

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

Université 20Août 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 : Génie Chimique

**Proposition et évaluation d'un produit chimique pour le nettoyage
des échangeurs de chaleur à plaques**

Réalisé par :

- Nouiouat chouiter Rahma
- Bouaouina Wissam

Soutenu le 21/06/2026, devant le jury suivant :

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1	Boultif Walid	MCB	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Encadrant
2	Rahal Hassiba	MCA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Présidente
3	Boussaha El Hadi	professeur	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examinateur
4	Zouied Daoiya	MCA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examinatrice

Année universitaire : 2025/2026



Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la patience, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Mr. Boultif, pour son accompagnement, ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements Mr. Boussaha, pour son aide précieuse, ses orientations pertinentes et ses encouragements qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail et pour l'intérêt qu'ils lui portent.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du département de Génie Chimique pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils nous ont transmises tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos familles et à nos proches pour leur soutien moral, leur confiance, leur patience et leurs encouragements permanents.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, nous adressons nos plus sincères remerciements.



DÉDICACE

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Louange à Dieu, Seigneur de l'univers, qui m'a guidée et m'a accordé la force, la patience et la réussite pour mener à bien ce travail. Je Lui demande de le rendre entièrement sincère pour Son noble visage.

Je dédie ce modeste travail avant tout à Dieu Tout-Puissant, en reconnaissance de Ses innombrables bienfaits.

Je le dédie également à mes chers parents, en signe de gratitude pour leur amour, leur soutien et leurs sacrifices.

Une dédicace particulière à ma sœur Amira, qui a joué un rôle important dans mon éducation depuis mon enfance et qui a été un véritable soutien tout au long de mon parcours.

À mon amie Wissam, avec qui j'ai partagé la réalisation de ce mémoire, les efforts, les nuits de travail et la persévérance jusqu'à son achèvement.

À mes frères et sœurs (Karim, Hamza, Mohamed, Hadjer, Aya et Amina), ainsi qu'à mes proches, pour leur affection et leurs encouragements.

À mes professeurs et à tous mes camarades de la promotion de Génie Chimique 2025/2026.

Je prie Dieu Tout-Puissant de nous accorder la réussite et le succès à tous.

Louange à Dieu, Seigneur de l'univers.



Nouiouat chouiter rahma



DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, en témoignage de mon profond amour et de ma grande gratitude pour leurs sacrifices, leur patience et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours universitaire. Que Dieu les protège et leur accorde santé et bonheur.

À mon cher frère Hani, et à mes chères sœurs Amine, Aya et Merve, pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements constants.

À ma chère grand-mère, pour sa tendresse, ses prières sincères et sa présence bienveillante dans ma vie.

À mon neveu, qui apporte joie et bonheur à notre famille.

À ma coéquipière et amie Rahma , qui m'a accompagnée dans la réalisation de ce mémoire, en partageant avec moi les efforts, les défis et les moments de réussite, en lui souhaitant plein succès dans sa vie.

À mes chères cousines Wafa, Oumayma et Amira, pour leur affection, leur soutien moral et leurs encouragements permanents.

À tous mes amis ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenue, de près ou de loin.

Et enfin, à moi-même, en reconnaissance de ma patience, de mes efforts et de ma persévérance pour atteindre ce résultat.



Bouaouina wissam

ملخص

تلعب المبادلات الحرارية دورًا أساسيًا في مختلف العمليات الصناعية من خلال ضمان انتقال الحرارة بين مائعين. غير أن أداءها يتأثر بظاهرتي الترسب والتكلس الناتجتين عن تراكم الرواسب المعدنية والعضوية والصلبة على أسطح التبادل الحراري. تؤدي هذه الرواسب إلى تكوين مقاومة حرارية إضافية تقلل من كفاءة انتقال الحرارة، وتزيد من فقدان الضغط واستهلاك الطاقة وتكاليف الصيانة. يهدف هذا العمل إلى اقتراح وتقييم فعالية محاليل كيميائية مختلفة مخصصة لتنظيف المبادلات الحرارية وإزالة الرواسب المترابطة على الأسطح المعدنية. أُجريت تجارب مخبرية على عينات ملوثة اصطناعيًا لدراسة تأثير تركيز محاليل التنظيف ومدة التنظيف على فقدان كتلة الرواسب. وقد سمحت النتائج المتحصل عليها بتحديد شروط التنظيف المثلى وإبراز أهمية التنظيف الكيميائي في تحسين أداء المبادلات الحرارية وإطالة عمرها التشغيلي.

الكلمات المفتاحية: المبادلات الحرارية، الترسب، التكلس، التنظيف الكيميائي، انتقال الحرارة، الكفاءة.

Résumé

Les échangeurs de chaleur jouent un rôle essentiel dans de nombreux procédés industriels en assurant le transfert thermique entre deux fluides. Cependant, leur performance est souvent affectée par les phénomènes d'encrassement et d'entartrage, causés par l'accumulation de dépôts solides, organiques ou minéraux sur les surfaces d'échange. Ces dépôts constituent une résistance thermique supplémentaire qui réduit l'efficacité du transfert de chaleur, augmente les pertes de charge, la consommation énergétique ainsi que les coûts de maintenance. Dans ce contexte, ce travail vise à proposer et à évaluer l'efficacité de différentes solutions chimiques de nettoyage destinées à éliminer les dépôts présents sur les surfaces métalliques. Des essais expérimentaux ont été réalisés sur des échantillons encrassés artificiellement afin d'étudier l'influence de la concentration des solutions et du temps de nettoyage sur la perte de masse des dépôts. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les conditions optimales de nettoyage et de mettre en évidence l'importance du nettoyage chimique dans l'amélioration des performances et de la durée de vie des échangeurs de chaleur.

Mots-clés : Échangeur de chaleur, encrassement, entartrage, nettoyage chimique, transfert thermique, efficacité.

Abstract

Heat exchangers play a vital role in industrial processes by ensuring heat transfer between two fluids. However, their performance is often reduced by fouling and scaling phenomena resulting from the accumulation of mineral, organic, and solid deposits on heat transfer surfaces. These deposits create an additional thermal resistance that decreases heat transfer efficiency, increases pressure drop, energy consumption, and maintenance costs. In this context, the present work aims to propose and evaluate the effectiveness of chemical cleaning solutions for the removal of deposits formed on metallic surfaces. Experimental tests were carried out on artificially fouled samples to investigate the influence of cleaning solution concentration and cleaning time on deposit mass loss. The obtained results made it possible to determine the optimal cleaning conditions and highlight the importance of chemical cleaning in improving the performance and service life of heat exchangers.

Keywords: Heat exchanger, fouling, scaling, chemical cleaning, heat transfer, efficiency.

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale.....1

Chapitre I Généralités sur les échangeurs de chaleur et l'eau

I.1 Introduction.....3

I.2 Généralités sur les échangeurs de chaleur.....3

I.2,1 Définition des échangeurs de chaleur3

I.2,2 Principe de fonctionnement4

I.2,3 Modes de transfert thermique4

La conduction4

La convection5

Le rayonnement5

I.2,4 Classification des Échangeurs de Chaleur5

I.2,4,1 Classification fonctionnelle5

I.2,4,2 Classement selon les écoulements6

I.2,4,3 Classement technologique8

I.2,5 Les problèmes de fonctionnement d'un échangeur	12
I.2,5,1 L'encrassement	12
I.2,5,2 La corrosion	13
I.2,5,3 La vibration	13
I.3 Généralités sur l'eau.....	14
I.3,1 Définition de l'eau	14
I.3,2 Importance de l'eau dans les procédés industriels	14
I.3,3 Propriétés Physiques	15
I.3,3,1 Masse volumique	15
I.3,3,2 Propriétés oxydo-réductrices	15
I.3,3,3 Conductivité électrique de l'eau	16
I.3,3,4 Propriétés Optiques	16
I.3,4 Propriétés Chimiques	17
I.4 Différents types de l'eau utilisée dans l'industrie	17
I.4,1 Les eaux souterraines	18
I.4,2 Les eaux de surface	18
Conclusion.....	20
Chapitre II	
Généralités sur l'encrassement	
II.1 Introduction.....	21
II.2 Le problème industriel.....	22
II.3 L'encrassement.....	22
II.4 Classification : différents types d'encrassement	23

II.4,1 Encrassement particulaire.....	25
II.4,2 Encrassement sous corrosion	25
II.4,3 Entartrage	26
II.4,4 Encrassement biologique	27
II.4,5 Encrassement par réactions chimiques	27
II.4,6 Encrassement par solidification	28
II.5 Classification suivant la nature du dépôt	29
II.5,1 Dépôt dur	29
II.5,2 Dépôt poreux	29
II.5,3 Dépôt mou	29
II.6 Les processus fondamentaux de l'encrassement (Mécanismes).....	30
II.6,1 L'initiation	30
II.6,2 Transfert des particules à la paroi	30
II.6,3 Fixation (ou Adhésion) des particules	30
II.6,4 Réentraînement des particules déposées	31
II.6,5 Vieillessement du dépôt.....	31
II.7 Les paramètres influençant l'encrassement.....	31
II.7,1 Vitesse d'écoulement	31
II.7,2 Température	32
II.7,3 Nature de surface et de matériaux de fabrication	32
II.7,4 Nature de la charge	32
II.8 Conséquences de l'encrassement.....	33

II.8,1 Conséquences thermiques et hydrauliques.....	33
II.8,2 Conséquences organisationnelles et opérationnelles	33
II.8,3 Conséquences sur la durée de vie des équipements	33
II.8,4 Conséquences économiques	34
II.8,5 Conséquences scientifiques et industrielles	34
II.9 Prévention de l'encrassement dans les échangeurs.....	34
II.9,1 Pendant la phase de dimensionnement	35
II.9,1.a Sensibilité à l'encrassement des divers types d'échangeurs	35
II.9,1.b Paramètres physiques permettant de réduire la tendance à l'encrassement	36
II.9,2 Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route.....	36
II.9,3 Pendant la phase de fonctionnement	37
II.9,4 Au moment de l'arrêt de l'échangeur	37
II.10 Nettoyage de l'échangeur.....	37
II.10,1 Nettoyage mécanique	37
II.10,2 Nettoyage hydraulique	38
II.10,3 Nettoyage chimique	38
II.10,4 Nettoyage par projectile	39
Conclusion.....	39
Chapitre III	Partie expérimentale
III.1 Introduction.....	40
III.2 But de l'étude	40

III.3. Méthodologie de l'étude.....	40
III.4. Méthodes et matériaux.....	41
III.4,1. Méthodes.....	41
III.4,2. Matériaux utilisés	41
III.4,2,1 Préparation des échantillons	41
III.4,2,2 Matière encrassée et entartrée.....	44
III.4,2,3. Choix des solutions	48
III.4,2,4. Préparation des solutions	50
III.5 Mode opératoire.....	53
III.5,1 L'encrassement	53
III.5,2 L'entartrage.....	54
III.5,3 la peinture	56
III.6 Protocole de nettoyage chimique.....	58
III.6,1 Protocoles de nettoyage d'entartrage	58
III.6,2 Protocole de nettoyage de l'encrassement des huiles	59
III.6,3 Protocole de nettoyage de tartre et peinture	63
III.7 Résultats et interprétations.....	66
Conclusion.....	83
Conclusion générale.....	84

Chapitre I **Généralités sur les échangeurs de chaleur et l'eau**

Tableau I,1: Principales constantes physiques de l'eau pure.....	17
---	----

Chapitre II **Généralités sur l'encrassement**

Tableau II.1: Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur.....	35
--	----

Chapitre III **Partie expérimentale**

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques du fer blanc..	42
Tableau III.2 : Composition et épaisseur des différentes couches du fer blanc.....	42
Tableau III.3 : Différents concentration des expériences.....	59
Tableau III.4 : Concentrations des solutions de NaOH utilisées pour le nettoyage...	60
Tableau III.5 : Concentrations des solutions de HCl utilisées pour le nettoyage.....	60
Tableau III.6 : Effet de la concentration de HCl après 24 min.....	61
Tableau III.7 : Concentrations des solutions de nettoyage utilisées pour l'échantillon encrassé (ENC).....	61
Tableau III.8 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon ENC.....	62
Tableau III.9 : Paramètres de nettoyage de l'échantillon ENC par une solution de HCl à 5 %.....	62
Tableau III.10 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon PNT.....	63
Tableau III.11 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon PNT.....	65

Tableau III.12 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon PNT.....	65
Tableau III.13 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon.PNT.....	65
Tableau III.14 : Concentrations des solutions de NaOH et de HCl utilisées dans le protocole 05.....	66
Tableau III.15 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.....	66
Tableau III.16 : résultats de nettoyage d'un echantillon entarté.....	68
Tableau III.17 : résultats de nettoyage d'un echantillon entarté.	69
Tableau III.18 : résultats de nettoyage d'un echantillon entarté.	70
Tableau III.19 : résultats de nettoyage d'un echantillon entarté.	71
Tableau III.20 : résultats de nettoyage d'un echantillon encrassé.	72
Tableau III.21 : résultats de nettoyage d'un echantillon encrassé.....	73
Tableau III.22 : résultats de nettoyage d'un echantillon encrassé.	75
Tableau III.23 : résultats de nettoyage d'un echantillon encrassé.....	76
Tableau III.24 : résultats de nettoyage d'un echantillon encrassé.	77
Tableau III.25 : résultats de nettoyage d'un echantillon teinté et entarté.....	78
Tableau III.26 : résultats de nettoyage d'un echantillon teinté et entarté.....	79
Tableau III.27 : résultats de nettoyage d'un echantillon teinté et entarté.....	80
Tableau III.28 : résultats de nettoyage d'un echantillon teinté et entarté.....	81
Tableau III.29 : résultats de nettoyage d'un echantillon teinté et entarté.....	82

Liste des figures

Chapitre I **Généralités sur les échangeurs de chaleur et l'eau**

Figure I.1: Échangeur de chaleur à co-courant.....	7
Figure I.2: Échangeur de chaleur à contre-courant pur.....	7
Figure I.3: Échangeur à courants croisés.....	8
Figure I.4 : Échangeur monotube.....	8
Figure I.5: Exemple d'un échangeur double tubes.....	9
Figure I.6: Échangeur coaxial.....	9
Figure I.7: un échangeur à faisceau tubulaire et calandre.....	10
Figure I.8: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire.....	11
Figure I.9: Échangeur à plaques et joint.....	11
Figure I.10 Représentation d'une goutte d'eau à la surface de l'eau.....	14

Chapitre II **Généralités sur l'encrassement**

Figures II.1: Accumulation de dépôts et corrosion à l'intérieur d'une conduite industrielle.....	21
Figures II.2 : Accumulation de dépôts sur une surface d'échange thermique (phénomène d'encrassement).....	23
Figures II.3 : Répartition des équipements de transfert thermique les plus affectés par l'encrassement.....	24
Figures II.4 : Dépôts particuliers.....	25
Figures II.5 : Encrassement sous corrosion.....	26
Figures II.6 : Entartrage dans un échangeur thermique.....	26
Figures II.7 : Bio-encrassement sur surface industrielle.....	27

Figures II.8 : Dépôt solide par solidification sur échangeur thermique.....	28
Figure II.9 : Dépôts de tartre et de corrosion sur un échangeur thermique.....	29
Figures II.10 : Nettoyage mécanique des tubes par brosse rotative.....	38
Figures II.11 : Nettoyage hydraulique des tubes d'échangeur.....	38
Figures II.12 : Nettoyage des conduites par projectile – comparaison avant/après....	39

Chapitre III

Partie expérimentale

Figure III.1 : Échantillon de fer blanc avant traitement.....	41
Figure III.2 : échantillon de fer-blanc après le découpage.....	43
Figure III.3 : fer-blanc après polissage.....	43
Figure III.4 : exemple de deux échantillons sur la balance.....	44
Figure III.5 : huile 10W40 propre avant l'utilisation.....	44
Figure III.6 : Pot de peinture acrylique GLYLAC 2000.....	45
Figure III.7 : chlorure de calcium CaCl_2	46
Figure III.8 : structure de NaHCO_3	47
Figure III.9 : poudre de bicarbonate de sodium.....	47
Figure III.10 : chlorure de calcium et bicarbonate de sodium.....	48
Figure III.11 : dépôt du tartre sur des plaques de Fer-blanc.....	48
Figure III.12 : ydroxyde de sodium utilisé dans le protocole de nettoyage.....	49
Figure III.13 : Acide chlorhydrique (HCl) utilisé pour l'élimination des dépôts.....	49
Figure III.14 : solution aqueuse de NaOH.....	51
Figure III.15 : solution aqueuse de HCl.....	53
Figure III.16 : échantillons au cours d'encrassement.....	54
Figure III.17 : échantillons propres et après encrassement.....	54

Figure III.18 : pesé 10g de NaHCO ₃ et 10g de CaCl ₂	54
Figure III.19 : 10g de NaHCO ₃ + 10g de CaCl ₂ après l'addition de l'eau.....	55
Figure III.20 : formation du tartre après 30 min de chauffage.....	55
Figure III.21 : le dépôt du tartre après huit jours de séchage.....	56
Figure III.22 : pesé un échantillon entartré.....	56
Figure III.23 : Echantillons teintés (après séchage).....	57
Figure III.24 : Echantillon teinté et entartré (avant et après le séchage).....	57
Figure III.25 : pesé un échantillon teinté et entartré.....	58
Figure III.26 : Nettoyage d'échantillons entartrés.....	59
Figure III.27 : Nettoyage d'un échantillon teinté et entartré.....	64
Figure III.28 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (2 %) et HCl (0,25 %).....	67
Figure III.29 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (1 %) et HCl (0,25 %).....	68
Figure III.30 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (3 %) et HCl (0,25 %).....	69
Figure III.31 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5 %) et HCl (0,25 %).....	70
Figure III.32 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5 %) et HCl (0,5 %).....	71
Figure III.33 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (2% 3% et 5%).....	72
Figure III.34 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (0,25 % 0,5% 0,75% 1% 3% et 5%).....	73

Figure III.35 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (0,25 % 0,5% 0,75% 1% 3% et 5%).....	74
Figure III.36 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (1% 3% et 5%).....	75
Figure III.37 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(5%) et HCl S(1% 3% et 5%).....	76
Figure III.38 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(5%) et HCl (5%).....	77
Figure III.39 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(1%) et HCl (0,25%).....	78
Figure III.40 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(2%) et HCl (0,5%).....	79
Figure III.41 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(3%) et HCl (0,75%).....	80
Figure III.42 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(5%) et HCl (1%).....	81
Figure III.43 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(3%) et HCl (5%).....	82

Liste d'abréviation

Fer-blanc ETP (Electrolytic Tinplate)

ENC : Encrassement

ENT : Entartrage

PNT : Peinture

C : Concentration

V : volume

d : densité

M : la masse molaire

p : la pureté

introduction

générale

Introduction générale

L'industrie moderne occupe une place importante en raison du rôle essentiel de ses produits dans divers domaines. Avec le développement technologique et l'augmentation du rythme de production, les équipements industriels, en particulier les échangeurs de chaleur, sont de plus en plus exposés à des problèmes de fonctionnement pouvant affecter leurs performances et leur efficacité, entraînant ainsi des pertes financières et une diminution du rendement.

Les échangeurs de chaleur figurent parmi les équipements les plus importants utilisés dans différents secteurs industriels, où ils jouent un rôle essentiel dans le transfert de chaleur entre les fluides. Toutefois, ces équipements peuvent rencontrer plusieurs problèmes au cours de leur fonctionnement, notamment l'entartrage, l'encrassement et la pollution de l'eau, qui influencent directement l'efficacité du transfert thermique et augmentent la consommation d'énergie.

La problématique traitée dans ce travail s'inscrit dans les défis industriels actuels et constitue un sujet important pour l'amélioration des performances des systèmes thermiques ainsi que pour la réduction des pannes et des coûts d'exploitation.

Dans ce contexte, nous avons réalisé une étude visant à comprendre les échangeurs de chaleur et les caractéristiques de l'eau utilisée, ainsi qu'à analyser les principaux problèmes associés, tout en proposant des solutions simples et efficaces afin de limiter leurs effets.

Ce travail est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur les échangeurs de chaleur et l'eau, en abordant les définitions, les différents types, les principes de base ainsi que le rôle de l'eau en tant que fluide thermique.

Le deuxième chapitre traite des phénomènes de pollution, d'entartrage et d'encrassement, ainsi que leur impact sur les performances des échangeurs de chaleur.

Enfin, le troisième chapitre est consacré à la partie pratique, où une étude expérimentale ou de terrain a été réalisée afin d'analyser le problème et d'évaluer les solutions proposées sur la base des résultats obtenus.

Chapitre I

**Généralités sur les échangeurs de
chaleur et l'eau**

I.1 Introduction

Les échangeurs de chaleur occupent une place essentielle dans les procédés industriels en assurant le transfert d'énergie thermique entre deux fluides à des températures différentes. Leur utilisation permet d'améliorer les performances énergétiques des installations tout en réduisant les coûts d'exploitation. Cependant, leur fonctionnement est souvent affecté par différents phénomènes tels que l'entartrage, l'encrassement et la corrosion, qui diminuent leur efficacité et leur durée de vie.

L'eau constitue le fluide le plus utilisé dans les systèmes d'échange thermique grâce à ses propriétés physiques et chimiques particulières. Néanmoins, sa composition peut être à l'origine de nombreux dépôts responsables de la dégradation des équipements industriels.

Dans ce chapitre, nous présenterons les généralités sur les échangeurs de chaleur, leurs principes de fonctionnement, leurs classifications ainsi que les principaux problèmes rencontrés lors de leur exploitation. Nous aborderons également les caractéristiques de l'eau, son importance dans l'industrie et les différents types d'eaux utilisées dans les procédés industriels.

