



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 août 1955-SKIKDA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE PÉTROCHIMIE

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Industrie Pétrochimique

Spécialité : Génie Pétrochimique

*Proposition d'un décapage chimique et une protection par
peinture à base d'huile contre l'encrassement
et la corrosion : cas des échangeurs*

Réalisé par :

- ❖ DAMACHE Rania
- ❖ GUEHAM Fatima Manel

Encadré par

- ❖ Dr. BOUSSAHA El Hadi

Année universitaire : 2024-2025

Remerciements

Nos remerciements vont tout d'abord à Dieu pour la santé, la force et le courage qu'Il nous adonnés afin de mener à bien ce modeste travail.

Nos sincères remerciements vont également à notre encadrant, **Dr. BOUSSAHA El Hadi**, pour ses conseils avisés et son accompagnement précieux tout au long de ce projet. Nous remercions également **Dr. MECHATI** et **Dr. SAADI** pour leurs orientations judicieuses et leur soutien constant.

Nous adressons sincèrement nos plus vifs remerciements à **Dr. CHARIME Razika**, de Sonatrach, pour son aide inestimable et sa disponibilité. Nous avons pu, tout au long de notre travail, bénéficier de son expertise et de ses points de vue très constructifs.

Nos pensées vont également à l'ensemble du personnel qui nous a accompagnés lors de notre passage à Sonatrach, notamment à la raffinerie : **Mr. Chérif, Mr. Ali Fares et Mr. Chemsseddine**, pour leur collaboration et leur soutien sur le terrain.

Enfin, nous remercions chaleureusement l'équipe du laboratoire au Hall de Technologie, dont l'appui a été essentiel dans le cadre de nos analyses et expérimentations.

À toutes ces personnes, nous exprimons notre profonde reconnaissance pour leur contribution à la réussite de ce travail.

Dédicaces

À mon héros **Papa**

Ton absence est grande, mais ton empreinte est encore plus forte. Sans toi, je ne serai pas arrivé là où je suis aujourd'hui. Ton soutien, ta douceur et ton amour continuent de m'accompagner même après ton départ.

À **ma mère**, mon trésor le plus précieux

Ma mère, qui a œuvré sans relâche pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, À toi, **maman**, pour ta présence constante et ta lumière dans ma vie, je dédie ce travail avec toute ma reconnaissance et tout mon amour

À mon cher frère, **Dahmane**

Ton soutien a été mon ancre dans le tempête, merci pour tes encouragements, ta présence constante. Tu as toujours été là pour moi, Tu es mon pilier, un appui précieux sur lequel j'ai toujours pu compter. Cette réussite, je te la dédie avec tout mon cœur.

À mes étoiles **Amira, Rima**

Vous qui avez illuminé mon chemin quand l'obscurité voulait tout éteindre. Merci pour votre amour votre soutien inconditionnel. Vous êtes ma force, ma lumière je vous aime de tout au fond de mon cœur

À ma chère **Roufaïda**

Ta présence à mes côtés a été d'un grand soutien. Merci pour tes encouragements, tes conseils précieux,

À mes anges : **Djawed, Mouhamed Firas, Talin, Darine**

Je t'aime beaucoup mes petits.

À mon petite **Rania**

Aujourd'hui, grace à dieu tu es arrivée là où tu voulais être. Merci de ne pas avoir abandonné.

À mes amis **Nada, Aya**

Merci du fond du cœur pour votre présence, votre soutien et vos mots qui m'ont toujours motivée
Merci d'avoir été là.

À ma binôme **Manel**

Tu as pris une grande place dans mon cœur au fil de ces années. Merci pour les beaux jours qu'on a vécu ensemble, et surtout pour ton encouragement que tu m'as toujours donné. Je te souhaite tout le succès et le bonheur dans ta vie.

Rania

Dédicaces

*A mes chers **parents**,*

*Aucun hommage ne pourrait égaler l'amour incommensurable que vous ne cessez de me prodiguer.
Que Dieu vous accorde une santé parfaite et une longue vie remplie de bonheur*

*À ma très chère **grand-mère**,*

*Votre présence, vos prières et votre douceur ont illuminé mon chemin. Que Dieu vous comble de
santé, de bonheur et de sérénité pour de longues années encore*

*À ma très chère Sœur **Rym** et à ma tante **Razika**,*

*Aucune phrase, aussi expressive soit-elle, ne saurait traduire l'étendue de mon amour, de mon
respect, et de ma gratitude envers vous. Votre tendresse et votre soutien m'ont accompagné tout au
long de mon parcours. Vous êtes toutes les deux un modèle de générosité, de sagesse et de force pour
moi. Que Dieu vous protège, vous accorde une vie longue et heureuse, et qu'Il me donne toujours la
force de ne jamais vous décevoir.*

*À mon oncle **Karim**,*

*Votre présence et votre soutien dans les moments difficiles ont été précieux. Je ne saurai jamais
exprimer pleinement à quel point je vous suis reconnaissant. Je vous porte un amour sincère et
inconditionnel. Que Dieu vous protège et vous accorde une vie remplie de bonheur et de sérénité.*

*À mes chers frères et sœurs : **Sara, Salah, Mehdi et Daoud**,*

Vous êtes une source constante de joie et d'encouragement dans ma vie. Je vous aime profondément.

*À mes chères amies **Rania, Hidaya, Marwa** et mes camarades de classe*

Merci pour votre amitié sincère, votre soutien et tous les souvenirs précieux que nous avons partagé.

*A mon binôme **Rania**,*

*Pour les précieux souvenirs partagés au cours de nos années d'études, en particulier durant les trois
dernières années. Tu occupes une place très spéciale dans mon cœur, Je te souhaite une vie pleine de
bonheur, de santé et de réussite.*

Manel

Résumé

L'encrassement est défini comme étant l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affectant une grande variété d'opérations industrielles. Dans le cas des échangeurs, la présence d'un fort gradient thermique près de la surface peut perturber ses mécanismes et leurs fonctionnements à cause de l'encrassement. Les objectifs recherchés de ce travail consistent à proposer une solution au problème de bouchage dans les échangeurs thermiques par un lavage avec des produits chimiques (la soude, l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique) à concentrations appropriées, et d'étudier leurs influences sur la peinture (Xf-13865 WHITE LACQUER) de protection de l'équipement. Les résultats obtenus ont montré que les peintures protègent la surface des matériaux en se dégradant pour un temps limité causé par les milieux acides.

Mots clés : l'encrassement, échangeur thermique, lavage, produits chimiques, peinture

عرّف التكلّس (Fouling) على أنه تراكم عناصر صلبة غير مرغوب فيها على سطح معين، مما يؤثر على العديد من العمليات الصناعية. وفي حالة المبادلات الحرارية، فإن وجود تدرج حراري مرتفع بالقرب من السطح قد يعرقل آلية عملها ووظيفتها بسبب التكلّس. تهدف هذه الدراسة إلى اقتراح حل لمشكلة الانسداد في المبادلات الحرارية من خلال التنظيف باستعمال مواد كيميائية (هيدروكسيد الصوديوم، حمض الهيدروكلوريك، وحمض الكبريتيك)، ودراسة تأثير هذه المواد على الطلاء (Xf-13865 WHITE LACQUER) وقد أظهرت نتائج دراستنا أن الطلاءات تحمي أسطح المواد، لكنها تتدهور خلال فترة زمنية محدودة تحت تأثير الظروف الحمضية.

الكلمات المفتاحية: التكلّس، المبادلات الحرارية، التنظيف، المواد الكيميائية، الطلاء

Abstract

Fouling is defined as the accumulation of unwanted solid elements on an interface, affecting a wide range of industrial operations. In the case of heat exchangers, the presence of a high thermal gradient near the surface can disrupt their mechanisms and functioning due to fouling. The objectives of this work are to propose a solution to the clogging problem in exchangers through cleaning with chemical products (sodium hydroxide, hydrochloric acid, sulfuric acid) and to study their effects on paint (Xf-13865 WHITE LACQUER). Our study revealed that paints protect material surfaces by degrading over a limited time due to the acidic conditions.

Keywords: fouling, heat exchanger, cleaning, chemical products, paint.

TABLE DES MATIERES

Titre ou sous-titre	Page
Résumé	i
Liste Des Figures	ii
Liste Des Tableaux	iii
Liste Des Abréviations	v
Introduction générale	1
Référence bibliographique	3

PARTIE THÉORIQUE

CHAPITRE I : Généralités sur le nettoyage en place et les produits de nettoyage	5
I.1 Introduction	6
I.2 Définition du nettoyage	6
I.3 Principe de nettoyage	6
I.4 Produit de nettoyage	7
I.4.1 Les dérivés halogénés	7
I.4.2 Les composés d'ammoniums quaternaires	8
I.4.3 Les produits amphotères	8
I.4.4 Les aldéhydes	9
I.4.5 Les détergents	9
I.4.6 Les tensioactifs	10
I.4.7 Les séquestrants ou les chélatants	11
I.4.8 Les solutions alcalines	11
I.4.9 Les solutions acides	12
I.5 Méthode de nettoyage	12
I.5.1 Nettoyage mécanique	12
I.5.2 Nettoyage chimique	13
I.6 Les règles essentielles du nettoyage	13
I.7 Procédure de nettoyage	14
I.8 Facteurs d'efficacité de nettoyage	15

I.8.1 Le temps	15
I.8.2 La température	15
I.8.3 L'action mécanique	16
I.8.4 L'action chimique	16
I.9 Notions de choix des détergents	18
I.9.1 Notion de pH	18
I.9.2 Notion de dureté de l'eau	18
I.10 Les types de nettoyage	18
I.10.1 Le nettoyage manuel	19
I.10.2 Le nettoyage semi-automatique	19
I.10.3 Le nettoyage automatique	19
I.11 Procédé de nettoyage en place	20
I.11.1 Protocole d'un nettoyage en place	20
I.11.2 Principe du NEP	20
I.11.3 Les différents types de nettoyage en place	21
I.11.4 Le NEP et les exigences pour la technologie de pompage	22
I.11.5 Les circuits de NEP	22
I.11.6 Avantages et attentes d'un système de nettoyage NEP	23
I.12 Conclusion	23
Références bibliographiques	24
CHAPITRE II : Généralité sur les échangeurs et l'encrassement	28
II.1 Introduction	29
II.2 Définition d'un échangeur de chaleur	29
II.3 Principaux types des échangeurs de chaleur	29
II.3.1 Échangeurs tubulaires	29
II.3.2 Échangeurs à plaques	32
II.3.3 Échangeurs tubulaires à faisceau et calandre	33
II.4 Notions sur l'encrassement des échangeurs	35
II.4.1 Aspect physique de l'encrassement	35
II.4.2 Aspect économique et environnemental de l'encrassement	36
II.5 Classification des différents types d'encrassement	37

II.5.1 Encrassement particulaire	37
II.5.2 Encrassement par précipitation	37
II.5.3 Encrassement dû à la corrosion	38
II.5.4 Encrassement biologique	39
II.5.5 Encrassement par réaction chimique	39
II.5.6 Encrassement par solidification	40
II.6 Nature du dépôt	40
II.6.1 Dépôt dur	40
II.6.2 Dépôt poreux	40
II.6.3 Dépôt mou	40
II.7 Les processus fondamentaux de l'encrassement (Mécanismes)	41
II.7.1 Initiation	41
II.7.2 Transport des particules dans le fluide jusqu'au voisinage de la paroi	41
II.7.3 La déposition	42
II.7.4 Réentraînement des particules déposées	42
II.7.5 Vieillessement du dépôt	43
II.8 Facteurs influençant l'encrassement	44
II.8.1 Géométrie de l'échangeur (zones stagnantes)	44
II.8.2 Effet de la vitesse	44
II.8.3 Effet de la température de surface	45
II.8.4 Effet de la granulométrie des particules	45
II.9 Conséquences de l'encrassement	45
II.10 Conclusion	46
Références bibliographiques	49

PARTIE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE III : Procédures Expérimentales	51
III.1 Introduction	52
III.2 Objectifs de l'étude	52
III.3 Présentation de la raffinerie de Skikda (RA1K)	52
III.3.1 Mission de la raffinerie (RA1K)	52

III.3.2 Situation géographique	52
III.4 Description des unités de production de la raffinerie de Skikda (RA1K)	53
III.4.1 Unités de distillation atmosphérique (U10 et U11)	55
III.4.2 Unité de production de bitume (U70)	55
III.4.3 Gas-Plant (U30, U31 et U104)	55
III.4.4 Unités Reforming Catalytique (U100, U103)	55
III.4.5 Unité de récupération des aromatiques (U200)	56
III.4.6 Unité de récupération paraxylènes (U400)	56
III.4.7 Unité d'Isomérisation du xylène (U500)	56
III.4.8 Unités de prétraitement et d'isomérisation de naphta léger	56
III.4.9 Unité de purification d'hydrogène (U900)	57
III.4.10 Unités des utilités	57
III.4.11 Unité de stockage, mélange et expédition	58
III.5 Produit utilisé par RA1K pour le nettoyage des équipements	59
III.5.1 Acide sulfamique	59
III.6 Procédure de lavage chimique du circuit de refroidissement des pompes Topping	60
III.7 Programme expérimental, méthodes et techniques	62
III.7.1 Méthodes	62
III.7.2 Matériaux utilisés	63
III.8 Procédés de nettoyage	64
III.9 Procédé expérimental	67
III.9.1 Encrasse	67
III.9.2 Peinture	69
III.10 Préparation des solutions	71
III.11 Protocole de nettoyage chimique	79
III.12 Conclusion	82
Références bibliographiques	83
CHAPITRE IV : Résultats et discussions	84
IV.1 Introduction	85
IV.2 Effet du décapage chimique sur l'encrassement	85

IV.2.1 Masses et pertes de masse – Interprétations	85
IV.3 Conclusion	109
Conclusion Générale et perspectives	111
Annexes	112

LISTE DES FIGURES

Figure No.	Titre	Page
CHAPITRE I : Généralités sur le nettoyage en place et les produits de nettoyage		
Figure I.1	Classification des dérivés halogénés.	7
Figure I.2	La formule d'un ammonium quaternaire.	8
Figure I.3	Schéma simplifié d'un tensioactif.	11
Figure I.4	Schéma de synthèse de la conception d'une procédure de nettoyage.	14
Figure I.5	Mécanismes d'élimination des souillures.	15
Figure I.6	Cercle de Sinner (comptoir de la droguerie, 2010).	17
CHAPITRE II : Généralité Sur les échangeurs et l'encrassement		
Figure II.1	Échangeur monotube.	30
Figure II.2	Échangeur coaxial cintré.	30
Figure II.3	Échangeur à tubes séparés.	30
Figure II.4	Échangeur à tubes rapprochés.	31
Figure II.5	Échangeur à tubes ailettes.	31
Figure II.6	Échangeur à tubes et calandre.	32
Figure II.7	Échangeur à plaques.	32
Figure II.8	Échangeur à tubes et calandre : principales technologies à boîte fixe, boîte flottante et à tube en U.	34
Figure II.9	Divers constituants d'un échangeur de chaleur à tubes et calandre.	34
Figure II.10	L'encrassement dans un échangeur tubulaire.	35
Figure II.11	Échangeur. Corrosion importante.	38
Figure II.12	Dépôt salin bactérien.	39
Figure II.13	Le phénomène de thermophorèse.	42
Figure II.14	Représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide.	43

CHAPITRE III : Programme expérimental et Méthodes d'essais

Figure III.1	Situation géographique de la raffinerie de Skikda.	53
Figure III.2 (a-b)	La zone de réhabilitation et la zone d'adaptation de RA1/K	54
Figure III.3 (a-b)	Etat des tubes des échangeurs avant et après le lavage chimique	62
Figure III.4	L'acide sulfurique H ₂ SO ₄	65
Figure III.5	Hydroxyde de sodium	66
Figure III.6	L'acide chlorhydrique HCl	66
Figure III.7	Immersion des échantillons A et B dans l'huile EXOL 10W40	67
Figure III.8 (a-b)	Masse de l'échantillon A avant et après ajout de l'huile	67
Figure III.9	Masse de l'échantillon B avant et après ajout de l'huile	68
Figure III.10	Échantillons (A, B, C) teintés	69
Figure III.11	Masse de l'échantillon A avant et après application de la peinture	69
Figure III.12	Masse de l'échantillon B avant et après application de la peinture	69
Figure III.13	Masse de l'échantillon C avant et après application de la peinture	70
Figure III.14	Immersion de l'échantillon A dans une solution aqueuse de (5%) H ₂ SO ₄	70
Figure III.15	Immersion de l'échantillon B dans une solution aqueuse de (5%) H ₂ SO ₄	70
Figure III.16	Immersion de l'échantillon C dans une solution aqueuse de HCL (5%)	71
Figure III.17	Solution aqueuse de 12% H ₂ SO ₄	71
Figure III.18	Solution aqueuse de 2% H ₂ SO ₄	72
Figure III.19	Solution aqueuse de 1,5% H ₂ SO ₄	73
Figure III.20	Solution aqueuse de 1% H ₂ SO ₄	73
Figure III.21	Solution aqueuse de 0,5% H ₂ SO ₄	74
Figure III.22	Solution aqueuse de 5% NaOH	75

Figure III.23	Solution aqueuse de 2% HCl	77
Figure III.24	Solution aqueuse à 5% HCl	78
Figure III.25	Immersion de l'échantillon dans la solution aqueuse de H ₂ SO ₄ à 12%	79
Figure III.26	Echantillon avant traitement à l'acide H ₂ SO ₄ (12%)	80
Figure III.27	Echantillon après traitement à l'acide H ₂ SO ₄ (12%)	80
Figure III.28	Masse de l'échantillon A après 330 secondes de traitement à l'acide H ₂ SO ₄ (12%)	80
Figure III.29	Masse de l'échantillon A après 2840 s de traitement à l'acide H ₂ SO ₄ (12%)	80
Figure III.30	Échantillon immergé dans une solution de HCl à 0,5 % pendant 30 secondes	81
Figure III.31	Echantillon avant traitement avec NaOH et HCl	81
Figure III.32	Echantillon après traitement avec NaOH et HCl	81
CHAPITRE IV : Résultat et discussion		
Figure IV.1	Dégradation de la masse de l'échantillon A en fonction du temps d'immersion dans H ₂ SO ₄ à 12%	88
Figure IV.2	Variation de la perte de masse de l'échantillon A en fonction du temps d'immersion dans H ₂ SO ₄ à 12 %	89
Figure IV.3	Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NAOH et HCl exp 1	90
Figure IV.4	Dégradation de la masse de l'échantillon C dans HCL et NAOH exp 2	91
Figure IV.5	Dégradation de la masse de l'échantillon C dans HCL et NAOH exp 3	91
Figure IV.6	Dégradation de la masse de l'échantillon C dans HCL et NAOH exp 4	92
Figure IV.7	Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl exp 5	93
Figure IV.8	Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NAOH et HCL exp 6	93
Figure IV.9	Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NAOH et HCl exp 7	94

Figure IV.10	Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl exp 8	95
Figure IV.11	Dégradation de l'échantillon A en fonction des concentrations H ₂ SO ₄ (%)	97
Figure IV.12	Perte de masse de l'échantillon A en fonction des concentrations H ₂ SO ₄ (%)	98
Figure IV.13	Dégradation de l'échantillon B en fonction des concentrations H ₂ SO ₄ (%)	99
Figure IV.14	Perte de masse de l'échantillon B en fonction des concentrations (H ₂ SO ₄) (%)	100
Figure IV.15	Variation de la masse du revêtement dans (H ₂ SO ₄) à 5% en fonction du temps - (A)	102
Figure IV.16	Perte de masse du revêtement dans (H ₂ SO ₄) à 5% en fonction du temps -(A)	102
Figure IV.17	Variation de la masse du revêtement dans (H ₂ SO ₄) à 5% en fonction du temps -(B)	104
Figure IV.18	Perte de masse du revêtement dans (H ₂ SO ₄) à 5% en fonction du temps - (B)	105
Figure IV.19	Variation de masse du revêtement dans (HCl) à 5% en fonction du temps -(C)	107
Figure IV.20	Perte de masse du revêtement dans (HCl) à 5% en fonction du temps- (C)	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau No.	Titre	Page
CHAPITRE I : Généralités sur le nettoyage en place et les produits de nettoyage		
Tableau I.1	Conséquences de variation du temps de nettoyage	15
Tableau I.2	Les conséquences de variation de la concentration de nettoyage [23].	17
CHAPITRE IV : Résultats et discussions		
Tableau IV.1	Variation de la masse de l'échantillon sous l'effet de H ₂ SO ₄ à 12 %	53
Tableau IV.2	Variation de la perte de masse de l'échantillon sous l'effet de H ₂ SO ₄ à 12 %	54
Tableau IV.3	Variation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl exp 1	62
Tableau IV.4	Variation de la masse de l'échantillon C dans NAOH et HCL exp 2	65
Tableau IV.5	Variation de la masse de l'échantillon C dans HCl et NAOH exp 3	66
Tableau IV.6	Variation de la masse de l'échantillon C dans HCl et NAOH exp 4	66
Tableau IV.7	Variation de la masse de l'échantillon C sous l'effet de NaOH et HCl	67
Tableau IV.8	Variation de la masse de l'échantillon C dans NAOH et HCl exp 6	67
Tableau IV.9	Variation de la masse de l'échantillon C dans NAOH et HCl exp 7	94
Tableau IV.10	Variation de la masse de l'échantillon C dans NAOH et HCl exp 8	94
Tableau IV.11	Variation de la masse et perte de masse de l'échantillon A dans (H ₂ SO ₄)	96
Tableau IV.12	Variation de la masse et de la perte de masse de l'échantillon B dans H ₂ SO ₄	98
Tableau IV.13	Variation de la masse et perte de masse de l'échantillon A dans (H ₂ SO ₄) à 5%	100
Tableau IV.14	Variation de la masse et perte de masse de l'échantillon B	102
Tableau IV.15	Variation de la masse et perte de masse de l'échantillon dans (HCl) à 5%	104
Tableau IV.16	Evaluation des échantillons traités avec ou sa peinture	107
Tableau IV.17	Variation de la masse et perte de masse des échantillons traités avec la peinture	107

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Définition
C–X	Liaison carbone–halogène (X = I, Br, Cl, F)
I	Iode
Br	Brome
Cl	Chlore
F	Fluor
AQ	Ammoniums quaternaires
NR₄⁺	Cation ammonium
O₃	Ozone
COV	Composés organiques volatils
EDTA	Acide éthylène diamine tétraacétique
GLDA	Diacétate de glutamate tétrasodique
NEP	Nettoyage en place
EP	En place
CIP	Cleaning in Place (nettoyage en place)
°F	Degré Fahrenheit
mm	Millimètre
Atm	Atmosphère
°C	Degré Celsius
mm²	Millimètre carré
DLC	Diamond-Like Carbon (Carbone de type diamant)
Dp ≤ 100 μm	Diamètre des particules ≤ 100 micromètres
RA1K	Raffinerie de Skikda
U10, U11	Unités de distillation atmosphérique
LGO	Gas-oil léger
HGO	Gas-oil lourd
RCO	Résidu atmosphérique
U70	Unité de production de bitume
BRI	Brut réduit importé

U30, U31, U104	Gas-Plant
U100, U103	Unités de Reforming Catalytique
U200	Unité de récupération des aromatiques
U400	Unité de récupération des paraxylènes
U500	Unité d'isomérisation du xylène
BS12	Acide sulfamique
HCl	Acide chlorhydrique
H₂SO₄	Acide sulfurique
Noah	Soude caustique
10W40	Huile lubrifiante
Nb	Niobium
Cu	Cuivre
V	Vanadium
Fe	Fer
Mn	Manganèse
Ti	Titane
W	Tungstène
Cr	Chrome
Mo	Molybdène
Ni	Nickel
HO₃⁺	Ions hydronium
SO₄²⁻	Ions sulfate
OH⁻	Anions hydroxyde
Na⁺	Cation sodium
ml	Millilitre
S	Seconde

Introduction Générale

Introduction générale

L'échangeur de chaleur constitue un composant fondamental dans toute stratégie de maîtrise énergétique. En effet, environ 90 % de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes ou via les systèmes de récupération de l'énergie thermique associés. Ces équipements sont principalement employés dans des secteurs variés tels que l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), le transport (automobile, aéronautique), ainsi que dans les domaines résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). [1]

Le choix d'un échangeur dépend de plusieurs paramètres : température et pression des fluides concernés, agressivité chimique des milieux, exigences en matière de maintenance, et contraintes d'encombrement. Un échangeur bien conçu et bien entretenu permet d'optimiser le rendement énergétique des installations. [1] Toutefois, l'un des défis majeurs auxquels ils sont confrontés est **l'encrassement**.

