire sont susceptibles d'être sujets à l'accumulation de calcaire. A un degré plus important, les circuits internes de chauffe-eau sont très facilement entartrables.

Il faut cependant remarquer que, malgré la température, les circuits de chauffage s'entartrent peu, étant donné qu'il n'y a pas de renouvellement d'eau et que le processus de formation de tartre s'arrête une fois que tout le CaCO_3 contenu a été déposé.

- **La présence dans l'eau d'éléments favorisants**

Il a été noté que deux types d'eau, ayant une composition identique et exposées aux mêmes conditions, ne présentaient pas nécessairement le même effet de formation de tartre.

Ce phénomène est dû à la présence d'une quantité infinitésimale d'éléments dans l'eau susceptibles de provoquer un phénomène d'entartrage. De ce fait, la présence dans l'eau d'ions cuivre ou d'ions zinc freine le dépôt de tartre qui reste en suspension dans l'eau. Cependant, l'ion Fe^{2+} est reconnu pour être un élément qui favorise. Les quantités nécessaires sont très faibles, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de microgrammes par litre.

- **Influence de la nature de la canalisation**

Dans le cas des eaux moyennement ou peu entartrées, le cuivre peut empêcher l'apparition des premières traces de tartre et bloquer ainsi le développement naturel du processus d'entartrage. Le cuivre a donc un avantage décisif sur les autres matériaux avec lesquels il y a toujours amorce d'entartrage.

Dans le cas des eaux très entartrées, il y a aussi un avantage au cuivre mais d'un autre ordre. Le tartre déposé sur un tube de cuivre contient lui-même des traces de cuivre qui jouent pleinement leur rôle bactéricide vis-à-vis des eaux transportées par la canalisation. On sait que le tartre favorise le développement de certaines bactéries comme celles de la légionellose, mais si la canalisation est en cuivre, la présence de ces traces de cuivre dans le tartre va inhiber le risque de prolifération de ces micro-organismes.

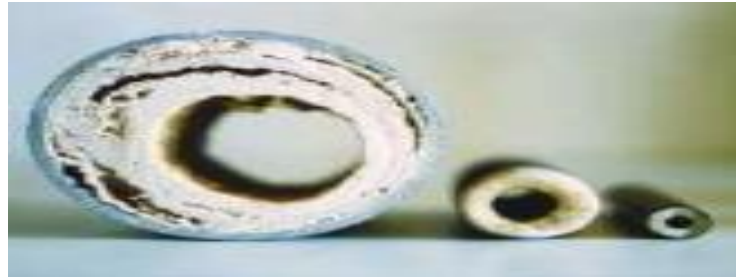


Figure II.3 : encrassement par entartrage

II.2.7 Encrassement particulaire

Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation sur les surfaces d'échange de particules transportées par l'écoulement des fluides industriels :

- l'eau des chaudières contenant des produits de corrosion, celle des tours de refroidissement, des particules transportées par l'air et des produits de corrosion (oxydes et hydroxydes de fer).
- les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- les fumées industrielles de résidus solides de combustion. [24]



Figure II.4 : Encrassement particulaire [26]

II.3 Processus d'encrassement

L'encrassement est un phénomène complexe dû à l'implication d'un grand nombre de Variables. D'un point de vue fondamental, le mécanisme d'encrassement suit certaines étapes de développement sur une surface. Ce sont : l'initiation, Transfert des particules à la paroi, la fixation, le retrait et le vieillissement.

II.3.1 L'initiation

La surface est conditionnée pendant la période d'initiation. La période d'induction initiale du retard est influencée par la température de surface des matériaux, le matériau, l'état de surface, la rugosité et le revêtement de surface. Avec l'augmentation du degré de sursaturation par rapport à la température de la surface de transfert de chaleur ou l'augmentation de la température de surface, la période d'induction diminue. Pendant la période d'induction, des noyaux destinés à la cristallisation du dépôt se forment également pour la croissance biologique. Cette période peut prendre beaucoup de temps, plusieurs semaines ou quelques minutes, voire quelques secondes. [27]

II.3.2. Transfert des particules à la paroi

Dans cette partie, les particules encrassantes du fluide en vrac sont transportées vers la surface de transfert de chaleur à travers la couche limite. Cela dépend des propriétés physiques du système et de la différence de concentration entre la masse et l'interface fluide de surface.

Le transport s'effectue par un certain nombre de phénomènes, notamment la diffusion, la sédimentation et la thermophorèse. [27]

II.3.3 Fixation (ou Adhésion) des particules

A cette phase, les dépôts adhèrent à la surface et entre eux. Les ions de sel s'approchant de la surface sont attirés par les forces électromagnétiques et adhèrent à la surface pour former une nucléation qui se développe progressivement avec le temps pour former une couche d'encrassement. Ainsi, les forces agissant sur les particules lorsqu'elles s'approchent de la surface sont impuissantes à déterminer l'attachement. Les propriétés des matériaux, telles que la taille, la densité et l'état de surface, dominent le phénomène d'attachement. [27]

II.3.4 Réentraînement des particules déposées

Le réentraînement des particules déposées dû aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt, à l'érosion ou à l'écaillage. Une certaine proportion de la matière est enlevée de la surface immédiatement après leur dépôt et un autre est enlevée plus tard. En général, les forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et la couche de dépôt encrassant sont responsables de cet enlèvement. Les forces de cisaillement dépendent

du gradient de la vitesse à la surface, de la viscosité du fluide et de la rugosité de la surface. [27]

II.3.5 Vieillissement du dépôt

Avec le début du dépôt, le vieillissement commence. Au cours du vieillissement, il peut y avoir une transformation du cristal pour améliorer ou diminuer la résistance au dépôt avec le temps. Au cours du vieillissement, les propriétés mécaniques du dépôt peuvent changer en raison de modifications de la structure cristalline ou chimique. L'altération de la composition chimique du dépôt par une réaction chimique peut modifier sa résistance mécanique. D'un autre côté, la couche de bio-salissure peut s'affaiblir en raison de la corrosion en surface due à un empoisonnement lent des micro-organismes. [27]

II.4 Classification suivant la nature du dépôt

II.4.1 Dépôt dur

Il s'agit d'une structure dense et renforcée qui ne s'atténue pas lors d'un simple jet d'eau ou de vapeur mais qui nécessite un traitement mécanique ou un nettoyage chimique approprié. C'est le cas de dépôt corrosif ou cristallin. La résistance thermique d'un dépôt dur est directement proportionnelle à son épaisseur. [28]

II.4.2 Dépôt poreux

C'est le matériau d'un dépôt dur qui se présente en une structure moins dense, sous l'effet des conditions opératoires. Ce cas est plus sérieux que le précédent quand le fluide emprisonné dans les pores a une conductivité thermique plus faible que le matériau solide. [28]

II.4.3 Dépôt mou

C'est le cas de boues, poudres de coke ou de fibres végétales. La résistance dans ce cas est plutôt liée au fluide emprisonné qu'au matériau constituant la matrice.

Un simple soufflage peut donner des résultats satisfaisants lors du nettoyage. [28]

II.5 Aspect économique de l'encrassement

L'appréciation du coût supplémentaire que représente l'encrassement des chaudières n'est pas facile à évaluer de manière directe. Les différentes études réalisées sur le sujet sont d'accord pour répartir les dépenses relatives à l'encrassement selon quatre grandes catégories :

- investissement supplémentaire en surface d'échange lors du dimensionnement (20%)
- coût de maintenance incluant les phases de nettoyage (18 %)
- non récupération d'énergie sur les effluents encrassant (41 %)
- coûts supplémentaires en énergie nécessités par l'encrassement pendant les phases de production (21 %). [28]

II.5.1 Coûts liés à la conception de l'chaudière

Il s'agit surtout, dans cette phase, de surdimensionner les surfaces d'échange par l'affectation d'une valeur, le plus souvent empirique, de la résistance d'encrassement. Dans de nombreux procédés industriels, l'utilisation d'chaudières fonctionnant avec une efficacité continuellement proche d'une efficacité optimale est souvent requise. Dans ce cas, la chaudière considérée est dupliquée. Ainsi, lorsque la chaudière en place est encrassée, il est retiré de l'installation pour entretien, et remplacé par son duplicata. Le coût engendré par la nécessité d'avoir une réserve de répliques vient alors s'ajouter au surcoût lié au surdimensionnement des surfaces d'échange. [28]

II.5.2 Coûts liés au fonctionnement de la chaudière

Si le problème de l'encrassement n'est pas anticipé correctement lors de la phase de Conception, des coûts supplémentaires dus aux arrêts intempestifs pour maintenance et entretien viennent s'ajouter. En effet, des arrêts non planifiés de l'installation peuvent mener à une perte complète de production qui représente à son tour un manque à gagner pour les industriels.

L'encrassement des surfaces d'échange entraîne une perte d'énergie non négligeable due à la diminution du transfert de chaleur et à l'augmentation de la perte de charge. Généralement, cette perte d'énergie au niveau de la chaudière doit être compensée par une utilisation accrue d'énergie primaire. [28]

II.5.3. Coûts liés à l'arrêt de l'installation

Le nettoyage des chaudières entraîne des coûts de main d'œuvre supplémentaires et exige un équipement adéquat surtout si un traitement chimique est requis. Dans ce cas, un circuit complémentaire impliquant des pompes et des réservoirs peut être nécessaire. Les produits chimiques doivent être achetés et les effluents issus du processus de nettoyage doivent être traités. Les processus de nettoyage plus

conventionnels, tels que la projection de vapeur ou d'air comprimé, ou la circulation de boules ou de ressorts dans l'installation, exigent des dépenses supplétives à celles liées à la main d'œuvre. [28]

II.6 Les paramètres influençant l'encrassement

L'ampleur de l'encrassement sur la surface d'échange thermique, pour un fluide donné, dépend des paramètres suivants :

II.6.1 Vitesse d'écoulement

Une vitesse d'écoulement élevée du fluide minimise tous les types d'encrassement.

Cependant une grande vitesse d'écoulement requiert une puissance de pompage énorme et peut contribuer à l'érosion du métal. [28]

II.6.2 Température

La température fluide - métal est un paramètre important. Dans le cas de produits polymérisables contenant des chaînes insaturées (oléfines), une surchauffe peut provoquer une réticulation des gommages présentes. Ce phénomène s'intensifie en présence d'un catalyseur qui va favoriser beaucoup plus les réactions de polymérisation. Il n'est, alors, plus possible de dissoudre les gommages par auto nettoyage.