I.2 Généralités sur les échangeurs de chaleur

I.2,1 Définition des échangeurs de chaleur

Un échangeur thermique est un dispositif ou un équipement conçu pour transférer une quantité de chaleur d'un fluide à haute température vers un fluide à basse température, sans qu'ils ne se mélangent.

par le biais d'une séparation sans contact physique. On désigne le fluide qui émet de la chaleur comme « fluide chaud », alors que celui qui en absorbe est qualifié de « fluide froid ». Dans les procédés de pétrochimie, il est essentiel de régler la température ou l'état d'un fluide pour sa séparation, sa distillation, son stockage et son transport. Pour cela, il faut ajouter ou soustraire une quantité spécifique de chaleur en utilisant des

dispositifs de transfert thermique, comme des échangeurs, des condenseurs ou des réchauffeurs [1].

I.2,2 Principe de fonctionnement

L'idée fondamentale d'un échangeur de chaleur est de faire passer deux fluides à travers des tuyaux qui facilitent leur interaction thermique. En règle générale, les deux fluides sont introduits en contact thermique via une séparation généralement métallique, ce qui facilite le transfert de chaleur. Généralement, un fluide chaud transmet de la chaleur à un fluide froid.

Le nom de l'appareil provient du fait que les deux liquides transfèrent de la chaleur à travers la paroi. L'enjeu principal est de déterminer une surface d'échange adéquate entre les deux fluides pour assurer le transfert de la quantité de chaleur requise dans un agencement spécifique. Comme mentionné précédemment, le volume de chaleur transféré est influencé à la fois par la surface d'échange entre les deux fluides et par plusieurs autres facteurs, ce qui complique considérablement l'analyse détaillée de ces dispositifs.

Les transferts de chaleur seront également influencés par :

- Les températures à l'entrée,
- Les propriétés thermiques des fluides (capacités calorifiques, conductivité thermique),
- Les coefficients de transfert par convection.[2]

I.2,3 Modes de transfert thermique

Il existe trois modes de transmission de chaleur :

- **La conduction**

La conduction est décrite comme le processus de transmission de chaleur résultant d'une disparité de températures entre deux zones d'un même matériau ou entre deux matériaux qui sont en contact physique.

Ce mode requiert l'existence de substance sans son déplacement.[3]

- **La convection**

La convection est un procédé de diffusion thermique reposant sur le déplacement d'un fluide (gaz, liquide). Elle joue un rôle spécifique dans le transfert de chaleur entre une surface et un fluide en déplacement.

En réalité, la convection représente une fusion des processus de conduction et de transfert de substance. La paroi chaude transmet la chaleur au fluide adjacent par une conduction directe, qui ensuite la diffuse de couche en couche également par conduction. De plus, le déplacement du fluide facilite l'évacuation de l'énergie stockée vers les zones les plus froides. [4]

On identifie la convection forcée où la circulation du fluide est générée par une intervention externe (comme une pompe ou un ventilateur, etc.), et la convection naturelle (libre) où ce déplacement découle simplement des variations de densités, elles-mêmes provoquées par des disparités de températures au sein du fluide.[5]

- **Le rayonnement**

Comme toutes les radiations électromagnétiques, le rayonnement thermique n'a pas besoin de médium matériel pour se diffuser. Par conséquent, il représente le seul moyen d'échange thermique entre des corps éloignés placés dans un environnement transparent tel que l'air ou le vide. [5]

Tous les corps diffusent constamment un rayonnement thermique dans toutes les directions.

I.2,4 Classification des Échangeurs de Chaleur

I.2,4,1 Classification fonctionnelle

Les échangeurs peuvent être amenés à remplir diverses fonctions, potentiellement de manière simultanée, en fonction des objectifs liés à l'un ou aux deux fluides impliqués dans l'échange.

En général, la terminologie utilisée renseigne sur la fonction principale de l'échangeur:

- **Fonction réfrigération**

Les réfrigérants assurent le refroidissement d'un liquide ou d'un gaz à travers la circulation d'un fluide auxiliaire, qui peut être soit un fluide de procédé, soit de l'eau.[6]

- **Fonction réchauffage**

Les échangeurs de chaleur chauffent un fluide de traitement grâce à de la vapeur ou un autre fluide chaud de traitement. [6]

- **Fonction condensation**

Les condensateurs garantissent la condensation complète ou partielle de la vapeur grâce à la circulation d'eau ou d'un fluide de procédé suffisamment frais. Les aérocondenseurs jouent ce rôle en se servant de l'air comme moyen de refroidissement. [6]

- **Fonction évaporation**

Les vaporiseurs garantissent l'évaporation complète ou partielle d'un liquide de processus, la fourniture de chaleur étant assurée par de la vapeur d'eau ou un fluide de procédé potentiellement en phase de condensation.

Les évaporateurs ont pour fonction de concentrer des solutions aqueuses par le biais de l'évaporation, mais ils peuvent également être appelés vaporiseurs. [6]

I.2,4,2 Classement selon les écoulements

a. Courants parallèles Co-courants (anti-méthodiques)

Les deux fluides s'écoulent en parallèle et dans la même direction. Dans un échangeur en parallèle, la température du fluide froid à la sortie est obligatoirement inférieure à celle du fluide chaud à la même sortie. [7]

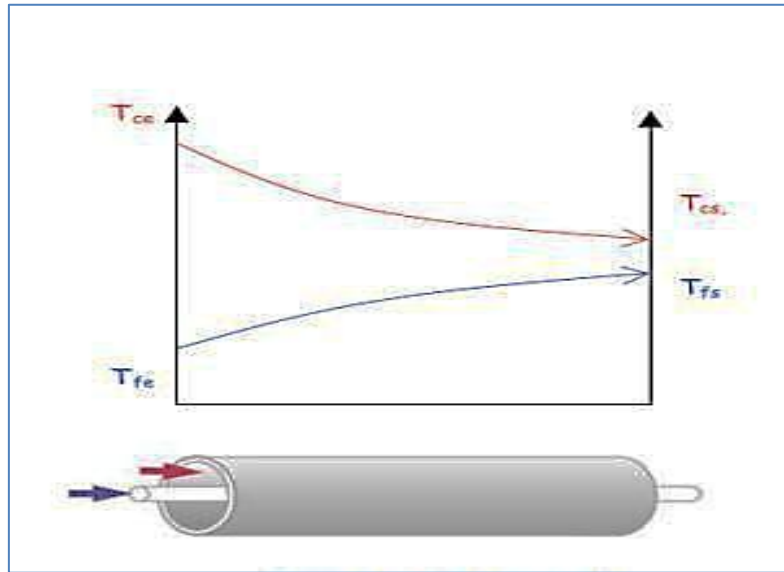


Figure I.1: Échangeur de chaleur à co-courant [8]

b. Contre-courant (méthodiques)

Les deux fluides s'écoulent en parallèle, mais dans des directions contraires. Dans un échangeur à contre-courant, le coefficient d'échange est nettement plus élevé qu'avec un échangeur à co-courant, ce qui fait que la température du fluide froid peut surpasser celle du fluide chaud à sa sortie. [7]

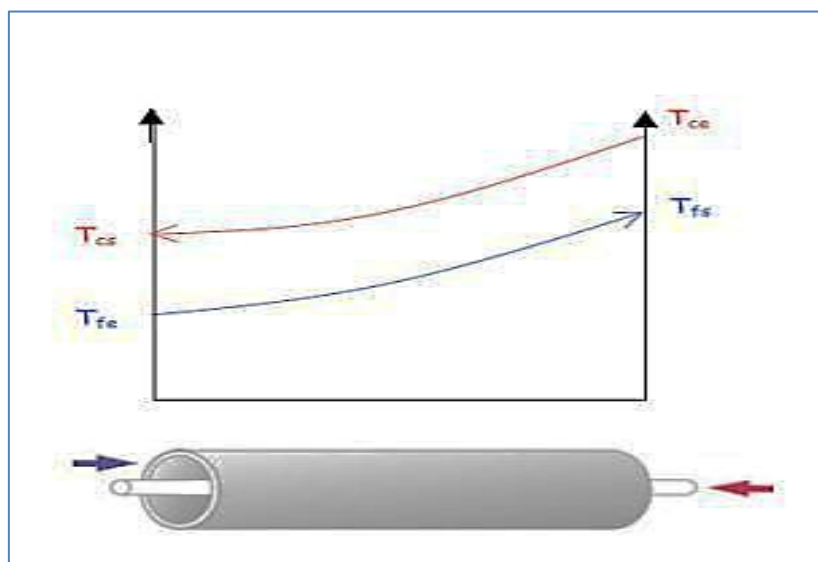


Figure I.2: Échangeur de chaleur à contre-courant pur[8]

c. Courants croisés

On utilise des échangeurs de chaleur à courants croisés pour les transferts entre le gaz circulant dans la calandre et le liquide qui circule à l'intérieur des tubes. Le flux autour des tubes est quasiment à angle droit par rapport au faisceau de tubes.[7]

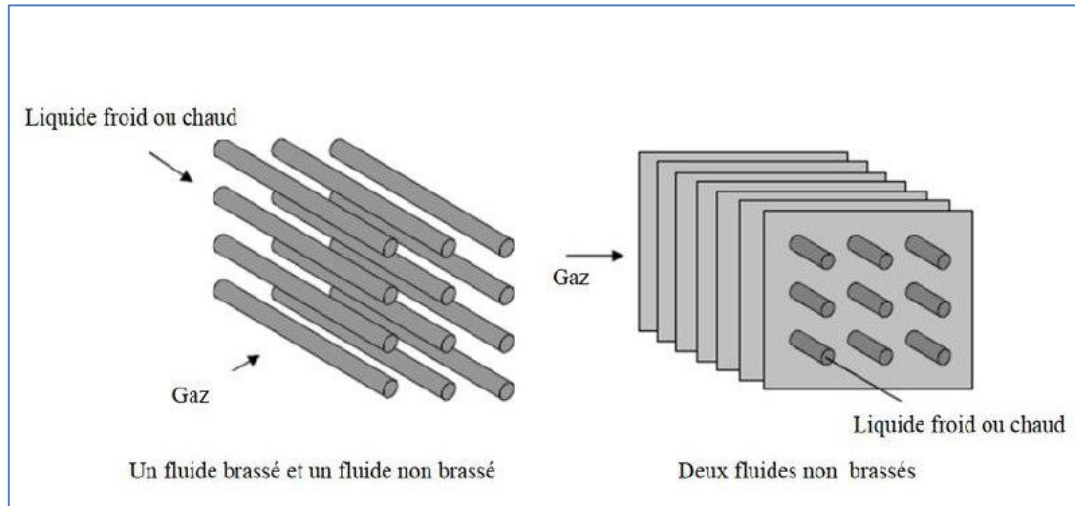


Figure I.3: Échangeur à courants croisés [9]

I.2,4,3 Classement technologique

a. Échangeurs tubulaires

1. Échangeur monotube

Où le tube est inséré à l'intérieur d'un conteneur et prend généralement la forme d'une



Figure I.4 : Échangeur monotube.[11]

2. Échangeur double tubes

Un fluide (habituellement le chaud) s'écoule à travers le tube interne, tandis que l'autre se déplace dans l'espace situé entre les deux tubes. Le passage de chaleur du fluide chaud au fluide froid se fait par l'intermédiaire de la paroi qui forme le tube intérieur. Ils se composent de tubes dont les parois constituent la surface d'échange. Ils peuvent être constitués d'un seul tube (serpentin), de deux tubes concentriques (échangeurs bitubes) ou d'un faisceau de tubes contenu dans un revêtement nommé calandre.[12]

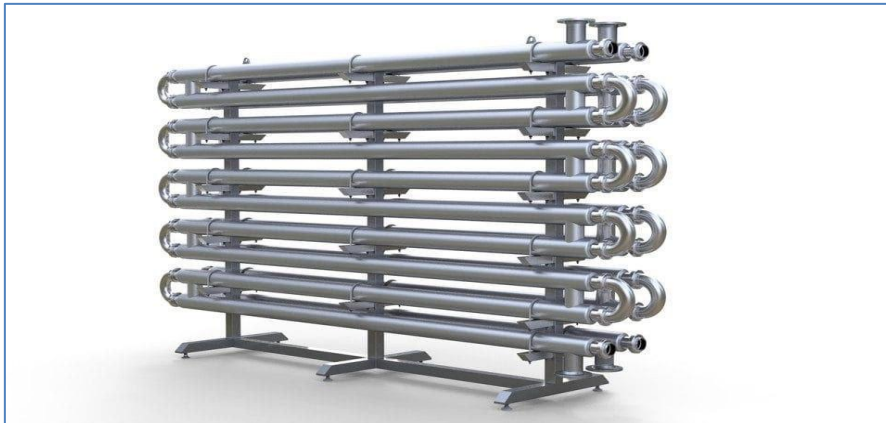


Figure I.5: Exemple d'un échangeur double tubes [13].

3. Échangeur coaxial

Où les conduites sont fréquemment courbées ; habituellement, le fluide chaud ou à haute pression circule à travers le conduit interne.[14]

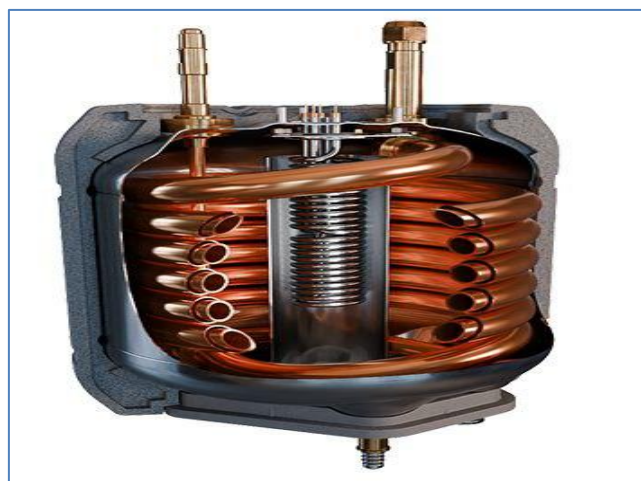


Figure I.6: Échangeur coaxial [15].

4. Échangeur à faisceau tubulaire et calandre

Ce genre d'échangeurs est incontestablement le plus courant dans les installations de transformation des secteurs chimique et pétrochimique. Voici ci-dessous un modèle typique d'un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire, également connu sous les noms d'échangeur multitubulaire ou d'échangeur à tubes et calandre. L'engin comprend un groupe de tubes organisés à l'intérieur d'une structure appelée calandre. Un des fluides circule à travers les tubes, tandis que l'autre le fait à travers la calandre, enveloppant les tubes. On optimise le nombre et la forme des chicanes pour favoriser un meilleur transfert thermique. Des boîtes de distribution sont fixées à chaque bout du faisceau, garantissant ainsi la circulation du fluide à l'intérieur des tubes. Il est possible de les configurer en mode simple ou en mode multiple. La calandre est également dotée de conduits d'entrée et de sortie (connexions) pour le fluide qui passe en dehors des tubes selon la trajectoire dictée par les chicanes. L'optimisation du diamètre des tubes est également effectuée en tenant compte de la nature du fluide qui y passe.[16]

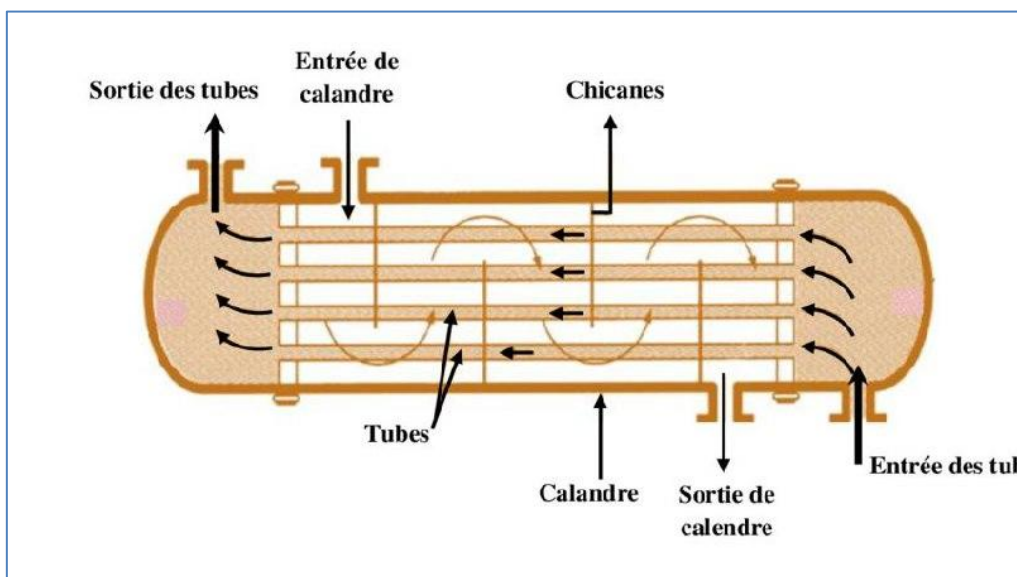


Figure I.7: un échangeur à faisceau tubulaire et calandre [17].

b. Échangeurs à plaques

1. Échangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont composés de plaques corrigées, nervurées ou dotées de picots. Le tracé du profil des plaques peut être assez diversifié, mais il conserve toujours un double objectif de renforcement du transfert thermique et de résistance à la pression par multiplication des points de contact.[18]



Figure I.8: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire [19].

2. Échangeurs à plaques avec joints

La surface d'échange est ainsi constituée de plaques métalliques, munies de joints, qui sont maintenues serrées les unes contre les autres grâce à des tirants placés entre deux flasques, dont l'un est fixe et l'autre mobile.[18]

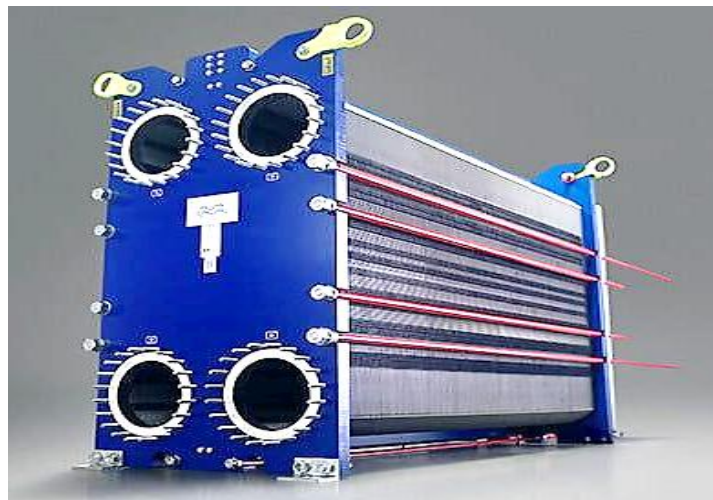


Figure I.9: Échangeur à plaques et joint [20]

I.2,5 Les problèmes de fonctionnement d'un échangeur

Les utilisateurs d'échangeurs de chaleur sont couramment confrontés à des problèmes tels que l'encrassement, la corrosion et les vibrations.

L'industrie continue de peiner à comprendre l'encrassement et la corrosion, deux phénomènes qui se manifestent par :

- une dépense d'énergie supplémentaire.
- le remplacement des appareils corrodés.
- des coûts d'arrêt des installations pour démontage et nettoyage. [21]

I.2,5,1 L'encrassement

Le phénomène de l'encrassement, qui peut être globalement décrit comme l'amas d'éléments solides non désirés sur une interface, touche un large éventail de processus industriels.

Ce dépôt, en constante évolution, peut être composé de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, de produits issus d'une réaction chimique ou encore être le mélange de plusieurs de ces composants.

Il est primordial de prendre en compte ce phénomène d'encrassement afin de sélectionner un échangeur thermique aux dimensions appropriées, car l'encrassement peut significativement diminuer la capacité de transfert de chaleur et provoquer une hausse de la chute de pression.

Un nettoyage et une maintenance régulière sont nécessaires. Étant donné que l'accumulation de saleté et les problèmes d'entretien s'intensifient avec le temps, il est nécessaire d'effectuer des nettoyages réguliers.

Il est fréquemment essentiel de mettre en place des sortes de cloisons qui purifient les impuretés des fluides caloporteurs avant leur entrée dans l'échangeur, afin de minimiser les dangers d'encrassement.[21]

I.2,5,2 La corrosion

La dégradation des matériaux métalliques, y compris les métaux et les alliages, désigne l'ensemble des processus qui entraînent leur détérioration progressive en passant à un état oxydé, thermodynamiquement plus stable, semblable à celui que l'on observe dans les minerais naturels.

Dans l'utilisation quotidienne, les matériaux métalliques sont fréquemment en interaction avec un environnement liquide ou gazeux corrosif, ce qui signifie que la corrosion représente un enjeu de surface, ou plus précisément une problématique d'interface entre un métal et un environnement liquide ou gazeux hostile.

Les processus de décomposition des matières métalliques et non métalliques diffèrent généralement dans leur essence, pourtant, ils aboutissent à un résultat similaire, à savoir la démolition du matériau.[22]

I.2,5,3 La vibration

Dans la conception d'un échangeur, les vibrations sont un facteur crucial à considérer, tout comme les transferts de chaleur ou les pertes de pression. En plus des éléments traditionnels (comme les chocs ou le spectre des vibrations) provenant de l'environnement extérieur, les échangeurs génèrent également leurs propres vibrations dues au passage du fluide à travers eux.

Ce problème se trouve principalement dans les échangeurs à tubes et à calandre, ce phénomène vibratoire est rarement, voire jamais, observé dans les autres types d'échangeurs.