Ce phénomène se caractérise par le dépôt progressif de matériaux sur les surfaces d'échange. Ces dépôts, peuvent évoluer pour former des cristaux, des sédiments, ou des produits issus de réactions chimiques, voire une combinaison complexe de ces éléments à l'image du gaz brut provenant des puits qui est un mélange hétérogène de substances.[2]

Par ailleurs, l'encrassement peut engendrer de conséquences majeures, telles que des arrêts de production, le remplacement onéreux de pièces corrodées, des accidents ou encore des risques environnementaux de pollution susceptibles d'entraîner des impacts économiques significatifs. La nature des dépôts, généralement déterminée par les fluides utilisés et les conditions d'exploitation, est un facteur déterminant dans la sélection des méthodes de nettoyage appropriées.[2]

Ainsi, le nettoyage ne se limite pas à une simple fonction esthétique ou hygiénique ; Il joue un rôle fondamental dans la préservation des équipements industriels, en prolongeant leur durée de vie et en réduisant les coûts de maintenance ainsi que les risques de défaillances. Une gestion efficace des cycles de nettoyage, combinée à l'application de traitements anti-corrosion adaptés [3], et à la mise en œuvre de peinture protectrices, assure un fonctionnement durable et optimal des installations.

Le présent mémoire est structuré en quatre (04) chapitres :

- **Le premier chapitre** aborde les notions générales relatives au nettoyage, avec une attention particulière portée au nettoyage en place (NEP) ainsi qu'aux produits de nettoyage associés.
- **Le deuxième chapitre** présente une synthèse bibliographique sur le phénomène d'encrassement et son impact sur les échangeurs.
- **Le troisième chapitre** décrit les différentes méthodes expérimentales employées dans cette étude, ainsi que les modes opératoires y afférents.
- **Le quatrième chapitre** présente les résultats expérimentaux obtenus et les interprétations nécessaires à notre étude à partir des essais.
- **Enfin, la conclusion générale** synthétisera les principaux résultats obtenus au cours de ce travail, notamment l'efficacité de peinture pour limiter l'encrassement et la corrosion dans les environnements industriels agressifs, ainsi que leurs implications pour l'optimisation des pratiques de nettoyage. Des perspectives telles que l'amélioration des procédés de traitement, l'étude sans l'effet de la température et l'évaluation en milieu érosif offrent des axes prometteurs pour renforcer la prévention de la corrosion et ainsi augmenter la durabilité des équipements.

Référence bibliographique

- [1]. Belhadi, N. *Étude thermique d'un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire et calandre (eau de mer/ammoniac)* (Mémoire de Master, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie), 2019-2020.
- [2]. René, F., Leuliet, R. C., Goldberg, M., & Lalande, M. Encrassement et nettoyage d'un échangeur de chaleur à plaques lors du traitement UHT d'un produit lacté chocolaté : comparaison avec le lait. Centre International de Recherche Daniel Carasso & I.N.R.A., B.P. 39, Villeneuve d'Ascq Cedex, France.
- [3]. Biotechno, Centre Technique des Industries de la Propreté (CTIP). Comprendre le rôle de l'action mécanique dans le nettoyage (Fiche technique). 2009

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

Généralités sur le nettoyage en
place et les produits de nettoyage

I.1 Introduction

Ce chapitre propose une synthèse générale sur le nettoyage en place et les produits de nettoyage, avec un focus particulier sur le nettoyage en place (NEP) et ses avantages. Nous y présentons également les méthodes, les procédures ainsi que Les types de nettoyage adoptés dans les équipements industriels.

I.2 Définition du nettoyage :

Le nettoyage constitue un élément fondamental du traitement curatif visant à limiter de manière significative les risques de dégradation des équipements industriels et à éliminer toute trace de souillure ou contamination déposée sur une surface, afin d'assurer un contrôle rigoureux du risque de contamination croisée [1].

La décontamination des équipements tels que les échangeurs, représente une étape essentielle et incontournable pour garantir une production conforme aux exigences de qualité. Cette opération vise à restaurer l'état de propreté en prenant en considération plusieurs paramètres : la nature du fluide, le diamètre des orifices, la granulométrie des déblais ainsi que les conditions de circulation [2]. Le nettoyage s'effectue lors des phases d'arrêt de l'installation, selon deux modalités : nettoyage chimique et nettoyage mécanique, qui peuvent être réalisés conjointement ou séparément [3].

I.3 Principe de nettoyage :

Le nettoyage consiste à éliminer intégralement les résidus et les impuretés présents sur les surfaces afin qu'elles apparaissent visuellement propres et soient préparées pour une désinfection efficace. Il permet d'ôter les salissures résiduelles sur les surfaces, des équipements ou des composants en utilisant des méthodes ou des produits adaptés. Toutefois, il convient de noter que le nettoyage seul ne garantit pas une décontamination complète.

L'état final du matériel après nettoyage dépend étroitement de la nature de la souillure, du type de détergent utilisé, de la configuration du matériel, ainsi que des méthodes appliquées lors du nettoyage.

L'objectif principal est donc d'assurer la propreté des équipements ou des composants industriels conformément aux exigences spécifiques [4].

I.4 Produit de nettoyage :

Les opérations de nettoyage nécessitent l'utilisation de produits chimiques spécifiques. Une utilisation non maîtrisée de ces produits peut impacter la santé et la sécurité des utilisateurs.

I.4.1 Les dérivés halogénés :

Les dérivés halogénés des alcanes, également appelés halogénures d'alkyle, sont des composés organiques dérivés des hydrocarbures, obtenus par le remplacement d'un atome d'hydrogène par un atome d'halogène.

Ces composés possèdent une liaison carbone-halogène (C-X), où X représente un atome de fluor (F), de chlore (Cl), de brome (Br) ou d'iode (I), qui sont des liaisons polarisées [5].

Parmi ceux-ci, les dérivés bromés et chlorés sont les plus couramment utilisés ; en particulier, les produits chlorés sont privilégiés en milieu industriel pour leurs propriétés blanchissantes, désodorisantes et désinfectantes, par rapport aux dérivés iodés et fluorés [6].



Figure I.1: classification des dérivés halogénés [6].

I.4.2 Les composés d'ammoniums quaternaires :

Les ammoniums quaternaires (AQ) sont des dérivés de l'ammoniac dans lesquels les quatre atomes d'hydrogène liés à l'azote ont été remplacés par des groupes organiques, tels que des alkyles ou aryles. Leur formule générale est NR_4^+ , où R représente un groupement alkyle [7]. Ces composés possèdent des propriétés tensioactives très intéressantes, leur neutralité chimique et leur innocuité relative en font des composés idéaux pour la désinfection des surfaces et des milieux [7]. Leurs principaux avantages sont les suivants :

- Un large spectre bactéricide, qui repose sur un mécanisme d'action et qui consiste en l'infiltration et la rupture de la membrane cytoplasmique, la destruction des protéines et acides nucléiques, induisant ainsi, une lyse cellulaire.
- Une faible corrosivité [8].

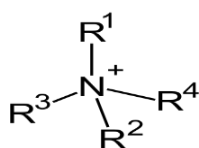


Figure I.2: la formule d'un ammonium quaternaire [8].

I.4.3 Les produits amphotères :

Les amphotères sont des tensioactifs ioniques, connus dermatologiquement pour leur douceur, en raison de leur comportement et leur structure protéinique et à leur excellente compatibilité avec des divers types de tensioactifs. Ils se caractérisent par leur stabilité face aux électrolytes, aux acides, aux alcalis ainsi qu'à l'eau dure [9]. Ils ont la capacité de se comporter comme des acides ou des bases selon le pH ambiant, ce qui signifie qu'un ion peut agir tantôt comme un acide, tantôt comme une base. À titre d'exemple, l'oxyde d'aluminium, ou alumine, est amphotère : il réagit avec l'acide chlorhydrique pour former le chlorure d'aluminium et, avec la soude pour produire l'aluminate de sodium [9].

I.4.4 Les aldéhydes :

Les aldéhydes appartiennent à la famille des composés organiques volatils (COV) et contribuent également à la formation de l'ozone (O_3). Les principaux aldéhydes présents dans l'atmosphère urbaine sont le formaldéhyde et l'acétaldéhyde. Ces composés exercent également un effet indirect sur l'environnement, en tant que précurseurs de l'ozone, ce qui perturbe la photosynthèse et nuit à la végétation. Les sources majeures d'émission d'aldéhydes dans l'air ambiant incluent les véhicules diesel et essence, ainsi que, dans une moindre mesure, les systèmes de chauffage au bois, au fioul et au gaz.

Dans l'air intérieur, les aldéhydes proviennent de multiples sources courantes telles que les matériaux d'ameublement et de décoration, les colles et enduits, les produits d'entretien et désinfectants, les désodorisants, parfums d'intérieur, cosmétiques, produits d'hygiène corporelle, aliments, cuisson ainsi que la fumée de tabac, etc [10].

I.4.5 Les détergents :

Les détergents utilisés lors des opérations de nettoyage ont pour objectif principal l'élimination des souillures et salissures. Le choix du détergent est conditionné par la nature des salissures présentes. Les matières organiques sont généralement nettoyées avec des produits alcalins, tandis que les matières minérales sont traitées avec des produits acides. L'efficacité dégraissante et décapante d'un détergent est donc plus élevée lorsqu'il est alcalin, alors que son pouvoir désincrustant et détartrant s'accroît lorsqu'il est acide. Dans de nombreux cas, l'utilisation de produits multi-usages, moins agressifs, s'avère suffisants pour garantir un nettoyage efficace [11].

Différents types de détergents se distinguent par leurs caractéristiques chimiques spécifiques et leurs modes d'action particuliers :

a. Détergents acides

Les détergents acides seront adaptés à l'élimination des salissures d'origine minérale. Les solutions d'acide nitrique, phosphorique ou citrique, ainsi que certains mélanges d'acides, sont les plus couramment utilisés. Leur efficacité peut être renforcée par l'ajout de tensioactifs compatibles avec le milieu acide [12].

b. Les détergents neutres

Avec un pH compris entre 7 et 8, ces détergents permettent le nettoyage de nombreuses surfaces sans risque d'endommagement. Ils sont fréquemment utilisés comme nettoyeurs universels ou multi-usages [11].

c. Détergents alcalins :

Les alcalins permettent, grâce à leurs caractéristiques physico-chimiques, d'éliminer efficacement des souillures organiques de différentes natures. Ils sont constitués de bases ou de sels minéraux alcalins caractérisés par un pH supérieur à 10. Les formulations employées varient, allant de solutions simples telles que la potasse à des compositions plus élaborées intégrant des agents minéraux, des séquestrants, des tensioactifs et des dispersants. Le recours à ces détergents représente environ 80% des opérations de nettoyage dans le secteur industriel [12].

Cependant, la panoplie des détergents présents sur le marché ne se limite pas uniquement aux détergents acides ou alcalins ; on distingue également :

- Des détergents oxydants ;
- Des détergents enzymatiques ;
- Des produits composés assurant simultanément nettoyage et désinfection [12].

I.4.6 Les tensioactifs

Un tensioactif est une molécule constituée de deux parties distinctes : une tête hydrophile (affinité pour l'eau) et une queue hydrophobe (qui n'aime pas l'eau), reliées par une liaison chimique.

Les tensioactifs sont classés selon l'échelle de Griffin, qui leur attribue un indice compris entre 1 et 20. Cette échelle permet d'identifier si un tensioactif est plus attiré par l'eau ou par les graisses, orientant ainsi son usage optimal le mieux adapté.

- **Lorsque l'indice est inférieur à 9**, le tensioactif est majoritairement lipophile, c'est-à-dire qu'il est attiré par les graisses. Il sera notamment employé pour limiter

la formation de la mousse. **Si cet indice est inférieur à 3**, le tensioactif sera alors mélangé à l'eau et à l'huile.

- **Si cet indice est compris entre 3 et 6**, il est possible d'améliorer l'humidité dans d'autres situations. **S'il se situe entre 9 et 11**, il sera principalement destiné au nettoyage.
- **Si l'indice est supérieur à 11** indique que le tensioactif est plutôt hydrophile, donc attiré par l'eau. Il sera utilisé pour mélanger de l'huile dans de l'eau.
- Enfin, **un indice situé entre 13 et 15** permet au tensioactif de dissoudre d'autres substances dans l'eau [13].

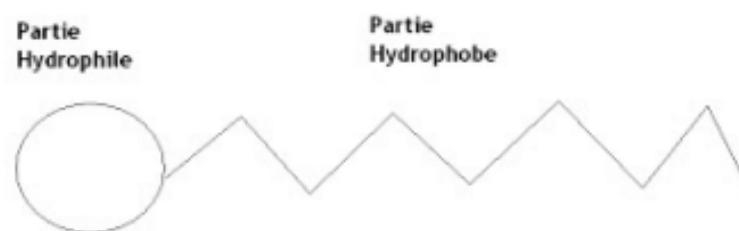


Figure I.3: Schéma simplifié d'un tensioactif [13].

I.4.7 Les séquestrants ou les chélatants :

Les agents séquestrants sont employés dans le nettoyage afin d'empêcher la précipitation et la formation du tartre, tout en améliorant le rendement des produits de nettoyage. Ils agissent en formant des complexes solubles avec le calcium et le magnésium. Parmi les plus couramment utilisés figurent les phosphonates, le gluconate de sodium, l'EDTA ainsi que le GLDA [14].

I.4.8 Les solutions alcalines

Les solutions alcalines sont des agents nettoyants dont le pH varie entre 7,1 et 14 — le pH étant la mesure permettant d'évaluer l'acidité ou d'alcalinité d'une substance. Ces nettoyants sont particulièrement efficaces pour le dégraissage et contiennent des substances telles que l'ammoniac, le bicarbonate de soude ou encore le savon. Plus une solution est alcaline, plus son pouvoir dégraissant est élevé [15].

I.4.9 Les solutions acides :

Les solutions acides sont utilisées pour faciliter la dispersion des résidus minéraux en favorisant leur décomposition, ce qui permet d'empêcher la formation du tartre à partir du calcium et de l'ion carbonate présent dans l'eau ou dans les souillures. Leur emploi est principalement réservé aux aciers inoxydables. Le pH de ces détergents est inférieur à 4.

L'acidité de ces produits provient de deux catégories d'acides :

❖ Acides minéraux :

Largement employés pour leurs propriétés détartrantes et désincrustantes. Parmi les plus courants figurent l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique, l'acide phosphorique, l'acide sulfurique et l'acide sulfamique. Ces acides présentent des caractéristiques corrosives et oxydantes, justifiant ainsi l'ajout d'agents anticorrosion.

❖ Acides organiques (citrique, formique...) :

Utilisés en raison de leur innocuité et faible corrosivité, ils offrent également un pouvoir séquestrant supplémentaire [16].

I.5 Méthode de nettoyage

I.5.1 Nettoyage mécanique :

Cette étape revêt une importance capitale pour garantir l'efficacité du nettoyage. Elle s'effectue à l'aide de matériel tels qu'une monobrosse ou une autolaveuse, mais peut également inclure l'agitation de la solution de détergent ou de la pièce à nettoyer (nettoyage par trempage/immersion), la vitesse de circulation de la solution dans les canalisations lors du Nettoyage En Place (NEP), ou encore la pression avec laquelle la solution est projetée (jet sous pression).

Ces dispositifs génèrent du frottement et de la pression. En l'absence de matériel, l'agent de nettoyage peut effectuer cette tâche manuellement en frottant avec un grattoir ou un frottoir. Lors des opérations de nettoyage, il est essentiel d'ajuster l'intensité de l'action mécanique pour éviter d'endommager le support [17].

I.5.2 Nettoyage chimique :

Le nettoyage chimique est particulièrement recommandé lorsque le nettoyage mécanique continu s'avère insuffisant ou lorsque les opérations mécaniques effectuées lors des arrêts deviennent trop coûteuses en raison de difficultés techniques majeures immobilisant trop longtemps l'installation.

Les principales méthodes de nettoyage chimique sont :

- **Par circulation :** à l'aide d'une pompe, une solution de nettoyage circule dans l'échangeur thermique.
- **Nettoyage et absorption :** l'échangeur de chaleur doit être rempli d'une solution de nettoyage, qui sera ensuite évacuée après un temps de contact déterminé.
- **Nettoyage par injection de vapeur :** Cette méthode consiste à injecter un mélange concentré de solutions de nettoyage et de vapeur [18].

Avantages du nettoyage chimique :

- Procédé rapide et optimale.
- Réduction des dommages sur la surface d'échange.
- Les solutions chimiques atteignent même les zones inaccessibles de l'échangeur, permettant ainsi le traitement de toute la surface d'échange.
- Le processus peut être réalisé sans nécessiter le démontage de l'appareil [19].

I.6 Les règles essentielles du nettoyage :

Le nettoyage joue un rôle important pour garantir le bon fonctionnement des équipements industriels et les protéger contre la corrosion. Cependant, le respect des principes de nettoyage ne se limite pas à l'utilisation de produits appropriés, il est également important de considérer d'autres facteurs tels que le choix des produits, les conditions d'application et l'environnement.

- ✓ Il est essentiel de sélectionner de bons produits de nettoyage pour éviter la corrosion des équipements, afin de définir et mettre en œuvre un plan de nettoyage.

- ✓ Il est important de respecter les conditions d'utilisation des produits, telles que la température, le pH, le temps et d'assurer la surveillance des opérations de nettoyage.
- ✓ Former le personnel (connaissance des produits et des règles de sécurité, méthode et mode d'emploi, compétences et comportements...).
- ✓ Il est nécessaire de vérifier l'efficacité du nettoyage afin de garantir le bon fonctionnement des équipements [20].

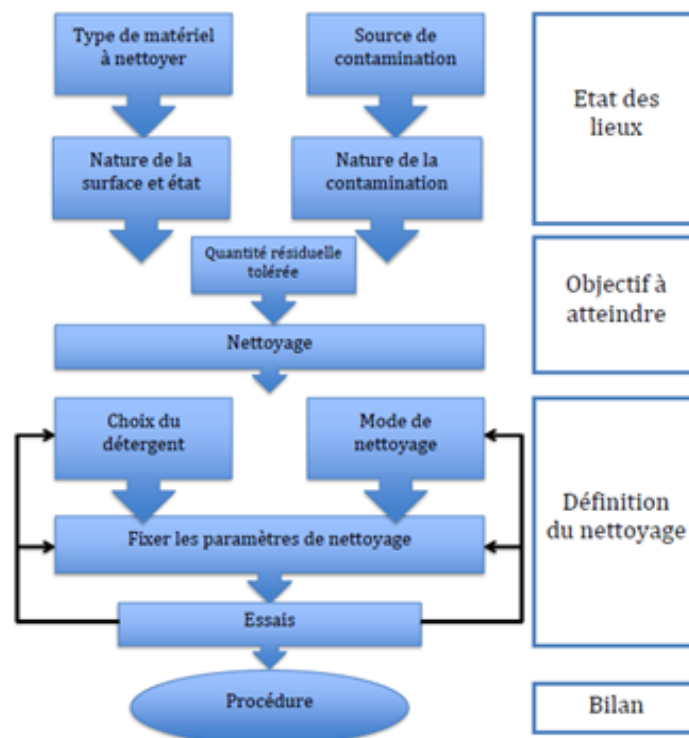


Figure I.4: Schéma de synthèse de la conception d'une procédure de nettoyage [26].

I.7 Procédure de nettoyage :

Une procédure de nettoyage dépend de la zone à risque de contamination considérée. L'obtention de la qualité est étroitement liée au type de contaminant, à la nature des revêtements, aux équipements, aux produits et au matériel utilisés.

- La gestion des revêtements et des équipements lors du nettoyage doit être choisie pour faciliter le nettoyage, assurer la durabilité et s'adapter aux niveaux de matériel.