Le phénomène de réticulation des gommages se rencontre généralement dans les bouilleurs. La vitesse d'une réaction chimique est aussi fonction de la température. La vitesse d'encrassement dans le temps est liée à la constante de vitesse de la réaction chimique. [28]

II.6.3 Nature de surface et de matériaux de fabrication

La rugosité de la paroi du tube et la taille des cavités sur la paroi contribuent à l'initiation de l'encrassement. Un bon choix des matériaux de construction évitera l'encrassement par corrosion. [28]

II.6.4 Nature de la charge

Une charge plus ou moins lourde et contenant des éléments chimiques

Polymérisables peut conduire à un encrassement par polymérisation.

Industriellement, la teneur en oléfine dans les essences est limitée de 1 à 2 % afin de remédier aux problèmes de bouchage des équipements. [28]

II.7 Détection des encrassements dans les chaudières

- La détection de l'encrassement se fait généralement par inspection physique ou par Surveillance des performances du système.
- L'inspection physique comprend la mesure de l'épaisseur de l'encrassement sur les Canalisations ou les tubes.
- La surveillance de la température et des pressions est le meilleur moyen de dépanner et de détecter l'encrassement des chaudières. Les instruments mesurent et signalent les variables critiques pouvant indiquer un encrassement de la chaudière.
- **Transmetteurs de température :** Surveillez la température de l'eau passant à travers les chaudières. Les chutes de température peuvent indiquer une perte de transfert de chaleur causée par un encrassement.
- **Transmetteurs de pression :** Détecter les chutes de pression entre l'entrée et la sortie de la chaudière.
- **Débitmètres :** Indiquent les diminutions qui peuvent être causées par L'accumulation de matériaux encrassant dans les tubes. [29]

II.8 Les méthodes de nettoyage

II.8.1 Nettoyage mécanique

II.8.1.1 Nettoyage mécanique hors ligne

Le nettoyage mécanique hors ligne est une procédure fréquemment utilisée. L'approche consiste à abraser ou éliminer le dépôt par des moyens mécaniques. La méthode comprend une haute pression eau, vapeur, lances et pistolets à eau. Dans le nettoyage mécanique hors ligne, il existe certains avantages tels qu'un excellent nettoyage de chaque tube est possible, un bon potentiel d'élimination des dépôts très tenaces. Les inconvénients incluent l'incapacité de nettoyer les faisceaux de tubes en U avec succès, problème de démontage habituel et grosse main d'oeuvre nécessaire. Nettoyage Mécanique en ligne. [30]

A- Nettoyage à sec

Cette technique est utilisée pour enlever les dépôts très durs à l'intérieur des tubes des chaudières. Ces outils peuvent être :

- Moteur d'entraînement électrique ou pneumatique équipé à ça extrémité à une outil de grattage, outil à brosse, outil à lames.
- Pistolet hydraulique (pression d'utilisation : 6 à 15bar) propulsant des écouvillons spéciaux dans les tubes : ils permettent d'enlever des dépôts de boues ou d'algues dans des tubes de petits diamètres. [30]



Figure II.5 : Nettoyage à l'aide d'un pistolet hydraulique [26]

B- Nettoyage à l'eau

➤ Nettoyage à l'eau sous pression

Elle est efficace pour enlever les dépôts à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes d'échangeur ou pour d'autres types de géométrie, de façon occasionnelle, du sable peut être injecté avec l'eau pour arracher les dépôts durs mais dans ce cas, il y a risque d'érosion de la surface et sur tout de destruction du film protecteur anti corrosion. [30]

➤ Nettoyage à la vapeur

Injection de vapeur à haute pression pour détacher et éliminer les dépôts accumulés. [30]



Figure II.6 : Outil de nettoyage mécanique [26]

II.8.1.2 Nettoyage mécanique en ligne

Il existe un certain nombre de solutions pour tenter de maintenir ou de rétablir les Performances de ces générateurs ; chacune d'elles a ses avantages et ses inconvénients.

[31]

➤ Le frappage

Il est réservé aux chaudières de petite puissance construites à cet effet et limité aux Encrassements pulvérulents. Sa nocivité éventuelle sur les collecteurs et piètements de tubes n'est pas parfaitement connus. De plus, la vitesse d'encrassement étant difficilement prévisible, il n'est pas aisé d'établir un planning d'exploitation. [31]

➤ Le grenailage

Cette technique, destructrice de la couche d'oxyde qui recouvre les tubes, est à éviter pour les températures de peau supérieures à 450°C et n'est pas applicable aux chaudières de plus de 50 t/h, sauf localement (économiseurs ou réchauffeurs d'air, par exemple). En outre, l'humidification accidentelle des cendres peut provoquer de sérieux colmatages difficiles à éliminer. [31]

➤ Les vibrations acoustiques

Technique préventive et non curative comme les précédentes, elle a l'avantage de ne pas être agressive pour les surfaces d'échange. Elle est efficace sur des cendres non visqueuses ; un procédé chimique ou mécanique peut lui être associé lorsque les températures excèdent le point de fusion des dépôts. [31]

➤ Le ramonage à la vapeur ou à l'air comprimé

Ces procédés exigent des appareils spéciaux et adaptés à la technologie des chaudières ou des échangeurs sur lesquels ils sont installés. Ils doivent être utilisés conformément aux prescriptions des constructeurs : caractéristiques de la vapeur, pression de l'air, fréquence d'usage,... Ils réclament en outre un entretien régulier, parfois coûteux. En raison de leur rayon d'action limité, ils sont en général nombreux et représentent donc une dépense importante : tuyauteries spécialisées, robinetterie, passerelles d'accès, calorifugeage, compresseurs,... Par ailleurs, plus la chaudière est petite, plus l'appel de vapeur de ramonage aura d'incidence sur le process aval, voire sur le fonctionnement du générateur lui-même. [31]

II.8.2 Nettoyage chimique hors ligne

Le nettoyage chimique hors ligne est une technique très fréquemment utilisée pour nettoyer les chaudières. Certaines raffineries et usines chimiques disposent de leurs propres installations de nettoyage pour les paquets de trempage ou des solutions de nettoyage en recirculation. En général, ce type de nettoyage a pour but de dissoudre le dépôt au moyen d'une réaction chimique avec le liquide de nettoyage. Les avantages de l'approche de nettoyage chimique comprennent le nettoyage des zones difficiles d'accès.

II.8.2.1 Nettoyage par circulation chimique

Cette méthode implique le remplissage de la chaudière avec une solution chimique spécialement formulée pour dissoudre les dépôts de calcaire, de rouille, de suie et d'autres contaminants. La solution chimique est ensuite circulée à travers les tubes de la chaudière pendant une période spécifiée pour permettre une action de nettoyage efficace. Après le nettoyage, la solution est vidangée et la chaudière est soigneusement rincée pour éliminer tout résidu de produit chimique.

II.8.2.2 Nettoyage avec les acides

Cette méthode utilise des acides forts comme l'acide chlorhydrique ou l'acide sulfurique pour dissoudre les dépôts de tartre.

Il est très efficace pour éliminer le tartre tenace, mais nécessite une extrême prudence car les acides forts peuvent être très corrosifs.

➤ **Acide chlorhydrique (HCl)**

Couramment utilisé pour dissoudre le carbonate de calcium et d'autres incrustations Minérales. Des inhibiteurs sont ajoutés pour protéger le métal de la chaudière de la corrosion acide.

➤ **Acide sulfurique (H₂SO₄)**

Efficace pour éliminer le tartre important. Comme l'acide chlorhydrique, les inhibiteurs sont utilisés pour prévenir les dommages aux métaux.

➤ **Acide citrique**

Une alternative plus douce aux acides chlorhydrique et sulfurique, adaptée pour éliminer les dépôts légers de tartre et de rouille.

II.9.2.3 Nettoyage de remplissage et de trempage

Dans cette méthode, les pièces détachées de la chaudière, telles que les tubes, les plaques tubulaires ou les échangeurs de chaleur, sont retirées et trempées dans une solution chimique pour éliminer les dépôts. Cette méthode est particulièrement efficace pour les composants de petite taille ou les pièces difficiles à nettoyer en place.

[31]

II.9.2.4 Nettoyage chimique à la vapeur basse pression

Beaucoup plus connu, le quatrième procédé, baptisé "NEUTROL", a fait ses preuves depuis plus de 20 ans. Il constitue un heureux compromis entre le lavage à grande eau et le brossage à sec, peu efficace car limité aux seules surfaces accessibles. Il est en outre complémentaire du procédé CECONET, notamment pour le nettoyage des faisceaux de surchauffeurs des chaudières à fuel lourd, très souvent encrassés par des dépôts vanado-sodiques volumineux et adhérents.

Il consiste à injecter dans les chaudières et les fours froids un mélange de vapeur basse pression et de produits chimiques désincrustants et neutralisants. Pendant l'opération, le registre de tirage est maintenu grand ouvert, ou bien le ventilateur d'extraction est mis en route à petite vitesse, ce qui permet à la vapeur de cheminer sur le parcours des gaz et d'atteindre les surfaces d'échange les plus éloignées. On procède échangeur après échangeur : faisceau de surchauffeur, puis faisceau de convection, puis réchauffeur d'air, s'il existe. [31]

Son action est double :

- Une action chimique : les agents mouillants et neutralisants entraînent une désincrustation des dépôts et la neutralisation de l'acidité. Au départ, le pH du produit est de 12 à 13.
- Une action physique : la vapeur provoque le ramollissement des dépôts, ce qui facilite leur enlèvement grâce à la pression du jet.

II.9.2.5 Considérations importantes concernant le nettoyage chimique :

▪ Compatibilité des matériaux de la chaudière

Les produits chimiques de nettoyage choisis doivent être compatibles avec les matériaux spécifiques utilisés dans la construction de votre chaudière pour éviter tout dommage.

▪ Composition des dépôts

Le choix de la bonne méthode de nettoyage dépend du type de dépôt dominant (calcaire, boues...) dans votre chaudière.

▪ État de la chaudière

L'état général de votre chaudière doit être évalué pour garantir que la méthode de nettoyage choisie ne causera pas de dommages.

▪ Réglementations environnementales

Les processus de nettoyage chimique doivent être conformes aux réglementations Environnementales locales en matière d'élimination des déchets. [31]

II.9.3. Autres méthodes

II.9.3.1 Le nettoyage chimique à la mousse

L'un de ces procédés innovants, baptisé CECONET consiste à remplacer chaque fois que possible l'eau par un produit chimique adapté à la nature des dépôts à éliminer et appliqué sous forme de mousse de manière à réduire les risques d'infiltration entre les tubes et les réfractaires et à recueillir des effluents peu humides.

II.9.3.2. Nettoyage chélateur

Cette méthode utilise des agents chélateurs pour lier et solubiliser les ions métalliques présents dans les dépôts.

Il est efficace contre le tartre et les boues contenant des métaux.

Le nettoyage par chélateur est considéré comme moins agressif que les méthodes acides ou alcalines, ce qui permet son utilisation sur des matériaux de chaudière plus sensibles.