Selon le débit du fluide du côté de la calandre, les tubes qui vibrent à leurs fréquences naturelles peuvent se mouvoir au point de provoquer une collision. [21]

I.3 Généralités sur l'eau

I.3,1 Définition de l'eau

L'eau, appelée en latin arqua (d'où aquatique) et en grec hydro (qui a donné hydrique, hydrologie), est un élément incolore, inodore et sans goût lorsqu'elle se trouve à l'état liquide dans des conditions standard. Elle est constituée de molécules formées par l'association de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, ce qui lui confère la formule chimique H_2O .

Toutefois, elle demeure l'élément essentiel de tout organisme vivant.[22]



Figure I.10 Représentation d'une goutte d'eau à la surface de l'eau [23]

I.3,2 Importance de l'eau dans les procédés industriels

L'eau, qui occupe une place centrale dans diverses activités industrielles, est responsable d'environ un quart de la consommation mondiale. On la retrouve fréquemment dans les centrales charbonnières, les raffineries, les usines de produits chimiques et les lieux de production d'énergie.

Dans ces situations, l'eau ne se limite pas à « circuler » sans objectif. Elle sert de moyen de transfert thermique dans les échangeurs thermiques, réduit la température des installations, dissout des composés ou participe directement à des réactions chimiques.

Elle garantit le transfert de chaleur dans les systèmes thermiques, autorisant les dispositifs à opérer à une température adéquate, sans surchauffe.

Toutefois, il est important de rester prudent : pas toutes les eaux sont appropriées. La performance des installations est fortement influencée par la qualité. Si elle contient trop de sels minéraux, de gaz ou d'impuretés, cela pourrait rapidement devenir problématique. Formation de tartre, corrosion sur les composants, échangeurs obstrués...

Les dégâts sont réellement authentiques. C'est pourquoi un entretien adéquat est indispensable, souvent par le biais de produits chimiques particuliers, pour assainir les circuits et éviter ces désagréments.[24]

I.3,3 Propriétés Physiques

I.3,3,1 Masse volumique

La densité change en fonction de la température et de la pression, la densité de la glace est inférieure à celle de l'eau. En effet, l'eau atteint sa densité maximale à une température de 3 984 °C. [25]

Par conséquent, l'eau est vue comme un liquide incompressible. En réalité, c'est un fluide légèrement élastique : son volume diminue approximativement de 0 048% chaque fois que la pression s'accroît d'une atmosphère.[26]

I.3,3,2 Propriétés oxydo-réductrices

Il est essentiel de prendre en compte l'eau comme un système redox, car son domaine de stabilité est restreint par ses réactions d'oxydation et de réduction. L'agent oxydant est le pôle positif, qui indique un déficit en électrons. Le pôle négatif se distingue par une surabondance d'électrons, agissant en tant qu'agent réducteur susceptible de donner des électrons.[27]

I.3,3,3 Conductivité électrique de l'eau

L'eau possède une faible conductivité. La plus grande pureté de l'eau que nous avons obtenue présente une conductivité de 42 micro siemens par mètre à 20 °C (équivalant à une résistivité de 23 8 mégohms-centimètres). Elle s'accroît lors de la dissolution de sels dans l'eau et fluctue selon la température.[28]

I.3,3,4 Propriétés Optiques

La clarté de l'eau est déterminée par la longueur d'onde de la lumière qui y pénètre. L'eau a une forte capacité d'absorption de l'orange et du rouge dans le spectre visible, ce qui explique la teinte bleue de la lumière qui traverse en épaisseur, cette clarté étant fréquemment employée pour détecter certaines formes de pollution.[28]

I.3,4 Propriétés Chimiques

L'eau est un solvant efficace, donc susceptible d'être rapidement polluée. La dissolution d'une substance représente une rupture de sa cohésion interne, qui est le résultat des forces interatomiques et intermoléculaires. Grâce à ses caractéristiques électriques et sa structure moléculaire, l'eau est particulièrement capable de dissoudre une grande variété de substances gazeuses, liquides polaires et surtout solides SS[29] (Tableau 1).

Tableau I,1: Principales constantes physiques de l'eau pure [30]

Constantes physiques de l'eau pure	Valeurs
Température d'ébullitions sous 760 mm Hg (101 325 02 Pa)	100%
Capacité thermique massique à 15°C	4 186 8 j .g -1
Enthalpie de vaporisation à 100°C	2252 5 j. g -1
Conductivité thermique à 20°C	5 98 mW. cm -1. K-1
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	1 333
Masse volumique à 4°C E	1g .cm -3 (par définition)

I.4 Différents types de l'eau utilisée dans l'industrie

L'eau est un élément crucial sur notre planète, car elle soutient l'existence de la vie terrestre. Pour l'homme, l'eau destinée à la consommation est essentielle pour les processus industriels tels que ceux de l'agroalimentaire.

L'approvisionnement en eau pour les habitants peut provenir de deux sources aux caractéristiques très distinctes :

- L'exploitation des eaux souterraines (comme les puits et les sources) est compliquée en raison de leur inaccessibilité.

- Les eaux de surface (tels que les lacs, rivières et barrages) sont exposées aux éléments environnants, ce qui les rend susceptibles à la pollution [31].

I.4,1 Les eaux souterraines

L'humanité tire principalement son eau douce des eaux souterraines. 30% de l'eau douce de la planète est représentée par les eaux souterraines. Le reste inclut les calottes glaciaires (69%) et l'ensemble des rivières et des lacs (1%) [32].

L'eau souterraine provient principalement de l'infiltration de l'eau pluviale qui passe à travers les strates souterraines pour atteindre les nappes aquifères.

La composition chimique de l'eau souterraine est fortement influencée par la nature géologique du sol.

Ces eaux ont leur provenance dans les eaux de surface qui s'infiltrent à travers diverses strates du sol et atteignent la nappe phréatique. Ce processus naturel de filtration permet la purification de l'eau [31].

Les eaux souterraines sont définies comme toutes les eaux présentes sous la surface terrestre, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le substrat, et se distinguent par une faible turbidité due à une filtration naturelle significative.

Étant généralement protégée des sources de pollution, elle présente une faible contamination bactérienne. Cela entraîne une forte dureté de l'eau, et les eaux souterraines peuvent entrer en contact avec des formations rocheuses qui contiennent des métaux bivalents tels que le calcium ou le magnésium. De plus, une forte concentration de fer et de magnésium se retrouve dans les eaux souterraines.

I.4,2 Les eaux de surface

En Algérie, l'exploitation des eaux de surface a connu une hausse ces dernières années, répondant aux exigences de l'agriculture, de la fourniture d'eau potable et de l'industrie. Toutefois, ces eaux de surface sont exposées à diverses contaminations (naturelles et industrielles) et leur qualité est souvent compromise. Par conséquent, il serait nécessaire

d'appliquer des modifications physiques, chimiques et biologiques pour les rendre potables.

L'identification du traitement nécessite une analyse détaillée et spécifique afin d'écartier les paramètres indésirables et nocifs qui affectent la qualité de l'eau.

Cette source se distingue par une pollution microbienne et chimique à son maximum. C'est pourquoi un classement est effectué pour théoriquement retirer les eaux les plus contaminées et choisir les plus pures afin de les utiliser pour l'approvisionnement en eau.

On utilise souvent ces eaux dans les zones fortement industrialisées.

Contrairement aux eaux souterraines, les eaux de surface sont celles qui se trouvent stockées sur la surface des continents. Elles proviennent soit des nappes souterraines qui émergent et constituent une source, soit des eaux de ruissellement (comme les fleuves, rivières, barrages, mares et marigots).

Ces dernières se distinguent par une surface d'interaction eau-atmosphère constamment en mouvement et une vitesse de circulation notable.

Elle change de température en fonction des saisons et du climat, et La composition de ces particules en suspension varie en fonction des précipitations, du type de sol et du relief environnant. La composition en minéraux varie en fonction du sol, des précipitations et des rejets. Généralement, l'eau de surface est riche en oxygène et pauvre en dioxyde de carbone.

Les eaux de surface englobent les eaux maritimes, ainsi que celles des rivières, fleuves, étangs, lacs, barrages, réservoirs et glaciers. C'est une masse d'eau bien distincte, qu'elle soit en repos ou en déplacement, solide ou fluide.

La contamination de cette eau peut entraîner divers types de maladies, comme : le choléra, la typhoïde, les hépatites, la bilharziose et les intoxications chimiques.[33]

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales relatives aux échangeurs de chaleur et à l'eau utilisée dans les procédés industriels. Les échangeurs de chaleur jouent un rôle primordial dans le transfert thermique et l'optimisation énergétique des installations industrielles. Toutefois, leur efficacité peut être compromise par des phénomènes tels que l'encrassement, l'entartrage, la corrosion et les vibrations.

L'étude des propriétés physiques et chimiques de l'eau a également montré son importance dans le fonctionnement des équipements thermiques. La qualité de l'eau influence directement les performances des échangeurs et peut favoriser la formation de dépôts responsables de nombreuses dégradations.

Ces généralités constituent une base indispensable pour comprendre les mécanismes de formation des dépôts et les méthodes de nettoyage et de traitement qui seront développés dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Généralités sur l'encrassement

II.1 Introduction

L'utilisation industrielle des échangeurs de chaleur ne pose pas de problèmes particuliers dans le cas où les parois des surfaces d'échanges restent propres pendant toute la durée du fonctionnement de l'appareil.

Mais dans de nombreuses applications, il n'en est pas ainsi, la circulation de l'un des fluides est souvent accompagnée de la formation des dépôts, l'épaisseur de ce dernier croît avec le temps.

La présence de ces dépôts réduit le flux thermique et empêche de réaliser entièrement l'opération désirée. Il est donc indispensable de procéder à un nettoyage périodique d'un tel échangeur.

L'encrassement reste l'un des phénomènes les moins compris de l'industrie. La hausse importante du coût de l'énergie et des matières premières durant ces dernières années et le besoin pour les industries de devenir plus compétitives, ont rendu nécessaire une approche plus approfondie de ces mécanismes [34].



Figures II.1: Accumulation de dépôts et corrosion à l'intérieur d'une conduite industrielle.[35]

II.2 Le problème industriel

Les utilisateurs d'échangeurs thermiques se heurtent principalement à des problèmes liés à l'encrassement, la corrosion, les vibrations et la résistance mécanique. Néanmoins, plusieurs études publiées [36] indiquent que l'accumulation de salissures demeure la principale préoccupation des professionnels du domaine des appareils de transfert thermique. L'association encrassement – détérioration des transferts thermiques a un impact significatif sur la rentabilité de l'opération. Les dépenses associées à la salissure des échangeurs s'élèvent à environ 700 millions d'euros annuellement [37]. Ces coûts englobent les dépenses associées, d'un côté, à la conception (surdimensionnement de la surface d'échange à réaliser, ajout d'équipements de nettoyage) pour 20%, et de l'autre côté, au fonctionnement (perte de production, baisse du transfert, coûts d'entretien et nettoyage) pour 80%. En dépit des efforts acharnés depuis les travaux initiaux de Kern & Seaton [38] en 1959, l'encrassement continue d'être un phénomène mal compris où la pratique empirique est le moyen le plus fréquemment employé. Effectivement, la diversité des flux et l'éventail des conditions industrielles actuelles contribuent largement à l'ignorance du phénomène.

Des travaux de recherche sont actuellement en cours sur deux axes, qui bien que distincts, sont par ailleurs complémentaires. Le premier se rapporte à la détection de l'encrassement, tandis que le second, auquel nous désirons nous associer, porte sur les produits et équipements dédiés au nettoyage de tels dépôts.

II.3 L'encrassement

L'encrassement, dû à l'accumulation de particules solides non désirées sur une surface, affecte un grand nombre de processus industriels. En ce qui concerne les échangeurs de chaleur, un gradient thermique important près de la surface peut déranger les

Mécanismes de transfert thermique, ce qui diminue l'efficacité du transfert de chaleur. Ceci peut provoquer une surchauffe, une diminution de l'efficacité énergétique et, dans certaines situations, des préjudices aux appareils. L'encrassement dans ces dispositifs se

révèle principalement par l'accumulation de particules solides, de sédiments ou de biofilm qui se créent sur les faces des tuyaux ou des plaques.

Les éléments qui contribuent à l'accumulation de dépôts comprennent la rapidité du liquide, la température, la composition chimique ainsi que les propriétés des matériaux qui entrent en contact avec le liquide.[39]

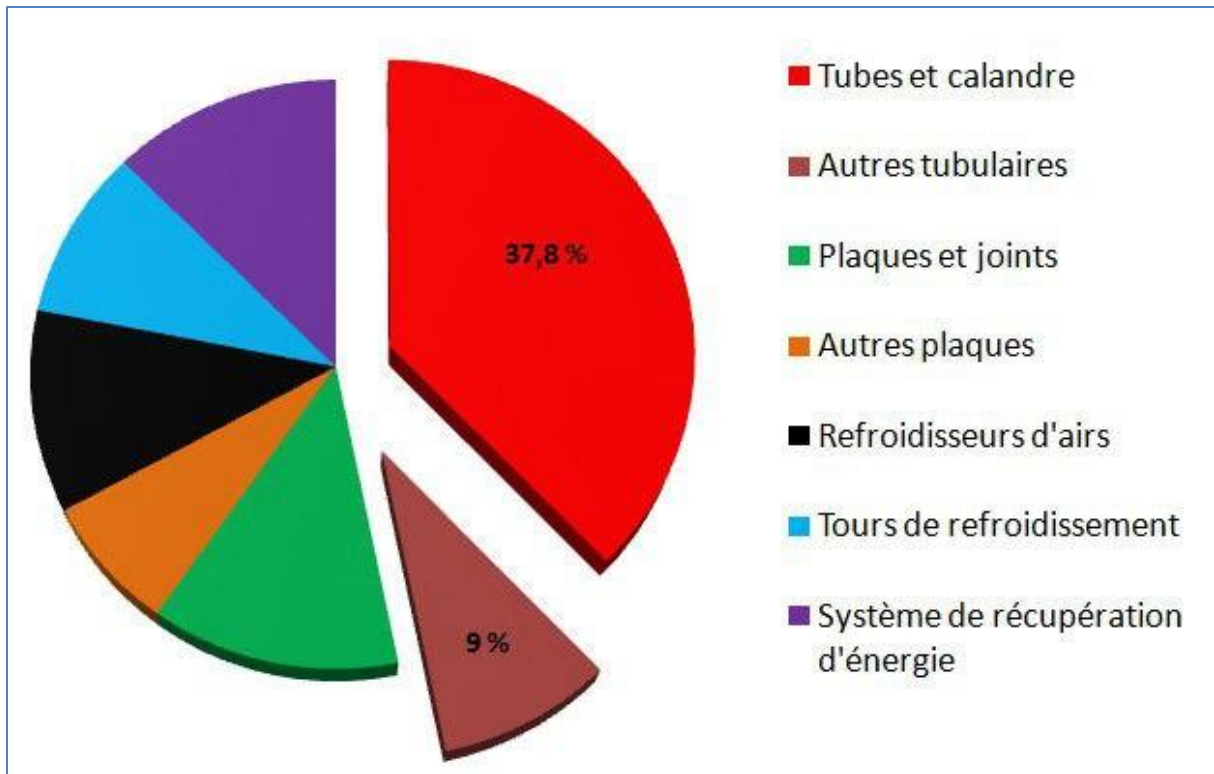


Figures II.2 : Accumulation de dépôts sur une surface d'échange thermique (phénomène d'encrassement) [40]

II.4 Classification : différents types d'encrassement

L'encrassement des équipements de transfert thermique peut être défini comme le dépôt de matériaux ou des substances considérées sur les surfaces d'échanges.

Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments.[41]



Figures II.3 : Répartition des équipements de transfert thermique les plus affectés par l'encrassement.[42]

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, selon les conditions d'utilisations de l'échangeur ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt : pour cela on distingue selon [43 44, 45]

- Encrassement particulaire,
- Entartrage,
- Corrosion
- Encrassement biologique
- Encrassement par réaction chimique
- Encrassement par solidification

Mais la plupart des dépôts réels sont le résultat de la combinaison d'au moins deux des types cités, un type peut prédominer et accélérer à la contribution des autres.

En considérant qu'une seule catégorie de ce phénomène plusieurs recherches ont été faites pour prévoir des méthodes performantes qui mettent en évidence des différents moyens pour minimiser l'encrassement ; la plupart des travaux se sont basés seulement sur le type d'encrassement particulaire (phénomène de déposition et de réentraînement)[46]

II.4,1 Encrassement particulaire

C'est le dépôt de particules transportées par le flux de divers fluides industriels :

- L'eau des chaudières qui renferme des substances corrosives (oxydes et hydroxydes de fer),
- Les eaux issues des tours de refroidissement,
- Les particules en suspension dans l'air,
- Les flux gazeux susceptibles d'être fortement chargés en particules de poussière,
- Les fumées industrielles provenant des résidus solides de combustion.[47]



Figures II.4 : Dépôts particulaires.[48]

II.4,2 Encrassement sous corrosion

L'encrassement dû à la corrosion est causé par une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert thermique et le fluide en circulation, ce qui engendre des particules (oxydes) responsables de l'encrassement particulaire. [47]



Figures II.5 : Encrassement sous corrosion.[49]

II.4,3 Entartrage

l'associe souvent à la formation d'un solide cristallin (tartre) à partir d'une solution liquide. Il est donc déterminé par la composition de l'eau industrielle. Cela traduit le mouvement de l'équilibre calco-carbonique de l'eau vers la formation de tartre, à cause de la dureté de l'eau et de la hausse de température. L'accumulation de calcaire peut se produire dans les échangeurs thermiques à eau, dans les installations de dessalement d'eau de mer ou saumâtre, dans les chaudières, dans les échangeurs utilisés dans le secteur agroalimentaire, ainsi que dans les systèmes géothermiques. On dispose de plusieurs techniques pour prévenir l'accumulation de tartre. [47]



Figures II.6 : Entartrage dans un échangeur thermique.[50]

II.4,4 Encrassement biologique

Cela est attribué à la croissance de micro-organismes (tels que les bactéries, les algues ou les champignons) qui forment un film lorsqu'ils entrent en contact avec la surface d'échange : à une échelle macroscopique, cela peut même être illustré par l'apparition de coquillages. Les mesures de prévention visent soit à éliminer les micro-organismes, soit à freiner leur prolifération. Les traitements appropriés emploient des biocides (chlore) nocifs pour la majorité des micro-organismes. Dans ce contexte, c'est une action rapide. En général, la décision finale sur le traitement à mettre en œuvre est un équilibre entre les questions de toxicité, de pollution, de coût et d'entretien. L'encrassement biologique est une tendance naturelle car les bactéries se retrouvent partout dans l'eau ; de plus, les conditions physico-chimiques observées dans les échangeurs tendent généralement à favoriser sa croissance. [47]



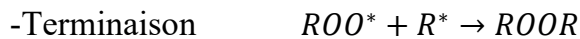
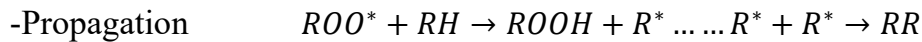
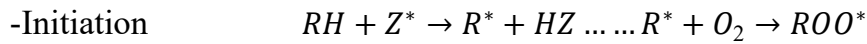
Figures II.7 : Bio-encrassement sur surface industrielle.[51]

II.4,5 Encrassement par réactions chimiques

observe ce genre de colmatage lorsqu'une réaction chimique a lieu à proximité d'une surface d'échange et que les solides issus de cette réaction s'y accumulent. Ce genre de salissure est fréquemment associé aux réactions de polymérisation qui provoquent la création d'un dépôt. Les secteurs principalement touchés incluent l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourdes), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les systèmes. [47]

EPSTEIN souligne les caractères généraux de la cinétique chimique de l'encrassement par réaction chimique comme étant une réaction de polymérisation par auto-oxydation qui se propage comme une réaction en chaîne à radicaux libres ou l'oxygène joue un rôle prépondérant.

Le principe du schéma réactionnel serait le suivant :



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. [52]

II.4,6 Encrassement par solidification

Ceci concerne la cristallisation d'un liquide pur lorsqu'il entre en contact avec une surface d'échange sous-refroidie (création d'une couche de glace ou de givre à l'intérieur des tuyaux) ou l'accumulation d'un élément à point de fusion élevé d'un liquide lorsqu'il est en contact avec une surface de transfert thermique froide (accumulation d'hydrocarbures paraffiniques). Une vapeur peut aussi se transformer en solide sans passer par l'état liquide (formation de givre).[47]



Figures II.8 : Dépôt solide par solidification sur échangeur thermique.[53]

II.5 Classification suivant la nature du dépôt

II.5,1 Dépôt dur

C'est une structure dense et renforcée qui ne se dégrade pas avec un simple jet d'eau ou de vapeur, mais qui requiert un entretien mécanique ou chimique adéquat.