Le nettoyage avec un détergent alcalin doit être réalisé à la température à laquelle le produit a été exposé, et au moins à 70°C. Pour le nettoyage avec des détergents acides, il est recommandé de l'appliquer à des températures comprises entre 68 à 70°C [16,23].

I.8.3 L'action mécanique :

Cette action augmente la vitesse d'écoulement, ce qui rend la couche de saleté plus fine et permet au détergent d'atteindre plus efficacement les impuretés, facilitant ainsi leur élimination en augmentant la force exercée par la solution. Cela peut être réalisé en augmentant la turbulence dans les tuyaux, en agitant les pièces à nettoyer ou en appliquant de la pression (comme avec un nettoyeur haute pression ou manuellement) [23].

I.8.4 L'action chimique :

Il est nécessaire d'ajuster la quantité de détergent dans la solution avec une concentration adéquate avant de commencer le nettoyage [23].

Les conséquences de la variation de la concentration du détergent sur l'efficacité de nettoyage sont résolues dans le tableau suivant :

Tableau I.2: Les conséquences de variation de la concentration de nettoyage [23].

Action Chimique du détergent	Trop forte	Trop faible
Les conséquences	<ul style="list-style-type: none"> • Le nettoyage peut produire des résultats similaires, voire inférieurs, à ceux obtenus avec une solution correctement dosée. • Le rinçage est plus complexe, ce qui accroît le risque de laisser des traces résiduelles de produit • Problèmes de pollution liés au rejet dans l'environnement • Une solution surdosée peut entraîner des difficultés lors de son utilisation et favoriser la corrosion des surfaces • Des dépenses inutiles dues au gaspillage de produit actif 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosion des surfaces due à un manque d'inhibiteurs de corrosion • Dépôt de tartre sur les surfaces du fait de l'absence d'agents séquestrant • Formation indésirable de mousse en raison de l'absence d'agents anti-moussants.

❖ Ces quatre paramètres sont regroupés dans le cercle de sinner

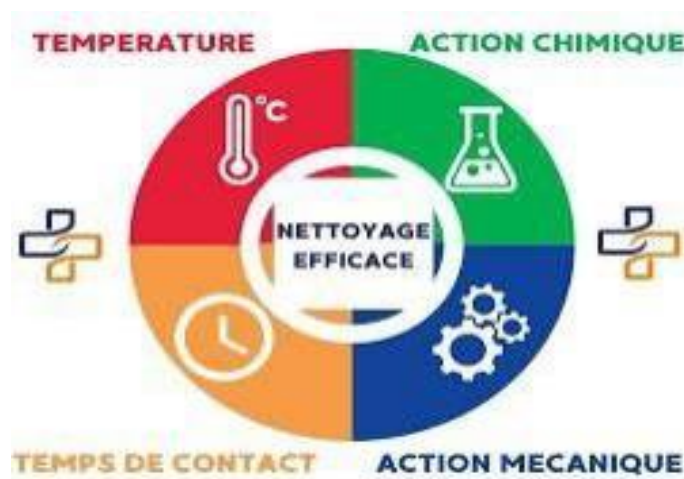


Figure I.6: Cercle de Sinner (comptoir de la droguerie ,2010) [23].

I.9 Notions de choix des détergents :

I.9.1 Notion de pH :

Un pH compris entre 0 et 6 est considéré comme acide et sera principalement utilisé pour détartrer.

Un PH de 7 à 8 caractérise un produit détergent neutre, efficace pour traiter les salissures de type inorganique (tartre, calcaire, rouille...).

Un pH supérieur à 8 est classé comme alcalin. Les dégraissants ont un pH de 9 à 12, tandis que les produits les plus puissants, comme les décapants, atteignent un pH de 13 ou 14. Les détergents alcalins sont adaptés aux salissures organiques (graisses, aliments...) [24, 25].

I.9.2 Notion de dureté de l'eau :

L'eau joue un double rôle dans le nettoyage, servant d'agent de dilution et de rinçage. Le détergent doit être facilement et rapidement soluble dans l'eau, tout en étant également facilement rinçable. Le niveau de dureté de l'eau peut aussi influencer l'efficacité du détergent [26].

L'eau contient du calcium et, dans une moindre mesure, du magnésium, ce qui peut entraîner la formation de tartre. Plus l'eau est dure (supérieur à 20°F), plus elle est

source d'entartrage, de corrosion, et interagit avec les principes actifs (ajout d'agents complexant pour les ions calcium et magnésium dans les formulations des produits) [27].

I.10 Les types de nettoyage :

Les types de nettoyage se répartissent en trois catégories principales : le nettoyage manuel, le nettoyage semi-automatique et le nettoyage automatique.

Un type de nettoyage optimal doit obligatoirement remplir deux exigences fondamentales :

- Élimination efficace des résidus.
- Réduction du risque de contamination, en minimisant les risques de propagation de résidus indésirables [26].

I.10.1 Le nettoyage manuel :

Le nettoyage manuel est particulièrement adapté aux petites pièces ou aux zones difficiles d'accès, qui ne peuvent pas être nettoyées par d'autres méthodes. Il est effectué par un opérateur de production, qui doit être bien formé et habilité à réaliser le nettoyage à l'aide d'outils spécifiques, selon un protocole établi et validé [29].

Cette méthode est susceptible de faire appel à l'emploi :

- D'écouvillons rotatifs
- De jets sous pression
- De textiles spéciaux
- D'ultrasons pour les parties spécifiques

Elle dépend de l'opérateur qui effectue une action mécanique. Son avantage est de permettre de cibler les zones critiques à nettoyer mais sa reproductibilité n'est pas assurée [26].

I.10.2 Le nettoyage semi-automatique

Ce mode de nettoyage vise à réduire l'intervention de l'opérateur, ce qui diminue le risque d'accidents liés à la manipulation du détergent. Il s'effectue grâce à une

combinaison d'opérations manuelles et automatiques, telles que la préparation des solutions détergentes, le démontage partiel pour l'installation du système de lavage, et le prérinçage manuel [30].

I.10.3 Le nettoyage automatique

Ce type de nettoyage repose sur l'aspersion ou la circulation de fluide dans l'équipement. L'opérateur a pour rôle de s'assurer du bon déroulement du nettoyage et de surveiller les données enregistrées. Ce mode de nettoyage est appelé NEP car il ne nécessite pas le démontage préalable des équipements [26].

I.11 Procédé de nettoyage en place

I.11.1 Protocole d'un nettoyage en place

Le nettoyage en place (NEP) est une méthode utilisée dans divers domaines, notamment dans de nombreuses entreprises industrielles, pour nettoyer les équipements de production tels que les pipelines, les cuves, les échangeurs de chaleur et les réacteurs sans nécessiter de démontage préalable [31]. Ce procédé repose sur l'utilisation de solutions de nettoyage comprenant des détergents, des désinfectants ou des agents alcalins et acides, qui circulent à travers les installations [32].

Le système CIP (En anglais, CIP signifie "Cleaning In Place"), optimise les opérations en réduisant les temps d'arrêt, en minimisant la consommation d'eau et de produits chimiques, et en garantissant une hygiène rigoureuse [32].

Ce processus requiert uniquement la présence d'un opérateur pour en assurer le bon déroulement et pour vérifier les données enregistrées [31].

I.11.2 Principe du NEP :

Ce mode de nettoyage est entièrement automatisé car il permet de nettoyer les installations sans les démonter, avec une surveillance et une vérification assurée par un opérateur.

Les installations telles que les cuves, les tuyaux et d'autres équipements sont nettoyés grâce à un circuit fermé qui fait circuler de l'eau. Ce circuit sert d'abord à nettoyer et à fournir de l'eau propre, et également à évacuer les eaux usées. Dans les

machines automatisées les cycles et les programmes sont intégrés dès le départ. Des pompes sont utilisées pour faciliter le déplacement de l'eau et les produits de nettoyage.

Avant de commencer le nettoyage EP il est important de choisir le circuit à nettoyer et le cycle de nettoyage, qu'il soit court ou long [33].

Pour atteindre un résultat optimal des protocoles de nettoyage, les procédés NEP nécessitent un contrôle constant des paramètres suivants :

- **La température :**

Afin de maintenir le bon équilibre entre un lavage efficace et une consommation d'énergie maîtrisée, la température sous haute pression est surveillée et ajustée régulièrement.

- **Le débit :**

La mesure du débit est essentielle pour un nettoyage efficace. L'écoulement doit être stable et puissant.

- **La concentration en détergent :**

Afin d'optimiser les performances d'un procédé NEP, la concentration de détergent doit être contrôlée dans la boucle et le réservoir grâce à des capteurs ou transmetteurs de conductivité.

- **Le temps de contact :**

Chaque installation doit être surveillée durant du processus NEP afin d'éviter toute détérioration des équipements industriels par les produits utilisés [34].

Les étapes d'un processus de type NEP sont généralement les suivantes :

1. Rinçage initial pour l'évacuation des résidus solides.
2. Nettoyage avec un produit alcalin.
3. Rinçage à l'eau claire pour l'évacuation de la solution nettoyante.
4. Rinçage avec un acide pour éliminer le calcaire.
5. Rinçage à l'eau claire.
6. Séchage.

7. Remplissage des équipements avec un produit de désinfection antimicrobien
8. Rinçage à l'eau claire pour l'élimination du produit [35].

I.11.3 Les différents types de nettoyage en place :

Il existe plusieurs types de systèmes de nettoyage en place :

❖ Système simple :

En général, un système simple de nettoyage commence par un pré-rinçage pour éliminer les résidus indésirables. Ensuite, le détergent est appliqué pour nettoyer, et le processus se termine par un rinçage final.

❖ Système de recyclage :

Le nettoyage débute avec un réservoir externe qui stocke la solution de nettoyage, qui est ensuite introduite dans l'entreprise. Elle est recyclée jusqu'à la fin du cycle de nettoyage. Une fois le nettoyage avec le détergent est terminé, un rinçage final est exécuté pour compléter le processus. Les systèmes de recyclage consomment moins d'eau et de détergents mais nécessitent des dépenses accrues et dans certains cas, peuvent devenir inutilisables en raison d'une contamination entre différents processus [36].

I.11.4 Le NEP et les exigences pour la technologie de pompage

Le processus de NEP impose des exigences élevées à la solution de pompage. Une pompe doit être capable pour résister à des produits chimiques hautement corrosifs à des températures atteignant 75°C, de fonctionner sous haute pression, d'être raccordée à un processus automatisé, de requérir peu ou aucun entretien.", d'être économique à l'utilisation, d'occuper un espace réduit dans l'usine et d'éviter la pénétration de contaminants dans le processus.

I.11.5 Les circuits de NEP :

Des produits spécialisés utilisés dans le nettoyage des circuits CIP sont capables de circuler avec une forte turbulence et sans formation de mousse, assurant ainsi l'élimination correcte des salissures et garantissant ainsi un nettoyage et une désinfection maximaux.

La gamme CIRCUITS CIP comprend des produits pour l'hygiène des circuits, réservoirs, cuves, pasteurisateurs et autres systèmes fermés. Selon leur utilisation, ils sont classés en phase alcaline, phase acide et phase désinfectante [37].

On détermine quels types de matériels peuvent être nettoyés dans le même circuit, à partir des éléments suivants :

- Les dépôts de résidus de produits doivent être de nature similaire, permettant l'utilisation des mêmes détergents.
- Le matériau des surfaces à nettoyer doit être identique, ou au minimum compatible avec le même détergent ou désinfectant.
- Tous les éléments du circuit doivent être nettoyés simultanément [23].

I.11.6 Avantages et attentes d'un système de nettoyage NEP :

Le nettoyage en place (NEP) effectué après chaque production permet de nettoyer efficacement tous les équipements industriels, les débarrassant des contaminations et salissures. Ce procédé de lavage industriel empêche l'apparition de produits corrosifs pendant le fonctionnement des machines. Il offre également de véritables économies :

- **D'énergie**, grâce à une réduction de la consommation d'eau, de détergents et de désinfectants, ainsi qu'à l'absence de perte de chaleur ;
- **De temps**, en minimisant la durée de nettoyage et en améliorant les capacités de production grâce à des temps de mise en place réduits ;
- **De coûts**, grâce à la réduction des dépenses liées au nettoyage, aux énergies, à la maintenance et aux eaux usées.

Par ailleurs, le système NEP garantit une amélioration de l'hygiène, avec des systèmes automatisés qui nettoient et désinfectent plus efficacement et uniformément que le nettoyage manuel, une meilleure sécurité pour les opérateurs, une réduction des risques microbiens et une minimisation des déchets [34].

I.12 Conclusion

Nous avons illustré à travers ce chapitre une vue générale sur le nettoyage en place et les produits de nettoyage, notamment celles adoptées pour les équipements industriels, y compris leurs divers types, méthodes, procédures et avantages.

Ces informations s'avèrent essentielles pour mieux appréhender le nettoyage en place (NEP) face aux conditions environnementales agressives auxquelles l'équipement sera exposé

Références bibliographiques

- [1]. Boudra, H. & Bendali Brahma, I. Validation D'un Procédé De Nettoyage : Cas D'un Changement De Détergent Dans Un Atelier De Production D'une Forme Pâteuse [Mémoire de Master, Université Saad Dahleb - Blida],2018.
- [2]. Gacem, A. Etude Paramétrique De L'écoulement Annulaire Du Fluide De Forage Pétrolier Situe À Hassi-messaoud [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider - Biskra], 2007.
- [3]. Kaddache, M. & Chehba, M. Etude De L'évolution Des Pertes De Charge Dans Le Système De Refroidissement Avec L'encrassement D'un Condenseur Du La Centrale Thermique À Cap-djinet [Autre, Université M'hamed Bougara – Boumerdes. 2019
- [4]. Yassine Mankour, Mahfoud SI Tayeb, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2016/2017
- [5]. Support de cours, Université de M'sila. Chapitre 04 : Les dérivés halogénés. Récupéré.
[https://elearning.univmsila.dz/moodle/pluginfile.chapitre 04 les dérivés halogénés.pdf](https://elearning.univmsila.dz/moodle/pluginfile.chapitre%2004%20les%20d%C3%A9riv%C3%A9s%20halog%C3%A9n%C3%A9s.pdf)
- [6]. Hacini, S. Les dérivés halogénés. Université Oran 1, Master-M1-Ch. Org.
- [7]. Enil de Mamirole. Guide pratique : Ammoniums quaternaires et pratiques de nettoyage.2024
[https://enilea.fr/uploads/2024/03/GUIDE-PRATIQUE-Ammoniums-quaternaires-et pratiques-de-nettoyage.pdf](https://enilea.fr/uploads/2024/03/GUIDE-PRATIQUE-Ammoniums-quaternaires-et-pratiques-de-nettoyage.pdf)
- [8]. Proquimia. Évolution et caractéristiques des ammoniums quaternaires pour la désinfection des surfaces.
- [9]. Sarkar, R., Pal, A., Rakshit, A., & Saha, B. (2021). Properties and applications of amphoteric surfactant: A concise review. *Journal of Surfactants and Detergents*, 24(5), 709–730.
- [10]. Lachimie.net. Les aldéhydes. <https://www.lachimie.net/organique/aldehydes/>
- [11]. PRST 3 PDL. Fiches risque chimique - Nettoyage. 2021

https://www.prst-pdl.fr/wp_content/uploads/2021/05/Fiches-risque-chimique-PRST-3-PDL-Nettoyage-.pdf Consulté 12 2 2025

[12]. Techniques de l'Ingénieur. Différents types de détergents. Techniques de l'Ingénieur.

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/emballage>. Consulté 5 4 2025

[13]. Ferdjani.Y, (2024-2025). Matériaux microporeux et mésoporeux. Université de Skikda

[14]. Quimidroga. Le nettoyage NEP dans l'industrie alimentaire. 2022

<https://www.quimidroga.com/fr/2022/03/17/le-nettoyage-nep-dans-lindustrie-alimentaire/> Consulté 5 4 2025

[15]. B-Autoclave. Que sont les nettoyeurs alcalins ? B-Autoclave.

<https://www.b-autoclave.fr/pages/que-sont-les-nettoyants-alcalins>. Consulté 5 3 2025

[16]. Boudra, H. & Bendali Braham, I. Validation D'un Procédé De Nettoyage : Cas D'un Changement De Détergent Dans Un Atelier De Production D'une Forme Pâteuse [Mémoire de Master, Université Saad Dahleb - Blida]. 2018

[17]. Tikitea .Dy-finition du nettoyage.

<https://www.tikitea.pf/upload/protocoles/1656448276-Dy-finition-du> Consulté 4 2025

[18]. Kaddache, M. & Chehba, M. Etude De L'évolution Des Pertes De Charge Dans Le Système De Refroidissement Avec L'encrassement D'un Condenseur Du La Centrale 2019

[19]. Thermique À Cap-djinet [Autre, Université Mohamed Bougera - Boumerdes]

[20]. Paquet Hygiène. 01-02-NetD., sur

https://www.paquethygiene.com/co/01-02-NetD_1.html Consulté le 28 2 2025

[21]. Groupe permanent d'étude des marchés de produits divers de l'industrie chimique et para chimique. (1999). Guide pour le nettoyage des locaux. <https://www.exemple.com/5719.pdf>

- [22]. Bounoua, D. Stratégie De Validation Nettoyage En Industrie Pharmaceutique [Mémoire de Master, Université Saad Dahleb - Blida]. 2013
- [23]. CRITT IAA PACA. Dossier technique : Nettoyage et désinfection dans le cadre de l'action collective « Efficacité des opérations de Nettoyage et Désinfection ». <https://critt-iaa-paca.com/wp-content/uploads/2015/02/Guide-Effinet-ND.pdf>, 2015.
- [24]. Mahboub, A. & Benmouhoub, M. & Amoria, H. & Leghrieb, Y. Influence Et Rendement Du Controle Ionique Sur La Boue Du Forage Pétrolier [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouergla]. 2019
- [25]. Proprissimo. Comment bien choisir son détergent ? Proprissimo. Consulté sur. <https://www.proprissimo.com/fr/blog/comment-bien-choisir-son-detergent>
- [26]. Chenichen, T. & Haddoun, Y. & Touzouirt, S. Validation De La Méthode De Nettoyage De La Verrerie De Laboratoire (laboratoire Pharmaceutique Beker) [Autre, Université M'hamed Bougara - Boumerdes]. 2020
- [27]. Amriou, B. & Haroun, M. & Rahal, K. Nettoyage Détergence Et Désinfection , Des Bâtiments Avicoles [Autre, Université Saad Dahleb - Blida]. 2008
- [28]. Melle Boubeker Roza & Melle Bouaggar Khadidja. Validation de nettoyage d'une centrale de pesée : Cas d'un site multi produits université de mouloud Mammeri 2017 (26).
- [29]. Bekouche Mohamed Amine & Abdallah khodja Rania Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnalisant Filière : Sciences biologiques, Spécialité : bioindustries analyse et contrôle Université Frères Mentouri Constantine 1 2019/2020
- [30]. Boubeker, R. & Bouaggar, K. Validation De Nettoyage D'une Centrale De Pesée : Cas D'un Site Multi Produits [Autre, Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou]. 2017
- [31]. Elmiliani Yosra & Bouadjadj Fatima Zohra. Etude de l'efficacité du nettoyage en place NEP par l'ATP-métrie au sein de la SARL Glaces- Mosta Mostaganem Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem 09/10/2023

[32]. Thomas, A., & Sathian, C. T. (2014). Cleaning-In-Place (CIP) system in dairy plant: Review. IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT), 8(6), 41–44.

<https://doi.org/10.9790/2402-08634144> Consulté 2025

[33]. Sadek, M. & Misseraoui, I. Contribution À La Modernisation D'une Station De Nettoyage En Place (nep) De La Société Vitajus [Mémoire de Master, Université Saad Dahleb - Blida]. 2013

[34]. Legarrec. NEP (Nettoyage En Place) : Définition et Applications. <https://www.legarrec.com/entreprise/nep/> Consulté 6 3 2025

[35]. Palamatic Process. Nettoyage en place (CIP) : Ce qu'il faut savoir. Palamatic Process consulté sur <https://www.palamaticprocess.fr/blog/nettoyage-en-place-cip-ce-qu-il-faut-savoir> - : texte=Le Nettoyage en place (NEP, démonter ou déplacer l'installation.

[36]. Lenntech. Nettoyage en place (CIP). Lenntech. Consulté sur <https://www.lenntech.fr/cip-nettoyage.htm>

[37]. ITRAM. Nettoyage et désinfection des circuits NEP (CIP). <https://hreinlaetislausnir.is/wp-content/uploads/2020/01/Hef%C3%B0bundnars%C3%A1pur-loku%C3%B0-kerfi.pdf> Consulté 6 3 2025

CHAPITRE II

Généralités sur les échangeurs et l'encrassement

II.1 Introduction

Les performances des équipements industrielles dépendent étroitement de leur entretien et de leur maintenance prédictive. Dans ce cadre, ce chapitre présente le phénomène de l'encrassement et ses mécanismes, ses différents types, la nature du dépôt formé, notamment au niveau des échangeurs de chaleur ; tout en évoquant les conséquences de l'encrassement sur les installations industrielles.

II.2 Définition d'un échangeur de chaleur :

Un échangeur de chaleur est un dispositif ou un équipement permettant de transférer un flux de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid, sans les mélanger, à travers une paroi sans contact direct. Le fluide qui libère de la chaleur est appelé "fluide chaud", tandis que celui qui en reçoit est désigné comme "fluide froid". Dans les procédés pétrochimiques, il est nécessaire d'ajuster la température où l'état d'un fluide afin de le séparer, le distiller, le stocker et le transporter. Pour ce faire, il est nécessaire d'ajouter ou de lui retirer une certaine quantité de chaleur à l'aide d'équipements de transfert de chaleur, tels que des échangeurs, des condenseurs, des réchauffeurs [1].

II.3 Principaux types des échangeurs de chaleur

Les principaux types des échangeurs de chaleur sont :

II.3.1 Échangeurs tubulaires :

Les échangeurs utilisant les tubes comme élément principal de la paroi d'échange sont les plus courants. On peut les classer en trois catégories suivant le nombre de tubes et leur disposition, toujours conçues pour optimiser l'efficacité pour une utilisation donnée :

II.3.1.1 Échangeur monotube :

C'est un échangeur dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir de façon serpentine [2].