II.9.4 Sélection de la méthode de nettoyage

Facteurs à prendre en compte lors du choix d'une méthode de nettoyage :

- **Le type de chaudière :** La méthode de nettoyage choisie doit être adaptée au type de chaudière et à sa construction.
- **La gravité des dépôts :** La méthode de nettoyage choisie doit être suffisamment efficace pour éliminer le niveau de dépôts présent dans la chaudière.
- **Le budget :** Le coût de la méthode de nettoyage doit être pris en compte en fonction des avantages d'une chaudière propre.
- **Les contraintes de sécurité :** La méthode de nettoyage choisie doit être effectuée dans le respect des normes de sécurité et ne doit pas présenter de risques pour les travailleurs.

La méthode de nettoyage choisie doit respecter les réglementations environnementales locales Dans le cas de nettoyage chimique.

II.9.5 Action de prévention

Il est peu probable d'arriver à éliminer complètement ce type d'encrassement, par contre, certaines actions peuvent être entreprises pour le minimiser :

- Éliminer les sels et les produits non organiques, l'oxygène, l'air, les composés soufrés et azotés, les hydrocarbures non saturés ;
- Éliminer les matériaux particuliers ;
- Prévenir la corrosion à l'aide d'inhibiteur ;
- Prévenir l'encrassement organique à l'aide d'antioxydants, d'agents désactivateurs du métal et autres anti-encrassant ;
- Contrôler les paramètres organiques en minimisant les températures de surface, en utilisant de fortes vitesses de circulation et en surveillant les températures et les pressions pour éviter la vaporisation du produit transporté. [26]

Conclusion

Ce chapitre a permis de clarifier les mécanismes et les impacts de l'encrassement, ainsi que les diverses méthodes disponibles pour le combattre. Comprendre ces aspects est essentiel pour choisir la méthode de nettoyage la plus efficace et la plus économique.

Chapitre III

**Méthodes et préparation et résultats
et discussion**

Introduction

La corrosion est le processus d'interaction qui se produit entre un métal ou un alliage métallique et son environnement, ce qui conduit à une dégradation des propriétés bénéfiques du métal. Cela permet ensuite un retour vers la situation originale de sulfure ou d'oxyde, qui était la sienne avant les processus d'élaboration et d'extraction. La définition actuelle n'inclut pas les composés non métalliques. Les plastiques peuvent se dilater ou se fissurer, le bois peut fusionner ou se fendre, le granit peut subir de l'érosion et le ciment de Portland peut être lessivé, mais, dans ce contexte, le terme corrosion se réfère spécifiquement à l'attaque chimique des métaux [34]. Dans ce chapitre nous allons caractériser le comportement de l'acier dans des milieux acides et salins avec différents produits préparés en laboratoire, Dans le but de mesurer la perte de masse, le taux de corrosion et observation de surface.

III.1 Approche d'étude

Le travail consistera en un contrôle des paramètres suivant :

- La température de nettoyage (T) à 30°C, 60°C, 80°C.
- La concentration des solutions chimiques (C).
- La perte de masse des dépôts (m) sera mesurée.
- Le temps d'immersion 3h, 4h, 5h, 6h, 7h.

III.2 Méthodes et préparation des matériaux

III.2.1 Méthode gravimétrique

L'analyse gravimétrique représente un groupe de techniques d'analyse chimique quantitative réalisées en établissant, par pesée, la masse d'un produit, appelé l'analyte, formé ou supprimé. Elle se fonde sur l'évaluation de la masse d'un élément créé ou supprimé au cours d'une réaction chimique. Dans cette technique, on utilise des substances réactives spécifiques qui entrent en interaction avec le matériau visé pour créer un produit solide. Ce produit est par la suite séparé, raffiné et soigneusement pesé. Les chiffres issus de l'analyse gravimétrique sont généralement déterminés à partir de deux mesures issues de l'expérience :

- La masse de l'échantillon.

- La masse du produit résultant du traitement gravimétrique [35].

III.2.2 Matériaux utilisés

Les matériaux nécessaires pour les essais de l'acier dans des milieux acides et salins dans le cadre de cette étude ont été préparés avec soin en termes de qualité et de quantité

Echantillons d'acier de dimension identique, Balance analytique, Solutions de H_2SO_4

Solutions de NaCl, Bécher sou cellules de corrosion, Papier abrasif, Eau distillée, Acétone ou éthanol.

III.2.3 Préparation des échantillons

Choix des plaques

L'acier Le fer blanc : Le fer-blanc est un produit en acier recouvert d'une couche d'étain. Il est obtenu par voie électrolytique et est utilisé comme emballage. Il est concurrencé par l'aluminium, en particulier pour la fabrication des boîtes-boissons. [36



Figure III.1 : Echantillon de l'acier (fer blanc)

Composition

Le fer-blanc est un produit en acier doux ou extra doux laminé (la teneur en carbone est inférieure à 0,08 %) recouvert d'une couche d'étain. Le fer-blanc, obtenu par voie électrolytique, est constitué de plusieurs couches. En partant du cœur dans le cas d'un fer blanc d'épaisseur de 0,2 mm avec 5,6 g de Sn/m^2 sur une face on a :

Tableau III.1. Caractéristiques des différentes couches du système d'étamage [36]

	Composition	Épaisseur, en nanomètres	Masse en g/m ²
Acier doux	Fe	200 000	
Solution solide	Sn dans Fe	100	
Alliage fer-étain	FeSn ₂	100	0,6
Étain libre	Sn	700	5,0
Couche passive	Cr et oxydes de Cr et Sn	2	0,002 de Cr
Film d'huile	dioctylsébaçate (DOS)	5	0,003 à 0,006

Polissage des échantillons

Nous avons effectué cette étape de polissage afin d'éliminer la couche de rouille ainsi que les impuretés, et de rendre la surface des échantillons homogène. Nous avons ensuite procédé à un rinçage à l'eau distillée afin d'éliminer toute impureté, puis à un séchage à l'aide d'un chiffon sans frottement.

Pesage des échantillons

Pour déterminer la masse précise de chaque échantillon, nous avons utilisé une balance électronique.

**Figure.III.2** Balance électronique

III.3 Choix des solutions

III.3.1 Chlorure de sodium NaCl

Le chlorure de sodium est soit récupéré à partir de l'eau de mer dans des marais salants, soit extrait de gisements de sel gemme qui ont été formés par dépôts à partir d'eau de mer. L'exploitation des gisements de sel gemme est effectuée selon des méthodes minières classique ou par circulation d'eau in situ qui donne des saumures exploitées directement par l'industrie chimique. Les saumures peuvent aussi donner du sel cristallisé, par évaporation de l'eau. Le chlorure de sodium peut provenir également d'une coproduction industrielle lors du traitement des minerais de chlorure de potassium ou de la concentration des solutions d'hydroxyde de sodium. Il est principalement employé par l'industrie chimique pour produire le dichlore et l'hydroxyde de sodium ainsi que le carbonate et le sulfate de sodium. Il est utilisé comme sel de déneigement, dans l'alimentation humaine et animale, pour l'adoucissement de l'eau. [37]

Données physico-chimique

Tableau III.2. Données automatiques [37]

Formule	Masse molaire
NaCl	58,44 g.mol ⁻¹

Tableau III.3. Données physiques [37]

Masse volumique	Dureté	Température de fusion	Température d'ébullition	Solubilité dans l'eau
2,165 g.cm ⁻³	2 à 2,5	801°C	1 413°C	à 0°C : 35,7 g/100 g d'eau

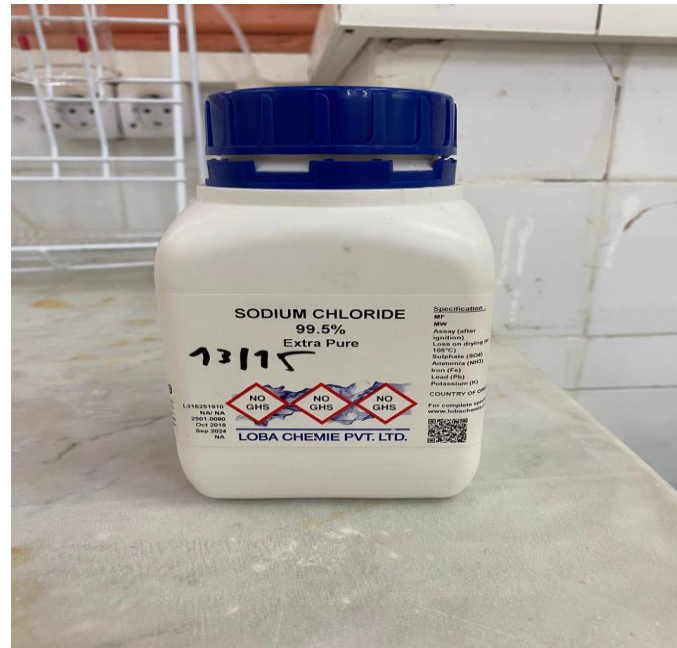


Figure.III.3 Chlorure de sodium

III.3.2. Acide sulfurique

L'acide sulfurique est un composé chimique de formule H_2SO_4 . Concentré, il est livré le plus souvent à une teneur de 98 %. Les statistiques sont généralement données en H_2SO_4 à 100 %. [38]

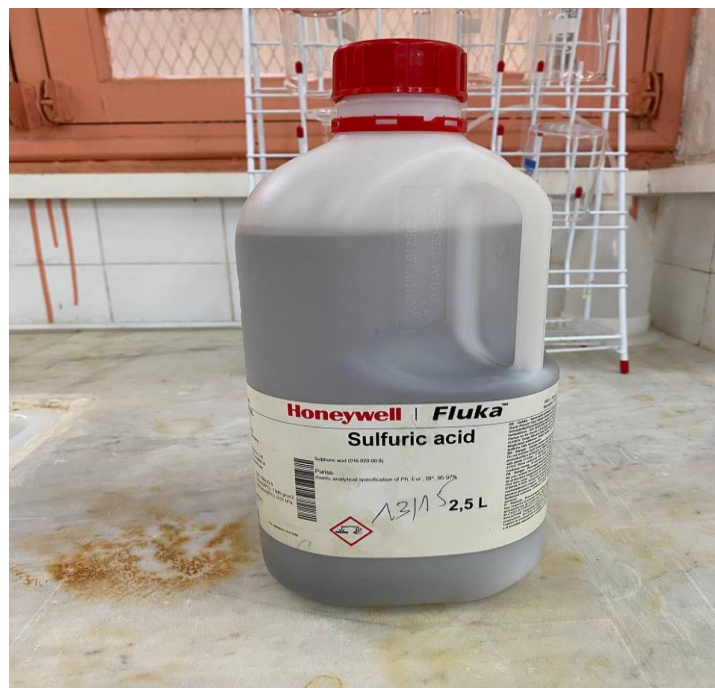


Figure.III.4 Acide sulfurique

III.4 Préparation des solutions

III.4.1 Chlorure de sodium NaCl

Nous avons pesé 5g, 3g de NaCl dans la balance, Ensuite, Nous mettons la quantité de 5g, 3g dans une fiole de 100 ml. Après, on mettre l'eau distillée on mélange NaCl et terminé la quantité avec l'eau distillée jusqu'à ce que nous atteignons le trait de jauge.