C'est une situation qui concerne le dépôt corrosif ou cristallin. L'épaisseur d'un dépôt dur est directement liée à sa résistance thermique.[54]

II.5,2 Dépôt poreux

Il s'agit du matériau d'un dépôt solide qui se manifeste par une structure moins dense, en conséquence des conditions de fonctionnement. Cette situation est plus grave que la précédente lorsque le liquide piégé dans les pores a une conductivité thermique inférieure à celle du matériau solide.[54]

II.5,3 Dépôt mou

Il en va de même pour les boues, les poudres de coke ou de fibres végétales. Dans ce contexte, la résistance est davantage associée au fluide confiné qu'au matériau formant la matrice. Un simple coup de souffle peut donner des résultats appréciables lors du nettoyage.[54]

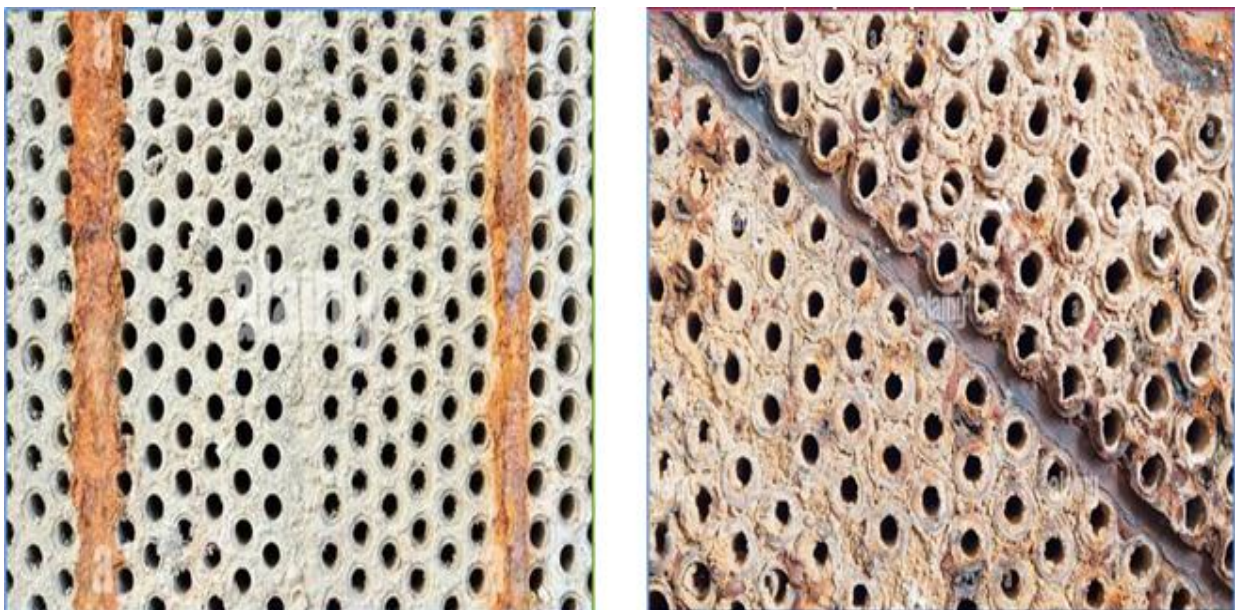


Figure II.9 : Dépôts de tartre et de corrosion sur un échangeur thermique.[55]

II.6 Les processus fondamentaux de l'encrassement (Mécanismes)

L'encrassement est un processus complexe résultant de l'interaction d'un grand nombre de variables. Sur un plan fondamental, le processus de salissure suit des phases spécifiques de progression sur une surface. Il s'agit de :

- L'initiation
- Transfert des particules à la paroi
- Fixation (ou Adhésion) des particules
- Réentraînement des particules déposées
- Vieillissement du dépôt

II.6,1 L'initiation

La surface est préparée durant la phase d'initiation. La période initiale de retard est affectée par la température de surface des matériaux, le type de matériau, la condition de surface, la rugosité et le traitement de surface. Avec l'accroissement du niveau de sursaturation par en ce qui concerne la température de la surface de transfert thermique ou l'élévation de cette dernière, la durée d'induction se réduit. Au cours de la phase d'induction, des noyaux destinés à la cristallisation du dépôt se créent aussi pour favoriser la croissance biologique. Cette durée peut varier considérablement, allant de plusieurs semaines à quelques minutes, voire même quelques secondes. [56]

II.6,2 Transfert des particules à la paroi

Dans cette section, les particules polluantes du matériau en vrac sont déplacées vers la surface de transfert thermique via la couche limite. Cela est déterminé par les caractéristiques physiques du système et la disparité de concentration entre la masse et l'interface de surface fluide.

Le transport se réalise par divers phénomènes, y compris la diffusion, la sédimentation et thermophorèse. [56]

II.6,3 Fixation (ou Adhésion) des particules

À ce stade, les dépôts s'attachent à la surface et entre eux. Les ions de sel qui se rapprochent de la surface sont attirés par des forces électromagnétiques et se fixent à celle-ci, créant une nucléation qui évolue progressivement avec le temps pour générer

une couche d'encrassement. Par conséquent, les forces qui s'exercent sur les particules lorsqu'elles se rapprochent de la surface n'ont aucun pouvoir sur leur attachement. Le phénomène d'attachement est dominé par les caractéristiques des matériaux, telles que la dimension, la densité et l'aspect de surface. [56]

II.6,4 Réentraînement des particules déposées

Le réentraînement des particules déposées est dû aux forces de cisaillement exercées sur le dépôt, à l'érosion ou à l'écaillage. Une portion de la substance est retirée de la surface juste après son application, tandis qu'une autre l'est ultérieurement. Habituellement, c'est l'action de forces de cisaillement à la jonction entre le fluide et la couche de dépôt encrassant qui provoque cet enlèvement. Les forces de cisaillement sont influencées par le gradient de vitesse à la surface, la viscosité du liquide et la rugosité de la surface. [56]

II.6,5 Vieillessement du dépôt

Le processus de vieillissement commence dès le début du dépôt. Avec le temps, au cours du processus de vieillissement, il peut y avoir une modification du cristal visant à augmenter ou réduire la résistance aux dépôts. Durant le processus de vieillissement, les caractéristiques mécaniques du revêtement peuvent se modifier suite à des altérations de la structure cristalline ou chimique. Une réaction chimique pouvant altérer la composition chimique du dépôt peut également affecter sa résistance mécanique. Par ailleurs, la couche de biosalissure peut être affaiblie par la corrosion de surface causée par un empoisonnement progressif des micro-organismes. [56]

II.7 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.7,1 Vitesse d'écoulement

Un débit important du fluide réduit tous les types de colmatage.

Toutefois, un débit élevé nécessite une puissance de pompage considérable et peut favoriser l'érosion du métal. [54]

II.7,2 Température

Le paramètre de la température entre le fluide et le métal est crucial. Pour des produits polymérisables contenant des chaînes insaturées (oléfines), une élévation excessive de la température peut entraîner une réticulation des gommages présentes. Avec la présence d'un catalyseur, ce phénomène s'amplifie et favorise largement les réactions de polymérisation. Il n'est donc plus envisageable de dissoudre les gommages par auto-nettoyage.

On observe souvent le processus de réticulation des gommages dans les bouilleurs. La température influence également la rapidité d'une réaction chimique. La constante de vitesse de la réaction chimique est liée à la rapidité de l'encrassement au fil du temps. [54]

II.7,3 Nature de surface et de matériaux de fabrication

La texture de la paroi du tube et les dimensions des cavités présentes sur cette dernière participent au commencement de l'encrassement. Une sélection judicieuse des matériaux de construction préviendra l'accumulation due à la corrosion. [54]

II.7,4 Nature de la charge

Un chargement plus ou moins pesant renfermant des éléments chimiques polymérisables peut entraîner un encrassement par polymérisation. Dans l'industrie, le pourcentage d'oléfine dans les essences est restreint à 1-2% pour résoudre les problèmes de colmatage des équipements. [54]

II.8 Conséquences de l'encrassement

II.8,1 Conséquences thermiques et hydrauliques

L'encrassement conduit à une diminution de l'efficacité des transferts thermiques entre les fluides. Le dépôt formé sert d'isolant thermique, diminuant ainsi la quantité d'énergie transférée au fluide secondaire.

Pour pallier cette baisse de performance, il est courant de surdimensionner les échangeurs de chaleur, une pratique qui peut néanmoins s'avérer peu efficace.

De plus, l'accroissement des dépôts solides entraîne une hausse des pertes de charge à l'intérieur des tubes. Ce processus entraîne une activité accrue des pompes et une augmentation de la consommation énergétique. [57]

II.8,2 Conséquences organisationnelles et opérationnelles

L'accumulation exige l'exécution de procédures d'entretien pour supprimer les dépôts constitués. La production du procédé est directement influencée par la baisse des performances thermiques et les interruptions programmées de maintenance.

La conception initiale des échangeurs de chaleur est également influencée par l'exigence de leur nettoyage, ceux-ci étant souvent conçus pour permettre un démontage facile qui facilite l'accès aux tubes. Par conséquent, les échangeurs les plus couramment employés ne sont pas nécessairement les plus efficaces, mais ceux qui sont les plus simples à maintenir. [57]

II.8,3 Conséquences sur la durée de vie des équipements

Impacts sur la longévité des équipements.

L'accumulation de saleté favorise l'usure anticipée des appareils, en particulier lorsqu'il y a des manifestations de corrosion. Les équipements peuvent également subir des dommages lors des opérations de nettoyage, en particulier mécaniques.

D'autres techniques de nettoyage, comme l'emploi d'ultrasons ou de substances chimiques, sont en cours d'élaboration. On examine également l'utilisation des ultrasons comme technique préventive pour réduire l'apparition du colmatage. Par

ailleurs, des traitements de surface et des revêtements particuliers sont employés pour minimiser la corrosion et l'encrassement biologique. [57]

II.8,4 Conséquences économiques

L'accumulation de saleté entraîne des dépenses importantes dues au fait que les échangeurs sont trop grands, à une consommation d'énergie accrue, aux interruptions de production, ainsi qu'aux nettoyages nécessaires et aux systèmes de prévention mis en place.

Évaluer avec précision le coût total de l'encrassement s'avère complexe. Cependant, de nombreuses recherches indiquent que ce phénomène constitue une fraction significative des coûts industriels, particulièrement dans l'industrie pétrolière. [57]

II.8,5 Conséquences scientifiques et industrielles

De nombreuses études ont été motivées par les répercussions économiques et techniques de l'encrassement. Les recherches cherchent à approfondir notre compréhension du phénomène, à élaborer des techniques de prévention et d'élimination, ainsi qu'à perfectionner la modélisation et l'anticipation de l'accumulation des dépôts.[57]

II.9 Prévention de l'encrassement dans les échangeurs

Prévention de l'encrassement dans les échangeurs

Il existe de nombreuses méthodes pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur, le choix de l'une ou de plusieurs de celle-ci dépend de l'efficacité de la méthode, du type d'encrassement et ainsi de nombreux paramètres économiques. Le tableau suivant résume les différentes actions pendant les quatre stades de vie de l'échangeur. [58]

Tableau II.1: Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur.

Phase fonctionnement	Phase construction et montage	Phase fonctionnement	Phase d'arrêt
<ul style="list-style-type: none"> • Choix de type d'échangeur • choix de la géométrie et de la configuration • choix des conditions de fonctionnement (température, débit,...) 	<ul style="list-style-type: none"> • assurance qualité sur la fabrication • protection pendant le transport et lors du stockage • opération de nettoyage et de passivation. 	<ul style="list-style-type: none"> • maintien des conditions de fonctionnement (températures, débit,...) • prétraitement des fluides • utilisation d'additifs (inhibiteurs, antitartres, dispersants, acides) 	<ul style="list-style-type: none"> • démontage et nettoyage manuel • attaques mécanique du dépôts (perçage,...) • nettoyage hydraulique à la lance (vapeur, air)

II.9,1 Pendant la phase de dimensionnement

Il y a deux questions fondamentales auxquelles un projeteur est confronté lors du dimensionnement d'un échangeur comportant certains risques d'encrassement :

quel est le type d'échangeur le mieux adapté au problème posé ?

quels sont les paramètres physiques qui permettent de réduire la tendance à l'encrassement ?

II.9,1.a Sensibilité à l'encrassement des divers types d'échangeurs

Pour un service thermique donné, le choix entre les différents types d'échangeurs dépend de très nombreux paramètres tels que : le coût, l'encombrement, le poids, les niveaux de pressions ou de températures mais dans certains cas, l'encrassement peut être considéré comme un paramètre important.

II.9,1.b Paramètres physiques permettant de réduire la tendance à l'encrassement

Il s'agit des paramètres qu'on permet d'ajuster pour réduire la tendance de l'encrassement

- Des zones stagnantes ou de faibles vitesses, qui sont des zones où les dépôts s'accumuleront plus facilement.
- Des vitesses qui doivent être optimisées.
- Des points chauds (ou froids) qui doivent être évités.
- Des états de surface qui jouent un rôle important vis-à-vis de l'initiation de l'encrassement.
- Des matériaux eux-mêmes qui doivent être choisis pour éviter la corrosion. [58]

II.9,2 Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route

La construction des équipements de transfert thermique peut s'étendre sur une durée relativement longue et les surfaces d'échange sont alors exposées à des conditions diverses.

L'encrassement peut être initié lorsque les essais sous pression de l'échangeur sont réalisés avec une eau de mauvaise qualité, non suffisamment rincée à l'eau propre et à l'azote. En conséquence, il est nécessaire de protéger les surfaces d'échange de tout environnement favorisant la corrosion ou le dépôt.

Lors de la mise en service de l'installation, compte tenu de l'excès de surface attribuée pour tenir compte de l'encrassement, l'échangeur ne fonctionne pas dans des conditions optimales, en effet, des vitesses de circulation plus lentes et des températures de surface plus importantes favorisent l'encrassement.

Des efforts doivent être faits au démarrage de l'installation pour fonctionner aux conditions nominales et employer un moyen de traitement de l'eau limitant l'apparition de l'encrassement, il est conseillé d'équiper l'échangeur de plusieurs capteurs de températures et de débit pour pouvoir suivre l'évolution du degré d'encrassement et agir

en conséquence lors d'un arrêt prolongé de l'installation, il faut prendre des précautions nécessaires (vidange, mise sous vide, traitement, ...) pour éviter, d'une part la corrosion rapide des surfaces et d'autre part l'apparition d'un encrassement biologique de l'appareil. [59]

II.9,3 Pendant la phase de fonctionnement

Les procédés mécaniques ou chimiques de prévention de l'encrassement pendant la phase de fonctionnement de l'échangeur peuvent améliorer de façon significative les performances de l'appareil, mais également permettent d'augmenter le temps de service entre deux arrêts de maintenance. [59]

II.9,4 Au moment de l'arrêt de l'échangeur

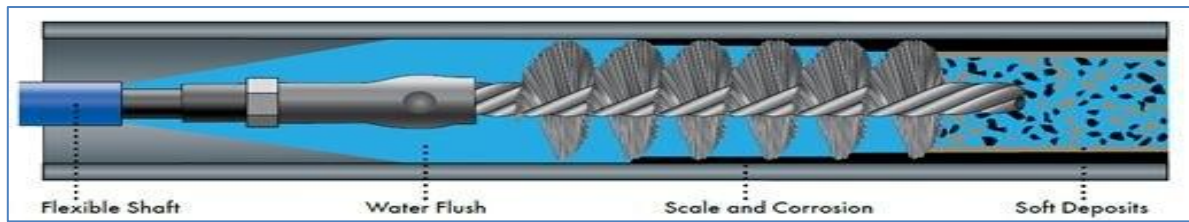
Il est souvent nécessaire, malgré les procédés précédemment cités, de nettoyer complètement l'appareil. Le démontage de l'appareil permet des interventions comme le nettoyage mécanique où plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre, le nettoyage hydraulique ou le nettoyage chimique. [59]

II.10 Nettoyage de l'échangeur

Pour améliorer la performance des échangeurs de chaleur il faut réduire l'encrassement périodiquement, il faut éliminer toutes les substances afin d'avoir un échangeur presque neuf, rendant les tubes à un nouveau cycle de vie. [60]

II.10,1 Nettoyage mécanique

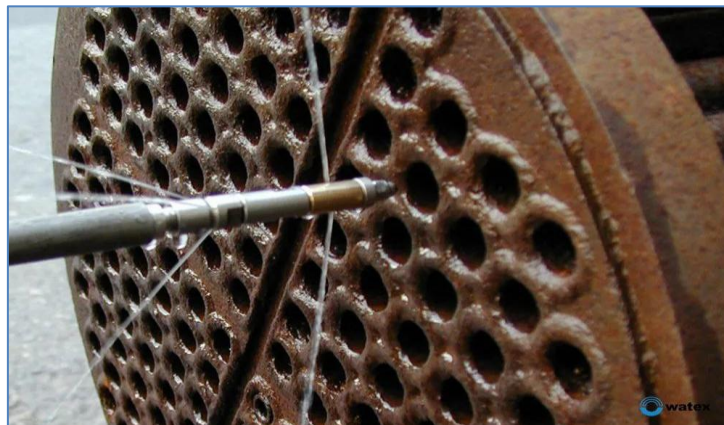
Les procédures de nettoyage des tubes pour échangeurs à tubes et calandre sont réalisées hors ligne, le plus fréquemment choisi et le plus rapide c'est le nettoyage mécanique. Cependant, cette méthode n'est pas efficace à 100%, laissant certaines substances d'encrassement et elle endommage la paroi du tube par le frottement de l'axe de nettoyage avec la paroi du tube. [61]



Figures II.10 : Nettoyage mécanique des tubes par brosse rotative[62]

II.10,2 Nettoyage hydraulique

Parmi les autres méthodes hors ligne l'utilisation de l'eau à très haute pression, le temps nécessaire pour nettoyer un échangeur de chaleur peut devenir long. Un grand soin doit être pris pour ne pas endommager les revêtements de plaques tubulaires ou les tubes mêmes; sinon la suppression réussie de dépôts d'encrassement peut devenir associée à de nouvelles fuites dans le tube ou l'augmentation de la feuille de corrosion des tubes, qui ne peuvent être révélés qu'après que l'appareil n'ait été ramené en ligne. [61]



Figures II.11 : Nettoyage hydraulique des tubes d'échangeur[63]

II.10,3 Nettoyage chimique

Les produits chimiques sont également utilisés pour le nettoyage hors ligne des tubes d'échangeur de chaleur. Plusieurs produits légèrement acides sont disponibles et peuvent éliminer plus de dépôt que la plupart des autres méthodes; mais ils sont coûteux, prennent plus de temps pour que l'opération soit terminée, et l'élimination ultérieure des produits chimiques peut se révéler un danger pour l'environnement. On a également

trouvé, assez fréquemment, que certaines matières résiduelles ont besoin d'être enlevé par des méthodes de nettoyage mécanique. [61]

II.10,4 Nettoyage par projectile

Pour le nettoyage hors ligne, l'outil sélectionné doit être le plus approprié pour retirer un type particulier de dépôt. Nettoyeurs plastique moulé sont très populaires pour certaines applications. Les brosses peuvent également être utilisées pour enlever ces dépôts mous ainsi que certains types de dépôt microbologique. Les brosses sont également utiles pour le nettoyage des tubes avec des surfaces améliorées (par exemple en spirale ou en retrait à ailettes). Avec les types de dépôts plus durs, les nettoyeurs de métaux de différents modèles ont été développés, souvent avec un dépôt particulier. Une version actuelle d'un produit de nettoyage constitué de plusieurs bandes en acier trempé en forme de U disposés de façon à former des paires de lames à ressort... Une version de ce nettoyeur pour acier inoxydable est également disponible. [61]



Figures II.12: Nettoyage des conduites par projectile – comparaison avant/après[64]

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

Partie expérimentale

III.1 Introduction

Le stage de mise en situation professionnelle a été effectué au niveau de laboratoire (hall de technologie).

L'encrassement est l'un des problèmes majeurs de l'industrie pétrochimique en raison de son énorme impact économique. Pour cela, dans ce chapitre nous allons essayer différents protocoles de nettoyage avec différents produits préparés en laboratoire, dans le but d'éliminer les encrassements et le tartre au niveau des échantillons préparés.

III.2 But de l'étude

Ce chapitre vise à élaborer un protocole de nettoyage destiné à éliminer les résidus crasseux et calcaires présents sur les équipements industriels, qui sont à l'origine des problèmes d'encrassement et de colmatage.

III.3. Méthodologie de l'étude

Le travail sera réalisé par :

- Suivi les paramètres suivants :

Paramètres donnés :

- La température de procédure de nettoyage ;
- La concentration des éléments chimique ;

Paramètres mesurés :

- La perte de masse des dépôts.
- La proposition d'un procédé de nettoyage :
- Réalisation d'un protocole de nettoyage chimique au niveau de laboratoire ;
- Résultats concernant chaque échantillon choisi ;
- Discussion les résultats obtenus ;

III.4. Méthodes et matériaux

III.4,1. Méthodes

La méthode de nettoyage chimique consiste à utiliser une solution de base forte (NaOH) et un acide fort (acide chlorhydrique HCl), tout en respectant des concentrations bien définies et des températures connues, suivant la méthode de perte de masse.

Elle décrit l'une des méthodes d'analyse chimique quantitative effectuées en déterminant, par pesée, la masse d'un produit formé ou éliminé.

III.4,2. Matériaux utilisés

La qualité et la quantité des matériaux ont été préparées en vue de la réalisation des essais de nettoyage chimique dans le cadre de ce travail.

III.4,2,1 Préparation des échantillons

- Choix des plaques
- Fer-blanc ETP



Figure III.1 : Échantillon de fer blanc avant traitement.

Définition

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-boisson. [65]

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques du fer blanc.[66]

Nom	Fer blanc
Phase à STP	Solide
Densité	7770kg/m ³
Résistance à la traction ultime	350 MPa
Limite d'élasticité	S.O.MPa
Module de Young	175 GPa
Dureté Brinell	470 BHN
Point de fusion	1260°C
Conductivité thermique	15-30W/Mk
Capacité thermique	540 J/g.K

Tableau III.2 : Composition et épaisseur des différentes couches du fer blanc.[65]

	Composition	Epaisseur, en nanomètres	Masse en g/m ²
Acier doux	Fe	200000	
Solution solide	Sn dans Fe	100	
Alliage fer-étain	FeSn ₂	100	0,6
Etain libre	Sn	700	5,0
Couche passive	Cr et oxydes de Cr et Sn	2	0,002 de Cr
Film d'huile	Diocylsébaçate(DOS)	5	0,003 à 0,006

- **Découpages des plaques**

Nous avons découpé les échantillons de fer-blanc sous forme de petites plaques afin de faciliter leur utilisation.