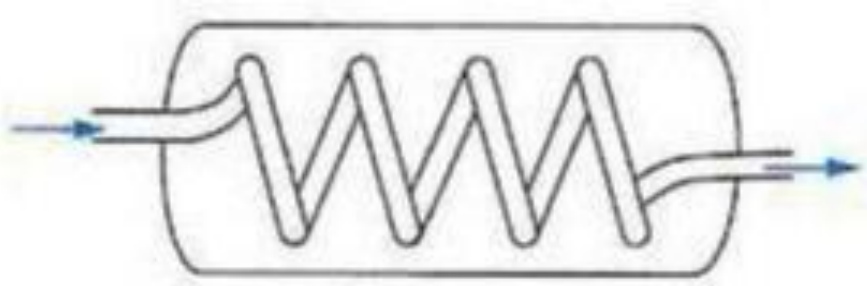


Figure II.1: Échangeur monotube [2].

II.3.1.2 Échangeur coaxial :

C'est un échangeur dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression circule dans le tube intérieur [2].

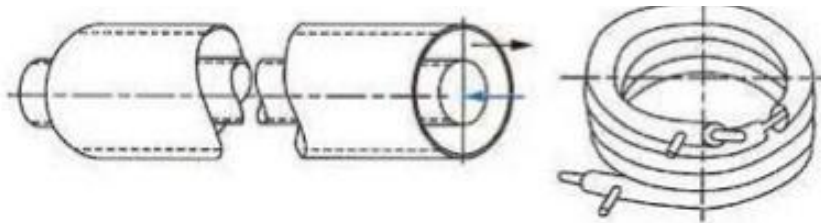


Figure II.2: Échangeur coaxial cintré [2].

II.3.1.3 Échangeur multitubulaire :

Existant sous quatre formes :

A. Échangeur à tubes séparés :

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (environ 100 mm), plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) sont disposés, maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé [2].

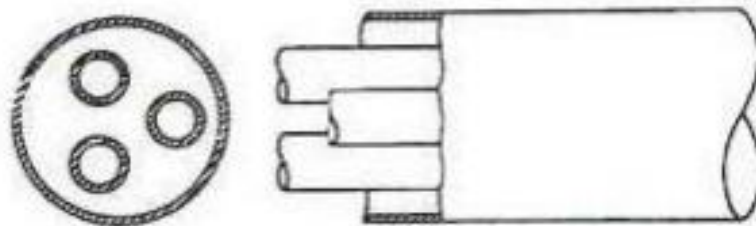


Figure II.3: Échangeur à tubes séparés [2].

B. Échangeur à tubes rapprochés :

Pour maintenir les tubes et assurer un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, un ruban enroulé en spirale est placé autour de certains d'entre eux [2].

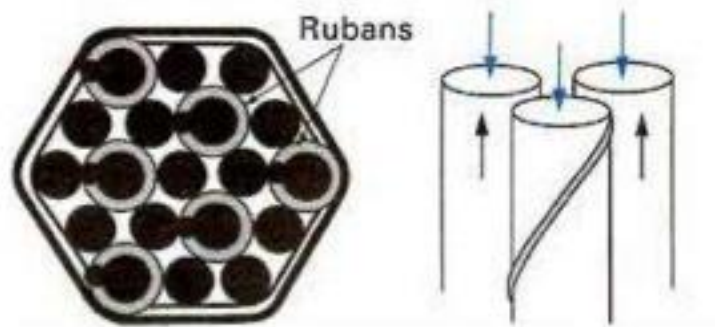


Figure II.4: Échangeur à tubes rapprochés [2].

C. Échangeur à tubes ailetés :

Ces tubes améliorent le coefficient d'échange thermique. Lorsque l'un des fluides dans l'échangeur s'avère moins bon caloporteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes autour ou à l'intérieur des tubes est nécessaire pour que la résistance thermique globale ne soit pas entièrement due au fluide ayant le plus faible coefficient d'échange thermique [3].

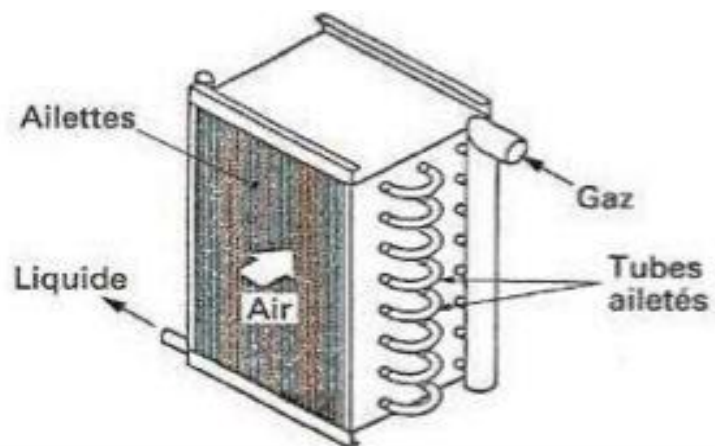


Figure II.5: Échangeur à tubes ailettes [3].

D. Échangeur à tubes et calandre :

Les échangeurs à tubes et calandre, où la calandre est une enveloppe métallique cylindrique entourant un faisceau de tubes : ils possèdent une boîte de distribution, c'est à dire un dispositif qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes. Ils peuvent être à boîte fixe, à boîte flottante, ou à tubes en U avec une boîte à chaque extrémité de l'échangeur. Les tubes peuvent être supportés par des chicanes [2].

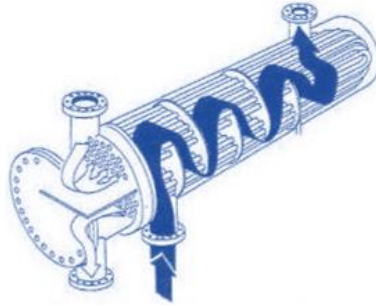


Figure II.6: Échangeur à tubes et calandre [2].

II.3.2 Échangeurs à plaques :

Les échangeurs à plaques sont constitués par un empilement de plaques garnies de joints d'étanchéité à leur périphérie ; les fluides s'écoulent entre ces plaques dans des canaux plats où la circulation peut être diagonale ou latérale [1].

❖ Les plaques :

Elles sont comprimées entre un châssis fixe et un châssis mobile. Elles sont positionnées et guidées par deux barres support, l'une inférieure et l'autre supérieure. Un joint par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la distribution des fluides dans les canaux créés par les deux plaques [1].

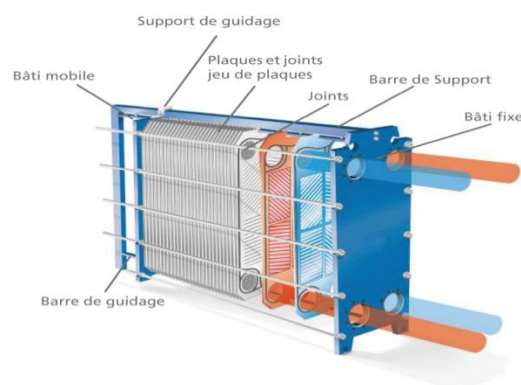


Figure II.7: échangeur à plaques [1].

De tels échangeurs peuvent être très polyvalents et permettent notamment la circulation de fluides ayant des viscosités très élevées. Cependant, il est important de ne pas dépasser des pressions supérieures à 30 atm et des températures de 150 [1].

II.3.3 Échangeurs tubulaires à faisceau et calandre :

Ce type d'appareil est le plus courant dans les raffineries. Il se compose d'un faisceau de tubes montés sur deux plaques tubulaires et comportant un certain nombre de chicanes. A chaque extrémité, les boîtes de distribution sont fixées pour assurer la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en plusieurs passes. Le faisceau est logé dans une calandre, muni de tubulaire d'entrée et de sortie, pour le second fluide qui circule à l'extérieur des tubes suivant le chemin imposé par les chicanes [4].

❖ Assemblage faisceau-calandre :

Les principales technologies d'échangeurs à tube et calandre sont :

a. Échangeur à plaque tubulaire fixe : Cette plaque peut être soudée directement à la calandre. Ces appareils permettent de loger le maximum de tubes à l'intérieur de l'enveloppe, mais ne peuvent être utilisés que si la différence de température entre les fluides chaud et froid est suffisamment faible pour que la dilatation ou la contraction du faisceau soit acceptable. Le nettoyage de l'extérieur des tubes ne peut s'effectuer que par voie chimique [4].

b. Échangeur à tête flottante : L'une des plaques tubulaires est fixe, tandis que la seconde plaque, de diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut glisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre. Ces appareils permettent l'expansion thermique du faisceau ainsi que son nettoyage mécanique [4].

c. Échangeur à tube en U : L'utilisation de tubes coudés élimine la plaque tubulaire, tout en concevant les propriétés d'expansion de la tête flottante. Le nettoyage mécanique à l'intérieur des tubes est impossible, ces faisceaux étant généralement utilisés dans les rebouilleurs à vapeur [4].

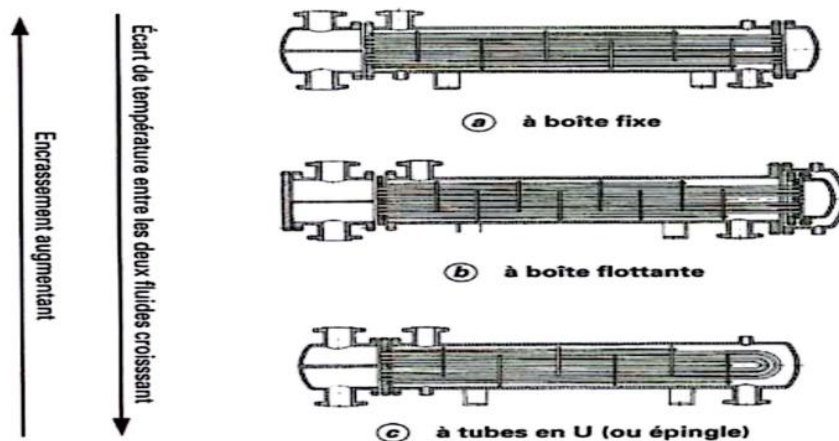


Figure II.8: Échangeur à tubes et calandre : principales technologies à boîte fixe, boîte flottante et à tube en U [4].

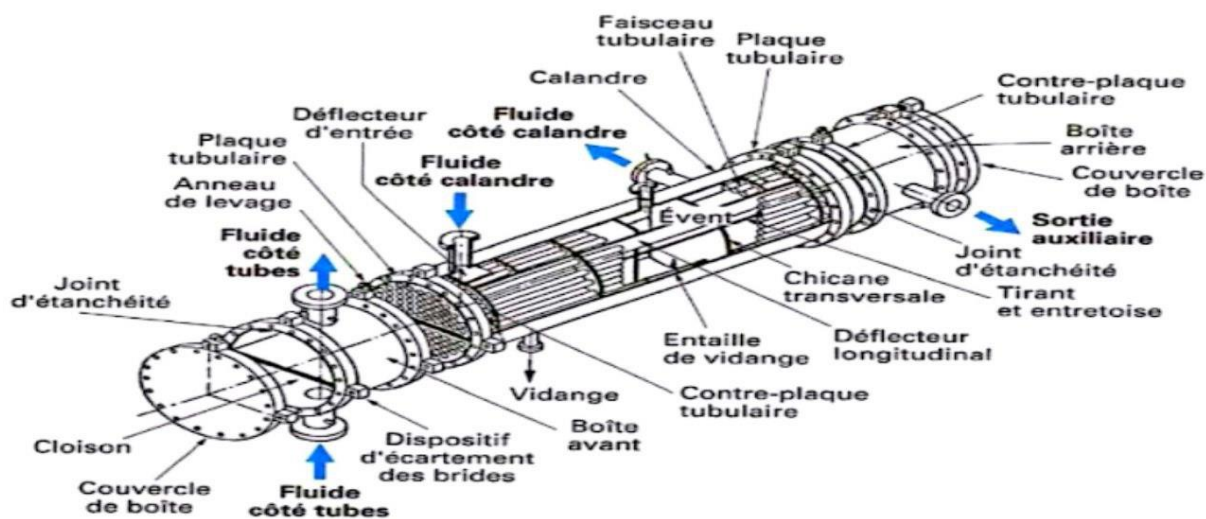


Figure II.9: Divers constituants d'un échangeur de chaleur à tubes et calandre [4].

Le phénomène de l'encrassement se produit lorsqu'il y a accumulation de substances indésirables, telles que des cristaux, des résidus biologiques, des produits chimiques ou des sédiments, sur les surfaces d'échange de chaleur dans divers secteurs industriels, comme les industries chimiques, pétrolières, alimentaires et pharmaceutiques. Cette accumulation augmente la résistance thermique, rendant le transfert de chaleur difficile et réduisant ainsi l'efficacité des équipements, notamment dans les échangeurs de chaleur [5].



Figure II.10: L'encrassement dans un échangeur tubulaire [5].

L'encrassement peut affecter les performances des systèmes et entraîner une augmentation de la perte de charge, ce qui engendre des coûts économiques significatifs, en raison de la nécessité de pompage supplémentaire et le nettoyage fréquents des installations. Même en l'absence de différence de température, le phénomène d'encrassement peut apparaître. Cela constitue un véritable problème lors de la conception et de l'utilisation des équipements. Pour limiter ses effets, il est crucial de bien choisir le type d'échangeur et de prendre en compte les valeurs réelles de résistance à l'encrassement [6].

II.4 Notions sur l'encrassement des échangeurs

II.4.1 Aspect physique de l'encrassement :

Il est primordial de considérer l'encrassement d'un échangeur thermique pour déterminer les dimensions appropriées, car ce phénomène peut réduire la capacité de transfert de chaleur et augmenter la chute de pression. En effet les dépôts sur la surface d'échange ajoutent une résistance thermique qui entrave le transfert de chaleur, diminuant ainsi le coefficient d'échange global. Pour éviter ce problème, il faut effectuer des nettoyages et un entretien régulier.

Avec le temps, l'encrassement s'intensifie et les opérations de maintenance deviennent plus fréquentes. Il existe également des procédés mécaniques et chimiques qui permettent de prévenir l'encrassement pendant le fonctionnement de l'échangeur. Ces procédés non seulement améliorent les performances, mais prolongent aussi de la durée de service de l'échangeur entre deux maintenances. Il est également important d'utiliser des filtres pour éliminer les impuretés des fluides avant qu'ils ne passent dans l'échangeur, et afin de réduire les risques d'encrassement [7].

II.4.2 Aspect économique et environnemental de l'encrassement

Une étude approfondie du phénomène d'encrassement des échangeurs a été réalisée. Durant leur utilisation, des dépôts se forment sur les surfaces de transfert, ce qui accroît la résistance thermique et diminue l'efficacité des échangeurs. Cette accumulation entrave le flux des fluides et rend la surface plus rugueuse, ce qui réduit l'efficacité du transfert thermique. L'ampleur de l'encrassement est influencée par divers facteurs, tels que la forme de transfert thermique (ébullition ou condensation), la nature de fluide employé (liquide ou gazeux), le type de surface et le matériau constitutif de l'échangeur. Les principaux inconvénients économiques de l'encrassement comprennent :

- Des pertes d'énergie considérables dues à une faible efficacité thermique ;
- Des coûts importants pour l'entretien lors des opérations de nettoyage ;
- Des interruptions de production pendant les nettoyages ;
- Les dépenses liées à toutes les causes d'encrassement se traduisent par :
 - Un surdimensionnement des équipements, par les bureaux d'études,
 - Une consommation énergétique accrue,
 - Le remplacement du matériel corrodé,
 - Des coûts liés à l'arrêt des installations (nettoyage, démontage, etc.) [8].

II.5 Classification des différents types d'encrassement :

II.5.1 Encrassement particulaire :

Le phénomène d'encrassement particulaire découle de l'accumulation de particules en suspension sur les surfaces dédiées aux échanges thermiques ou dans les conduits d'écoulement. Ce type d'encrassement peut se produire dans des installations utilisant à la fois des fluides liquides et de l'air, entraînant une accumulation de sédiments susceptibles de perturber le transfert thermique et de favoriser la corrosion localisée [9].

Par exemple, l'eau utilisée dans les chaudières peut contenir des produits issus de la corrosion, tandis que celle circulant dans les tours de refroidissement transporte fréquemment diverses particules. L'air ambiant peut également vecteur des poussières, tout comme les fumées industrielles issues des processus de la combustion, qui sont riches en résidus solides. Toutefois, les écoulements gazeux peuvent être fortement chargés en particules, accentuant ainsi le phénomène d'encrassement [10].

II.5.2 L'encrassement par précipitation :

Cette forme d'encrassement résulte de la précipitation ou du dépôt de substances dissoutes sur les surfaces concernées, généralement observé avec des solutions aqueuses dont la solubilité baisse à mesure que la température s'élève.

Ce type de dépôt est fréquent dans les installations comme les usines de dessalement d'eau de mer et les générateurs de manifeste à combustion. Il se manifeste généralement sous forme de tartre, et des dépôts solides et collants sur les surfaces d'échange de chaleur contenant souvent du carbonate de calcium, du sulfate de calcium et de la silice [11].



Figure II.9: Entartrage d'une chaudière à tube de fumée (P= 15 bars) [11].

II.5.3 Encrassement dû à la corrosion :

Il s'agit d'une réaction chimique ou électrochimique entre les parois et le fluide en circulation, on distingue plusieurs formes :

- ◆ La corrosion uniforme, caractérisée par une perte d'épaisseur régulière mais dont la vitesse n'est pas forcément proportionnelle au temps.
- ◆ La corrosion par piqûres, où l'attaque est limitée à des zones de très petites surface ($\approx 1\text{mm}^2$).
- ◆ La corrosion fissurante à l'échelle microscopique intergranulaire ou transgranulaire.
- ◆ La corrosion sélective, affectant uniquement un élément spécifique d'un alliage [12].



Figure II.11: Échangeur. Corrosion importante [12].

II.5.4 L'encrassement biologique :

L'encrassement biologique, également appelé biofouling en anglais, se caractérise par le dépôt et la croissance indésirable de biofilms sur diverses surfaces. Ce phénomène peut se produire dans différents environnements allant des dispositifs médicaux, à la production d'eau ultrapure, potable ou industrielle, en passant par les coques de navires, les conduites et les réservoirs. Bien que le biofouling affecte plusieurs domaines, il provient toujours de la formation de biofilms constitués de communautés de micro-organismes (notamment les bactéries) qui s'attachent à une surface et produisent une matrice protectrice. Ces biofilms sont extrêmement résistants, particulièrement face aux biocides, ce qui rend leur élimination difficile. Ils sont considérés comme l'une des formes de vie les plus résistantes et les plus répandues. Afin de lutter efficacement contre ce phénomène, il est recommandé d'adopter une approche intégrée incluant l'évaluation de l'état d'encrassement, la sélection des méthodes appropriées (choix des matériaux, traitements chimiques ou physiques, etc.), ainsi qu'un suivi régulier et rigoureux de l'évolution du biofilm [13].



Figure II.12: Dépôt salin bactérien [13].

II.5.5 Encrassement par réaction chimique :

Ce type d'encrassement résulte de réactions chimiques se produisant au sein du fluide ou à la surface de l'échangeur, engendrant la formation de dépôts. Par exemple, des phénomènes tels que l'autoxydation et la décomposition thermique des fluides organiques peuvent influencer la vitesse de l'encrassement, en fonction de paramètres variés tels que la température ou la composition du fluide [14].

II.5.6 Encrassement par solidification :

L'encrassement par solidification se produit lorsque des liquides ou des composants à point de fusion élevée présents dans une solution se solidifient sur une surface d'échange thermique et dont la température est trop basse. À titre d'exemple, ce phénomène peut se manifester par la formation de givre liée à l'humidité ambiante, le gel de l'eau de refroidissement dans les procédés à basse température, ou encore le dépôt de cire paraffinique lors du refroidissement des hydrocarbures [15].

II.6 Nature du dépôt

II.6.1 Dépôt dur

Ce type de dépôt se caractérise par une structure dense et résistante, qui ne s'atténue pas par d'un simple jet d'eau ou de vapeur. Il nécessite un nettoyage mécanique ou chimique approprié. Il s'agit notamment des dépôts corrosifs ou cristallins. La résistance thermique d'un dépôt dur est directement proportionnelle à son épaisseur. Plus le dépôt est épais, plus il freine le transfert thermique, entraînant une diminution significative des performances de l'équipement [7,15].

II.6.2 Dépôt poreux

C'est le matériau d'un dépôt dur qui se présente en une structure moins dense, sous l'effet des conditions opératoires. Ce type de dépôt est plus sérieux que celui du dépôt dur lorsque le fluide est emprisonné dans les pores à une faible conductivité thermique ce qui aggrave l'isolation thermique [7,15].

II.6.3 Dépôt mou

Les dépôts mous regroupent des substances telles que les boues, les poudres de coke ou de fibres végétales. Leur résistance thermique dépend principalement du fluide retenu plutôt que du matériau constituant la matrice. Un simple soufflage peut suffire à leur élimination, ce qui rend leur nettoyage généralement plus aisé [7,15].

II.7 Les processus fondamentaux de l'encrassement (Mécanismes) :

Phénoménologiquement, l'encrassement est une perturbation transitoire de chaleur et de masse qui implique l'interaction simultanée de multiples mécanismes complexes [16].

L'encrassement se déroule dans 5 phases :

II.7.1 Initiation :

La phase d'initiation du processus d'encrassement n'est pas détectée ; elle est décrite comme étant le temps nécessaire avant la formation d'un dépôt encrassant sur la surface d'échange.

Durant cette phase, la surface est conditionnée en vue de prévenir d'un futur encrassement. Plusieurs paramètres influencent significativement ce retard initial ou période d'incubation, notamment la température de surface, la nature du matériau ainsi que sa rugosité.

De nombreuses études soulignent l'importance cruciale de cette phase préalable à la formation du noyau cristallin encrassant. Actuellement, un des principaux objectifs des chercheurs est d'élaborer un modèle capable de décrire précisément cette phase d'initiation de l'encrassement afin d'allonger le plus possible le temps d'induction. L'utilisation de matériaux innovants pour les surfaces d'échange, tels que le DLC (Diamond-Like Carbon), contribue notamment à prolonger cette phase d'induction.

Par ailleurs, une surface rugueuse tend à réduire la durée de cette phase, car elle offre des conditions favorables à la cristallisation et ses aspérités constituent des sites propices au dépôt des particules [17].