30 g = 3%

50 g = 5%



Figure.III.5 pesage 3g et 5g de NaCl



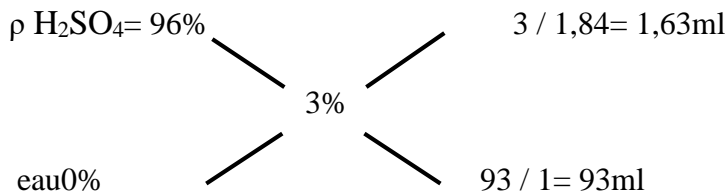
Figure.III.6 Solution de NaCl 3% et 5%

III.4.2 Acide sulfurique H₂SO₄

On prépare dans une fiole de 1L. 3%, 5%, 7%

Après on détermine le volume de H₂SO₄ dans 3%, 5%, 7% et la détermination de volume totale.

- H₂SO₄ 3%



$$V_t = 93 + 1,63 = 94,63\text{ml}$$

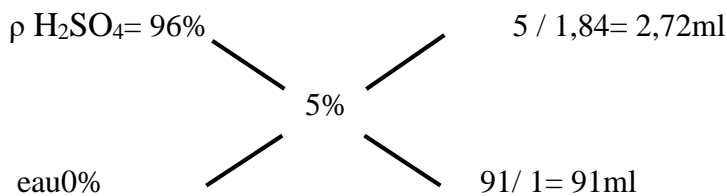
$$1,63 \longrightarrow 94,63\text{ml}$$

$$V \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow 1000\text{ml}$$

$$V = (1,63 \times 1000) / 94,63$$

$$V = 17,22\text{ml}$$

- H₂SO₄ 5%



$$V_t = 91 + 2,72 = 93,72\text{ml}$$

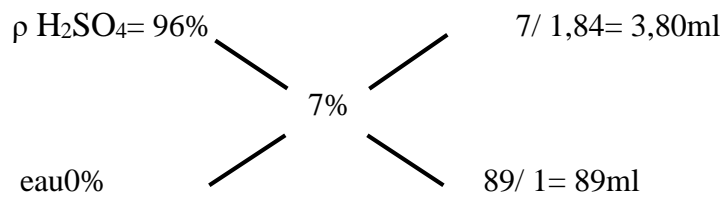
$$2,72 \longrightarrow 93,72\text{ml}$$

$$V \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow 1000\text{ml}$$

$$V = (2,72 \times 1000) / 93,72$$

$$V = 29,02\text{ml}$$

- H₂SO₄ 7%



$V_t = 89 + 3,80 = 92,8\text{ml}$

$3,80 \longrightarrow 92,8\text{ml}$

$V \text{ H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow 1000\text{ml}$

$V = (3,80 \times 1000) / 92,8$

$V = 40,95\text{ml}$



Figure.III.7 Acide sulfurique H₂SO₄



Figure.III.8 Solution de H₂SO₄

III.5 Procédure expérimentale

III.5.1 Immersion en milieu acide (H_2SO_4)

Nous avons plongé l'échantillon dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) 3%, 5%, 7%. Ensuite, L'échantillon a été maintenu dans la solution pendant des durées définies de 3h, 4h, 5h, 6h, 7h. À chaque intervalle de temps, nous avons retiré l'échantillon, l'avons rincé à l'eau distillée est séché, puis nous avons pesé afin de déterminer sa masse à l'instant considéré (m_t).

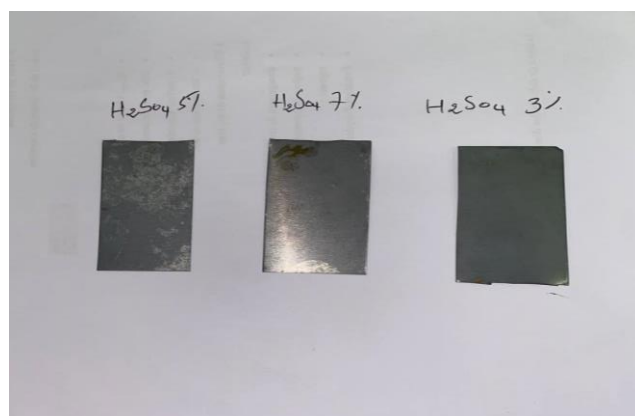


Figure.III.9. Aspect des échantillons après immersion dans des solutions de H_2SO_4 à différentes concentrations

III.5.2 Immersion en chlorure de sodium ($NaCl$)

Nous avons plongé l'échantillon dans une solution chlorure de sodium ($NaCl$) 3%, 5%. Ensuite, L'échantillon a été maintenu dans la solution pendant des durées définies de 3h, 4h, 5h, 6h, 7h. À chaque intervalle de temps, nous avons retiré l'échantillon, l'avons rincé à l'eau distillée est séché, puis nous avons pesé afin de déterminer sa masse à l'instant considéré (m_t).

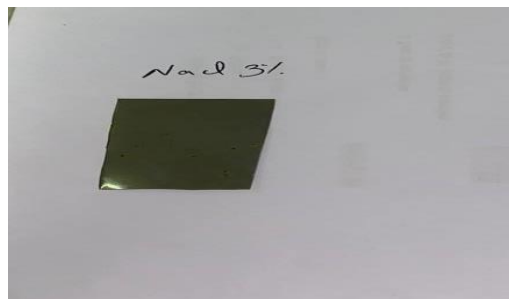


Figure.III.10. Aspect des échantillons après immersion dans des solutions de $NaCl$ à différentes concentrations

III.5.3 Immersion à différentes températures

Nous avons préparé un bain-marie et disposé des béchers contenant les solutions de NaCl à 5 % et de H₂SO₄ à 7 %. Les échantillons ont ensuite été immergés dans ces solutions et soumis à différentes températures (30 °C, 60 °C et 80 °C) pendant une durée de 1h.

À la fin de chaque essai, nous avons retiré les échantillons des solutions, les avons rincés à l'eau distillée afin d'éliminer les résidus, puis séchés soigneusement. Enfin, nous avons mesuré leur masse finale à l'aide d'une balance de précision afin d'évaluer l'influence de la température sur la perte de masse et le comportement de l'acier dans les milieux étudiés.

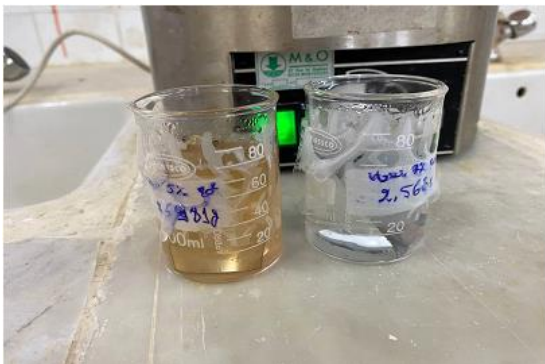


Figure.III.10. Les échantillons dans différentes solutions



Figure.III.11. Les échantillons sous des différentes températures

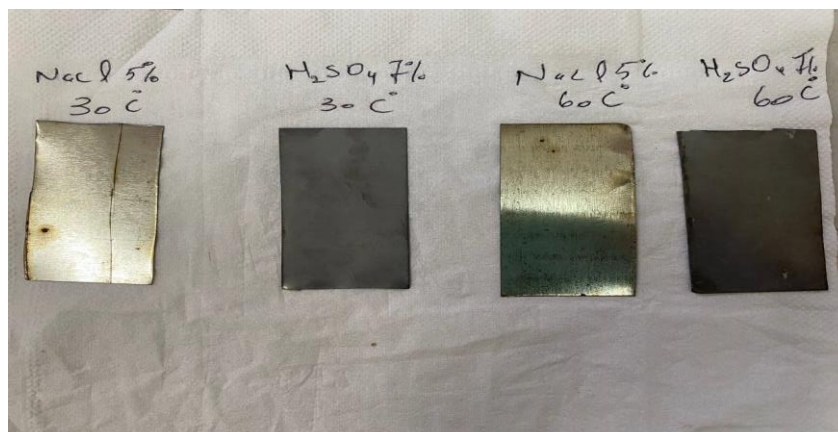


Figure.III.12. Aspect des échantillons après immersion dans des solutions de H₂SO₄ et NaCl à différentes températures

III.6 Résultats et discussions

Introduction

Cette partie présente les résultats obtenus lors des essais de corrosion réalisés sur les échantillons d'acier dans différents milieux agressifs. L'étude a porté sur l'influence de la concentration des solutions de H_2SO_4 (3 %, 5 % et 7 %) et de NaCl (3 % et 5 %), ainsi que sur l'effet de la température (30 °C, 60 °C et 80 °C) dans les solutions de NaCl à 5 % et de H_2SO_4 à 7 %. Les résultats obtenus à partir des mesures de perte de masse sont présentés sous forme de tableaux et de courbes, puis analysés afin d'évaluer l'influence de ces paramètres sur le comportement de l'acier et l'intensité du phénomène de corrosion.

III.6.1 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions de H_2SO_4 (3 %)

Tableau.III.4. L'influence de la concentration des solutions de H_2SO_4 à 3 %

le temps (h)	m_i (g)	m_f (g) H_2SO_4 3%	Δm (g) H_2SO_4 3%	V_{corr} (g. cm ⁻² .h- 1)
3	2,4152	2,4073	0,0079	1,57E-04
4	2,4152	2,4045	0,0107	1,59E-04
5	2,4152	2,4041	0,0111	1,32E-04
6	2,4152	2,4029	0,0123	1,22E-04
7	2,4152	2,4022	0,013	1,11E-04

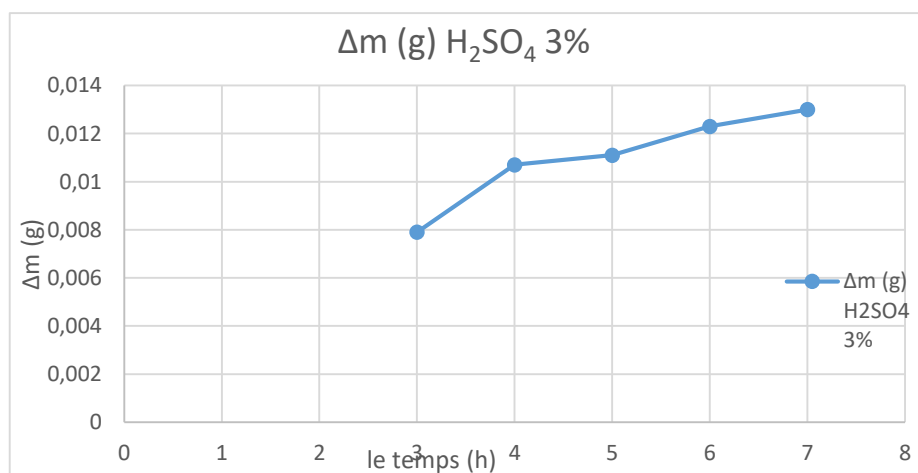


Figure.III.13. La perte de masse H_2SO_4 3 % en fonction de temps

La graphique ci-dessus représente l'évolution de la perte de masse (Δm) de l'échantillon en fonction du temps d'immersion dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 3%.