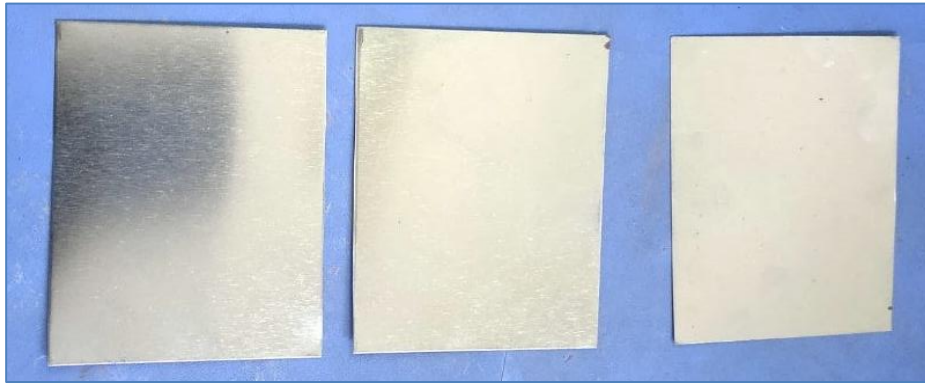


Figure III.2 : échantillon de fer-blanc après le découpage.

- **Polissage des plaques**

Dans cette étape on utilise le papier verre généralement le papier verre de numéro (180-220-320-400-600-800-1000-1200), on a réalisé cette étape de polissage pour éliminer les impuretés et homogénéiser la surface des plaques, ensuite un petit lavage à l'eau distillée pour débarrasser totalement les traces des impuretés et un séchage par un chiffon sans frottement.

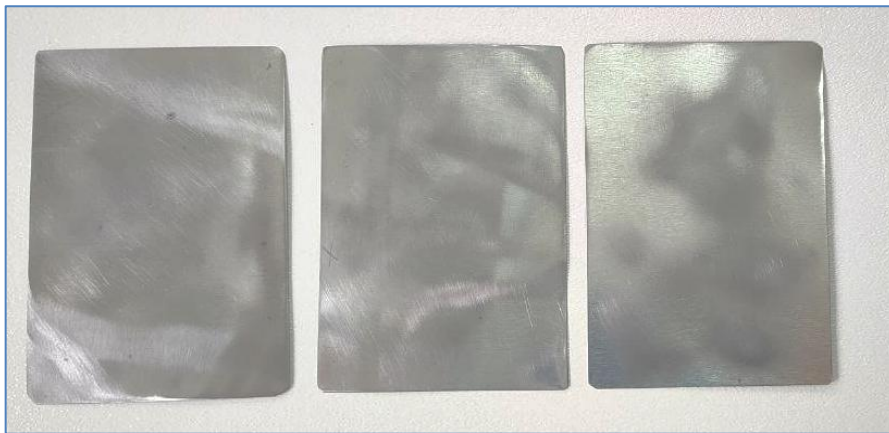


Figure III.3 : fer-blanc après polissage.

- **Pesée les plaques**

Dans cette étape on utilise une balance électronique pour savoir la masse exacte de chaque échantillon.



Figure III.4 : exemple de deux échantillons sur la balance.

III.4,2,2 Matière encrassée et entartrée

- Le fluide encrassant
- Huile lubrifiante 10W40

L'huile 10W40 est une huile lubrifiante utilisée dans les industries, les automobiles et les outils de transport puisqu'elle est aussi une huile moteur, avec une excellente stabilité thermique, un indice de viscosité élevé, stable, anticorrosion, antirouille, un très bas point d'écoulement de l'ordre de -35°C et un point d'éclair supérieur à 220°C .

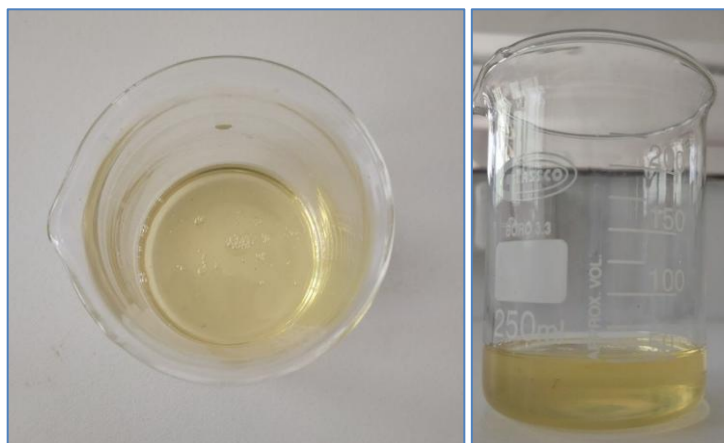


Figure III.5 : huile 10W40 propre avant l'utilisation.

- **Produits peinturé**

Une peinture, « paint » en anglais, est une préparation fluide qui peut s'étaler en couches minces sur différents supports et forment par l'évaporation d'un solvant un feuil adhérent, résistant, opaque, blanc ou coloré. Elle sert à protéger et à décorer, sa fonction protectrice est principale à l'extérieur (contre la corrosion) tandis qu'à l'intérieur, son application se base sur l'aspect décoratif



Figure III.6: Pot de peinture acrylique GLYLAC 2000.

- **Préparation du tartre (au niveau de laboratoire)**

Nous avons préparé une pâte de tartre dans le laboratoire afin de réaliser un dépôt dur de tartre sur nos échantillons. Pour cela, et afin d'obtenir un dépôt de carbonate de calcium CaCO_3 (tartre), nous avons utilisé le chlorure de calcium (CaCl_2) et le bicarbonate de soude (NaHCO_3).

- **CaCl_2**

Le chlorure de calcium (CaCl_2) est un composé chimique inorganique formé d'un ion calcium et de deux ions chlorure. Ses propriétés uniques lui confèrent de nombreuses applications industrielles et domestiques. Sa structure cristalline en fait un solide blanc soluble dans l'eau.

Le chlorure de calcium est largement utilisé comme agent de dessiccation, antigel, durcisseur de fromage, agent de séchage, etc. Ses propriétés hygroscopiques lui

permettent d'éliminer l'humidité de l'air, ce qui le rend utile dans les produits déshydratants et les systèmes de réfrigération.[67]

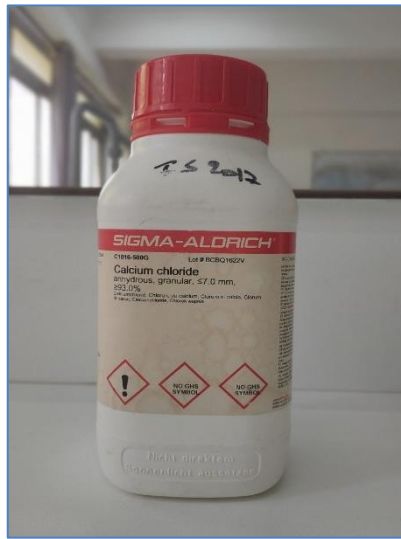


Figure III.7 : chlorure de calcium CaCl_2 .

- NaHCO_3

Le bicarbonate de sodium, également connu sous le nom de bicarbonate de soude, est un composé inorganique de formule moléculaire NaHCO_3 . C'est un sel composé de cation sodium Na^+ et d'anion bicarbonate HCO_3^- . Le bicarbonate de sodium est un solide blanc qui semble cristallin mais se présente généralement sous la forme d'une fine poudre. Le produit chimique vendu sur le marché est généralement poudre de bicarbonate de sodium. Il est inodore, salé et soluble dans l'eau. Il se décompose lentement dans l'air humide ou chaud, produisant du dioxyde de carbone, et se décompose complètement lorsqu'il est chauffé à 270°C . En cas d'acide, il sera fortement décomposé pour produire du dioxyde de carbone.[68]

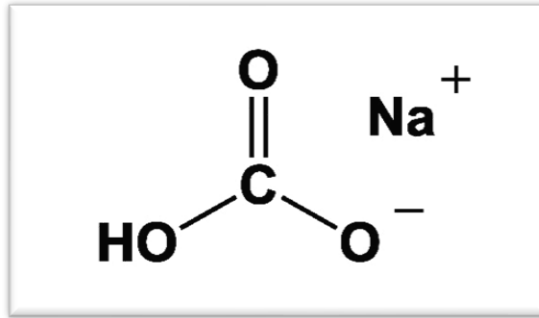


Figure III.8 : structure de NaHCO₃. [69]



Figure III.9 : poudre de bicarbonate de sodium.

La préparation du tartre se réalise selon la description et la réaction suivante :

- **Description de la préparation du tartre**

Mélanger 10 g de CaCl₂ (poudre blanche) avec 10 g de bicarbonate de soude (poudre blanche) dans un bécher, puis ajouter 80 mL d'eau du robinet afin d'obtenir une pâte. Ensuite, introduire un échantillon propre après polissage, puis déposer le mélange sur une plaque chauffante à 250 °C pendant 30 minutes. À la fin, récupérer un échantillon entartre caractérisé par la déposition d'une couche de tartre.



Figure III.10 : chlorure de calcium et bicarbonate de sodium.

- **La Réaction chimique de la formation du tartre**

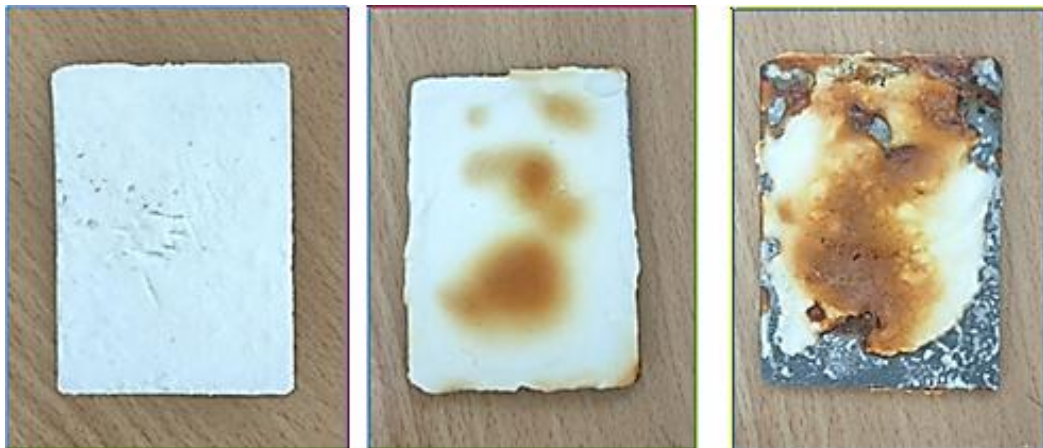


Figure III.11 : dépôt du tartre sur des plaques de Fer-blanc

III.4,2,3. Choix des solutions

- **La soude NaOH**

L'hydroxyde de sodium (NaOH), également appelé soude caustique, est une base forte qui se présente, à température ambiante, sous forme solide. Il est constitué de cations sodium (Na^+) et d'anions hydroxyde (OH^-). Il est très soluble dans l'eau. Sa solution aqueuse est transparente et souvent appelée soude. Concentrée, elle est, tout comme l'hydroxyde de sodium à l'état solide, particulièrement corrosive.

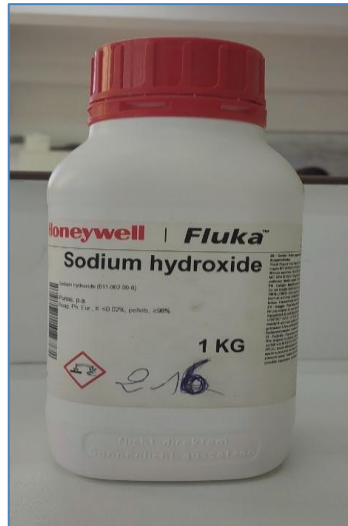


Figure III.12 : ydroxyde de sodium utilisé dans le protocole de nettoyage

- **L'acide chlorhydrique HCl**
- Acide chlorhydrique ou solution aqueuse de chlorure d'hydrogène est un acide fort de formule chimique HCl. Son apparence est incolore. Il est utilisé comme réactif chimique.

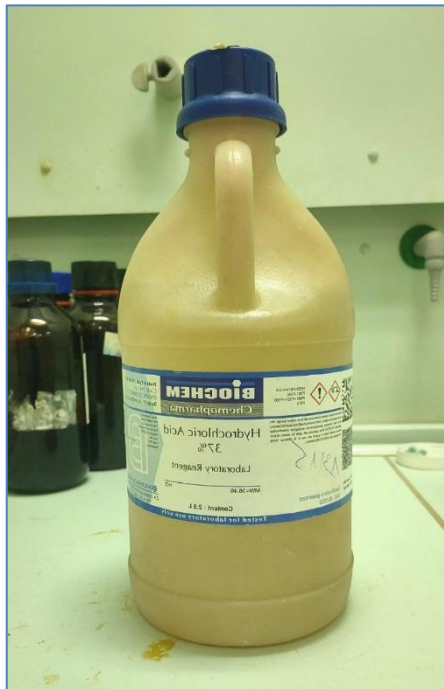


Figure III.13 : Acide chlorhydrique (HCl) utilisé pour l'élimination des dépôts.

III.4,2,4. Préparation des solutions**• La soude NaOH**

On a préparé 5 solutions de la soude de différente concentration à partir de la loi :

$$V_1 \longrightarrow m_2 \longrightarrow 100\%$$

1. solution de concentration 0,5 % de NaOH :

$$250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\%$$

$$m_1 \longrightarrow 0,5 \%$$

$$m_1 = 1,25\text{g}$$

2. solution de concentration 1% de NaOH :

$$250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\%$$

$$m_1 \longrightarrow 1 \%$$

$$m_1 = 2,5\text{g}$$

3. solution de concentration 2% de NaOH :

$$250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\%$$

$$m_1 \longrightarrow 2 \%$$

$$m_1 = 5\text{g}$$

4. solution de concentration 3% de NaOH :

$$250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\%$$

$$m_1 \longrightarrow 3 \%$$

$$m_1 = 7,5\text{g}$$

5. solution de concentration 5% de NaOH :

$$250 \text{ ml} \longrightarrow 250 \text{ g} \longrightarrow 100\%$$

$$m_1 \longrightarrow 5 \%$$

$$m_1 = 12,5\text{g}$$



Figure III.14 : solution aqueuse de NaOH.

• **L'acide chlorhydrique HCl**

La solution aqueuse de l'acide chlorhydrique doit être préparée à partir des paramètres du flacon de HCl concentré qui indiquent (une densité $d= 1,2$; masse molaire $M= 36,5$; une pureté $p= 37\%$), On a préparé 6 solutions de L'acide chlorhydrique HCl de différente concentration pour prendre une concentration d'HCl on a calculé le volume de chaque concentration avec les lois suivantes :

$$C_1V_1=C_2V_2 \longrightarrow V_1=C_2V_2 / C_1.....(1)$$

$$C=10Pd / M.....(2)$$

D'après (1) et (2) on peut déduire la loi finale du volume :

$$V_1 = \frac{P_2}{P_1} \times V_2$$

1. solution de concentration 0 25 % d'HCl :

$$V_1 = \frac{0,25}{37} \times 500$$

$$V_1 = 3,38 \text{ ml}$$

2. solution de concentration 0 5 % d'HCl :

$$V_1 = \frac{0,5}{37} \times 500$$

$$V_1 = 6,67 \text{ ml}$$

3. solution de concentration 0 75 % d'HCl :

$$V_1 = \frac{0,75}{37} \times 500$$

$$V_1 = 10,14 \text{ ml}$$

4. solution de concentration 1 % d'HCl :

$$V_1 = \frac{1}{37} \times 500$$

$$V_1 = 13,52 \text{ ml}$$

5. solution de concentration 3 % d'HCl :

$$V_1 = \frac{3}{37} \times 500$$

$$V_1 = 40,56 \text{ ml}$$

6. solution de concentration 5 % d'HCl :

$$V_1 = \frac{5}{37} \times 500$$

$$V_1 = 67,6 \text{ ml}$$



Figure III.15 : solution aqueuse de HCl.

III.5 Mode opératoire

III.5,1 L'encrassement

- On place l'échantillon sur une plaque chauffante puis on le chauffe pendant 5 min.
- Ensuite, on ajoute une quantité d'huile lubrifiante 10W40 sur l'échantillon jusqu'à sa couverture complète par l'huile.
- L'échantillon est laissé sur la plaque chauffante pendant 15 min afin de favoriser la formation d'une couche d'encrassement à sa surface.
- Après cette durée, on observe la formation du dépôt sur l'échantillon, puis on le laisse sécher à la température ambiante.
- Enfin, l'échantillon encrassé est pesé afin de déterminer la masse du dépôt formé.



Figure III.16 : échantillons au cours d'encrassement.

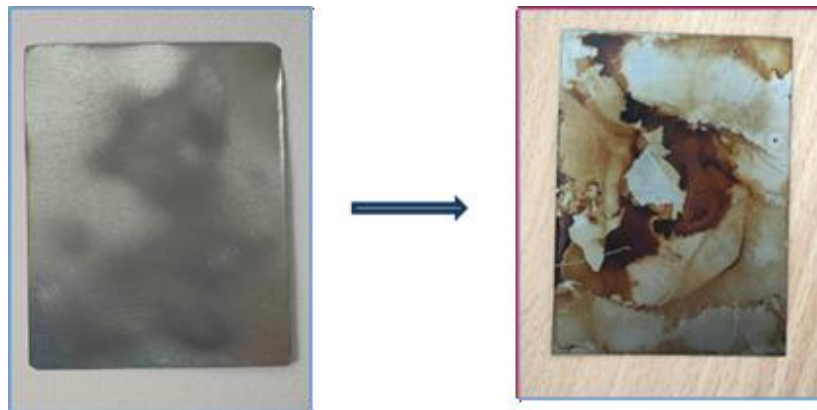


Figure III.17 : échantillons propres et après encrassement.

III.5,2 L'entartrage

- Pesé 10 gramme de (CaCl_2) et 10 gramme de (NaHCO_3).

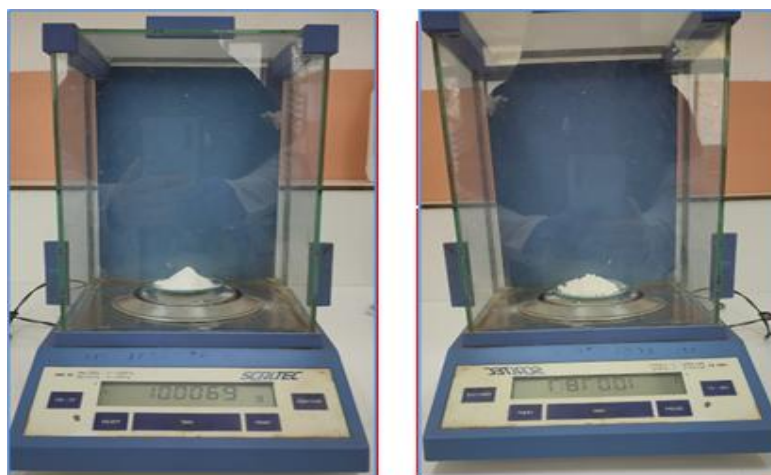


Figure III.18 : pesé 10g de NaHCO_3 et 10g de CaCl_2 .

- On met 10g de chlorure de calcium (CaCl_2) et 10g de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) dans un bécher, ensuite on ajoute 80 ml de l'eau.

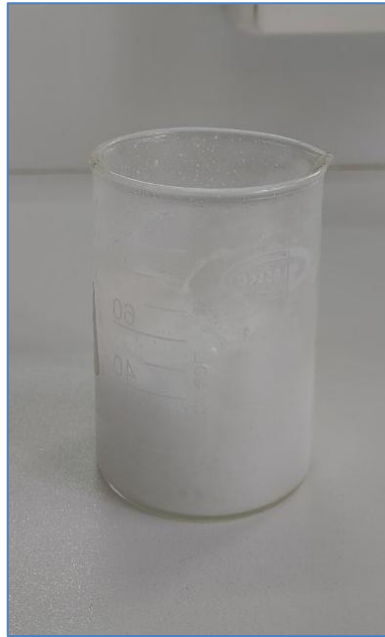


Figure III.19 : 10g de NaHCO_3 + 10g de CaCl_2 après l'addition de l'eau.

- Après on met l'échantillon dans ce mélange et le mettre sur une plaque chauffante à une température de $250\text{ }^\circ\text{C}$ pendant 30 min.



Figure III.20 : formation du tartre après 30 min de chauffage.

- Après 30 min on observe que le dépôt se forme, donc on laisse l'échantillon pour le séchage à la température ambiante pendant 8 jours.



Figure III.21 : le dépôt du tartre après huit jours de séchage.

- En fin on doit peser l'échantillon entartré et prendre en compte la masse entartrée .

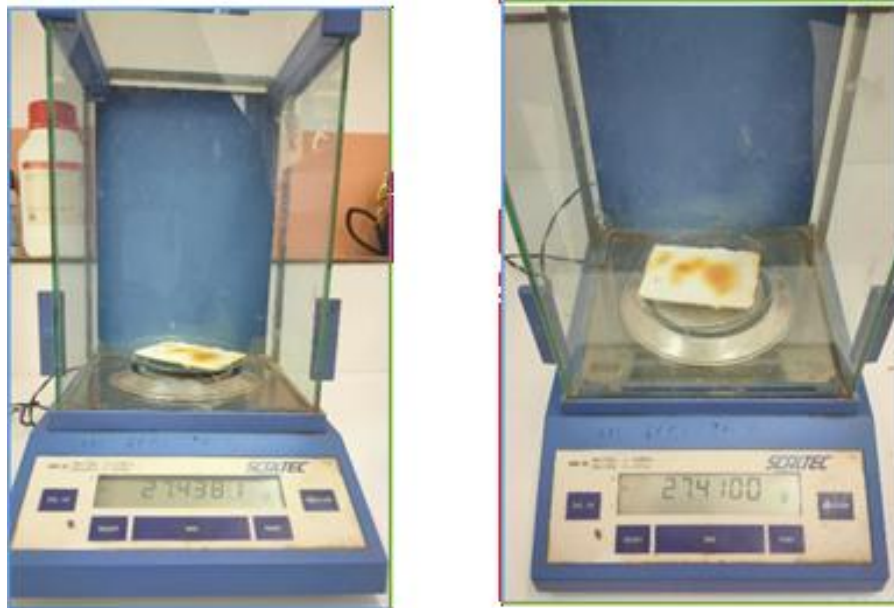


Figure III.22: pesé un échantillon entartré.