II.7.2 Transport des particules dans le fluide jusqu'au voisinage de la paroi :

Au cours de cette étape, les substances encrassantes sont transportées à la surface des parois, qui peuvent être contrôlée par un nombre de phénomènes : la diffusion, la sédimentation et la thermophorèse (thermophoresis) [18].

- La diffusion est due à la turbulence du fluide.
- La sédimentation est provoquée par les forces de pesanteur.

- La thermophorèse est due à un gradient de température.

La thermophorèse désigne le déplacement des particules microscopiques dans le fluide lorsqu'un gradient thermique est présent. Les particules colloïdales sont attirées vers les surfaces froides et repoussées par les surfaces chaudes. Cet effet devient particulièrement significatif pour des particules dont le diamètre avoisine les 5 micromètres, et constitue l'un des mécanismes prédominants pour des tailles plus petites, notamment autour de 0,1 micromètre [19].

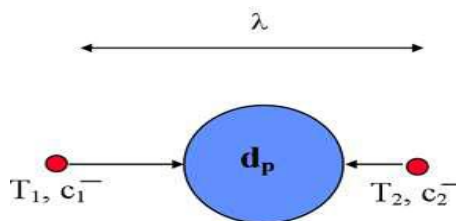


Figure II.13: le phénomène de thermophorèse [19]

II.7.3 La déposition :

Une fraction de la matière salissante transportée se fixe à la surface. Les propriétés du matériau, telles que la densité, la viscosité ainsi que les conditions de surface, jouent un rôle déterminant dans l'adhésion des particules. Ces dernières migrées vers la paroi peuvent y demeurer grâce aux forces d'adhésion résultant des interactions moléculaires (forces de Van der Waals), et des forces électrostatiques ou capillaires. Les forces de London-Van der Waals proviennent des interactions entre les moments dipolaires induits par le mouvement des électrons autour des noyaux atomiques neutres voisins. Dans les fluides monophasés, les forces résultantes entre particules et entre particules et paroi sont systématiquement attractives. Pour des particules dont le diamètre $d_p \leq 100 \mu\text{m}$, les forces de Van der Waals prédominent sur les forces gravitationnelles [20].

II.7.4 Réentraînement des particules déposées :

Certaines particules déposées sont réentraînées après avoir été agglomérées, arrachés à la couche de dépôt sous l'action des forces aérodynamiques [16]. Le

réentraînement des particules fixées à la paroi est provoqué par des forces de cisaillement exercées sur le dépôt, ainsi que par l'érosion ou l'écaillage. Une certaine proportion de la matière est éliminée de la surface immédiatement après son dépôt, tandis qu'une autre est retirée ultérieurement. Généralement, ce phénomène d'enlèvement résulte des forces de cisaillement agissant à l'interface entre le fluide et la couche d'encrassement. Généralement, ce phénomène d'enlèvement résulte des forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et la couche d'encrassement. Ces forces varient en fonction du gradient de la vitesse à la surface, de la viscosité du fluide et de la rugosité de la surface [11].

II.7.5 Vieillessement du dépôt :

Le vieillissement du dépôt se caractérise par une modification de sa structure chimique ou cristalline, résultant de phénomènes tels que la déshydratation ou la polymérisation. Dès le dépôt est établi sur la surface, le processus de vieillissement débute. Les propriétés mécaniques du dépôt évoluent durant cette phase, en raison des transformations cristallines ou chimiques intervenues. Par exemple, l'empoisonnement progressif des micro-organismes causé par la corrosion à la surface affaiblira et appauvrira la couche d'encrassement biologique. Les réactions chimiques modifient ainsi la composition chimique du dépôt, entraînant ainsi une altération de ses propriétés mécaniques [7].

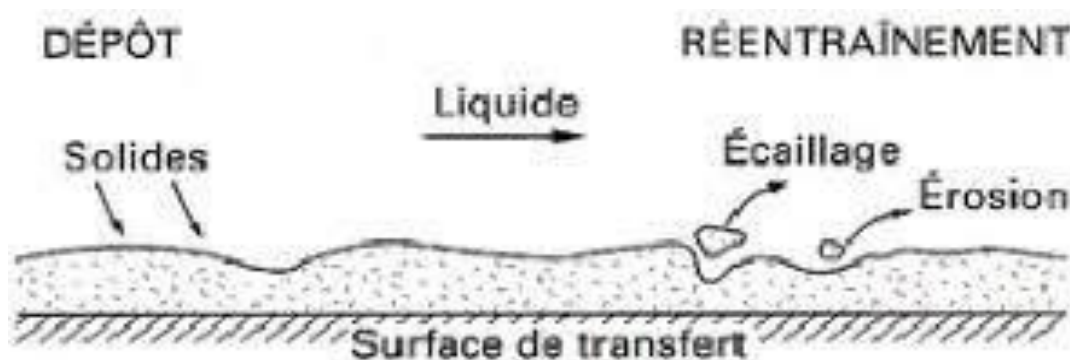


Figure II.14: Représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide [7].

II.8 Facteurs influençant l'encrassement :

Plusieurs paramètres influencent le mécanisme d'encrassement :

II.8.1 Géométrie de l'échangeur (Zone stagnantes) :

Les zones stagnantes représentent des zones de dépôts préférentiels, notamment dans l'écoulement externe d'un échangeur à tubes et calandre, les particules se concentreront dans les zones de recirculation situées en aval des chicanes. Avec le temps, ces dépôts peuvent dans certains cas s'agglomérer dans l'espace étroit entre les tubes et les chicanes, entraînant ainsi une obstruction partielle ou totale de l'écoulement du fluide [3].

Dans les échangeurs à plaques, spirales et tubulaires à tiges, l'absence de chicanes réduit le risque de formation des zones mortes. Toutefois, quel que soit le type d'échangeur, des zones à faible vitesse d'écoulement peuvent apparaître au niveau des raccords entre les tuyauteries et l'échangeur [22].

II.8.2 Effet de la vitesse :

En règle générale, une augmentation de la vitesse d'écoulement tend à réduire l'encrassement ; toutefois, cette vitesse reste limitée par les contraintes liées aux pertes de charges ainsi qu'aux risques d'érosion [23,24]. La vitesse d'écoulement joue un rôle déterminant dans le réentraînement des particules [26]. Par ailleurs, la dureté du dépôt constitue également un facteur déterminant dans ce processus, comme démontré par [27], dans leur expérience ils ont utilisé des particules de tailles et de compositions variées, soumises à de différentes vitesses d'écoulement. Ils ont observé que les petites particules s'attachent premièrement aux parois, suivies par les particules plus volumineuses. Afin de limiter l'encrassement, une vitesse d'écoulement élevée permet de réduire l'épaisseur des dépôts. Dans le cas de dépôts durs et fortement adhérents, la résistance à l'encrassement évolue de manière linéaire. En revanche, lorsque les dépôts sont mous, cette résistance évolue selon un comportement asymptotique classique

II.8.3 Effet de la température de surface :

Présence de points chauds ou froids sur la surface d'échange est souvent liée à une mauvaise répartition des vitesses au voisinage de la paroi. Il est établi que l'augmentation de la température de surface favorise le dépôt des sels à solubilité inverse. Ce phénomène demeure valable en ébullition, indépendamment des types sels présents [28,29]. Cette règle s'applique également à l'encrassement biologique jusqu'à une température limite d'environ 35°C.

II.8.4 Effet de la granulométrie des particules :

Le diamètre des particules constitue un paramètre essentiel dans le mécanisme de formation des dépôts, en considérant que ces particules sont de forme sphérique. Ce paramètre régit le mode de transport des particules vers la paroi ainsi que l'amplitude des forces hydrodynamiques et d'adhésion exercées sur la paroi. Des études ont montré que les forces d'adhésion augmentent lorsque le diamètre des particules diminue, tandis que, les forces favorisant le détachement ou le réentraînement augmentent avec la taille des particules. Par conséquent, une réduction du diamètre des particules tend à accentuer significativement l'encrassement [18].

II.9 Conséquences de l'encrassement :

L'encrassement de l'échangeur se manifeste par :

- Une diminution de l'efficacité de l'appareil, induisant une augmentation des pertes de charge.
- Une baisse globale des performances, incluant une réduction du transfert thermique, un rétrécissement des sections d'écoulement et une diminution des débits en cas de maintien constant de la pression et de la puissance transférée.
- Le colmatage progressif des tubes suite à la formation d'un film d'encrassement autour de leurs parois.
- Une dégradation prématurée de l'équipement entraînant son dysfonctionnement, nécessitant des réparations et occasionnant des pertes de production [29].



Figure II.16: Bouchage des tubes d'un échangeur [29].

II.10 Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre traite le phénomène de l'encrassement rencontré dans les installations industrielles, notamment dans les échangeurs, qui sera abordé dans l'étude expérimentale du chapitre III. Préalablement, nous avons exposé dans le présent chapitre les différents types d'encrassement rencontrés, son mécanisme, la nature du dépôt formé ainsi que les conséquences engendrées, en vue d'une meilleure connaissance du problème d'encrassement et de ses aspects, et conséquemment, aboutir à mieux le cerner.

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]. Mekid, A., & Ghatou, O. Comportement mécanique et thermique des nano réfrigérants pour les échangeurs de chaleur à triple tube concentrique en présence de chicane [Mémoire de Master, Université Yahia Farès de Médéa], (2022).
- [3]. Harkat. Y, « Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur », Mémoire Magister, Université Mohammed Bougera -Boumerdas, (2007)
- [4]. Pierre Wuithier, André Giraud, Raffinage et Génie Chimique, (Tome II) (2^{ème} édition), Paris : Editions Technip, 1972.
- [5]. Boudiaf, Y. Étude de l'encrassement dans un réfrigérant industriel (E112) – Cas de la raffinerie d'Alger. Mémoire de Master, Université Saad Dahlab – Blida, 2022.
- [6]. Khoulla Nadjet, Labгаа Ahmed. Contribution à l'étude numérique de la résistance thermique d'encrassement d'un réseau d'échangeurs de chaleur lors d'une phase de traitement thermique d'un pétrole brut, mémoire master Université de medea, 2021.
- [7]. Hamza Charif Sadouk. Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois (Thèse de doctorat, Université de Université de Paris-Est),2009
- [8]. Mansoori G.A., Physico-Chemical Basis of Arterial Blockage, Fouling Prediction and Prevention, 2001.
- [9]. Dupont, J., & Martin, P. Étude des mécanismes d'encrassement particulière. *Advances in Colloid and Interface Science*, 185-186, 34-76. 2012
- [10]. Amirat, Z. Bilan thermique du circuit de solvant lourd et étude de l'encrassement du réfrigérant E112 de la raffinerie d'Alger (Mémoire de Master, Université de Blida 1, Algérie). Université de Blida, 2015.
- [11]. Kerraoui Imen. Etude Numérique De L'encrassement Par Le Pétrole Brut Dans Le Train De Préchauffage De La Raffinerie d'Alger (Thèse de doctorat). Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène (USTHB), Alger, 2022.

- [12]. Leconte, J « Protection contre la corrosion ». Technique de l'ingénieur A830.
- [13]. Flemming, HC. Biofouling in water systems – cases, causes and countermeasures. Apple Microbiol Biotechnol 59, 629–640 (2002).
- [14]. Taylor, W. F., Wallace, T. J., Ind. Eng Chem. Prod. Res. Dev. 6 (1967) pp. 258–262.7 Ind. Eng Chem. Prod. Res. Dev. 7 (1968) pp. 198–202
- [15]. Brazetek. Fouling Classification.
<https://www.brazetek.com/articles/75-fouling-classification> consulté le 01.04.25 à 20h35min
- [16]. Epstein. “Thinking About Heat Transfer Fouling: A 5x5 Matrix”, Heat Transfer Engineering. (1983)
- [17]. Fahmi Brahim, Wolfgang Augustin, Matthias Bohnet, Numerical simulation of the fouling process, International Journal of Thermal Sciences 42 (2003) 323–334
- [18]. Support de cours chapitre 3 le phénomène d'encrassement ;
<https://fr.scribd.com/document/451221302/22> consulté le 01.04.25 à 20h35min
- [19]. Nishio, G., Kitani, S., and Tadashi, K. Thermophoretic deposition of aerosol particles in a heat-exchanger pipe. Ind. Eng. Chem. Proc. Design Dev., Vol. 13, 408-415, 1974.
- [20]. A. bontemps-a. garrigue-ch. goubier-j. hotes-ch. marvillet-p. mercier-r. vidal, Echangeur de chaleur problème de fonctionnement 2005
- [21]. Rodliffe R.S., Means F.A., “Factors Governing Particulate Corrosion Product Adhesion to Surfaces in Water Reactor Cooling Circuits”, CEGB Report RD/BN4525, Berkeley Nuclear Laboratories, UK, 1979
- [22]. Haouli, I., & Khelifi, I. Étude de l'encrassement d'un échangeur de chaleur à plaques [Mémoire de Master, Centre Universitaire Salhi Ahmed – Naâma].2020
- [23]. Duffau, C, Grillot, J, M, « L'encrassement Dans Les Echangeurs, Description, Prévention, Remèdes », Greth. (1991).
- [24]. Muller-Steinhagen, M, Watkinson, P« Influence Of Operating Conditions On Particulate Fouling » Can, J, Chem,Eng,66 42-50. (1988).
- [25]. Grillott, J, Icart, J« Fouling of A Cylindrical Probe and A Finned Tube Bundle in A Diesel Exhaust Environment”, Exp, Thermal Fluid, Sci 14.442- 454. (1997).

- [26]. Rindt, C, Abd-Elhady, M, S. « Minimum Gas Speed in Heat Exchanger to Avoid Particulate Fouling » Int, J, Of Heat and Mass Transfer 47.3943-3955. (2004).
- [27]. Crittenden, B & Khater, E « Fouling from Vaporising Kerosene » Fouling of Heat Exchanger Equipment; Asme.hfd.vol.35, ed.jw. suitor.am a.m. pritchard, pp 57-64. (1984).
- [28]. Story, M. Knudsen, J.G. « The Effect of Heat Transfer Surface Temperature on the Scaling Behavior of Simulated Cooling Tower Water ». Am.Inst. Chem.Engn Symp.74 (124), 25-30. (1978).
- [29]. Belmaghni, H. & Fatah, M. (2019). Evaluation Des Facteurs Causaux Le Phénomène De Bouchage De L'échangeur E.504 Edm/mea Au Complexe G11/z [Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem].

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III

Procédures expérimentales

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, une présentation de la raffinerie de Skikda (RA1K), d'où sont récupérés les échantillons pour réaliser le programme expérimental.

L'étude expérimentale a été conduite au sein du Laboratoire Hall de technologie du Département de Pétrochimie de l'Université du 20 Août 1955 Skikda, ainsi qu'au niveau du Département Production de la Raffinerie de SKIKDA (RA1K).

III.2 Objectifs de l'étude :

L'objectif du présent travail consiste à proposer une solution pour le problème de fonctionnement des équipements industriels, en l'occurrence, la corrosion sous l'effet de l'encrassement des échangeurs, par l'adoption du nettoyage en place en se basant sur l'effet des produits chimiques, entre autres, les acides et la soude, ainsi que d'évaluer l'efficacité d'un revêtement en peinture pour protéger ces équipements contre la corrosion, notamment dans des environnements agressifs comme les milieux acides. La présentation de la situation du lieu stage est dans le but de mettre en évidence les contraintes climatiques agressives à savoir l'humidité, la salinité...

III.3 Présentation de La raffinerie de Skikda (RA1K) :

III.3.1 Mission de la raffinerie (RA1K) :

La raffinerie de Skikda (RA1K-Sonatrach), a pour mission de transformer le pétrole brut de Hassi Messaoud en fractions pétrolières finies ou semi finies valorisables sur le marché intérieur ou extérieur. Elle a commencé avec une capacité de traitement de 15.000.000 t/an, et elle a été portée à 16.500.000t/an après sa rénovation. La raffinerie de Skikda est considérée comme la plus grande raffinerie d'Afrique.

De même, elle traite le brut réduit importé avec une capacité de 277.000 t/an pour l'obtention des bitumes routiers et oxydés.

III.3.2 Situation géographique :

La raffinerie de Skikda est située dans la zone industrielle à 7 km à l'est de Skikda et à 2 km de la mer, elle est aménagée sur une superficie de 256 hectares, et alimentée

en brut algérien par l'unité de transport U.T.E de Skikda qui est une station intermédiaire de Hassi Messaoud.

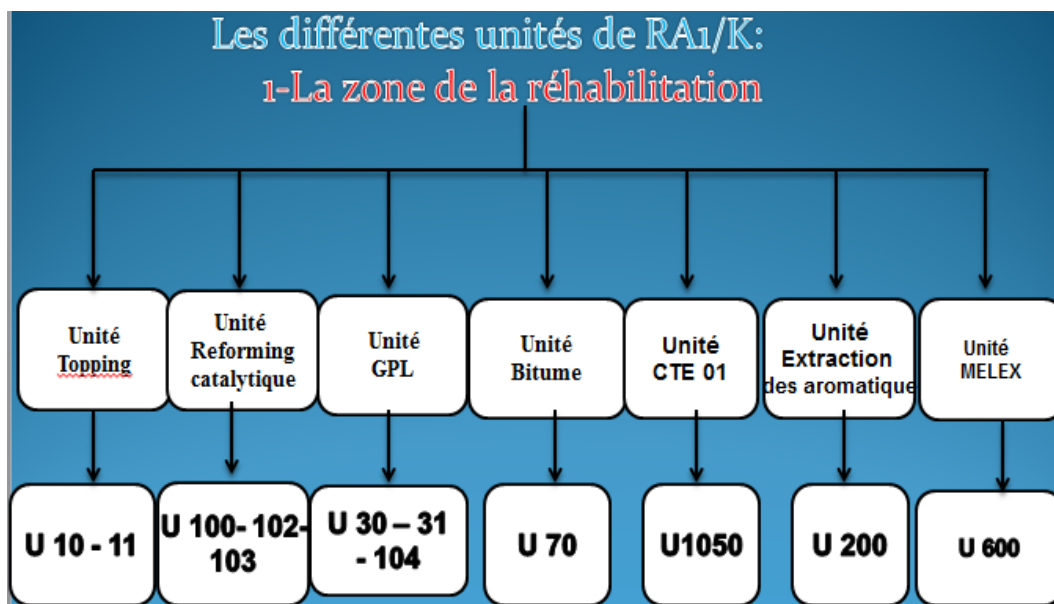


Figure III. 1: Situation géographique de la raffinerie de Skikda.

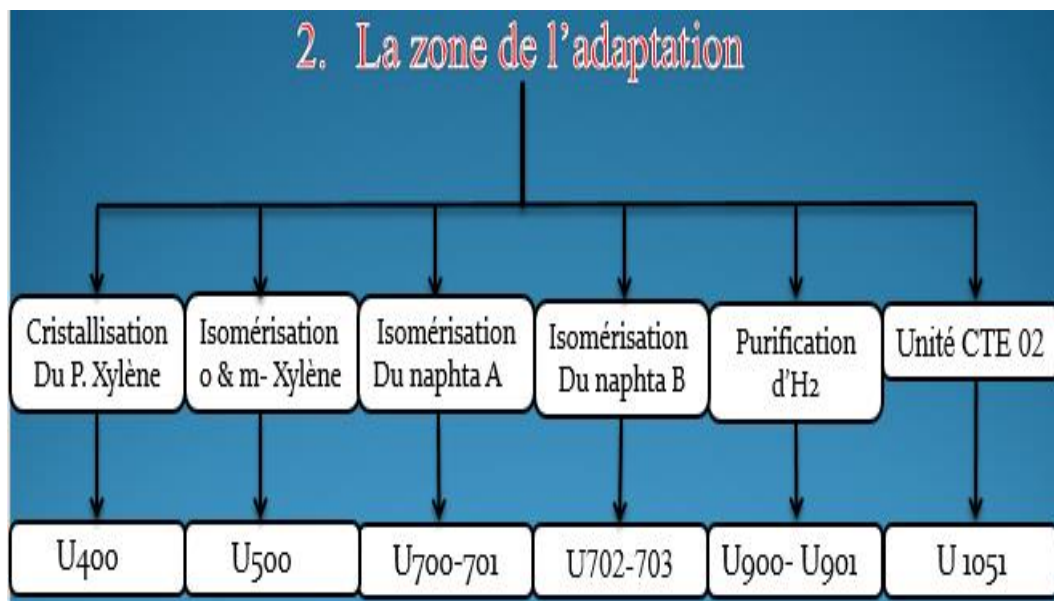
III.4 Description des unités de production de la raffinerie de Skikda (RA1K)

Après sa rénovation, elle comprend les unités suivantes :

- Deux unités de distillation atmosphérique (U10 et U11),
- Une unité de distillation sous vide (U70),
- Deux unités de reforming catalytique (U100 et U103),
- Trois unités de traitement et séparation des gaz (U30/31/104),
- Une unité de séparation des aromatiques (U200),
- Une unité de séparation du paraxylène (U400),
- Deux unités d'isomérisation du naphta (U700/701 et 702/703),
- Une unité d'isomérisation des xylènes (méta et ortho) (U500),
- Une unité de purification d'hydrogène (U900),
- Deux unités utilités,
- Deux parcs de stockage du brut et des produits pétroliers.



(a) La zone de réhabilitation RA1/K



(b) La zone d'adaptation RA1/K

Figure III. 2 (a-b): la zone de réhabilitation et la zone d'adaptation de RA1/K-Sonatrach

III.4.1 Unités de distillation atmosphérique (U10 et U11) :

Cette unité sert à séparer le pétrole brut en différentes fractions comme indiquées ci-dessous:

- GPL ;
- Coupe C6 ;
- Naphta A ;
- Naphta B ;
- Naphta C ;
- Kérosène ;
- Gas-oil léger (LGO) ;
- Gas-oil lourd (HGO) ;
- Résidu atmosphérique (RCO).

III.4.2 Unité de production de bitume (U70) :

Cette unité a été conçue pour traiter 277.000 T/an de brut réduit importé (BRI): L'unité se compose principalement d'une colonne de distillation sous vide et d'un réacteur d'oxydation des bitumes.