On observe que la perte de masse augmente progressivement avec le temps, passant d'environ 0,008 g après 3 h à 0,013 g après 7 h. Cette augmentation traduit une dissolution progressive du métal sous l'effet de l'attaque acide. La pente de la courbe est plus importante entre 3 h et 4 h, indiquant une vitesse de corrosion relativement élevée au début de l'immersion. Par la suite, l'augmentation de la perte de masse devient plus faible, ce qui peut être expliqué par la formation de produits de corrosion à la surface de l'échantillon, ralentissant légèrement l'attaque du milieu.

D'une manière générale, cette courbe montre que la durée d'exposition au milieu acide favorise la corrosion de l'acier, ce qui se traduit par une augmentation continue de la perte de masse.

III.6.2 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions de H_2SO_4 (5 %)

Tableau.III.5. L'influence de la concentration des solutions de H_2SO_4 à 5 %

le temps (h)	m_i (g)	mf (g) H_2SO_4 5%	Δm (g) H_2SO_4 5%	V_{corr} (g. cm ⁻² .h ⁻¹)
3	2,2651	2,2624	0,0027	5,36E-05
4	2,2651	2,26	0,0051	7,59E-05
5	2,2651	2,2593	0,0058	6,90E-05
6	2,2651	2,2586	0,0065	6,45E-05
7	2,2651	2,258	0,0071	6,04E-05

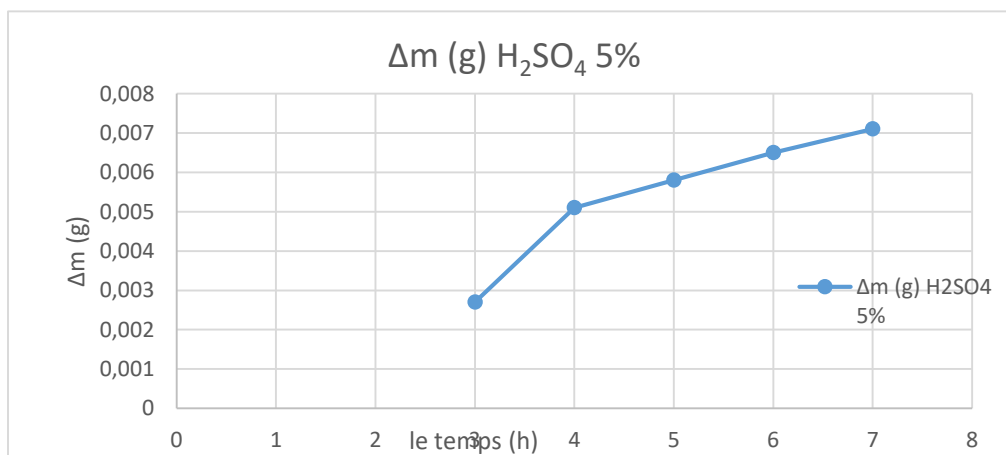


Figure.III.14. La perte de masse H_2SO_4 5 % en fonction de temps

La graphique ci-dessus représente l'évolution de la perte de masse (Δm) de l'échantillon en fonction du temps d'immersion dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 5 %. On observe que la perte de masse augmente progressivement avec le temps, passant d'environ 0,003 g après 3 h à 0,007 g après 7 h. Cette augmentation traduit une attaque continue du métal par le milieu acide et donc une corrosion progressive de l'échantillon. L'augmentation est plus marquée entre 3 h et 4 h, ce qui indique une vitesse de corrosion relativement élevée au début de l'immersion. Après 4 h, la courbe continue à croître mais avec une pente plus faible, suggérant un ralentissement de la vitesse de corrosion. Ce comportement peut être dû à la formation d'une couche de produits de corrosion à la surface du métal qui limite partiellement l'attaque du milieu.

III.6.3 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions de H_2SO_4 (7 %)

Tableau.III.6. L'influence de la concentration des solutions de H_2SO_4 à 7 %

le temps (h)	m_i (g)	m_f (g) H_2SO_4 7%	Δm (g) H_2SO_4 7%	V_{corr} (g. cm ⁻² .h- 1)
3	2,4023	2,3991	0,0032	6,35E-05
4	2,4023	2,3966	0,0057	8,48E-05
5	2,4023	2,3953	0,007	8,33E-05
6	2,4023	2,3945	0,0078	7,74E-05
7	2,4023	2,3936	0,0087	7,40E-05

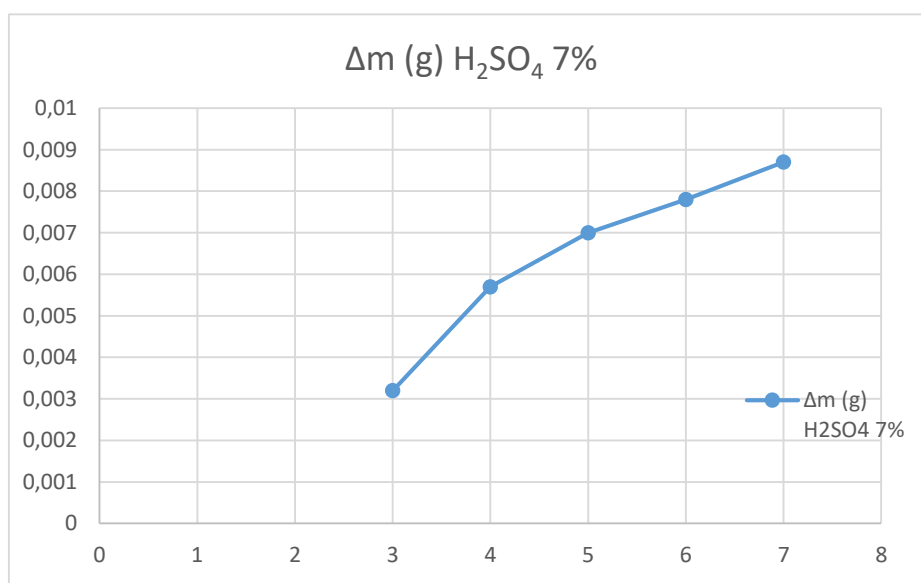


Figure.III.15. La perte de masse H_2SO_4 7 % en fonction de temps

La graphique ci-dessus représente l'évolution de la perte de masse (Δm) de l'échantillon d'acier en fonction du temps d'immersion dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 à 7 %.

On observe que la perte de masse augmente continuellement de 0,003 g à environ 0,0087 g entre 3h et 7h. L'augmentation est plus importante entre 3h et 4h, ce qui indique une attaque rapide du métal par l'acide. Après 4h, la pente de la courbe diminue légèrement, mais la perte de masse continue d'augmenter. La solution de H_2SO_4 à 7 % est suffisamment agressive pour dissoudre le métal et provoquer une perte de matière. Le ralentissement relatif de la pente après quelques heures peut être dû à la formation de produits de corrosion à la surface qui limitent partiellement l'attaque du métal.

III.6.4 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions NaCl (3 %)

Tableau.III.7. L'influence de la concentration des solutions de NaCl à 3%

le temps (h)	m_i (g)	m_f (g) NaCl 3%	Δm (g) NaCl	V_{corr} (g. cm ⁻² .h ⁻¹)
3	2,281	2,2806	0,0004	7,94E-06
4	2,281	2,2785	0,0025	3,72E-05
5	2,281	2,2783	0,0027	3,21E-05
6	2,281	2,278	0,003	2,98E-05
7	2,281	2,2779	0,0031	2,64E-05

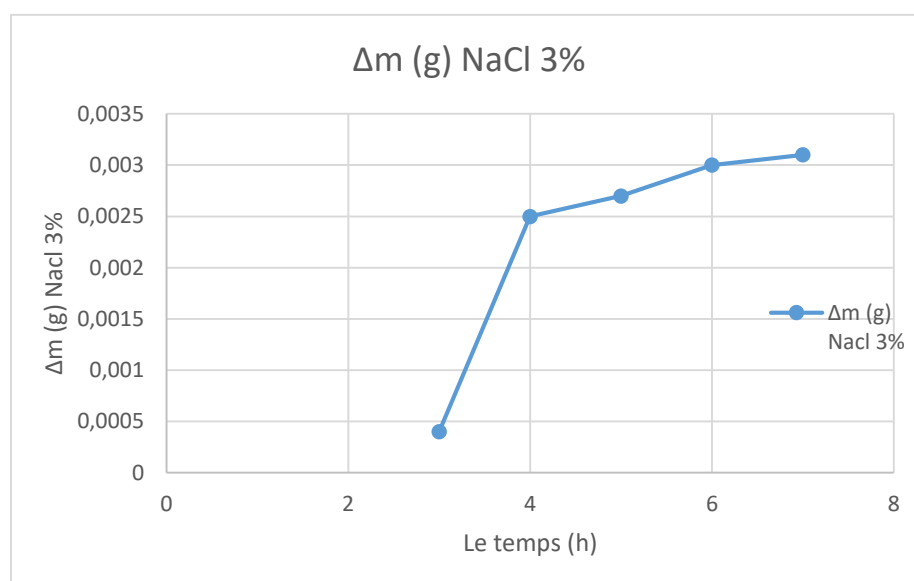


Figure.III.16. La perte de masse NaCl 3 % en fonction de temps

La graphique ci-dessus représente l'évolution de la perte de masse (Δm) de l'échantillon d'acier en fonction du temps d'immersion dans une solution de chlorure de sodium NaCl à 3%.

On observe entre 3 h et 4 h une augmentation très importante de Δm , passant d'environ 0,0004 g à 0,0025 g. Après 4 h, l'augmentation devient plus lente et progressive 5h : =0,0027, 6h : =0,0030g, 7h :=0,0031. À partir de 6–7 h, la courbe devient presque horizontale, indiquant que la variation de masse est faible et que l'équilibre est pratiquement atteint.