III.5,3 la peinture

- On prend un échantillon et on le met dans la peinture (Gylac 2000 bleu) jusqu'à ce que nous obtenions un échantillon complètement recouvert de peinture.
- Nous laissons l'échantillon un jours pour le séchage.



Figure III.23: Echantillons teintés (après séchage).

- Après le séchage nous avons fait le tarte pour notre échantillons (la même procédure que nous avons fait déjà) puis laissé l'échantillon pour le séchage pendant 5-8 jours.

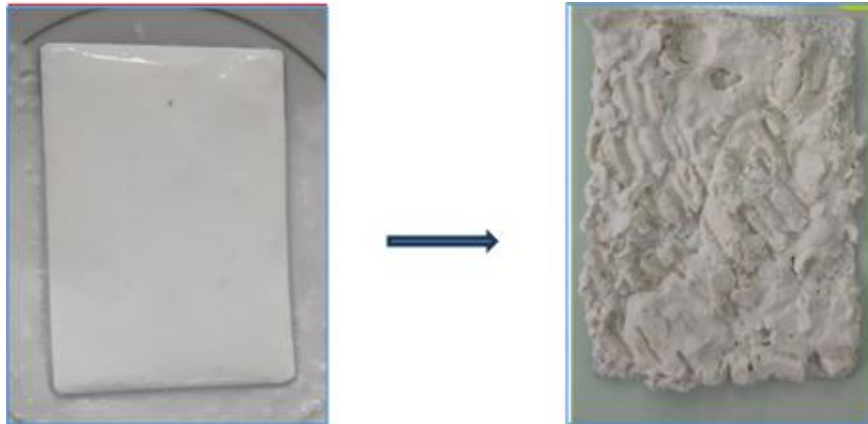


Figure III.24 : Echantillon teinté et entartré (avant et après le séchage)

- À la fin de cette étape, nous avons pesé notre échantillon.

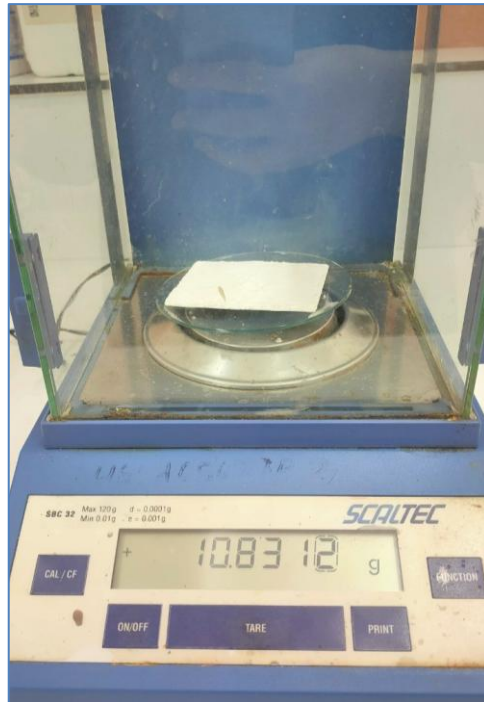


Figure III.25 : pesé un échantillon teinté et entartré.

III.6 Protocole de nettoyage chimique

Nous avons suivi les protocoles suivants au niveau de laboratoire

III.6,1 Protocoles de nettoyage d'entartrage

- **protocole 01**
- On prendre l'échantillon entartré après le pesage et on le mettre dans un cristalliseur qui contient solution basique NaOH 60 ml.
- On fait le Nettoyage avec la solution NaOH avec température 30°C pendant 12min et chaque 3 min on prélève l'échantillon pour peser leur masse.
- Après on obtient l'échantillon et on le met dans un notre solutions aqueuse d'HCl avec des conditions de température 30°C et volume 60 ml et suivre leur diminution du masse jusqu'à finir le nettoyage.

Tableau III.3 : Différents concentration des expériences.

Echantillon	NaOH(%)	HCl(%)
ENT	2	0,25
	1	0,25
	3	0,25
	5	0,25
	5	0,5

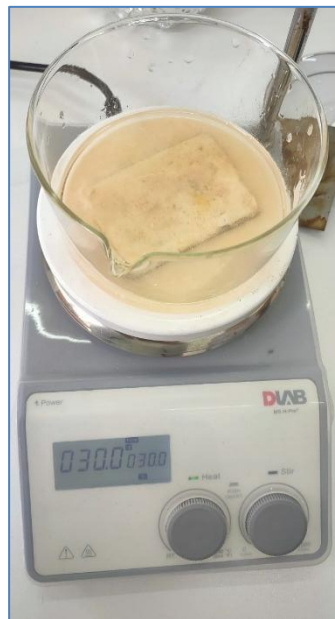


Figure III.26 : Nettoyage d'échantillons entartés.

III.6,2 Protocole de nettoyage de l'encrassement des huiles

- **Protocole 01**
- Nous avons placé l'échantillon encrassé dans un Cristallisateur contenant 60 ml de solution basique de NaOH.
- Le nettoyage a été réalisé en utilisant des solutions de NaOH de différentes concentrations : 2 %, 3 % et 5 %, à une température de 30°C. Pour chaque concentration, l'échantillon a été immergé pendant 12 minutes. Toutes les 3 minutes, l'échantillon a été retiré puis pesé afin de suivre la diminution de sa masse au cours du processus de nettoyage.

Tableau III.4 : Concentrations des solutions de NaOH utilisées pour le nettoyage

Echantillon	NaOH(%)
ENC	2
	3
	5

- **Protocole 02**
- Nous avons placé l'échantillon encrassé dans un Cristalliseur contenant 60 ml de solution aqueuse d'HCl.
- Le nettoyage a été effectué en utilisant des solutions d'HCl de différentes concentrations : 0,25 %, 0,5 %, 0,75 %, 1 %, 3 % et 5 %, à une température de 30°C.
- Pour chaque concentration, l'échantillon a été immergé pendant 12 minutes, puis retiré et pesé afin d'évaluer la diminution de sa masse après le nettoyage. Ensuite, l'échantillon a été transféré dans une nouvelle solution d'HCl de concentration différente pour répéter la même procédure.

Tableau III.5 : Concentrations des solutions de HCl utilisées pour le nettoyage.

Echantillon	HCl(%)
ENC	0,25
	0,5
	0,75
	1
	3
	5

- **Protocole 03:**
- Cet essai a été réalisé selon le protocole 02, en utilisant des solutions d'HCl de différentes concentrations : 1 %, 3 % et 5 %.

- Contrairement à l'expérience précédente, l'échantillon a été laissé dans la solution pendant 24 minutes à une température de 30°C.
- À la fin de chaque essai, l'échantillon a été retiré puis pesé afin d'étudier l'effet de la concentration de HCl et du temps de nettoyage sur la diminution de sa masse.

Tableau III.6 : Effet de la concentration de HCl après 24 min.

Echantillon	HCl(%)
ENC	1
	3
	5

- **Protocole 04:**
- Nous avons placé l'échantillon encrassé dans un cristalliseur contenant 60 mL de solution de NaOH à 5 %, à une température de 45 °C, pendant 12 minutes.
- À la fin de cette durée, l'échantillon a été retiré puis pesé.
- La même procédure a ensuite été appliquée avec des solutions d'HCl de concentrations 1 %, 3 % et 5 %, en maintenant la température à 45 °C, avec un volume de 60 mL et un temps de contact de 12 minutes.
- Après chaque essai, l'échantillon a été retiré puis pesé afin de suivre l'évolution de sa masse.

Tableau III.7 : Concentrations des solutions de nettoyage utilisées pour l'échantillon encrassé (ENC).

Echantillon	NaOH(%)	HCl(%)
ENC	5	1
		3
		5

- **Protocole 05:**
- Nous avons placé l'échantillon encrassé dans un cristalliseur contenant 60 mL de solution de NaOH à 5 %, à une température de 45 °C, pendant 24 minutes.
- À la fin de cette durée, l'échantillon a été retiré puis pesé.
- La même procédure a été réalisée avec une solution d'HCl à 5 %, en maintenant la température à 45 °C, avec un volume de 60 mL et un temps de contact de 24 minutes.
- À la fin de l'essai, l'échantillon a été retiré puis pesé.

Tableau III.8 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon ENC.

Echantillon	NaOH(%)	HCl(%)
ENC	5	5

- **Protocole 06:**
- Nous avons placé l'échantillon encrassé dans un cristalliseur contenant 60 mL de solution d'HCl à 5 % à une température de 45 °C.
- Un premier essai a été réalisé pendant 12 minutes. À la fin de cette durée, l'échantillon a été retiré puis pesé.
- Un second essai a été réalisé dans les mêmes conditions pendant 24 minutes.
- À la fin de l'essai, l'échantillon a été retiré puis pesé.

Tableau III.9 : Paramètres de nettoyage de l'échantillon ENC par une solution de HCl à 5 %.

Echantillon	HCl(%)
ENC	5

III.6,3 Protocole de nettoyage de tartre et peinture

- **Protocole 01**
- Nous avons placé l'échantillon teinté et entartré dans un cristalliseur contenant 60 mL de solution basique de NaOH.
- Nous avons effectué le nettoyage en utilisant une solution de NaOH à une concentration de 1 %, à une température de 30 °C, pendant 12 minutes. Toutes les 3 minutes, nous avons retiré l'échantillon de la solution puis l'avons pesé afin de suivre l'évolution de sa masse.
- Ensuite, nous avons transféré le même échantillon dans une solution aqueuse d'HCl de concentration 0,25 %, avec un volume de 60 mL et à une température de 30 °C, pendant 12 minutes. Toutes les 3 minutes, nous avons retiré l'échantillon puis l'avons pesé afin de suivre la diminution de sa masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.

Tableau III.10 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon PNT.

• Echantillon	NaOH(%)	HCl(%)
PNT	1	0,25



Figure III.27 : Nettoyage d'un échantillon teinté et entartré.

- **Protocole 02**
- Nous avons placé l'échantillon teinté et entartré dans un cristallisateur contenant 60 mL de solution de NaOH à une concentration de 2 %.
- L'échantillon a été maintenu dans cette solution pendant 24 minutes à une température de 30 °C. Après 12 minutes, nous avons retiré l'échantillon et l'avons pesé, puis nous l'avons remis dans la solution jusqu'à 24 minutes, où une seconde pesée a été effectuée.
- Ensuite, nous avons transféré le même échantillon dans un bécher contenant 60 mL de solution d'HCl à une concentration de 0,5 %.
- L'échantillon a été maintenu dans cette solution pendant 24 minutes à une température de 30 °C. Une première pesée a été réalisée après 12 minutes, puis une seconde après 24 minutes afin de suivre l'évolution de sa masse au cours du processus de nettoyage.

Tableau III.11 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon PNT.

Echantillon	NaOH(%)	HCl(%)
PNT	2	0,5

- **Protocole 03**
- Le même protocole expérimental que celui décrit dans le protocole 02 a été appliqué. Les concentrations utilisées étaient de 3 % pour la solution de NaOH et de 0 75 % pour la solution d'HCl.

Tableau III.12 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon PNT.

Echantillon	NaOH(%)	HCl(%)
PNT	3	0,75

- **Protocole 04**
- Le même protocole expérimental que celui décrit dans le protocole 02 a été appliqué. Les concentrations utilisées étaient de 5 % pour la solution de NaOH et de 1 % pour la solution d'HCl.

Tableau III.13 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon PNT.

Echantillon	NaOH(%)	HCl (%)
PNT	5	1

- **Protocole 05**
- Nous avons placé l'échantillon teinté et entartré dans 60 mL de solution de NaOH à 5 % pendant 24 minutes à 30 °C. Une première pesée a été réalisée après 12 minutes, puis une seconde après 24 minutes. Ensuite, le même échantillon a été transféré dans 60 mL de solution de HCl à 5 % pendant 24 minutes à 30 °C. Des pesées ont également été effectuées après 12 et 24 minutes afin de suivre l'évolution de sa masse.

Tableau III.14 : Concentrations des solutions de NaOH et de HCl utilisées dans le protocole 05.

Echantillon	NaOH(%)	HCl(%)
PNT	5	5

III.7 Résultats et interprétations

Les expériences appliquées aux échantillons ont abordé aux résultats suivant :

- **Résultats du protocole 1**

Tableau III.15 : résultats de nettoyage d'un échantillon entartré.

temps(min)	NaOH (2%)	HCl (0,25%)
3	18,15	11,61
6	15,82	10,235
9	14,52	9,02
12	13,18	8,21

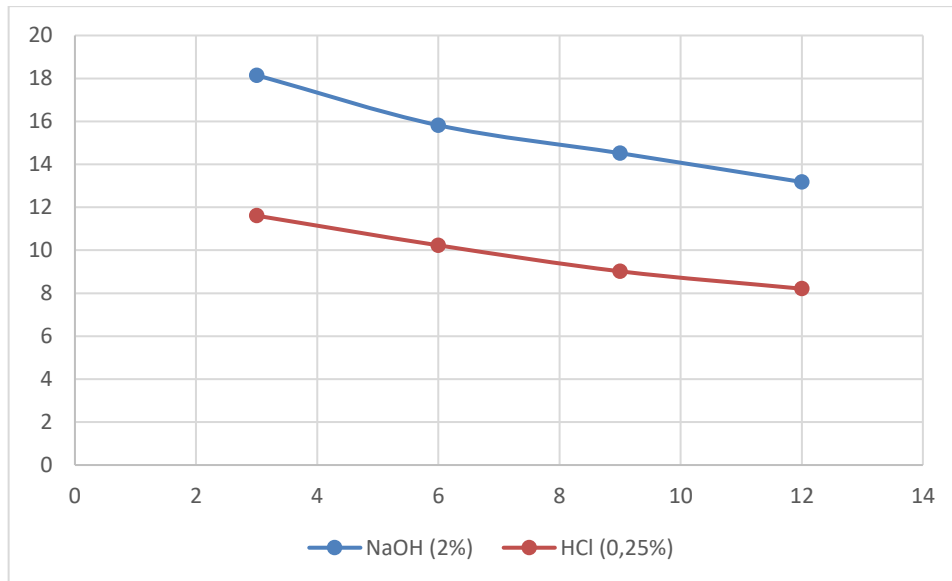


Figure III.28 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (2 %) et HCl (0,25 %).

- **Interprétation des résultats**

Nous observons une diminution progressive des valeurs pour les deux solutions (NaOH 2% et HCl 0,25%) au cours du temps. Dès les premières minutes (3 min à 6 min), la chute est notable : la solution de NaOH passe de 18,15 à 15,82, tandis que HCl passe de 11,61 à 10,23. Cette tendance se confirme jusqu'à 12 min, où les valeurs atteignent respectivement 13,18 et 8,21.

Cette décroissance régulière indique que l'échantillon entarté perd rapidement en matière, et se rapproche de l'objectif visé en peu de temps. On peut conclure que le nettoyage est efficace pour les deux produits testés, avec une légère supériorité de HCl en termes de vitesse de réduction dans les conditions de l'expérience.

- Résultats du protocole 2

Tableau III.16: résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

temps(min)	NaOH (1%)	HCl (0,25%)
3	7,64	6,8
6	7,34	6,65
9	7,15	6,53
12	6,96	6,43

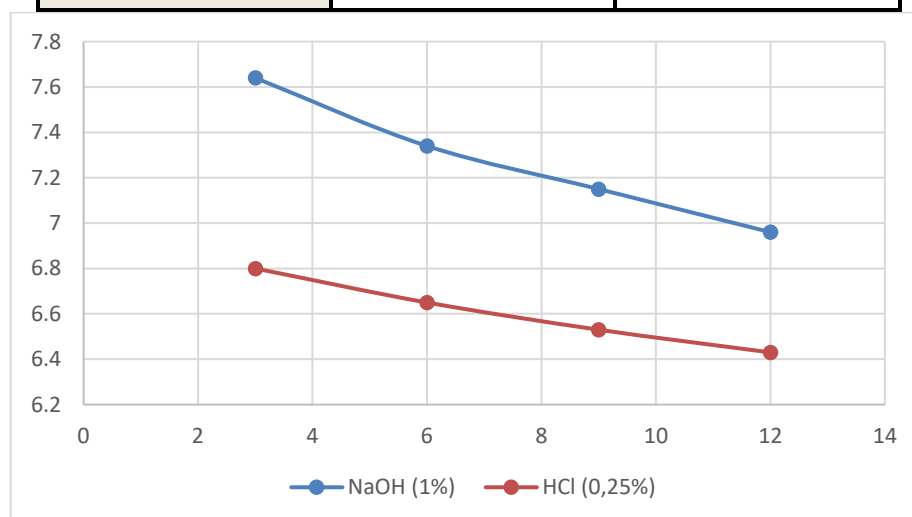


Figure III.29 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (1 %) et HCl (0,25 %).

- **Interprétation des résultats**

Les résultats montrent une diminution lente mais continue de la masse de l'échantillon tout au long de l'essai. Pour la solution de NaOH à 1 %, la masse passe de 7 64 à 6 96 entre 3 et 12 minutes, tandis qu'avec HCl à 0 25 %, elle diminue de 6 80 à 6 43.

Cette évolution traduit l'élimination progressive du dépôt de tartre sous l'action des deux solutions. La baisse reste toutefois modérée par rapport aux concentrations plus élevées, ce qui indique que l'efficacité du nettoyage est limitée à faible concentration. HCl conserve néanmoins une action légèrement plus marquée durant l'expérience.

▪ **Résultats du protocole 3**

Tableau III.17 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

temps(min)	NaOH (3%)	HCl (0,25%)
3	6,13	5,697
6	5,93	5,669
9	5,8	5,657
12	5,74	5,649

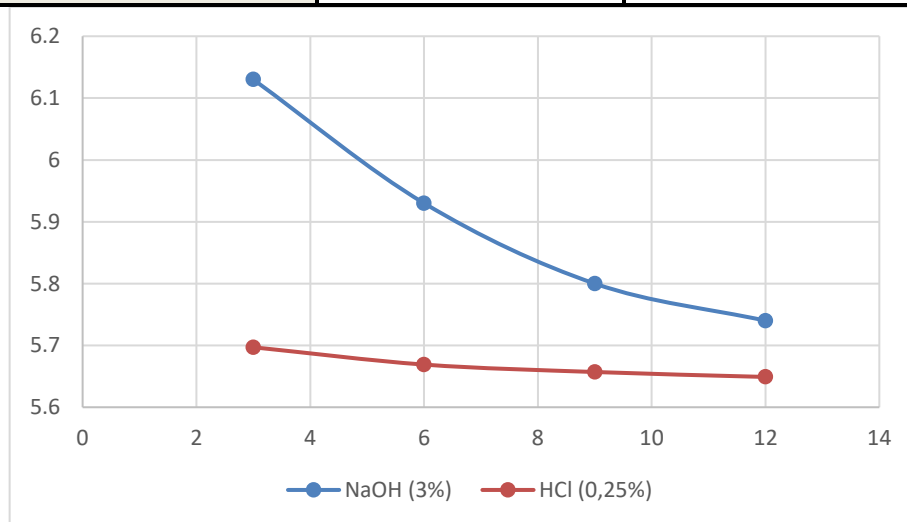


Figure III.30 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (3 %) et HCl (0,25 %).

• **Interprétation des résultats**

On constate une réduction graduelle des valeurs mesurées au cours du temps. La masse traitée par NaOH 3 % diminue de 6,13 à 5,74, alors que celle traitée par HCl 0,25 % passe de 5,697 à 5,649.

La diminution observée confirme l'action des solutions sur le dépôt présent à la surface de l'échantillon. L'effet du NaOH apparaît plus visible, avec une variation plus importante entre le début et la fin de l'essai, ce qui suggère une meilleure capacité de dissolution dans les conditions étudiées.

▪ Résultats du protocole 4

Tableau III.18 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

temps(min)	NaOH (5%)	HCl (0,25%)
3	5,637	5,603
6	5,629	5,597
9	5,62	5,589
12	5,608	5,58

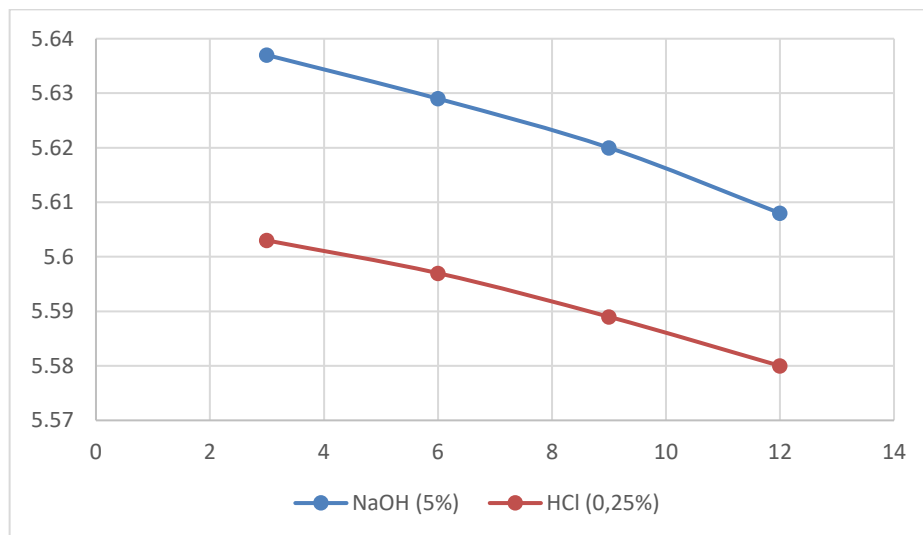


Figure III.31 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5 %) et HCl (0,25 %).