Le produit de fond de la colonne est le bitume routier ordinaire qui est envoyé :

- En partie vers le stockage.
- Et l'autre partie comme charge à la section d'oxydation où elle sera oxydée au moyen de l'air pour l'obtention du bitume oxydé.

III.4.3 Gas-Plant (U30, U31 et U104) :

Pour le traitement de GPL, la raffinerie de Skikda dispose de trois unités de traitement et trois unités de séparation, le GPL traité issu principalement de deux trains de distillation ainsi que le gaz des unités reforming.

III.4.4 Unités Reforming Catalytique (U100, U103) :

Le procédé produit un reformat à haut indice d'octane riche en composants aromatiques. L'hydrogène, les gaz incondensables et le GPL sont les sous-produits de la réaction. Le procédé a été développé pour l'amélioration du naphta de distillation directe

à bas indice d'octane en carburant pour moteurs à haut indice d'octane. Le procédé a été appliqué à la production d'aromatiques de haute pureté.

III.4.5 Unité de récupération des aromatiques (U 200) :

L'unité d'extraction des aromatiques, dans la configuration du revamping, traite la fraction riche en benzène provenant du système de Post-fractionnement du Magnaforming, la fraction riche en benzène provenant du Splitter de plat format, et la fraction benzène-toluène provenant de la section post-fractionnement de l'unité d'isomérisation.

III.4.6 Unité de récupération paraxylènes (U 400) :

L'Unité 400 traite les trois fractions riches en xylène :

- La coupe C8+provenant de la charge magnaformat ;
- La coupe C8+provenant de la charge plateformat ;
- Le courant de C8+de l'Unité d'isomérisation.

La séparation du paraxylène des autres xylènes (méta et ortho) et de l'éthylbenzène est réalisée par le procédé de cristallisation dont l'agent de séparation est le froid.

La section de fractionnement de l'unité est conçue afin de préparer la charge d'alimentation pour la section de cristallisation dans le but de produire du paraxylène à haute pureté.

III.4.7 Unité d'Isomérisation du xylène (U500) :

L'unité d'isomérisation du xylène a pour rôle d'augmenter la production de paraxylène par isomérisation du méta-xylène et de l'ortho-xylène.

Suivi les injections des produits chimique pour la protection du circuit process au niveau de l'unité 10 7.

III.4.8 Unités de prétraitement et d'isomérisation de naphta léger :

L'objet des unités 700/702 est l'hydrotraitement du naphta Léger afin de produire des charges d'alimentation hydro traitées propres pour alimenter les unités 701/703 d'Isomérisation. Ces charges d'alimentation doivent être suffisamment basses en

contaminants tels que le soufre, l'azote, l'eau, le mercure et d'autres métaux afin de ne pas affecter les unités en aval. La charge d'alimentation de l'unité est un mélange des coupes (C5 et C6) de naphta de distillation directe et de la coupe C5 de l'unité de reforming catalytique (U103)

L'objectif des unités 701/703 est d'améliorer l'indice d'octane du naphta léger (principalement C5/C6) avant de l'envoyer dans le pool essence.

III.4.9 Unité de purification d'hydrogène (U900) :

Cette unité est conçue pour traiter le gaz riche en H₂ provenant des unités de reforming catalytique (U100 et U103) et elle sert à produire de l'hydrogène à très haute pureté qui sera utilisé dans les unités d'isomérisation du naphta léger et d'isomérisation des xylènes. Sa capacité de traitement est de 20.256 Nm³/h pour une production de 12.582 Nm³/h d'hydrogène ayant une pureté de 99,90 % molaire avec un taux de récupération d'hydrogène de 88 %.

La purification de l'hydrogène est réalisée par le procédé d'adsorption dans un système comportant huit ballons d'adsorption, les uns en fonctionnement et les autres en régénération. L'adsorption des impuretés contenues dans le gaz riche est réalisée à une pression absolue de 25,3 kg/cm² (haute pression) et une température de 40°C, alors que la régénération s'effectue à basse pression.

III.4.10 Unités des utilités :

Les utilités de la raffinerie de Skikda se divisent essentiellement en deux zones de production bien distinctes, l'utilité 1 appelée aussi utilité réhabilitation située au centre de la raffinerie, l'utilité 2 ou bien utilité adaptation située du côté ouest de la raffinerie.

L'utilité 1 est dotée de :

- Système d'eau déminéralisée U62. (Actuellement à l'arrêt, elle est obsolète)
- Système eau de refroidissement U1020 et U1021 ;
- Système d'eau brute U1030;
- Système d'eau anti-incendie U1040;
- Système de BFW, Vapeur & Générateur U1050;

- Système de condensat U1060;
- Système de gaz combustible U1070;
- Système d'air comprimé U1081;
- Système de torche U1090;
- Système d'azote U1110.

L'utilité 2 est dotée de :

- Système d'eau déminéralisée U63;
- Système d'eau de refroidissement U1022;
- Système d'eau brute U1031;
- Système de BFW, Vapeur & Générateur U1051;
- Système de condensat U1061;
- Système de gaz combustible U1071;
- Système d'air comprimé U1082;
- Système de torche U1091;
- Système d'azote U1111.

III.4.11 Unité de stockage, mélange et expédition :

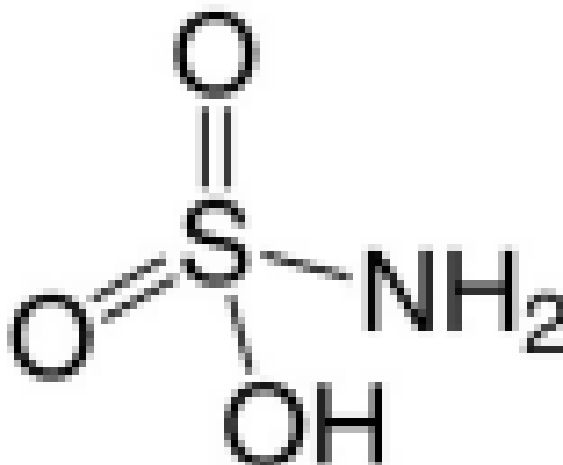
Cette unité est composée d'une section de mélange et d'expédition des produits pétroliers et d'une section de stockage du brut et des produits pétroliers. Elle comprend :

- Les bacs de stockage des différentes charges et produits des unités de production,
- Les bacs de mélange des gasoils et des essences,
- Les stations de pompage pour l'expédition des produits pétroliers vers les Différents dépôts de stockage (dépôts d'El Khroub et de Berrahal).

III.5 Produit utilisé par RA1K pour le nettoyage des équipements :

III.5.1 Acide sulfamique :

❖ **Formule :**



❖ **Propriétés physiques**

L'acide sulfamique est un solide cristallisé, incolore et inodore, non hygroscopique et non volatil dans les conditions ordinaires. Il est soluble dans l'eau (17,6 % en poids à 20 °C) et certains solvants organiques comme le formamide, le N,N-diméthylformamide, la pyridine, le méthanol.

❖ **Propriétés chimiques**

L'acide sulfamique est un produit très stable jusqu'à son point de fusion. Il commence à se décomposer à 209 °C en dégageant un mélange d'oxydes d'azote et d'oxydes de soufre toxiques, d'azote et de vapeur d'eau.

Les solutions aqueuses d'acide sulfamique sont relativement stables à température ambiante. À chaud, il se produit une hydrolyse exothermique avec formation de sulfate et bisulfate d'ammonium.

Bien qu'étant un acide fort (pH d'une solution 0,1 N à 25 °C : 1,18), l'acide sulfamique est beaucoup moins corrosif que les acides courants. Toutefois, il est

conseillé de ne pas l'utiliser au contact du zinc et de l'acier galvanisé en l'absence de système inhibiteur.

L'acide sulfamique peut donner lieu à une réaction dangereuse avec les oxydants puissants. Ses solutions aqueuses concentrées peuvent réagir violemment avec les bases fortes anhydres ou en solutions concentrées.

❖ Récipients de stockage

Le stockage s'effectue généralement dans des sacs de papier doublé de matière plastique. Il est possible de stocker les solutions aqueuses pendant quelques jours dans des récipients en matière plastique, en acier ébonite ou, pour les grandes capacités, en acier inoxydable.

III.6 Procédure de lavage chimique du circuit de refroidissement des pompes

Topping :

Cette procédure est élaborée pour le lavage chimique du circuit de refroidissement des pompes, pour l'élimination de l'encrassement.

Les moyens nécessaires pour cette opération (le lavage chimique et mécanique) sont les suivants :

Moyens matériels :

- Deux réservoirs mobiles ;
- Une pompe centrifuge : utilisation de la pompe 62-MP-2A qui se trouve au niveau de la plateforme maintenance :
- ✓ Une pompe HP pour nettoyage mécanique ;
- ✓ Un système de mesure de pH et concentration de la solution préparée ;
- ✓ L'acide sulfamique sec (BS 12) (magasin approvisionnement) ;
- ✓ Les utilités (air, vapeur LS, DW, eau d'anti-incendie) ;
- ✓ Les flexibles (boyau de différent diamètres) ;
- ✓ Les gants, lunettes, masques,etc (car le produit est un acide fort).

❖ Moyens humains :

- ✓ Équipe de chaudronneries ;
- ✓ Équipe des échafaudeurs
- ✓ Équipe de nettoyage ;
- ✓ Électricien et mécanicien ;
- ✓ Équipe de soudage ;
- ✓ Opérateur exploitation.

❖ Les étapes de l'opération :

1. Après le découpage des lignes (ramifications des pompes) pour modification, on procède au :
 - Rinçage du circuit d'alimentation et de retour à l'eau ;
 - Nettoyage les Lignes de refroidissement des pompes avec l'eau ;
 - Installation des connexions au bout des lignes pour créer des interconnexions entre les lignes d'alimentation et de retour au niveau des pompes.
2. Installation d'une vanne 2 et une purge sur la ligne d'alimentation N°2 des pompes et une purge 2 sur le bac N° 1 (8 m³) ;
 - Installation et connexion de la pompe (62-MP-2A) avec le réservoir de capacité 8 m³ (bac N° 1) et avec les lignes d'alimentation et de retour
 - Remplissez le système avec l'eau chaude est faire circuler plusieurs fois, vérifiez s'il y a des fuites au niveau des connexions ;
3. Assurer que les circuits principaux sont isolés 22- 20-18 ;
4. Préparer une solution d'acide sulfamique à 3% dans le réservoir N° 01 (8 m³) ;
5. Ajouter l'acide sulfamique (BS12) pré-mélangé au circuit de refroidissement des pompes (le passage du sol vers le corps de la pompe est interdit) ;
6. Faire circuler la solution d'acide sulfamique (BS12), dans le système pendant plusieurs heures pour enlever l'encrassement du circuit ;
7. Surveillez le pH pendant l'opération jusqu'à ce que les résultats souhaités soient atteints ;

8. Installer un réservoir destiné pour la vidange et la neutralisation de la solution usée (bac N° 2) ;
9. Diluer et neutraliser la solution de nettoyage usée avant de drainer dans le réservoir N° 2 (6 m³) ;
10. Rincer le circuit avec l'eau déminéralisé avant de le mettre en service.
11. Contrôler le pH du système s'il se situe entre 6 et 10 (pour tout pH applicable) ;
12. Remplissez et remettez le système en service.



Figure III. 3 (a-b) : État des tubes des échangeurs avant et après le lavage chimique

III.7 Programme expérimental, méthodes et techniques :

III.7.1 Méthode :

La méthode de nettoyage chimique, consiste à l'application d'une solution basique (la soude), et d'une solution acide chlorhydrique, acide sulfurique en respectant certaines concentrations et températures, suivant la méthode de perte de masse "gravimétrique". Elle décrit l'ensemble de la méthode d'analyse chimique quantitative effectuée en déterminant par pesée, la masse d'un produit formé ou éliminé.

III.7.1.1 Méthode gravimétrique :

Cette méthode consiste à exposer des échantillons avec encrassement à un milieu agressif pendant un temps déterminé et à mesurer la différence de masse des échantillons avant et après chaque essai [1].

III.7.1.2 Méthode de décapage en place :

Un système NEP est un procédé de préparation et de transmission de solutions de nettoyage vers les lignes de fabrication. C'est un système fermé où la circulation s'effectue en boucle, avec un fort débit. Les solutions de nettoyage, sont appliquées pour nettoyer, rincer et désinfecter les lignes de traitement continu. Au niveau des cuves, des boules d'aspersion permettent de disperser les solutions de nettoyage et d'atteindre ainsi l'ensemble des parois. Les agents chimiques utilisés sont acides ou alcalins. Le produit alcalin, employé généralement en premier, permet la saponification des matières grasses et la peptisation des protéines (nettoyage), l'acide sert à la destruction des dépôts minéraux (détartrage). Plusieurs facteurs influencent le résultat du nettoyage et sa qualité. Ces derniers sont : la température, le temps, la concentration chimique des produits.

Le système DEP est divisé en différentes étapes, on procède comme suit :

1. Rinçage à l'eau traitée pour éliminer les résidus.
2. Drainage d'une solution alcaline (soude caustique)
3. Rinçage intermédiaire à l'eau traitée.
4. Passage d'une solution acide
5. Rinçage final à l'eau froide traitée qui enlève les résidus acides [2].

III.7.2 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.7.2.1 Préparation des échantillons :

Choix des plaques : acier C1020

Le premier chiffre, le 1 signifie que c'est de l'acier au carbone. Le second chiffre, le 0 signifie qu'il n'y a pas eu de modification dans l'analyse. Les deux derniers chiffres nous indiquent le pourcentage de carbone 0.20 %

Tableau III.1: Propriétés de l'acier C1020

Propriétés
Le tuyau d'acier C1020 est un tuyau d'acier à faible teneur en carbone (0,17%C et 0,3%Mn), qui offre de meilleures propriétés mécaniques et physiques telles que la soudabilité, la ductilité et une résistance élevée à la corrosion. Toutefois en raison de sa faible teneur en carbone, il est difficile de durcir par induction ou de durcir à la flamme. Aussi, du fait du manque d'éléments d'alliage, il ne convient pas à la nitruration

➤ Découpages des plaques

Nous avons découpé une plaque de l'acier (C1020) en échantillons de petites dimensions pour faciliter leur utilisation.

III.7.2.2 Produits d'encrassement :

L'huile lubrifiante 10W40 : On utilise l'huile lubrifiante pour moteur automobile, parce qu'elle sert à limiter l'échauffement en diminuant le coefficient de frottement et à lutter contre la corrosion, avec un indice de viscosité 78-102, un point d'écoulement 40 C° et un point d'éclair 205-220C° [3].

III.7.2.3 Revêtement en peinture :

Les revêtements anticorrosion fonctionnent comme des matériaux sacrificiels, créant une "couche barrière" protectrice à la surface du matériau contre les agents corrosifs tels que l'eau, l'air, les sels ou les produits chimiques (pour ralentir le processus de corrosion). Ces traitements permettent de prolonger la durée de vie des structures métalliques, d'améliorer leur résistance et de réduire les coûts liés à l'entretien ou au remplacement [4].

III.8 Procédés de nettoyage :

- **Choix des solutions :**
- **L'acide sulfurique :**

L'acide sulfurique (H_2SO_4) est un acide minéral fort, très corrosif, ce diacide est incolore et inodore. Dans l'eau, il libère des ions hydronium, HO_3^+ , et des ions sulfates,

SO_4^{2-} , largement utilisé dans les procédés industriels de décapage des métaux. Il permet d'éliminer les oxydes, les impuretés et les dépôts tenaces sur des surfaces métalliques telles que l'acier, le fer ou le cuivre. Son efficacité repose sur sa forte réactivité chimique, capable de dissoudre la rouille et de préparer les métaux avant d'autres traitements (galvanisation, peinture, etc.) [5].

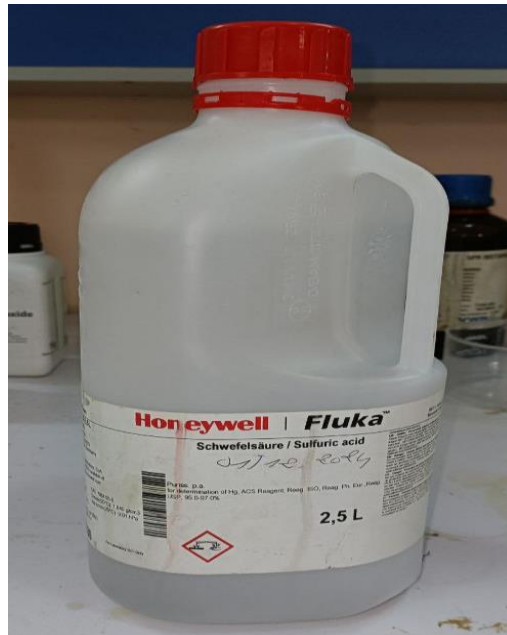


Figure III. 4: l'acide sulfurique

- **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 [6].

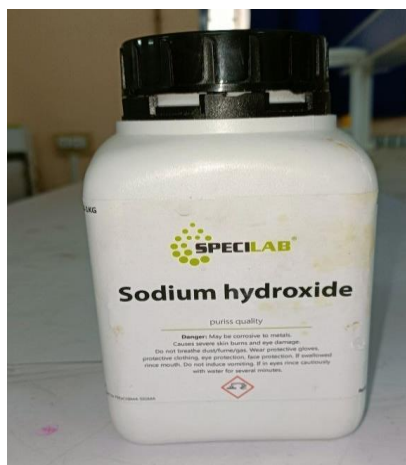


Figure III. 5: Hydroxyde de sodium

- **L'acide chlorhydrique :**

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

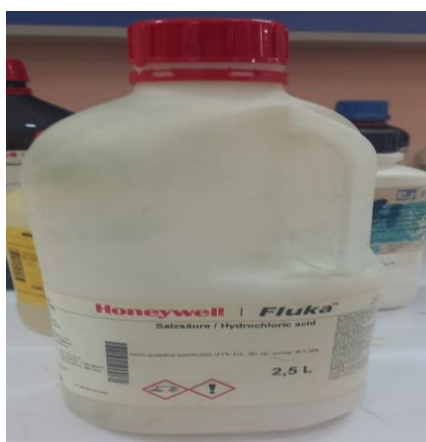


Figure III. 6: l'acide chlorhydrique

III.9 Procédé expérimental :

III.9.1 Encrasse :

On prend deux cristallisoirs et on ajoute à chacune une quantité d'huile EXOL10W40, puis on place deux échantillons A (traité avec l'acide sulfurique) et échantillon B (corrodé) dans chaque cristallisoir pendant 12 heures.



Figure III. 7: immersion de les échantillons A et B dans 10W40

• Nous retirons les deux échantillons A et B des cristallisoirs et nous les laissons sécher pendant 5 jours, puis nous les pesons.



(a) Avant ajout de l'huile



(b) Après ajout de l'huile

Figure III. 8 (a-b) : Masse de l'échantillon A avant et après ajout de l'huile



(a) Avant l'ajout de l'huile



(b) Après l'ajout de l'huile

Figure III. 9 (a-b) : Masse de l'échantillon B avant et après ajout de l'huile

Après on place les deux échantillons A et B dans un bicher qui contient la solution d'acide H_2SO_4 avec des concentrations (0,5% ; 1% ; 1,5% ; 2%) et un volume de 60 ml pendant 30 secondes. Ensuite, on prélève l'échantillon, on le rince avec l'eau distillée, puis le mettre dans l'étuve pour le laisser sécher et à la fin l'échantillon est pesé. On répète la même procédure précédente (immersion, rinçage, séchage dans l'étuve, et pesage) et suivre la diminution de la couche d'encrassement formée par l'huile.

III.9.2 La peinture

On prend trois échantillons A (traité par l'acide sulfurique), B (corrodé), C (traité avec la soude et l'acide chlorhydrique) et on les place dans la peinture XF-13865 WHITE LACQUER jusqu'à l'obtention d'un échantillon complètement recouvert de peinture et on laisse sécher pendant 3 jours.

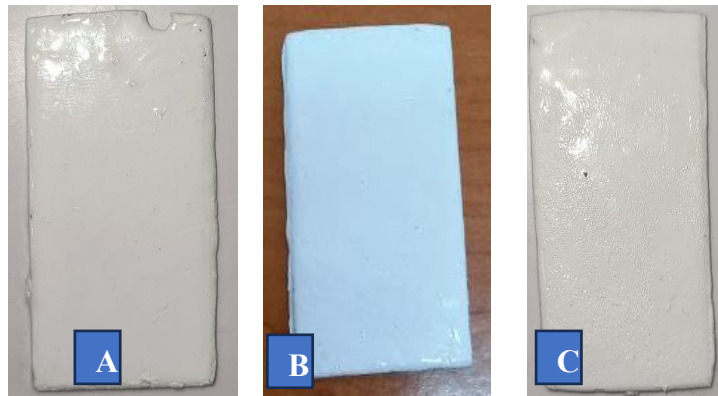


Figure.III.10 : Échantillons (A, B, C) teintés



(a) Avant application de la peinture



(b) Après application de la peinture

Figure III. 11 (a-b) : Masse de l'échantillon B avant et après application de la peinture



(a) Avant application de la peinture



(b) Après application de la peinture

Figure III.12 (a-b) : Masse de l'échantillon B avant et après application de la peinture



(a) Avant application de la peinture



(b) Après application de la peinture

Figure III. 13 (a-b) : Masse de l'échantillon C avant et après application de la peinture**❖ Après le séchage :**

1. On place les deux échantillons A et B dans un bicher qui contient la solution acide (H_2SO_4) avec une concentration de 5% et un volume de 60 ml pendant 30 secondes. Ensuite on prélève l'échantillon et on le rince avec l'eau distillée, puis on le laisse sécher et à la fin l'échantillon est pesé. On répète la même procédure précédente (immersion, rinçage, séchage et pesage) et suivre la diminution de l'épaisseur de la couche protectrice de la peinture.

**Figure III.14:** immersion de l'échantillon A dans une solution aqueuse de (5%) H_2SO_4 **Figure III.15:** immersion de l'échantillon B dans une solution aqueuse de (5%) H_2SO_4

2. On place l'échantillon C dans un bécher (60ml) et on répète la même procédure précédente (immersion, rinçage, séchage, pesage) dans une solution qui contient d'acide chlorhydrique.