III.6.5 Résultats et discussions l'influence de la concentration des solutions NaCl (5 %)

Tableau.III.8. L'influence de la concentration des solutions de NaCl à 5%

le temps (h)	mi (g)	mf (g) NaCl 5%	Δm (g) NaCl 5 %	Vcorr (g. cm ⁻² .h-1)
3	7,7242	7,7236	0,0006	1,32E-06
4	7,7242	7,7219	0,0023	3,80E-06
5	7,7242	7,7217	0,0025	3,31E-06
6	7,7242	7,7215	0,0027	2,98E-06
7	7,7242	7,7213	0,0029	2,74E-06

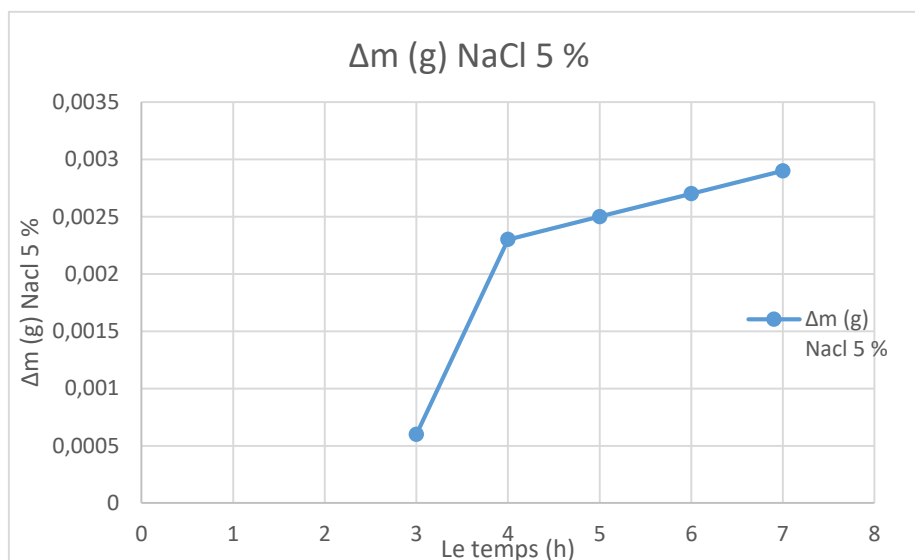


Figure.III.17. La perte de masse NaCl 5 % en fonction de temps

La graphique ci-dessus représente l'évolution de la perte de masse (Δm) de l'échantillon d'acier en fonction du temps d'immersion dans une solution de chlorure de sodium NaCl à 5%. On observe à 3 h, Δm est faible ($\approx 0,0006$ g). Entre 3 h et 4 h une augmentation rapide de Δm jusqu'à environ 0,0024 g. Après 4 h, Δm continue d'augmenter mais de façon plus lente et régulière. Ce qui montre que le phénomène de transfert de matière est intense dans les premières heures avant de tendre vers un état d'équilibre.

III.6.6 Résultats et discussions l'influence de la température dans la solution NaCl (5 %)

Tableau.III.9. l'influence de la température dans la solution NaCl (5 %)

la température C°	Δm (g) NaCl 5%
30	0,0002
60	0,0008
80	0,0012

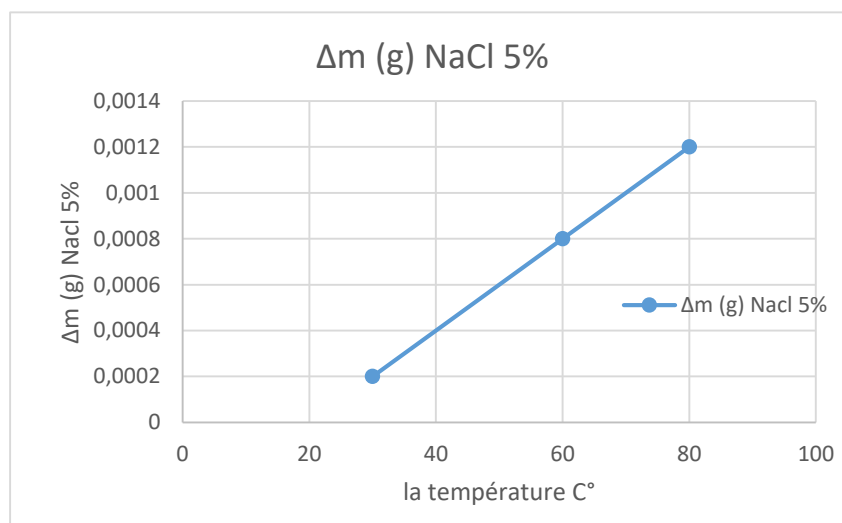


Figure.III.18. La perte de masse NaCl 5 % en fonction de température

La graphique ci-dessus représente l'évolution de la perte de masse (Δm) de l'échantillon immergé dans une solution de chlorure de sodium NaCl à 5 % en fonction de la température. On observe une augmentation progressive de la perte de masse lorsque la température augmente. Cette évolution indique que l'élévation de la température favorise les phénomènes responsables de la dégradation du matériau, notamment la

corrosion ou la dissolution en milieu salin. Entre 30 °C et 60 °C, la perte de masse augmente de façon significative, passant de 0,0002 g à 0,0008 g. Cette augmentation peut être attribuée à une accélération des réactions électrochimiques sous l'effet de la température. À 80 °C, la perte de masse atteint sa valeur maximale de 0,0012 g, ce qui confirme que les températures élevées intensifient davantage l'attaque du milieu NaCl à 5 %.

III.6.7 Résultats et discussions l'influence de la température dans la solution H₂SO₄ (7 %)

Tableau.III.10. l'influence de la température dans la solution H₂SO₄ (7 %)

température C°	Δm (g) H ₂ SO ₄ 7%
30	0,0018
60	0,0117
80	0,013

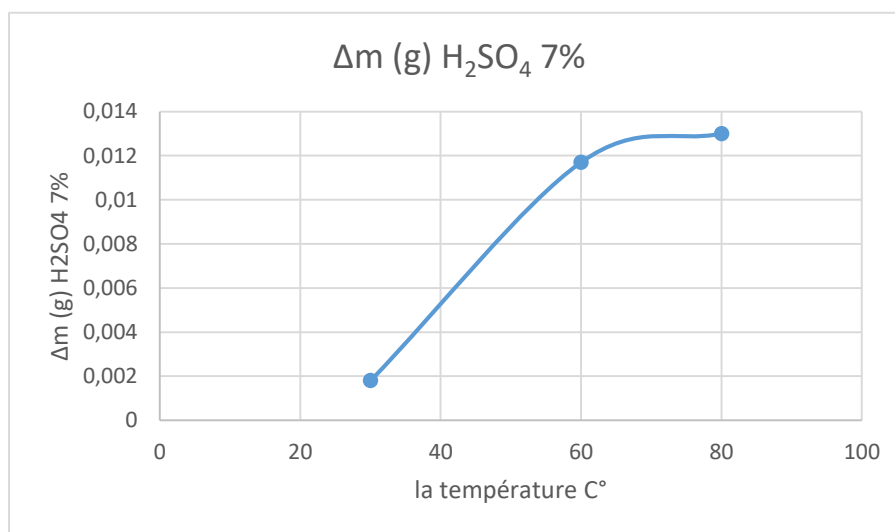


Figure.III.19. La perte de masse H₂SO₄ 7 % en fonction de température

La graphique ci-dessus représente l'évolution de la perte de masse (Δm) de l'échantillon en fonction de la température dans une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄) à 7 %. On observe une augmentation importante de la perte de masse lorsque la température passe de 30 °C à 60 °C. En effet, Δm augmente fortement, passant de 0,0018 g à 0,0117 g, ce qui traduit une accélération significative de l'attaque corrosive du milieu acide sur le matériau. Entre 60 °C et 80 °C, la perte de masse continue d'augmenter mais de manière

beaucoup plus faible, atteignant une valeur maximale de 0,0130 g. La courbe tend alors vers un plateau, ce qui peut indiquer un ralentissement relatif de la vitesse de corrosion. Ce comportement peut être lié à la formation d'une couche de produits de corrosion à la surface du matériau, limitant partiellement la poursuite de l'attaque acide.

III.6.8 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion NaCl 3 %

Tableau.III.11. l'influence de la vitesse de corrosion NaCl 3%

le temps (h)	Vcorr NaCl 3% (g. cm ⁻² .h ⁻¹)
3	7,94E-06
4	3,72E-05
5	3,21E-05
6	2,98E-05
7	2,64E-05

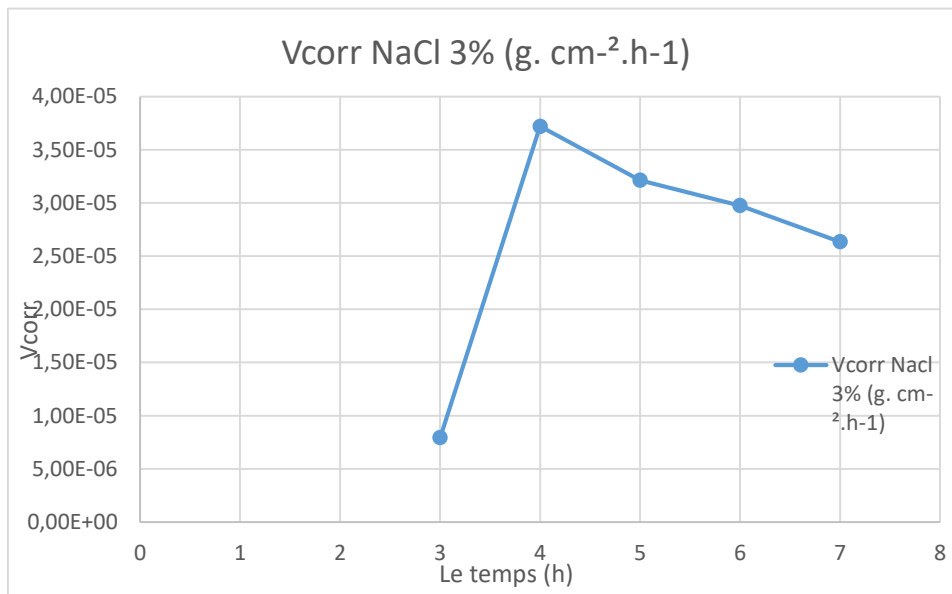


Figure.III.20. La vitesse de corrosion NaCl 3 % en fonction de temps

La graphique ci-dessus représente l'évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps d'immersion dans une solution de NaCl à 3 %. On observe tout d'abord une augmentation importante de la vitesse de corrosion entre 3 h et 4 h, passant d'environ $6,5 \times 10^{-6} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ à $3,7 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Cette augmentation traduit une attaque rapide du matériau par les ions chlorure (Cl^-) présents dans la solution saline. Les chlorures favorisent la dissolution de la couche protectrice naturelle à la surface du métal, ce qui accélère le processus de corrosion. À partir de 4 h, la vitesse de corrosion diminue progressivement pour atteindre

environ $2,5 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ à 7 h. Cette diminution peut être attribuée à la formation de produits de corrosion à la surface du matériau. Ces dépôts constituent une couche partiellement protectrice qui limite le contact direct entre le métal et le milieu corrosif, réduisant ainsi la vitesse de corrosion.