• **Interprétation des résultats**

Les deux courbes présentent une décroissance très faible et quasi linéaire. NaOH 5% passe de 5,637 à 5,608, et HCl 0,25% de 5,603 à 5,580 entre 3 et 12 min.

L'écart entre les deux solutions est minime, ce qui indique que le système approche d'un état d'équilibre. À cette concentration élevée de NaOH, l'action détartrante est déjà bien avancée dès le début de la mesure, laissant peu de matière résiduelle à éliminer. Le HCl

0,25% présente des résultats légèrement inférieurs, mais les deux courbes restent très proches tout au long de l'expérience.

▪ **Résultats du protocole 5**

Tableau III.19 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

temps(min)	NaOH (5%)	HCl (0,5%)
3	5,576	5,571
6	5,575	5,532
9	5,574	5,518
12	5,573	5,518

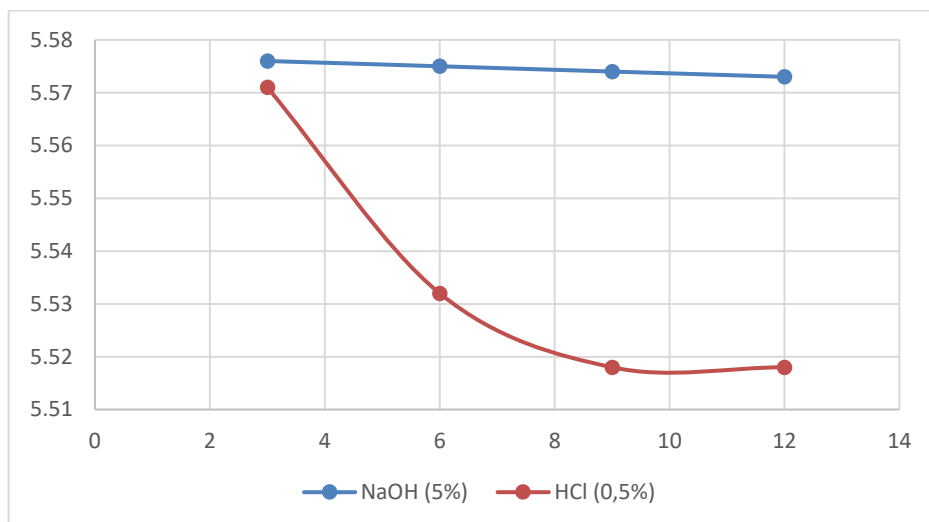


Figure III.32 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5 %) et HCl (0,5 %).

• **Interprétation des résultats**

Les valeurs mesurées pour NaOH 5% restent quasi constantes entre 3 et 12 min (de 5,576 à 5,573), tandis que HCl 0,5% présente une légère décroissance de 5,571 à 5,518.

La stabilité de la courbe NaOH indique que cette solution n'induit pratiquement plus de perte de masse à ce stade, suggérant que le détartrage est déjà achevé. En revanche, HCl

0,5% montre une action encore active, avec une réduction plus perceptible, indiquant une efficacité légèrement supérieure à cette concentration comparée à HCl 0,25%.

Échantillon encrassé

▪ Résultats du protocole 1

Tableau III.20 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.

temps(min)	NaOH (2%)	NaOH (3%)	NaOH (5%)
3	5,658	5,663	5,661
6	5,657	5,661	5,66
9	5,655	5,658	5,659
12	5,653	5,655	5,657

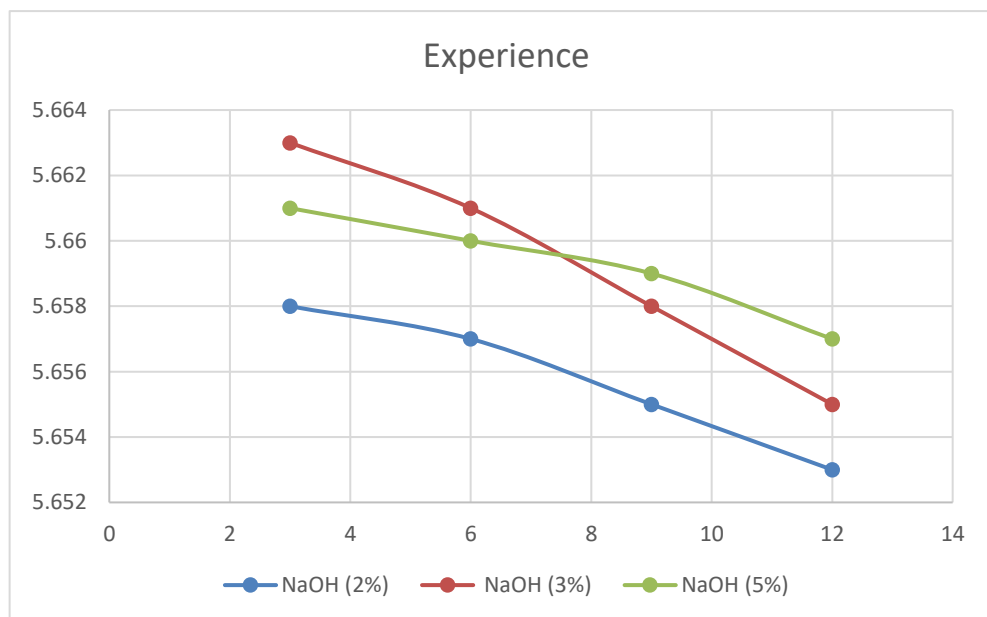


Figure III.33 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (2% 3% et 5%)

- **Interprétation des résultats**

Quelle que soit la concentration utilisée (2 % 3 % ou 5 %), les valeurs enregistrées diminuent très légèrement entre 3 et 12 minutes. Les écarts entre les trois courbes restent faibles.

Ces résultats suggèrent que l'augmentation de la concentration de NaOH améliore peu l'élimination de l'encrassement dans les conditions opératoires adoptées. L'effet du temps semble ici plus important que celui de la concentration.

- **Résultats du protocole 2**

Tableau III.21 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.

HCl (%)	0,25	0,5	0,75	1	3	5
La masse	5,659	5,658	5,656	5,655	5,652	5,65

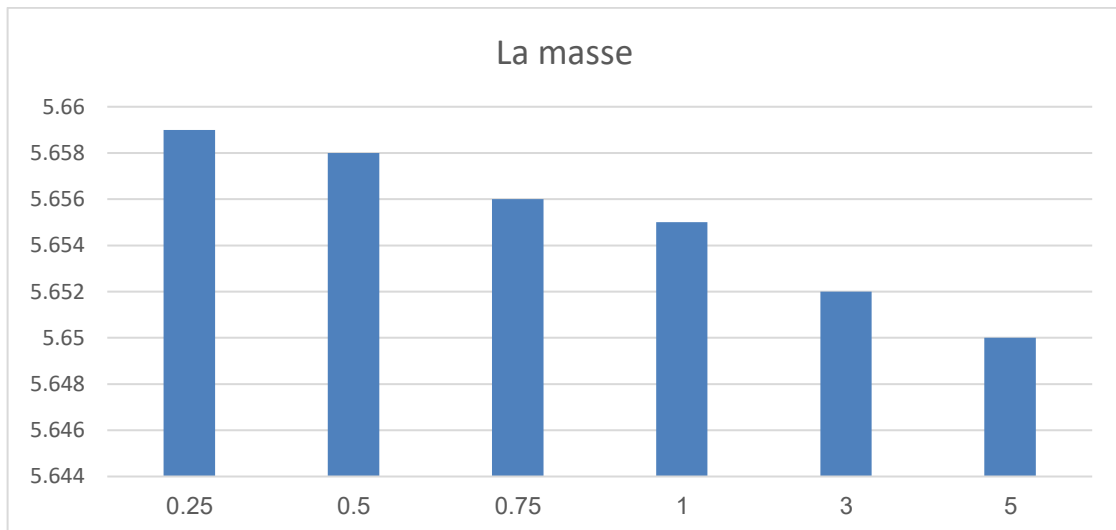


Figure III.34: Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (0,25 % 0,5% 0,75% 1% 3% et 5%)

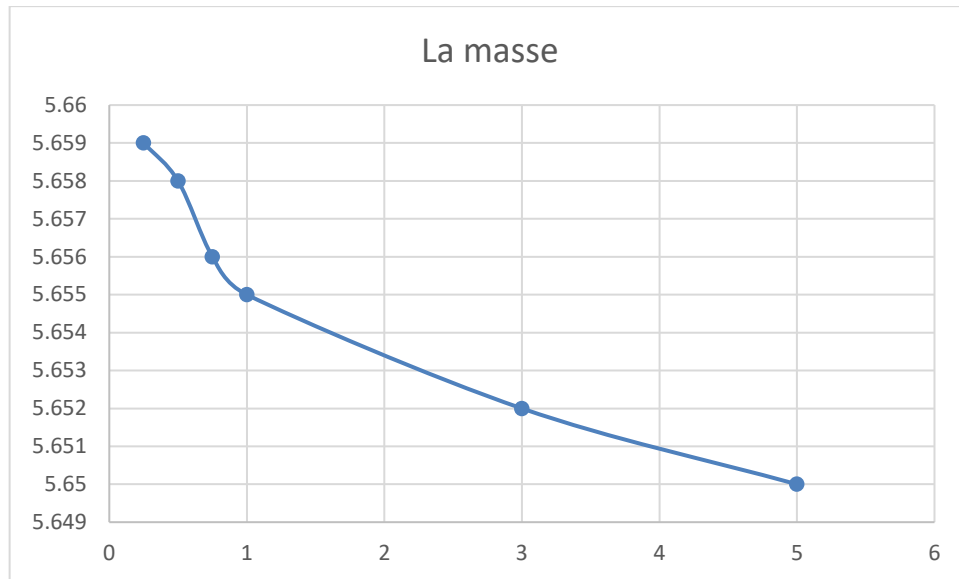


Figure III.35 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (0,25 % 0,5% 0,75% 1% 3% et 5%)

- **Interprétation des résultats**

L'augmentation de la concentration de HCl de 0,25 % à 5 % s'accompagne d'une diminution progressive de la masse finale mesurée. Les valeurs passent de 5,659 à 5,650.

Cette évolution indique que l'efficacité du nettoyage s'améliore avec la concentration de l'acide. Une concentration plus élevée favorise la dissolution des dépôts et conduit à une élimination plus importante de la matière encrassante.

- **Résultats du protocole 3**

Tableau III.22 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.

Temps(min)	HCl (1%)	HCl (3%)	HCl (5%)
24	5,654	5,649	5,641

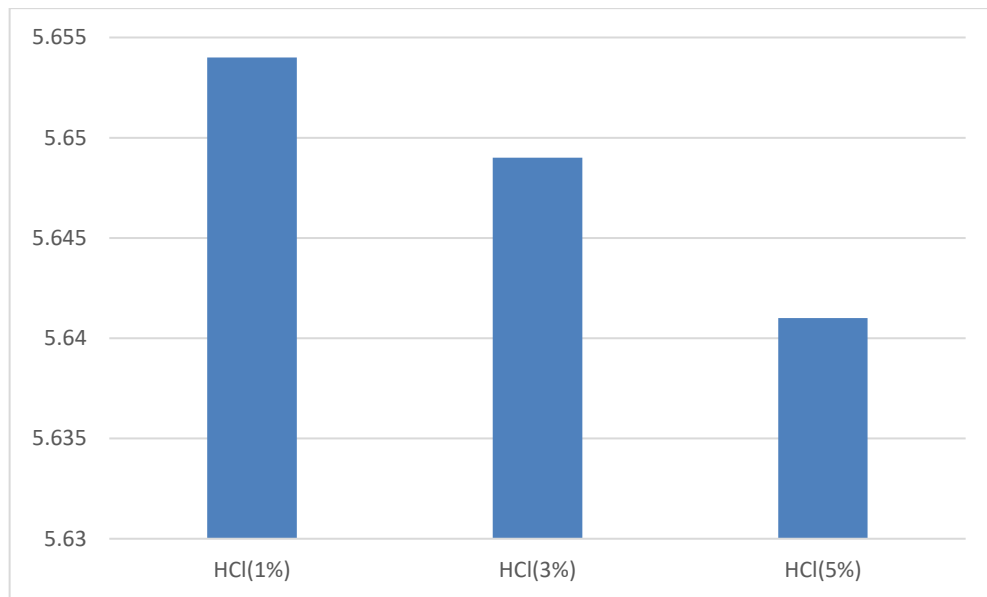


Figure III.36 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (1% 3% et 5%)

- **Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus montrent que les valeurs diminuent lorsque la concentration de HCl augmente. La masse mesurée est plus faible avec HCl 5 % qu'avec HCl 1 %.

Cette différence traduit une meilleure performance de l'acide aux concentrations élevées. L'augmentation de la quantité d'ions actifs dans la solution favorise les réactions de dissolution et améliore ainsi le rendement du nettoyage.

- **Résultats du protocole 4:**

Tableau III.23 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.

Temps(min)	NaOH (5%)	HCl (1%)	HCl (3%)	HCl (5%)
12	5,646	5,627	5,615	5,607

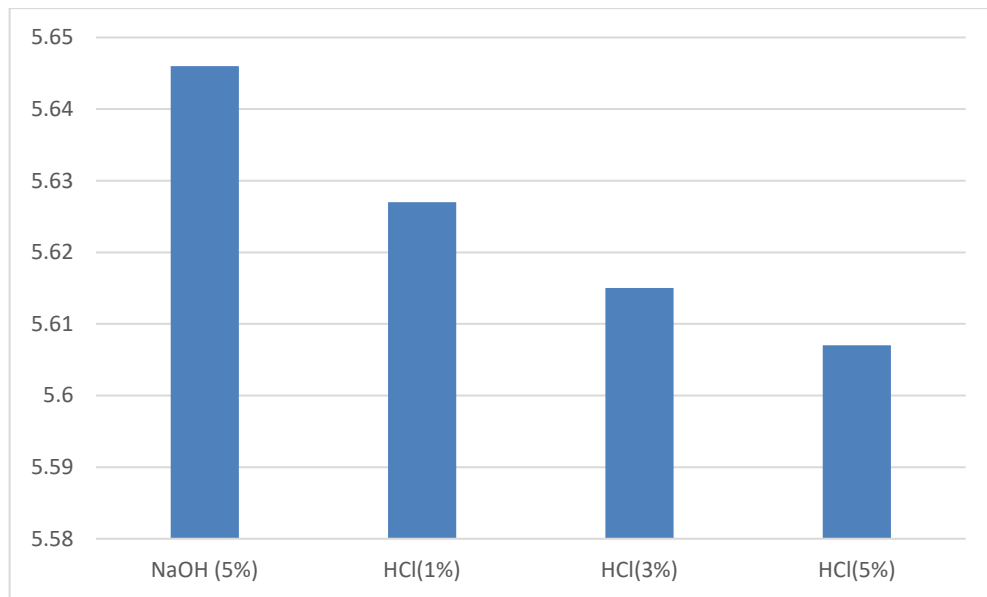


Figure III.37 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(5%) et HCl (1% 3% et 5%)

- **Interprétation des résultats**

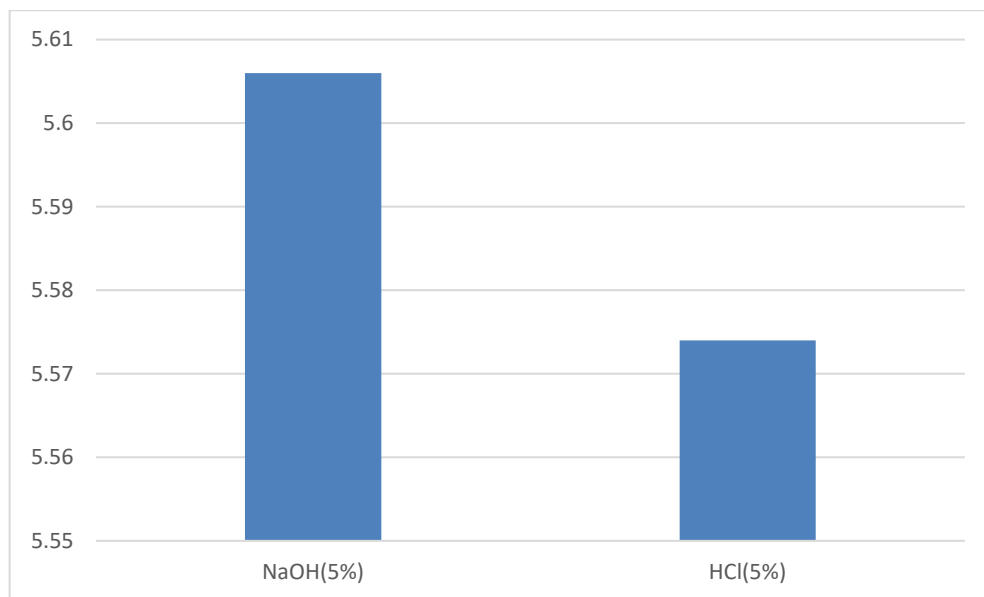
L'examen des valeurs mesurées à 12 minutes révèle des écarts faibles mais significatifs entre les différentes solutions. Les solutions d'HCl conduisent à des masses inférieures à celle obtenue avec NaOH 5 %, et cette diminution devient plus marquée lorsque la concentration de l'acide augmente.

Par ailleurs, l'augmentation de la température favorise également la diminution de la masse finale, traduisant une amélioration de l'efficacité du nettoyage. En effet, une température plus élevée accélère la dissolution des dépôts et facilite leur élimination.

Ces observations montrent que l'acide chlorhydrique possède une meilleure capacité de dissolution des dépôts dans les conditions expérimentales adoptées. Parmi les solutions testées, HCl 5 % donne le résultat le plus satisfaisant et semble offrir la meilleure efficacité de nettoyage.

Résultats du protocole 5 :**Tableau III.24** : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.

Temps(min)	NaOH (5%)	HCl (5%)
24	5,606	5,574

**Figure III.38** : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5%) et HCl (5%)

- **Interprétation des résultats**

L'allongement du temps de traitement de 12 à 24 minutes entraîne une diminution supplémentaire de la masse pour les deux solutions. Cette réduction est particulièrement visible avec HCl 5 %.

Par ailleurs, l'augmentation de la température accentue cette diminution de la masse finale, ce qui indique une amélioration de l'efficacité du nettoyage. Une température plus élevée favorise en effet la dissolution des dépôts et accélère leur élimination.

Les résultats montrent que le prolongement du temps de contact permet de poursuivre l'élimination des dépôts. L'acide chlorhydrique présente toutefois une efficacité supérieure, traduite par des masses finales plus faibles.

Echantillon teinté et entartré

- Résultats du protocole 1:

Tableau III.25 : résultats de nettoyage d'un échantillon teinté et entartré.

temps(min)	NaOH (1%)	HCl (0,25%)
3	9,835	6,459
6	8,378	6,198
9	7,649	6,148
12	7,25	6,117

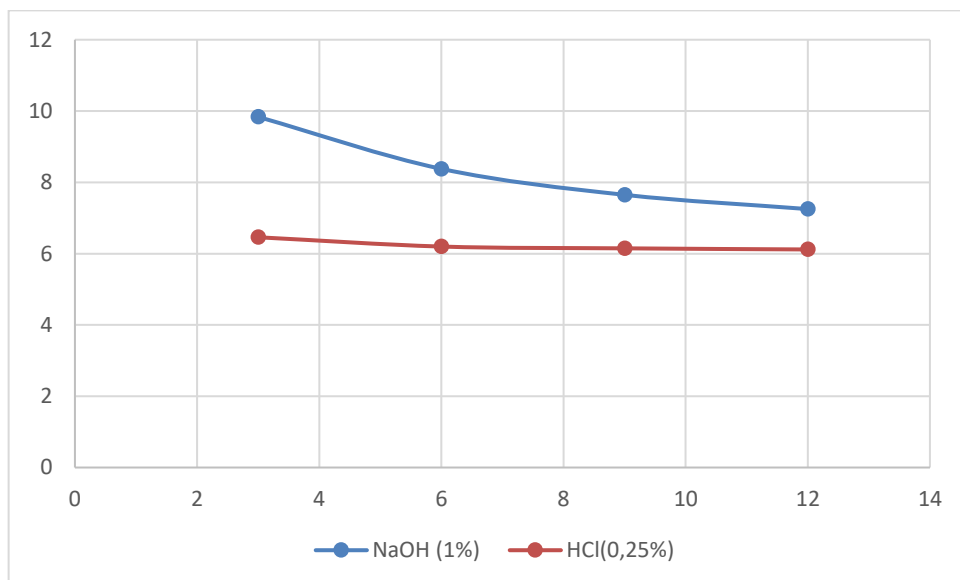


Figure III.39 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(1%) et HCl (0,25%)

- **Interprétation des résultats**

Une diminution nette de la masse est observée dès les premières minutes de traitement. Les valeurs passent de 9,835 à 7,25 avec NaOH 1 %, tandis qu'elles évoluent de 6,459 à 6,117 avec HCl 0,25 %.

Cette baisse témoigne de l'élimination progressive des dépôts combinés de tartre et d'encrassement. L'action du NaOH apparaît plus marquée dans cet essai, avec une perte de masse plus importante sur la durée de l'expérience.