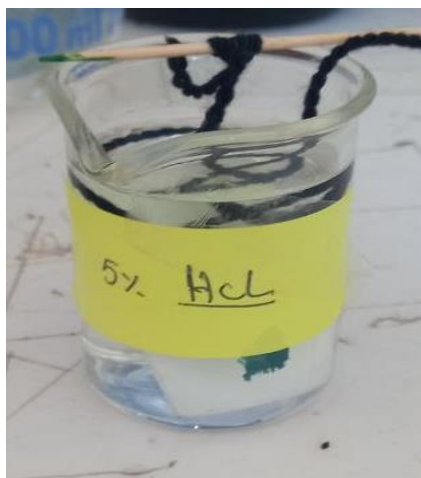


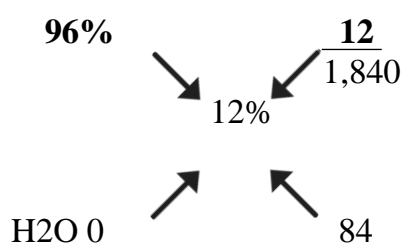
Figure III.16 : Immersion de l'échantillon C dans une solution aqueuse de HCL (5%)

III.10 Préparation des solutions :

L'acide sulfurique :

Nous avons préparé cinq (5) solutions d'acide sulfurique de différentes concentrations :

◆ La solution de concentration 12% de L'acide sulfurique :



$$\begin{array}{l}
 6,52 \longrightarrow 90,52 \\
 V \longrightarrow 500 \text{ ml} \\
 V(\text{H}_2\text{S}_04) = 36 \text{ ml}
 \end{array}$$

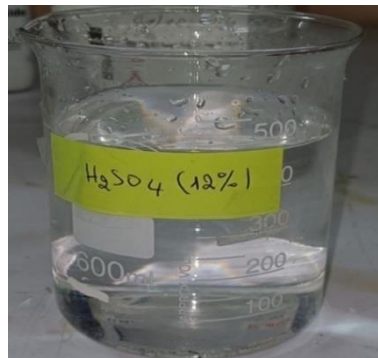


Figure III.17: Solution aqueuse de (12%) Acide sulfurique

◆ La solution de concentration 2% de L'acide sulfurique :

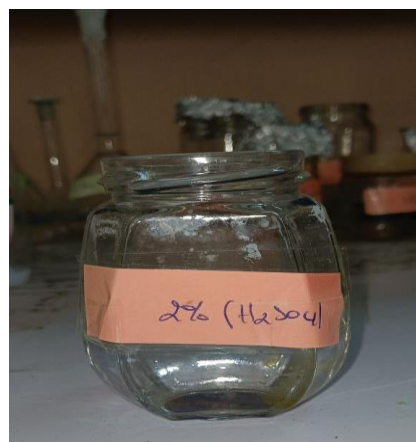
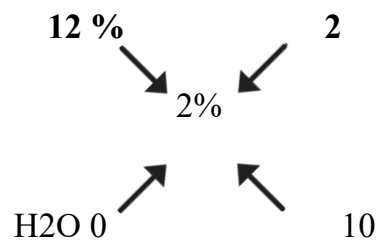
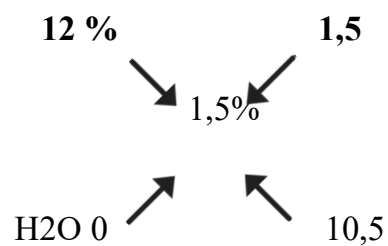


Figure III.18 : Solution aqueuse de (2%) Acide sulfurique

◆ La solution de concentration 1,5% de L'acide sulfurique :



V (solution) : 12,50ml (A. Sulfurique) + 87,5 ml (eau distillé) = 100 ml

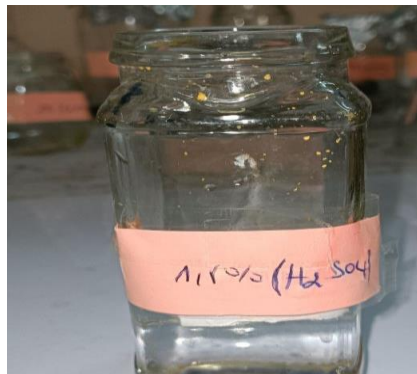
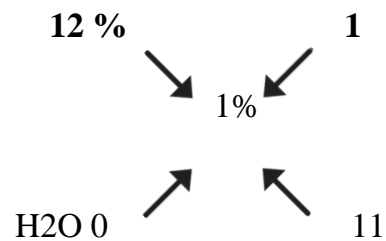


Figure III.19: Solution aqueuse de 1,5% H₂SO₄

◆ **La solution de concentration 1% de L'acide sulfurique :**



V (solution) : 8,33ml (A. Sulfurique) + 91,67 ml (eau distillé) = 100

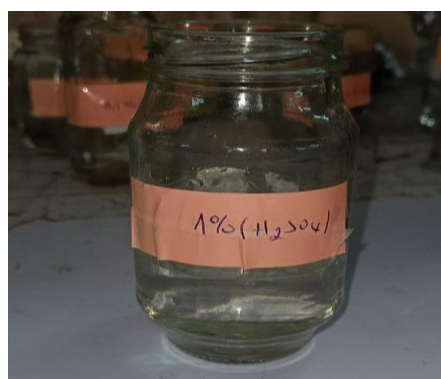


Figure III. 20 : Solution aqueuse de 1% H₂SO₄

♦ La solution de concentration 0,5% de L'acide sulfurique :

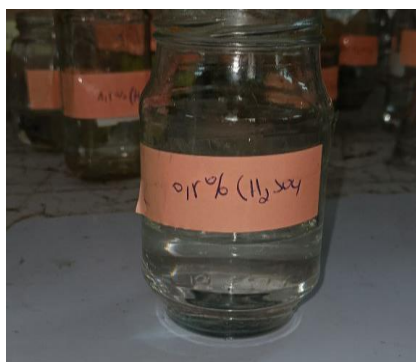
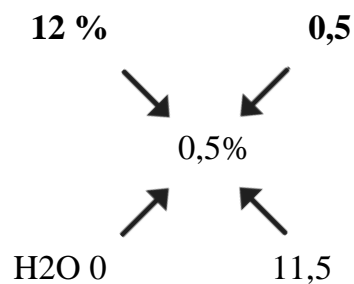


Figure III. 21 : Solution aqueuse de 0,5% H_2SO_4

• La soude NaOH :

Nous avons préparé six (6) solutions de soude de différentes concentrations :

♦ La solution de concentration 5% de NaOH :

$$\begin{array}{l}
 5 \text{ g} \longrightarrow 100 \text{ ml} \\
 m \longrightarrow 500 \\
 m = 25 \text{ g}
 \end{array}$$

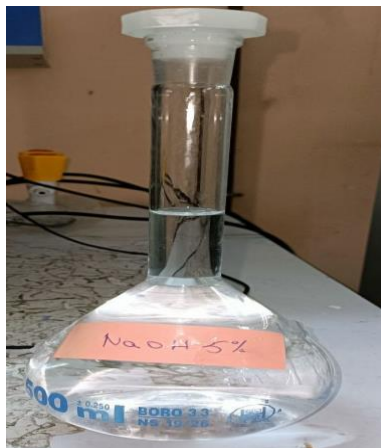
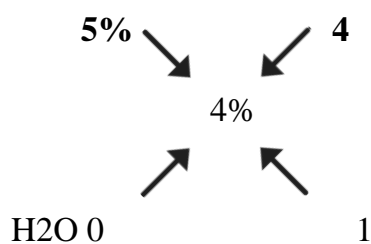


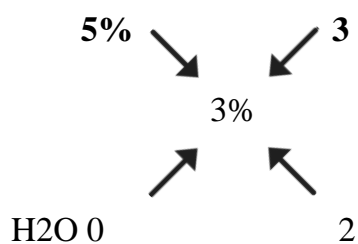
Figure III.22: Solution aqueuse de (5%) NaOH

◆ La solution de concentration 4% de NaOH :



V (solution) : 160 ml (NaOH) + 40 ml (eau distillé) = 200 ml

◆ La solution de concentration 3% de NaOH :

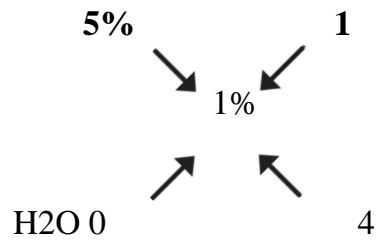


V (solution) : 120 ml (NaOH) + 80 ml (eau distillé) = 200 ml

◆ La solution de concentration 2% de NaOH :

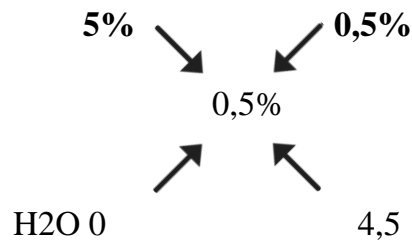
$$\begin{array}{l}
 2 \text{ g} \longrightarrow 100 \text{ ml} \\
 m \longrightarrow 200 \\
 m = 10 \text{ g}
 \end{array}$$

♦ La solution de concentration 1% de NaOH :



V (solution) : 40 ml (NaOH) + 160 ml (eau distillé) = 200 ml

♦ La solution de concentration 0,5% de NaOH :

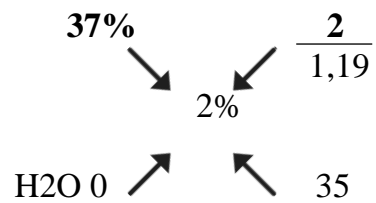


V (solution) : 20 ml (NaOH) + 180 ml (eau distillé) = 200 ml

• L'acide chlorhydrique :

Nous avons préparé cinq (5) solutions de soude de différentes concentrations :

♦ La solution de concentration 2 % de l'acide HCl :



$$\begin{array}{l}
 1.680 \text{ ml} \quad \Rightarrow \quad \text{HCL} \\
 35 \text{ ml} \quad \Rightarrow \quad \text{eau}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 1.680 \text{ ml} & \longrightarrow & 36.68 \text{ ml} \\
 500 \text{ ml} & \longrightarrow & V \\
 & & V = 23 \text{ ml}
 \end{array}$$

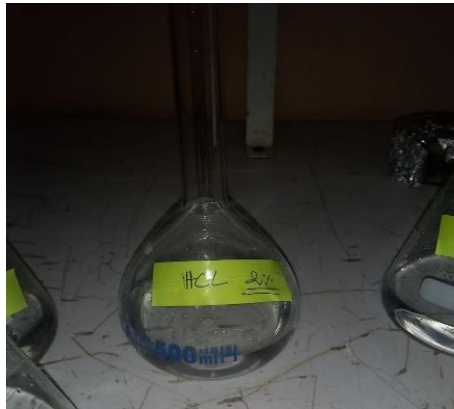
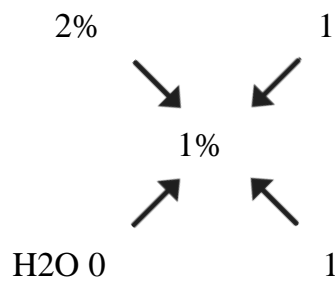


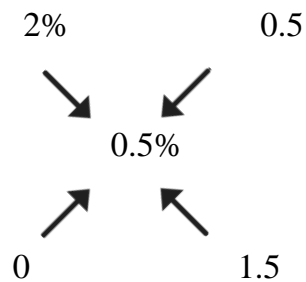
Figure III.23: solution aqueuse de 2% de l'acide chlorhydrique

◆ La solution de concentration 1% d'acide HCl :



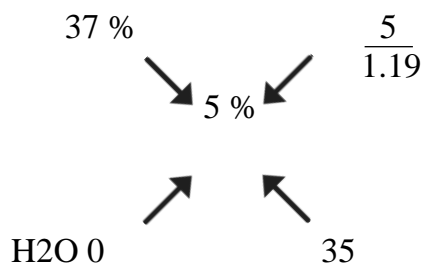
V (solution) : 100 ml (A. HCL) + 100 ml (eau distillé) = 200 ml

◆ La solution de concentration 0.5% d'acide HCl :



V (solution) : 50 ml (A. HCL) + 150 ml (eau distillé) = 200 ml

◆ La solution de concentration 5 % d'acide HCl :

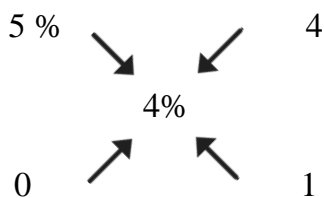


$$\begin{array}{l}
 4.201 \longrightarrow 36.201 \\
 V \longrightarrow 500 \text{ ml} \\
 V = 58.02 \text{ ml}
 \end{array}$$



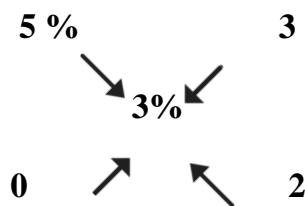
Figure III. 24 : solution aqueuse de 5% de l'acide chlorhydrique

◆ La solution de concentration 4 % d'acide HCl :



V (solution) : 160 ml (A. HCL) + 40 ml (eau distillé) = 200 ml

♦ La solution de concentration 3 % d'acide HCl :



V (solution) : 120 ml (A. HCL) + 80 ml (eau distillé) = 200 ml

III.11 Protocole de nettoyage chimique :

❖ Protocole 1 :

On prend un échantillon corrodé et on le pose dans un bicher qui contient la solution acide (H_2SO_4) avec une concentration 12 % et un volume de 60 ml pendant 30 secondes. Ensuite on prélève l'échantillon, et on le rince avec l'eau distillée, puis on le met dans l'étuve pour le laisser sécher et à la fin on pèse la masse

On répète la même procédure précédente (Immersion, rinçage, séchage dans l'étuve, pesage) et suivre la diminution de la masse jusqu'à l'achèvement du nettoyage.

L'opération de nettoyage a été effectuée à une température ambiante, et a duré 41 min pour éliminer tous les résidus et les impuretés.



Figure III.25: immersion de l'échantillon dans solution aqueuse de H_2SO_4 à 12%



Figure III.26: échantillon avant traitement à l'acide sulfurique (12%)



Figure III.27: échantillon après traitement à l'acide sulfurique (12%)



Figure III.28: la masse de l'échantillon A après 330 secondes de traitement à l'acide sulfurique (12%)



Figure III.29 : la masse de l'échantillon A après 2840 secondes de traitement à l'acide sulfurique (12%)

❖ Protocole 2 :

On prend un autre échantillon corrodé et on le place dans un bicher qui contient la solution basique NaOH (60 ml) avec différentes concentrations (0,5% ;1% ;2% ;3% ;4% ;5%) à une température ambiante pendant 30 secondes. Ensuite on prélève l'échantillon et on le rince avec l'eau distillée, puis on le pose dans l'étuve pour le laisser sécher.

L'échantillon préparé est mis dans une autre solution aqueuse d'acide chlorhydrique avec différents concentrations (0,5% ;1% ;2% ;3% ;4% ;5%), à une température ambiante, un volume de 60 ml pendant la même durée de 30 secondes. On

répète la même procédure précédente (immersion, rinçage, séchage dans l'étuve) et à la fin on pèse la masse.



Figure III.30: Échantillon immergé dans une solution de HCl à 0,5 % pendant 30 secondes



Figure III.31 : Échantillon avant traitement par Noah et HCl



Figure III.32 : Échantillon après traitement par Noah et HCl

III.12 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les diverses unités de la raffinerie de Skikda (RA1K) pour montrer l'impact du problème d'encrassement des équipements pétrochimiques, notamment les échangeurs, pouvant affecter la bonne marche de toute l'installation.

Ensuite, nous avons exposé le programme expérimental adopté lors de cette étude ainsi que le mode opératoire relatif aux méthodes et techniques utilisées, en abordant la préparation des différents échantillons, et les paramètres de l'étude, notamment, le choix des solutions de traitement chimique et leur concentration ainsi que la durée de traitement. Les résultats des essais effectués et les discussions seront présentés dans le chapitre IV.

Références bibliographiques :

[1] : cyclopaedia Britannica. Gravimetric analysis. Dans Encyclopaedia Britannica.

<https://www.britannica.com/science/gravimetric-analysis> Consulté le juin 2025,

[2] : Wagner, M., Mellouet, A. G., & Zuber, F. (2016, 10 septembre). Nettoyage en place des installations : Traitement thermique en continu de produits pompables.

Techniques de l'Ingénieur

<mailto:https://doi.org/10.51257/a-v1-f3080> consulté le 29 mai 2025

[3] : Mobil Ultra 10W-40 passenger vehicle motor oil specifications [Fiche technique].

ExxonMobil. Récupéré le 13 juin 2025, de Fiche technique Mobil Ultra 10W-40, 2024.

[4] : Tiger Coatings. Revêtements anticorrosion 101 : qu'est-ce que c'est et pourquoi c'est important?

<mailto:https://www.tigercoatings.com/ca/fr/tigergroup/blogtiger/protectioncontrelacorrosionaveclesappretsenpoudre> consulté le 13 juin 2025,

[5] : Future Sciences. Acide sulfurique : définition. Récupéré le 20 mai 2025, d

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-acide-sulfurique-15032/>

[6] : Futura-Sciences. Hydroxyde de sodium. Dans Futura-Sciences. 2025,

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-hydroxyde-sodium-15036/> consulté le 13 juin

CHAPITRE IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais réalisés, concernant le nettoyage de l'encrassement des tubes des échangeurs, en mettant l'accent sur l'utilisation de produits chimiques, notamment les acides H_2SO_4 et HCL ainsi que la soude NaOH à différentes concentrations. Il inclut également une évaluation de la résistance des peintures dans des environnements acides et alcalins, permettant une analyse précise des phénomènes observés.

IV.2 Effet du décapage chimique sur l'encrassement

IV.2.1 Masses et pertes de masse -- interprétations

A. Traitements avec l'acide sulfurique H_2SO_4 :

Tableau IV. 1: Variation de la masse de l'échantillon sous l'effet de H_2SO_4 à 12 %

Le temps (s)	La masse	Le temps (s)	La masse
0 S	15,36091	1460 S	15,22177
30 S	15,35721	1490 S	15,22169
90 S	15,35538	1520 S	15,22151
120 S	15,35335	1550 S	15,22169
150 S	15,35081	1580 S	15,22108
180 S	15,34715	1610 S	15,21902
210 S	15,34432	1640 S	15,21869
270 S	15,33623	1670 S	15,21856
300 S	15,32481	1700 S	15,21839
330 S	15,31784	1730 S	15,21776
360 S	15,31061	1760 S	15,217
390 S	15,29946	1790 S	15,21641
420 S	15,29028	1820 S	15,21494
450 S	15,28057	1850 S	15,2143
480 S	15,27539	1880 S	15,21393
510 S	15,2714	1910 S	15,21341
540 S	15,26847	1940 S	15,21279

570 S	15,26505	1970 S	15,21167
600 S	15,26268	2000 S	15,21085
630 S	15,26081	2030 S	15,21028
660 S	15,25895	2060 S	15,20966
690 S	15,24978	2090 S	15,20953
720 S	15,24315	2120 S	15,20932
750 S	15,24209	2150 S	15,20852
780 S	15,24092	2180 S	15,20778
810 S	15,23952	2210 S	15,2068
840 S	15,23884	2240 S	15,20627
870 s	15,23864	2270 S	15,20581
900 s	15,23826	2300 S	15,20496
930 S	15,23826	2330 S	15,20436
960 S	15,2356	2360 S	15,20348
990 S	15,23507	2390 S	15,20257
1020 S	15,23397	2420 S	15,20234
1050 S	15,23368	2450 S	15,20123
1051 S	15,23335	2480 S	15,20052
1110 S	15,23288	2510 S	15,20022
1140 S	15,23175	2540 S	15,19996
1170 S	15,23114	2570 S	15,19955
1200 S	15,22906	2600 S	15,19934
1230 S	15,22837	2630 S	15,199
1260 S	15,22822	2660 S	15,19875
1290 S	15,22726	2690 S	15,19801
1320 S	15,22703	2720 S	15,19784
1350 S	15,22653	2750 S	15,1975
1380 S	15,22571	2780 S	15,19648
1410 S	15,22409	2810 S	15,19634
1430 S	15,22249	2840 S	15,19555

Tableau IV.2: Variation de la perte de masse de l'échantillon sous l'effet de H₂SO₄ à 12 %

Le temps (s)	Perte de masse (g)	Le temps (s)	Perte de masse(g)
----------------	--------------------	--------------	-------------------

0 S	0	1460 S	0,13914
30 S	0,0037	1490 S	0,13922
90 S	0,00553	1520 S	0,1394
120 S	0,00756	1550 S	0,13922
150 S	0,0101	1580 S	0,13983
180 S	0,01376	1610 S	0,14189
210 S	0,01659	1640 S	0,14222
270 S	0,02468	1670 S	0,14235
300 S	0,0361	1700 S	0,14252
330 S	0,04307	1730 S	0,14315
360 S	0,0503	1760 S	0,14391
390 S	0,06145	1790 S	0,1445
420 S	0,07063	1820 S	0,14597
450 S	0,08034	1850 S	0,14661
480 S	0,08552	1880 S	0,14698
510 S	0,08951	1910 S	0,1475
540 S	0,09244	1940 S	0,14812
570 S	0,09586	1970 S	0,14924
600 S	0,09823	2000 S	0,15006
630 S	0,1001	2030 S	0,15063
660 S	0,10196	2060 S	0,15125
690 S	0,11113	2090 S	0,15138
720 S	0,11776	2120 S	0,15159
750 S	0,11882	2150 S	0,15239
780 S	0,11999	2180 S	0,15313
810 S	0,12139	2210 S	0,15411
840 S	0,12207	2240 S	0,15464
870 s	0,12227	2270 S	0,1551
900 s	0,12265	2300 S	0,15595
930 S	0,12265	2330 S	0,15655
960 S	0,12531	2360 S	0,15743
990 S	0,12584	2390 S	0,15834
1020 S	0,12694	2420 S	0,15857
1050 S	0,12723	2450 S	0,15968
1051 S	0,12756	2480 S	0,16039
1110 S	0,12803	2510 S	0,16069
1140 S	0,12916	2540 S	0,16095
1170 S	0,12977	2570 S	0,16136
1200 S	0,13185	2600 S	0,16157

1230 S	0,13254	2630 S	0,16191
1260 S	0,13269	2660 S	0,16216
1290 S	0,13365	2690 S	0,1629
1320 S	0,13388	2720 S	0,16307
1350 S	0,13438	2750 S	0,16341
1380 S	0,1352	2780 S	0,16443
1410 S	0,13682	2810 S	0,16457
1430 S	0,13842	2840 S	0,16536

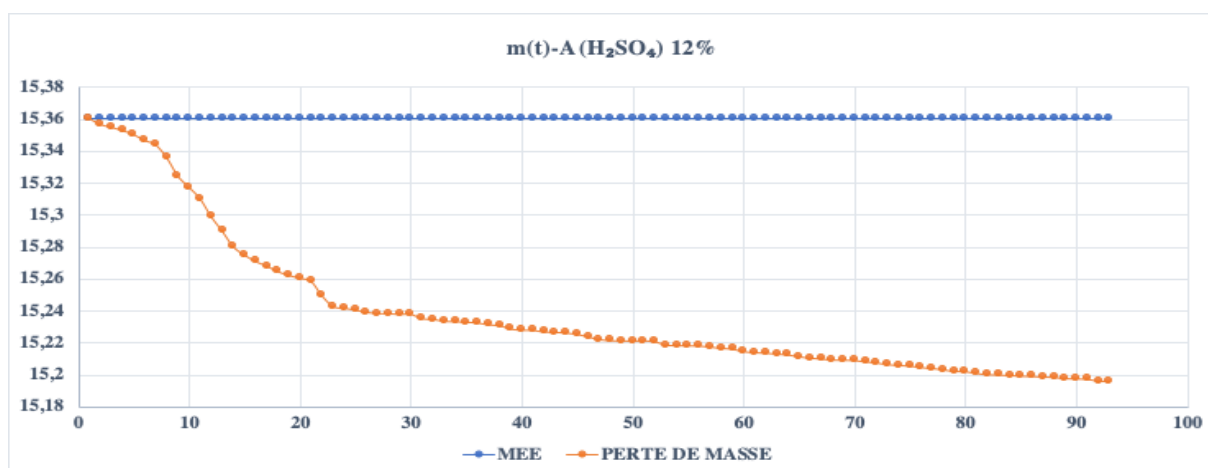


Figure IV.1 : Dégradation de la masse de l'échantillon A en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 à 12 %

Le graphique IV.1 illustre l'évolution de la masse de l'échantillon A tout au long du processus de nettoyage. La masse exprimée en grammes, est représentée sur l'axe vertical, tandis que le temps, en secondes, figure sur l'axe horizontal.