III.6.9 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion NaCl 5 %

Tableau.III.12. l'influence de la vitesse de corrosion NaCl 5%

le temps (h)	Vcorr (g. cm ⁻² .h ⁻¹)
3	1,32E-06
4	3,80E-06
5	3,31E-06
6	2,98E-06
7	2,74E-06

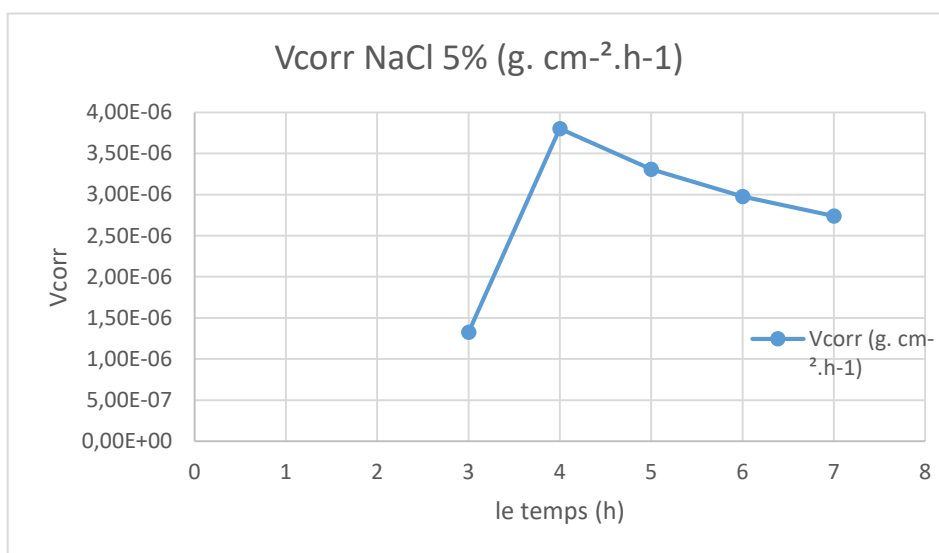


Figure.III.21. La vitesse de corrosion NaCl 5 % en fonction de temps

La graphique ci-dessus présente l'évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) du matériau en fonction du temps d'immersion dans une solution de NaCl à 5 %. Les résultats montrent que la vitesse de corrosion augmente initialement de $1,32 \times 10^{-6} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ après 3 heures à $3,80 \times 10^{-6} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ après 4 heures. Cette augmentation traduit une accélération du processus de corrosion due au contact prolongé entre le matériau et le milieu salin. À partir de 4 heures, la vitesse de corrosion diminue progressivement pour atteindre $2,74 \times 10^{-6} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ après 7 heures d'immersion. Cette diminution peut être attribuée à la formation d'une couche de produits de corrosion à la

surface du matériau. Cette couche agit comme une barrière partielle entre le métal et le milieu corrosif, ce qui ralentit les réactions de corrosion. La vitesse maximale de corrosion est observée après 4 heures d'immersion, ce qui indique que cette durée correspond à la période où l'attaque corrosive est la plus intense. Par la suite, le système tend vers un régime plus stable caractérisé par une diminution progressive de la vitesse de corrosion. Ces résultats montrent que le milieu NaCl à 5 % provoque une corrosion relativement rapide au début de l'immersion, suivie d'une phase de ralentissement liée à la formation d'une couche protectrice partielle à la surface du matériau.

III.6.10 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion H₂SO₄ 3 %

Tableau.III.13. l'influence de la vitesse de corrosion H₂SO₄ 3%

le temps (h)	V _{corr} H ₂ SO ₄ 3% (g. cm ⁻² .h ⁻¹)
3	1,57E-04
4	1,59E-04
5	1,32E-04
6	1,22E-04
7	1,11E-04

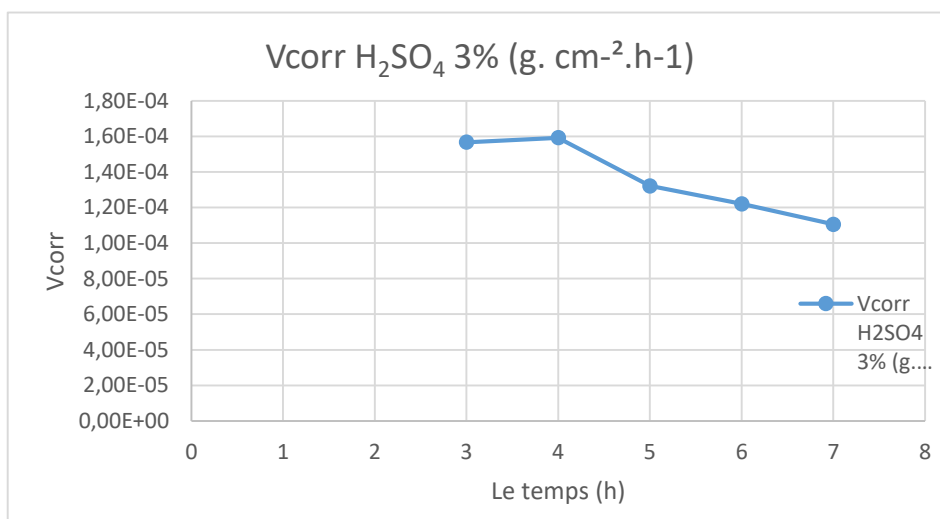


Figure.III.22. La vitesse de corrosion H₂SO₄ à 3% en fonction de temps

La graphique ci-dessus présente l'évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) du matériau en fonction du temps d'immersion dans une solution de H₂SO₄. Les résultats montrent que la vitesse de corrosion est initialement élevée, atteignant une valeur

maximale de $1,59 \times 10^{-4} \text{ g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ après 4 heures d'immersion. Par la suite, une diminution progressive de la vitesse de corrosion est observée, avec des valeurs de $1,32 \times 10^{-4}$, $1,22 \times 10^{-4}$ et $1,11 \times 10^{-4} \text{ g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ respectivement après 5, 6 et 7 heures. Cette diminution peut être attribuée à la formation d'une couche de produits de corrosion à la surface du matériau, jouant un rôle de barrière partielle entre le métal et le milieu corrosif. Cette couche limite les échanges entre le métal et la solution acide, ce qui ralentit progressivement le processus de corrosion. Ainsi, l'influence du temps se traduit par une réduction de la vitesse de corrosion après une phase initiale d'attaque plus intense.

III.6.11 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion H_2SO_4 5 %

Tableau.III.14. l'influence de la vitesse de corrosion H_2SO_4 à 5%

le temps (h)	Vcorr H_2SO_4 5% (g. cm ⁻² .h-1)
3	5,36E-05
4	7,59E-05
5	6,90E-05
6	6,45E-05
7	6,04E-05

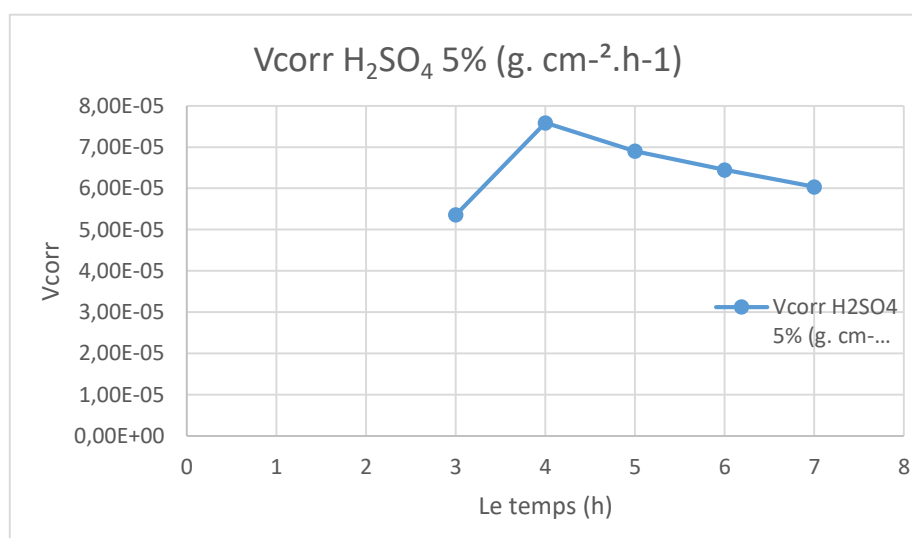


Figure.III.23. La vitesse de corrosion H_2SO_4 à 5% en fonction de temps

La graphique ci-dessus présente l'évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) du matériau en fonction du temps d'immersion dans une solution de (H_2SO_4) à 5 %.

On observe tout d'abord une augmentation de la vitesse de corrosion entre la troisième et la quatrième heure d'immersion. La V_{corr} passe d'environ $5,4 \times 10^{-5}$ à $7,7 \times 10^{-5}$ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Cette augmentation traduit une attaque importante de la surface métallique par le milieu acide. Durant cette phase, l'acide sulfurique dissout progressivement la couche d'oxydes présente à la surface de l'acier, exposant davantage le métal au milieu corrosif.

À partir de la quatrième heure, la vitesse de corrosion diminue progressivement pour atteindre environ $6,3 \times 10^{-5}$ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ après sept heures d'immersion. Cette diminution peut être attribuée à la formation de produits de corrosion à la surface du métal. Ces dépôts constituent une barrière partielle entre le métal et la solution corrosive, ce qui ralentit la cinétique de dissolution de l'acier.