- **Résultats du protocole 2:**

Tableau III.26 : résultats de nettoyage d'un échantillon teinté et entartré.

Temps(min)	NaOH (2%)	HCl (0,5%)
12	6,082	6,043
24	6,073	6,041

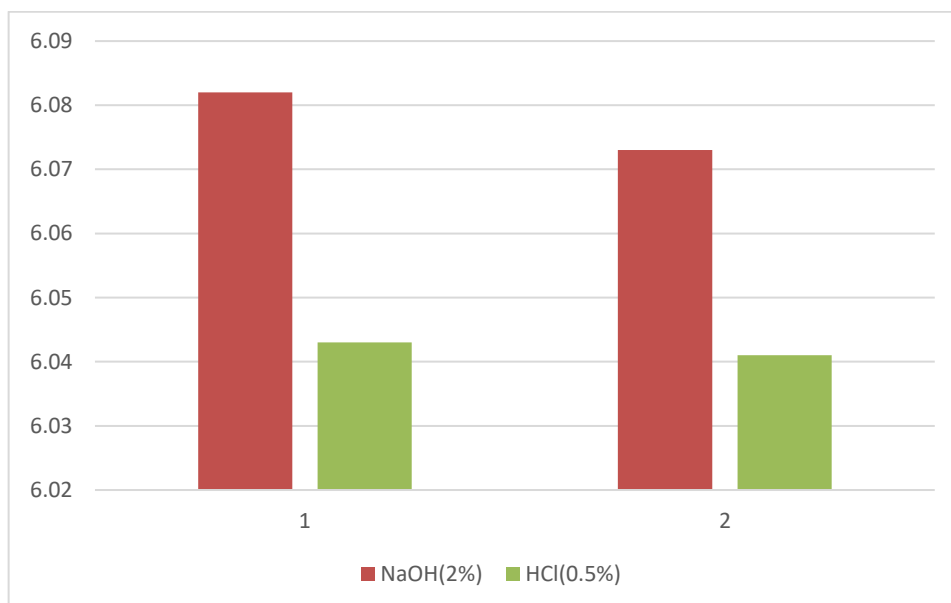


Figure III.40 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(2%) et HCl (0,5%)

- **Interprétation des résultats**

Les valeurs mesurées diminuent légèrement entre 12 et 24 minutes pour les deux solutions. Cette évolution confirme la poursuite du processus de nettoyage lorsque le temps de contact est prolongé.

L'effet reste toutefois limité, ce qui indique que la majorité des dépôts a déjà été éliminée avant 12 minutes. Les gains supplémentaires obtenus après cette durée deviennent progressivement moins importants.

- **Résultats du protocole 3:**

Tableau III.27 : résultats de nettoyage d'un échantillon teinté et entartré.

Temps(min)	NaOH (3%)	HCl (0,75%)
12	6,026	5,954
24	6,013	5,952

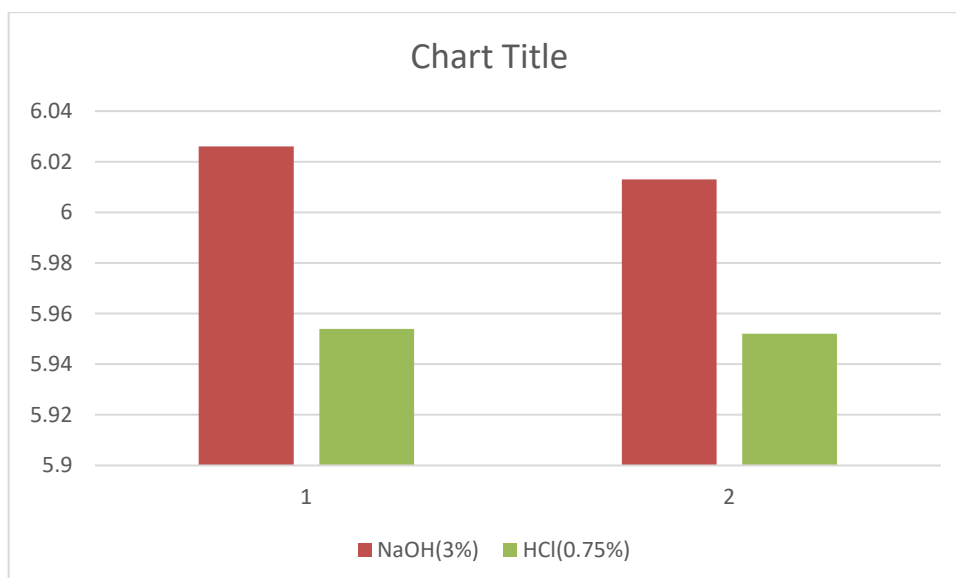


Figure III.41 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(3%) et HCl (0,75%)

- **Interprétation des résultats**

Une légère diminution des masses est observée après 24 minutes de traitement. Les variations restent faibles mais régulières pour les deux solutions.

Ces résultats montrent que les agents chimiques continuent à agir sur les résidus encore présents à la surface de l'échantillon. Le nettoyage reste efficace mais tend vers une phase de stabilisation.

- **Résultats du protocole 4:**

Tableau III.28 : résultats de nettoyage d'un échantillon teinté et entartré.

Temps(min)	NaOH (5%)	HCl (1%)
12	5,95	5,718
24	5,847	5,634

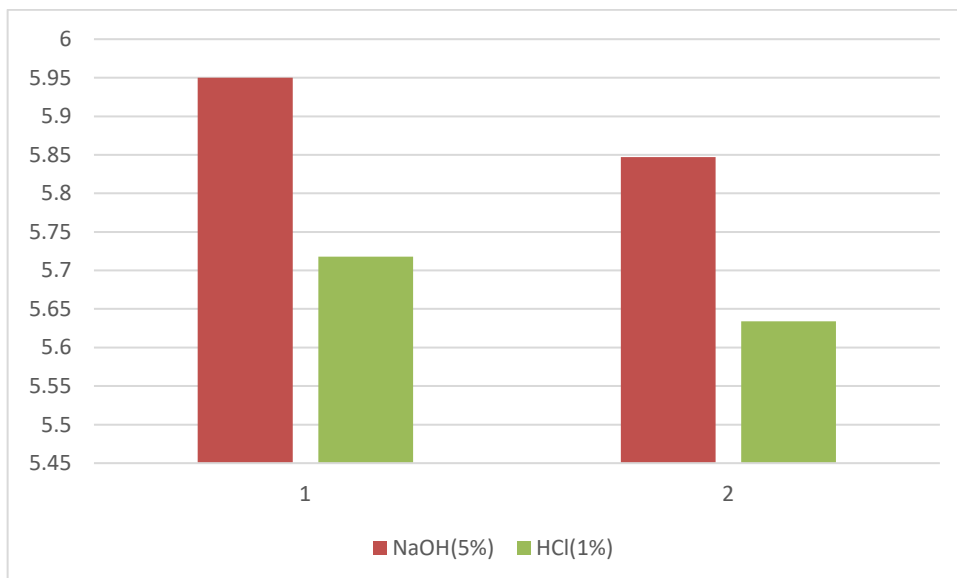


Figure III.42 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH(5%) et HCl (1%)

- **Interprétation des résultats**

Les valeurs enregistrées à 24 minutes sont inférieures à celles obtenues à 12 minutes. La diminution est plus marquée pour HCl 1 %, qui atteint la masse finale la plus faible.

Cette observation met en évidence l'influence positive du temps d'immersion sur l'efficacité du traitement. L'acide chlorhydrique présente une meilleure capacité à éliminer les dépôts persistants dans les conditions étudiées.

- **Résultats du protocole 5:**

Tableau III.29 : résultats de nettoyage d'un échantillon teinté et entartré.

Temps(min)	HCl(3%)	HCl (5%)
12	5,561	5,508
24	5,521	5,501

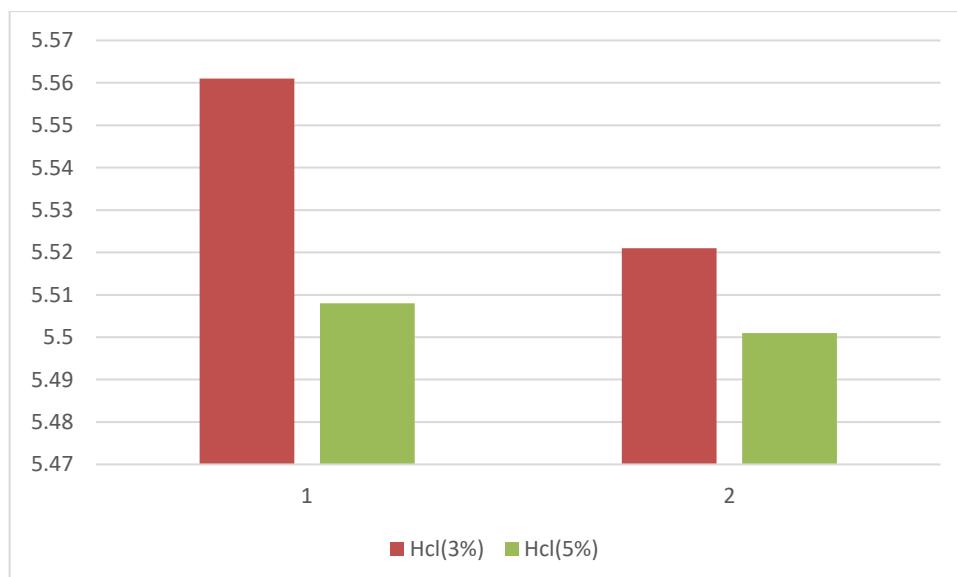


Figure III.43 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (3%) et HCl (5%)

- **Interprétation des résultats**

Les deux concentrations conduisent à une diminution progressive de la masse entre 12 et 24 minutes. Les valeurs obtenues avec HCl 5 % restent systématiquement inférieures à celles de HCl 3 %.

Ces résultats montrent qu'une concentration plus élevée améliore l'efficacité du nettoyage chimique. HCl 5 % permet ainsi une élimination plus poussée des dépôts et offre les meilleures performances parmi les concentrations comparées.

Conclusion

Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité du nettoyage chimique dépend principalement de la nature du dépôt, de la concentration des solutions utilisées, du temps de contact et de la température. La soude (NaOH) a présenté une bonne efficacité pour l'élimination des dépôts organiques et huileux, tandis que l'acide chlorhydrique (HCl) s'est révélé plus performant pour la dissolution du tartre. L'augmentation de la concentration et de la température a permis d'améliorer les performances de nettoyage.

Cette étude a permis de proposer un protocole de nettoyage chimique applicable aux échangeurs de chaleur, afin de limiter les phénomènes d'encrassement et d'entartrage, d'améliorer les performances des équipements et de réduire les coûts de maintenance.

Conclusion générale

Au terme de ce travail consacré à la proposition et à l'évaluation d'un produit chimique pour le nettoyage des échangeurs de chaleur à plaques, il apparaît que les phénomènes d'encrassement et d'entartrage constituent des facteurs majeurs de dégradation des performances thermiques des équipements industriels. L'accumulation de dépôts sur les surfaces d'échange entraîne une diminution de l'efficacité du transfert de chaleur, une augmentation de la consommation énergétique ainsi qu'une hausse des coûts de maintenance.

L'étude expérimentale réalisée a permis d'évaluer l'efficacité de différentes solutions de nettoyage à base d'hydroxyde de sodium (NaOH) et d'acide chlorhydrique (HCl) sur plusieurs types de dépôts simulés. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité du nettoyage dépend fortement de la nature du dépôt, de la concentration de la solution utilisée ainsi que du temps de contact. Parmi les produits testés, l'acide chlorhydrique à 5 % a présenté les meilleures performances pour l'élimination des dépôts entartrés, grâce à son action rapide et à sa capacité élevée de dissolution.

Cette étude a également mis en évidence l'importance d'optimiser les conditions opératoires afin d'obtenir un nettoyage efficace tout en limitant les risques de corrosion des matériaux. Le nettoyage chimique apparaît ainsi comme une solution simple, économique et performante pour restaurer les performances des échangeurs de chaleur et prolonger leur durée de vie.

Enfin, ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour l'évaluation de nouveaux produits de nettoyage moins corrosifs et plus respectueux de l'environnement, ainsi que pour l'étude de leur application à l'échelle industrielle dans le cadre des opérations de maintenance préventive et corrective des équipements thermiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. Documentation Total. Support de formation Exploration et production Cours des équipements. Total (EXP-PR-EQ120-FR). Révision 0,1 (16-04-2007)
- [2] Bennajah, M., et Chaouni, N. (2014). Échangeurs de chaleur : Technologie, calcul et design. Paris : Editions TECHNIP.
- [3] A. Degiovanni «Transmission de l'énergie thermique: Conduction», techniques de l'ingénieur [BE 8200].
- [4] J-L. Battaglia, A. Kusiak, J-R Puiggali «Introduction aux transferts thermiques», édition Dunod, Paris, 2010.
- [5] J-F. Sacadura «Initiation aux transferts thermiques», technique et documentation Lavoisier, 1982.
- [6] P.Trambouze «Le raffinage du pétrole: 4- Matériels et équipements» Document de l'IFP, Editions technip, 1999.
- [7] TAOURIT FARIDA ; Étude du comportement dynamique et Thermique de deux écoulements des fluides dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes), Mémoire de Master en Génie Energétique, Université Abou Bakr Belkaid-TLEMEN (2012/2013)
- [8]<https://rpn.univ-lorraine.fr/UL/echangeurs-de-chaleur/co/distributiontemperatureechangeur.html>
- [9]https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-deux-types-dechangeurs-a-courants-croises_fig5_385045983
- [10] F.Bouزيد, Simulation thermique d'un échangeur de chaleur a faisceau tubulaire et calandre, mémoire de master,2020.
- [11] <https://xlg-heattransfer.com/fr/gamme-industrielle/>

- [12] http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5218/4/Chapitre_I_.pdf
- [13] <https://perheattransfer.ch/doppelrohr-waermetauscher/>
- [14] N.Belhadi, Étude thermique d'un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire et calandre (Eau de mer/Ammoniac), 2019.
- [15] <https://www.batiweb.com/actualites/publi-redactionnels/pompe-a-chaleur-air-eau-alfea-excellia-s-pour-realiser-un-maximum-d-economies-44453>
(Eau de mer/Ammoniac), 2019.
- [16] H.E.Boughedir et N.Abdelaoui, étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur a tubes concentrique optionnel H 102A.
- [17] https://www.researchgate.net/figure/Principe-dun-changeur-de-chaleur-tubes-calandre-11_fig7_274710463
- [18] M.Benkirat et F.Talbi, Etude et vérification des performances des échangeurs de la raffinerie RA1K, mémoire de master ,2022.
- [19] <https://share.google/AobsE3BYMsFnVro5c>
- [20] <https://www.alfalaval.fr/produits/echange-thermique/echangeurs-de-chaleur-a-plaques/echangeurs-thermiques-plaques-et-joints/>
- [21] A.Bontemps, A.Garrigue, C.Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, R. Vidil «Problèmes de fonctionnement» techniques de l'ingénieur [B2344], 2012.
- [22] B.Fosset, J-B. Baudin, F.Lahitète, V.Prévost «Chimie TOUT-EN-UN», édition Dunod, Paris, 2008.
- [22] BALDERACCHI R, 2009. L'eau dans l'organisme. Centre national de la recherche scientifique (CNRS).
- [23] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-eau-5715/>

- [24] Hossain, M. F. (2019). Sustainable design and build: Building, energy, roads, bridges, water and sewer systems. Butterworth-Heinemann
- [25] Nordmann, F. et Pinard, L-G. (2000) - Chimie de l'eau et corrosion des REP. Dossier N° BN3750 . corrosion vieillissement. Matériaux. technique de l'ingénieur.
- [26] Durend R . (2001). L'eau et la vie .Opéra .Nantes .p 76 -86.
- [27] Durend R . (2001). L'eau et la vie .Opéra .Nantes .p 76 -86.
- [28] Degremont, G., (2005) - Mémento technique de l'eau. Tome 1, 10eme éd. : Tec et doc : 3-38.
- [29] Société DEGREMONT. (1989) - Mémento technique de l'eau. 2 volumes. 1ère édition Technique et Documentation Lavoisier. Paris, France : 18
- [30] Boeglin, J-C (2001) - Propriétés des eaux naturelles. Dossier N° G1110. Environnement Technologies de l'eau. Technique de l'ingénieur.
- [31] http://julientap.free.fr/travail_fichiers/TP_chimie_eau.pdf (Consulté le 21/05/2022)
- [32] <http://www.iaea.org/fr/themes/les-eaux-souterraines>(Consulté le 21/05/2022)
- [33] Degremont., (2005) : « Mémento technique de l'eau », Deuxième édition tom1.
- [34]: HAL. Id: tel-00739023 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00739023> Submitted on 5 Oct 2012
- [35] <https://www.wattco.com/fr/2020/09/4-causes-et-solutions-courantes-de-lencrassement-des-rechauffeurs-a-circulation/>
- [36] Bott Bott, T.R., Fouling of Heat Exchangers, Editions Elsevier, Amsterdam-Lausanne-New-YorkOxford- Shannon-Tokyo, 1995.
- [37] Sheikh et al. A risk based heat exchanger analysis subject to fouling: Economics of heat exchangers cleaning, Energy 25, Elsevier Ed, p 445-461, 2000

- [38] Kern et Seaton Kern, A theoretical analysis of thermal surface fouling., *Britanic Chemical Sciences* 4, Volume 5, p 258-262, 1959.
- [39] A.Khettou, étude de l'encrassement du circuit de refroidissement du kérosène de la raffinerie d'Alger RA1G.
- [40] Wattco, « Comprendre l'encrassement : ses effets sur le transfert de chaleur », Wattco.com, 18 oct. 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.wattco.com/fr/2023/10/comprendre-lencrassement-ses-effets-sur-le-transfert-de-chaleur/>. [Accès le : JJ-Mois-AAAA].
- [41] Croix, J. « Généralités Sur L'encrassement Des Echangeurs » Note Technique Greth 83/12. (1983)
- [42] *European Heat Exchanger Markets*, #3752-17, Frost & Sullivan, 1999.
- [43] Epstein, N« Fouling In Heat Exchangers » *Fouling Of Heat Transfert.* , (1981)
- [44] Knudsen J.G, Somerscales E, F, C *Equipment*; Hemisphere, Wash DC , (1975)
- [45] Bott, M, N,. *Process Engineering* P76. (1975)
- [46] Somerscales, E, F, C, Knudsen, J, G, personal Communication, (1), 1-4. (1977)
- [47] Bennajah, M., et Chaouni, N. (2014). *Échangeurs de chaleur : Technologie, calcul et design* (p. 42). Paris : Editions TECHNIP.
- [48] <https://share.google/uWMuBtmTHfdCDkT3U>
- [49] <https://www.chemaqua.com/fr-ca/blog/2018/08/08/repertoriage-des-types-de-corrosion-dans-les-systemes-deau/>
- [50] <https://www.tempeco.it/blog/en/5909/fouling-in-heat-recovery-heat-exchangers/>

<https://www.tempeco.it/blog/en/5909/fouling-in-heat-recovery-heat-exchangers/>

[51] https://fr.wikipedia.org/wiki/Encrassement_biotologique

[52] D. Grillot, «l'encrassement dans les échangeurs.», Edition GRET. 1991.

[53] https://www.memoireonline.com/01/13/6767/m_Etude-de-l-influence-de-la-temperature-du-fluide-sur-la-performance-d-un-echangeur-de-chaaleur-de-111.html

[54] 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.

[55] Alamy. (s. d.). Tube ou plaque d'échangeur thermique ou de chaudière avec dépôts minéraux durs (tartre) et corrosion [Photographie]. Récupéré le 20 octobre 2023, de

<https://www.alamyimages.fr/tube-ou-plaque-de-l-echangeur-thermique-ou-de-la-chaudiere-gros-plan-texture-macro-diagonale-plein-de-depots-mineraux-durs-insolubles-sels-tartre-et-cor-image359906431.html>

[56] 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].

[57] Cazenave, F. (2019). Modélisation et simulation de l'encrassement des échangeurs de chaleur pour eaux géothermales (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour). HAL.

[58] Marne,J,Webb,R,L« Worschop On An Assesment Of Gas Side Fouling In Fossing Fuel Exhaust Environment » Doe/Id,12138. (1982)

[59] Duffau, C, Grillot, J, M, « L'encrassement Dans Les Echangeurs, Description, Prévention, Remèdes », GRETH. (1991).

[60]: Photos trouve à SONATRACH Rhourd Nous devisions d'exploite CSC-ECHANGEUR DE

CHALEUR P10-GA-21-02 en 2016/03/12

[61]: un mémoire 2014 : Etude des pertes de charge dans un tronçon de train de préchauffage du TOPPING et équipement Page 42-44.

- [62] <https://conco.net/fr/systeme-de-nettoyage-de-tubes-excalibertm>
- [63] <https://www.watexfr.com/echangeur-de-chaleur-jet-deau-haute-pression/>
- [64] <https://ventiloexpair.com/service/nettoyage-dechangeurs-dair/>
- [65] Lelementarium. Fer-blanc. Disponible sur : <https://lelementarium.fr/product/fer-blanc/> □
(Consulté le : 19/05/2026)
- [66] <https://material-properties.org/fr/fer-blanc-densite-resistance-durete-point-de-fusion/>
- [67] <https://maestrovirtuale.com/fr/chlorure-de-calcium-cacl2-structure-utilisations-et-propri%C3%A9t%C3%A9s/>
- [68] <https://www.chemategroup.com/fr/what-is-sodium-bicarbonate/>
- [69] https://fr-academic.com/pictures/frwiki/83/Sodium_bicarbonate.png