III.6.12 Résultats et discussions l'influence de la vitesse de corrosion H_2SO_4 7 %

Tableau.III.15. l'influence de la vitesse de corrosion H_2SO_4 à 7%

le temps (h)	V_{corr} H_2SO_4 7% ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
3	6,35E-05
4	8,48E-05
5	8,33E-05
6	7,74E-05
7	7,40E-05

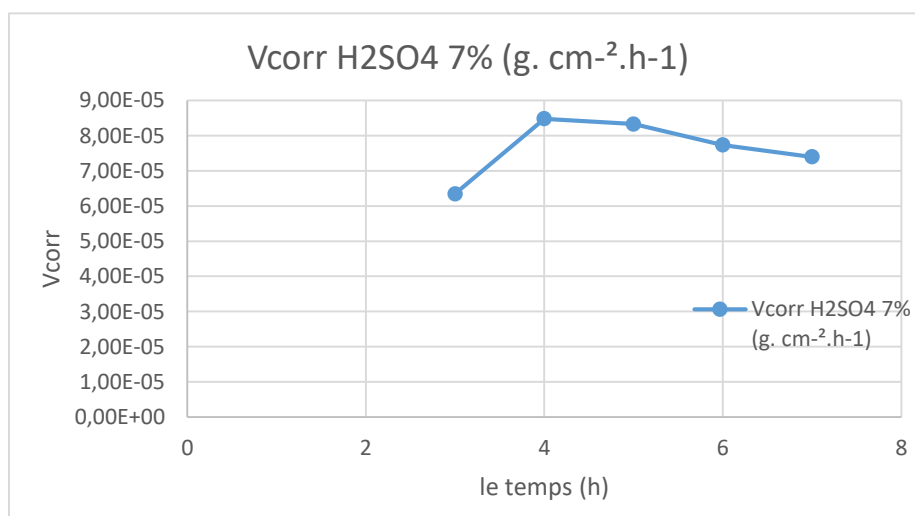


Figure.III.24. La vitesse de corrosion H_2SO_4 à 5% en fonction de temps

La graphique ci-dessus présente l'évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) du matériau en fonction du temps d'immersion dans une solution de (H_2SO_4) à 5 %. D'après les résultats obtenus, la vitesse de corrosion augmente de $6,35 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ après 3 h d'immersion à $8,48 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ après 4h. Cette augmentation traduit une intensification de l'attaque corrosive du métal par le milieu acide. En effet, l'acide sulfurique favorise la dissolution de la couche superficielle de l'acier et accélère les réactions électrochimiques responsables de la corrosion. Après avoir atteint une valeur maximale à 4h, la vitesse de corrosion diminue progressivement pour atteindre $7,40 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ à 7h. Cette diminution peut être expliquée par la formation et l'accumulation de produits de corrosion à la surface du métal. Ces produits forment une couche partiellement protectrice qui réduit le contact direct entre l'acier et le milieu agressif, ralentissant ainsi la vitesse de dissolution du métal.

Comparaison

Le milieu H_2SO_4 présente un pouvoir corrosif nettement supérieur à celui du NaCl , comme le confirme l'évolution plus rapide et plus importante de la perte de masse au cours du temps.

L'augmentation de la température favorise la corrosion dans les deux milieux, mais son effet est beaucoup plus marqué dans la solution d' H_2SO_4 7 %, qui présente un caractère corrosif nettement plus agressif que la solution de NaCl 5 %. Cette différence est liée à la forte acidité du milieu sulfurique, qui accélère davantage la dissolution du métal lorsque la température augmente.

Conclusion

Globalement, les résultats montrent que le temps d'immersion et la température influencent significativement le comportement à la corrosion de l'acier. Le milieu acide demeure le plus agressif et provoque une dégradation du matériau plus importante que le milieu salin.

Conclusion générale

L'encrassement des chaudières et des conduites de vapeur constitue un problème majeur dans les installations industrielles en raison de ses effets négatifs sur les performances thermiques, la consommation énergétique et la durée de vie des équipements. Face à cette problématique, le décapage chimique apparaît comme une solution efficace pour éliminer les dépôts accumulés et restaurer les conditions optimales de fonctionnement.

Dans ce travail, nous avons tout d'abord présenté des généralités sur l'eau et ses caractéristiques physico-chimiques, ainsi que son rôle dans les procédés industriels. Nous avons ensuite étudié les différents mécanismes d'encrassement, leurs causes, leurs conséquences et les principales méthodes de prévention et de traitement utilisées dans l'industrie.

La partie expérimentale a été consacrée à l'étude du comportement de l'acier dans des milieux acides et salins simulant les conditions de décapage chimique. L'évaluation de la perte de masse et du taux de corrosion a permis de mettre en évidence l'influence de la concentration des solutions, de la température et du temps d'immersion sur la dégradation du matériau. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la concentration des solutions agressives ainsi que de la température favorise généralement la dissolution des dépôts, mais entraîne également une augmentation de l'attaque corrosive de l'acier.

Ainsi, l'efficacité d'un protocole de décapage ne dépend pas uniquement de sa capacité à éliminer l'encrassement, mais également de sa faculté à préserver l'intégrité du matériau traité. Un compromis doit donc être recherché entre le pouvoir nettoyant des solutions utilisées et leur agressivité vis-à-vis du métal.

En conclusion, cette étude a permis de mieux comprendre les phénomènes liés à l'encrassement et à la corrosion dans les systèmes de production de vapeur. Les résultats obtenus constituent une base intéressante pour l'optimisation des opérations de décapage chimique et pour le développement de protocoles plus performants,

garantissant à la fois l'efficacité du nettoyage, la protection des équipements et la réduction des coûts de maintenance.

Références bibliographiques

- [1] NOUADRIA, B, NOUADRIA, S, GHOULI, Y, HANNECH, A. (2022). Contribution à l'analyse bactériologique de l'eau potable « l'Eau de robinet » (Master 2 UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA .)
- [2] Hamed, M., Guettache, A., & Bouamer, L. (2012). Etude des propriétés physicochimiques et bactériologiques de l'eau du barrage DJORF-TORBA Bechar. Mémoire de Master. Université de Bechar.
- [3] : Géométrie de quelques molécules simples, de la vie courante — ressource pédagogique publiée par l'Académie de Poitiers sur son site Espace pédagogique (Physique-Chimie).
- [4] AIT-OUBELLI, M, (2018), les eaux embouteillées en Algérie. Mémoire de Master. UNIVERSITE DE BLIDA 1.
- [5] Scribd. Les différents états de l'eau. Disponible sur Scribd
- [6] Scribd. Le rôle vital du cycle de l'eau sur la Terre. Disponible sur Scribd <https://fr.scribd.com/presentation/968108270/Sciences-8-Chapitre-10-Le-Role-Vital-Du-Cycle-de-l-Eau-Sur-La-Terre>.
- [7] <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/cycleau/modeliser>
- [8] Scribd. Répartition de l'eau sur terre. Disponible sur Scribd
- [9] L'eau sur Terre | Blog Savanturiers - École de la recherche
- [10] <https://www.oieau.fr/Mediatheque/illustrations/la-part-deau-douce-sur-terre>
- [11] BERTRAND. C, Utiliser L'eau De Pluie, Editions Eyrolles, 2008, 130 p
- [12] ILLAL, A., & CHERFAOUI. S. (2018). Contribution à l'évaluation de la qualité physicochimique et microbiologique de l'eau de consommation de la ville de Bouira (Doctoral dissertation, Université de Bouira).
- [13] RODIER. J. L'analyse De L'eau (Eaux Naturelles, Faux Résiduaire Et Eaux De Mer). 8 -ème Edition. Dunod, Paris, 1997.

- [14] MERIEM, G. W. R. (2020). Caractéristiques physico-chimiques de l'eau potable de la région de M'sila (Dréat, Souamaa, Newara) (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [15] SARI. H.(2014).: Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de la source (Attar) (Tlemcen). Mémoire de Master en Sciences des aliments. Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen.
- [16] Djihad, HadeF., & Malika, HASNI. (2017). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de l'Oued de Boutane région de Khemis-Miliana W. Ain Defla.
- [17] JOEL . G . (2003).La qualité de l'eau potable, technique et responsabilités, Paris, Novembre.
- [18] LEBBIHI, R., & DERKI, H. (2018). Etude de quelques paramètres physico-chimiques et microbiologiques des eaux potables dans la région d'El-OUED. MEMOIRE de Master Académique en science biologiques.
- [19] BELDJILALI.F,ARAB.A. Etude comparative des paramètres physico-chimiques et bactériologique des eaux de barrage Kramis et des eaux de source naturelle Ain sidi abd elkader. Mémoire de Master en S N V. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
- [20] LEYRAL. G, RONNEFOY. C, GUILLET. F, (2002) Microbiologie et qualité des industries agroalimentaire, Paris, 245p
- [21] . JOHN . P, DANALD . A . (2010) Microbiologie, 3ème édition.
- [22] Malaoui, S., & Agoudjil, N. E. (2015). Etude de la Qualité des eaux de surface et des eaux traitées Cas des barrages de Koudiat Medaouar& de Ain Zada. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme Master en hydraulique. Université Larbi Ben M'hidi- OUM EL – BOUAGHI.
- [23] . KOUIDRI NEE BELALA. Z.(2006).Etude et traitement de leau du barrage djorf-eltorba de la wilaya de Béchar par filtration sur sables. Mémoire de magister.
- [24] D. Grillot, «l'encrassement dans les échangeurs.,» Edition GRET. 1991.

- [25] M. A. Masri, «Méthodologie d'approche d'étude de l'encrassement,» 3èmes, journée, Scientifique et Technique de Sonatrach, n° 1949. 1998.
- [26] A. Dahmane et S. Moussa, «Etude de problème de l'encrassement dans un échangeur de chaleur type faisceau calandre 12x20400,» Mémoire master professionnel 2018/2019, Université Kasdi Merbah Ouargla. Page | 79Référence bibliographique.
- [27] S. Kazi, «Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces,» mars 2012. [En ligne]. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/221927710>. [Accès le 18 juin 2024].
- [28] H. C. Sadouk, «Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois,» Université Paris- Est, 2009.
- [29] «Fouling In Heat Exchangers,» csi designs, 30 mars 2021. [En ligne]. Disponible: <https://www.csidesigns.com/blog/articles/fouling-in-heat-Eexchangers> [Accès le 18 jui 2024].
- [30] H. YAMINA, «Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur,» Mémoire Magister, Université Mohammed Bougerra -Boumerdas, 2007.
- [31] P. ROUSSEAU, «Maintenance des chaudières, comment lutter contre l'encrassement et la corrosion acide,» [En ligne]. Disponible: <https://www.drivex.fr/Cat/P4EX0.htm>. [Accès le 18 juin 2024].
- [32] Nalco Water. *The Nalco Water Handbook*. 3rd Edition. New York: McGraw-Hill; 2009.
- [33] F. Douard, «AIT Drivex, 40 ans d'expérience contre l'encrassement et la corrosion acide des chaudières,» Bioenergie, 2 juillet 2017. [En ligne]. Disponible: <https://www.bioenergiepromotion.fr/52013/ait-drivex-40-ans-dexperiance-contre-lencrassement-et-la-corrosion-acidedes-chaudieres/>.
- [34] <http://thesis.univ-biskra.dz/2425/3/Chapitre%2001.pdf>
- [35] C. . Yoder, «Gravimetric Analysis,» 5 janveir 2017 wiredchemist.com.
- [36] <https://lelementarium.fr/product/fer-blanc/>.

[37] <https://lelementarium.fr/product/chlorure-de-sodium/>

[38] <https://lelementarium.fr/wp-content/uploads/2018/08/Acide-sulfurique-2015.pdf>.