L'analyse des résultats gravimétriques montre une diminution modérée et rapide de la masse du dépôt à température ambiante, indiquant que l'échantillon A subi une attaque acide entraînant la dissolution dudit dépôt.

Durant la phase initiale (0–600 s), une dégradation rapide de la masse est observée, révélant une attaque directe et intense des ions H^+ sur le métal non protégé.

Entre 600 et 1500 s, la dégradation de la masse continue mais à un rythme plus lent. Cela étant attribué la formation progressive d'une couche de passivation principalement composée de Fe_2O_3 , agissant comme une barrière physique entre le métal et l'acide ou peut être la dernière couche de dépôt de tarte plus adhérente.

Après 1500 s : La dégradation de la masse se stabilise progressivement, traduisant une corrosion très lente.

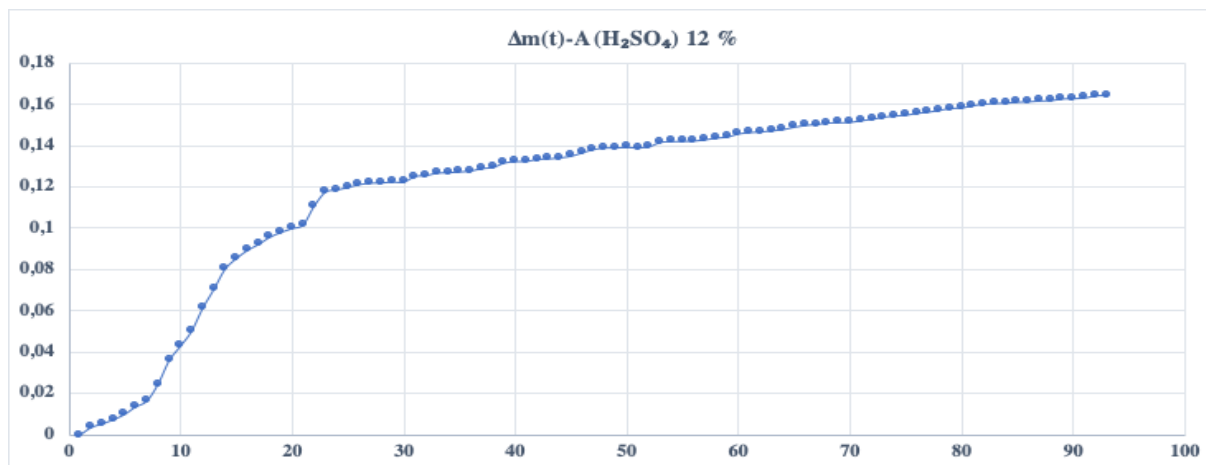


Figure IV.2 : Variation de la perte de masse de l'échantillon A en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 à 12 %

Le graphique IV.2, présente la variation de la perte de masse de l'échantillon A en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 à 12 %, affichant une perte de masse initiale rapide, suivie d'une stabilisation progressive jusqu'à une quasi-constance.

1. Phase initiale (0–600 s) :

On observe une augmentation très rapide, probablement liée à l'attaque de la rouille (oxyde de fer) en surface. L'acide sulfurique réagit rapidement avec la couche oxydée, entraînant une dissolution accélérée.

2. Phase intermédiaire (600–1500 s) :

La courbe traduit un ralentissement, signalant que soit une couche de passivation c'est formé progressivement, soit que la dernière couche de tarte était très dure et difficile à éliminer.

3. Phase finale (> 1500 s) :

La dégradation de la perte de masse se stabilise progressivement

Ces observations confirment l'efficacité d'une solution d' H_2SO_4 à 12 % pour le décapage de la rouille sur l'échantillon A.

B. Traitements avec l'acide chlorhydrique et NaOH :

❖ Expérience 1 : $m = 17.6970\text{g}$

Tableau IV.3: Variation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl

HCl / NOH	0,50%	1%	2%
0,50%	17,6960	17,6890	17,6800
1%	17,6930	17,6850	17,6780
2%	17,6900	17,6830	17,6760

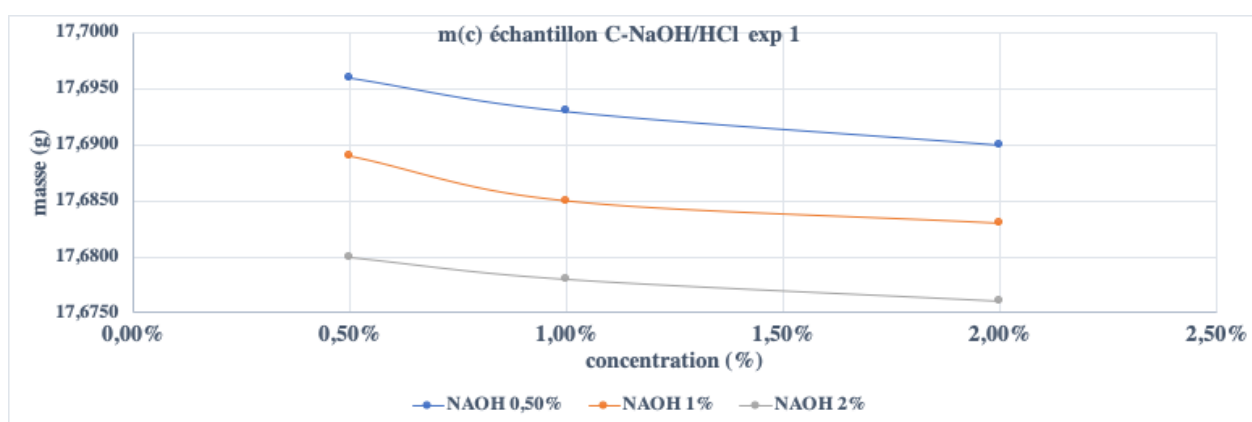


Figure IV.3: Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl

❖ Expérience 2 : $m = 17.6760\text{g}$

Tableau IV.4: variation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl

HCl / NaOH	3%	4%	5%
0,50%	17,6755	17,6624	17,6507
1%	17,6736	17,6611	17,6497
2%	17,6718	17,6591	17,6482
3%	17,6700	17,6574	17,6462
4%	17,6676	17,6552	17,6442
5%	17,6647	17,6523	17,6393

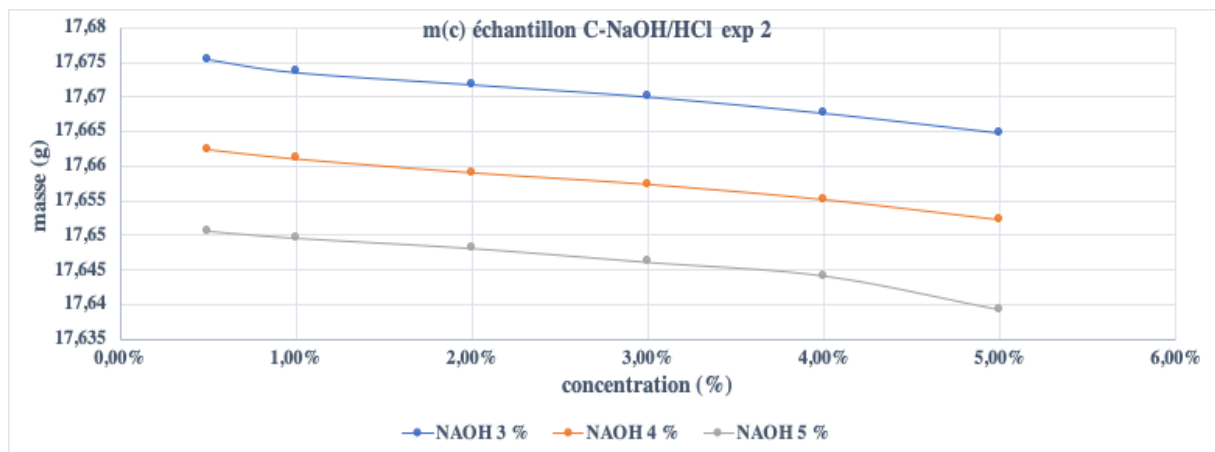


Figure IV.4: Dégradation de la masse de l'échantillon dans HCL et NaOH exp 2

❖ Expérience 3 : m= 17.6393g

Tableau IV.5: variation de la masse de l'échantillon C dans HCL et NaOH

HCl / NaOH	3%	4%	5%
0,50%	17,6313	17,6183	17,6021
1%	17,6278	17,6152	17,5998
2%	17,6232	17,6120	17,5958
3%	17,6208	17,6077	17,5928
4%	17,6204	17,6047	17,59
5%	17,6200	17,6034	17,5888

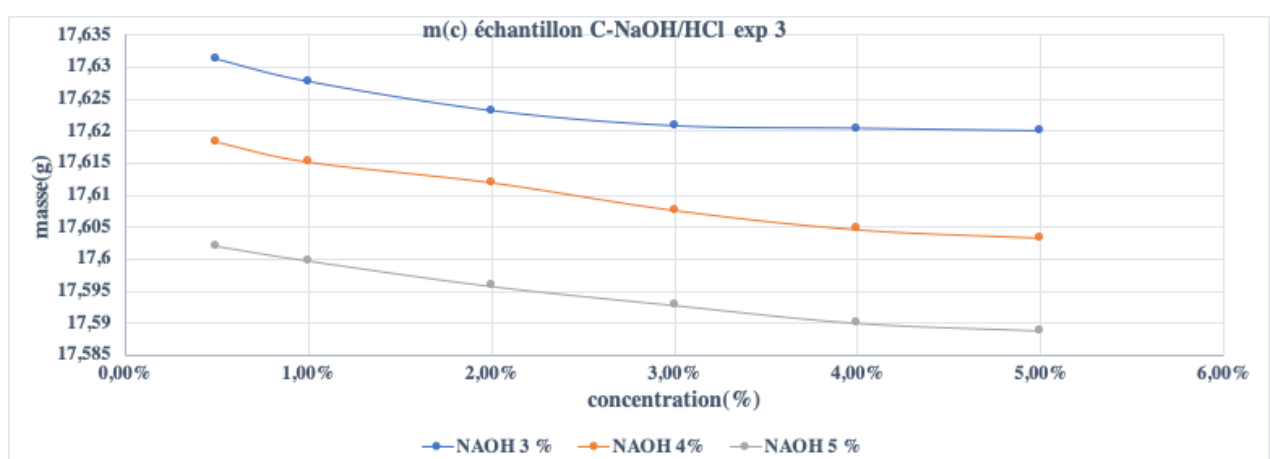
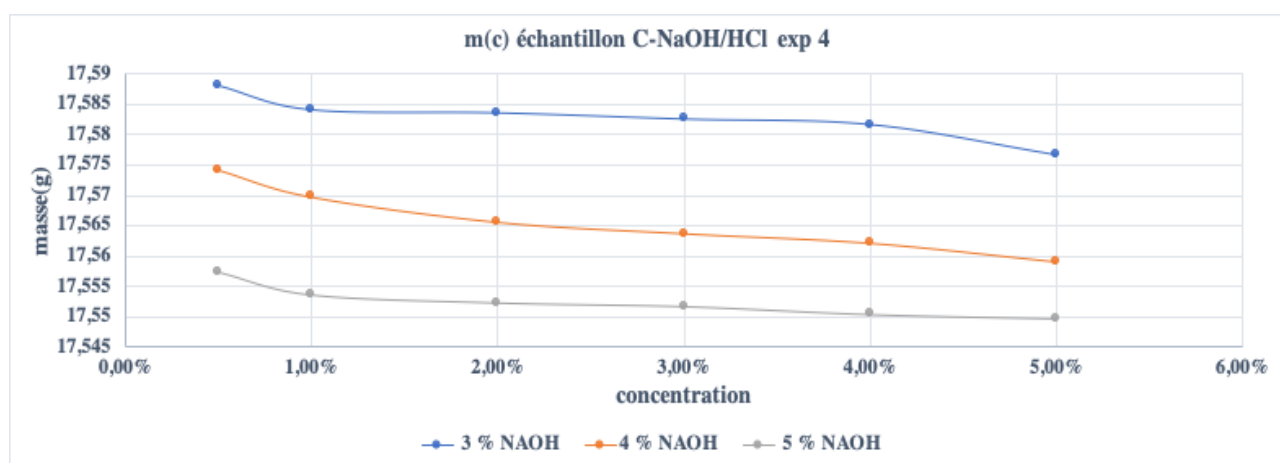


Figure IV.5: Dégradation de la masse de l'échantillon dans HCl et NaOH

❖ Expérience 4 : m= 17.5888g

Tableau IV.6: variation de la masse de l'échantillon C dans HCl et NaOH

HCl / NaOH	3%	4%	5%
0,50%	17,588	17,5743	17,5573
1%	17,5841	17,5698	17,5536
2%	17,5836	17,5656	17,5523
3%	17,5826	17,5637	17,5517
4%	17,5817	17,5621	17,5504
5%	17,5768	17,559	17,5497

**Figure IV.6:** Dégradation de la masse de l'échantillon C dans HCl et NaOH❖ **Expérience 5 : m= 17.5497g****Tableau IV.7:** variation de la masse de l'échantillon C sous l'effet de NaOH et HCl

HCl / NaOH	3%	4%	5%
0,50%	17,5493	17,5239	17,5047
1%	17,5468	17,5174	17,5032
2%	17,5462	17,5149	17,5014
3%	17,5412	17,5132	17,4985
4%	17,5346	17,5081	17,4971
5%	17,5252	17,5064	17,4967

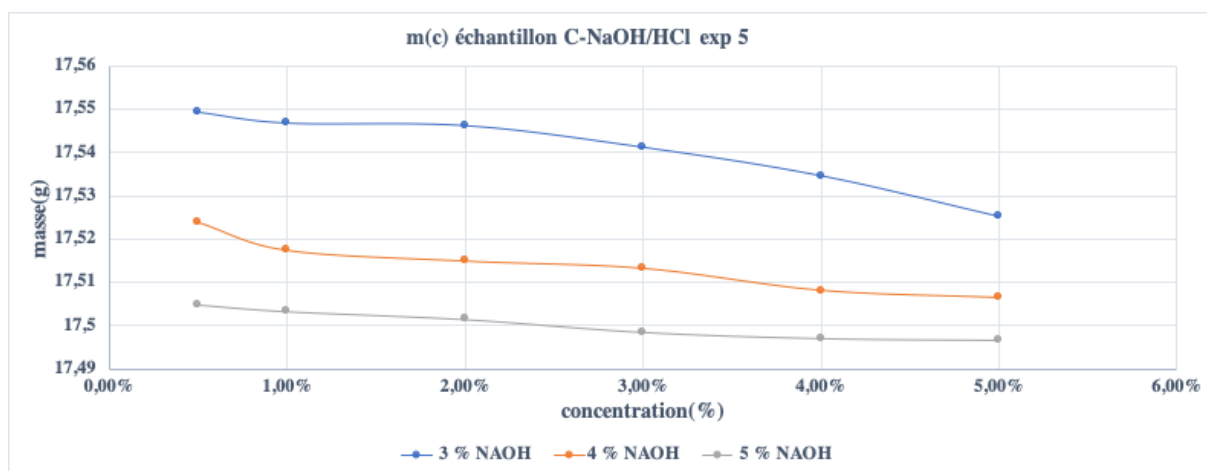


Figure IV.7: Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl

❖ Expérience 6 : m=17.4967g

Tableau IV.8 : Variation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl

HCl / NaOH	3%	4%	5%
0,50%	17,4958	17,484	17,4737
1%	17,4950	17,4828	17,473
2%	17,4925	17,4789	17,4722
3%	17,4916	17,4786	17,4711
4%	17,4914	17,4775	17,4703
5%	17,4884	17,475	17,4696

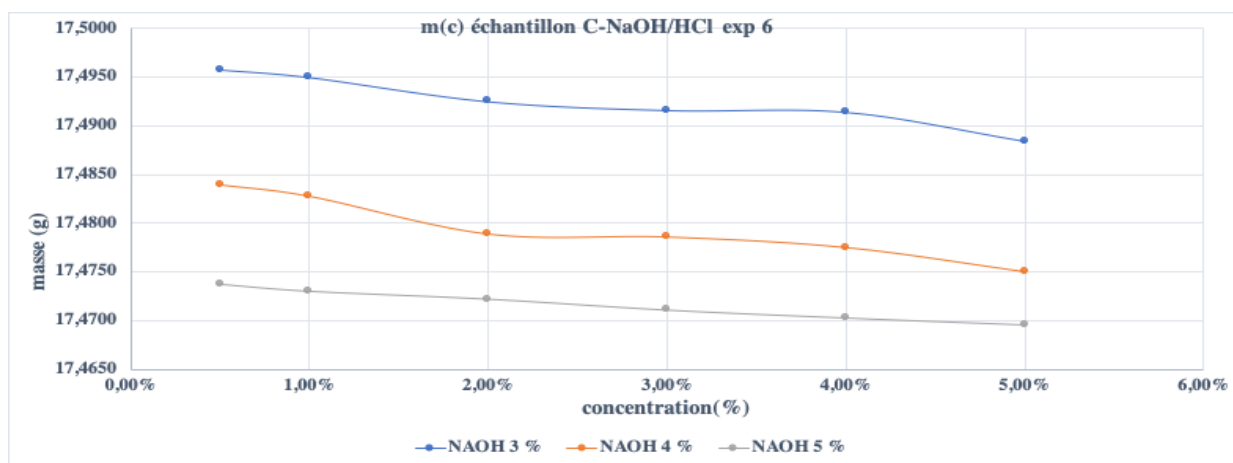


Figure IV.8 : Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl

❖ Expérience 7 : $m=17,4696\text{g}$

Tableau IV.9: variation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl exp 7

HCl / NaOH	3%	4%	5%
0,50%	17,4692	17,4636	17,458
1%	17,469	17,4635	17,4575
2%	17,4679	17,4634	17,4565
3%	17,467	17,4622	17,4556
4%	17,4662	17,4617	17,4541
5%	17,4641	17,4603	17,4512

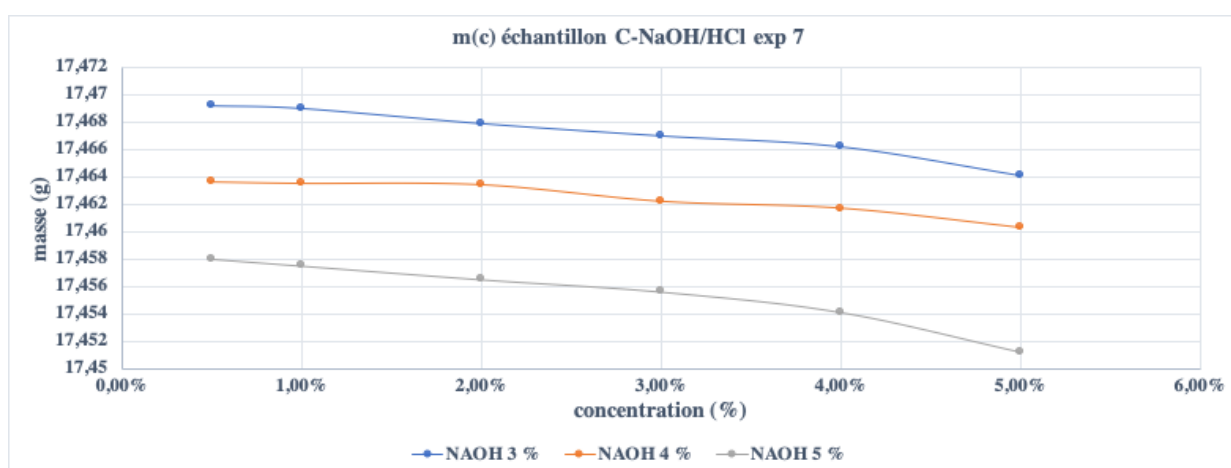


Figure IV.9: Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl

❖ Expérience 8 : $m=17,4512\text{g}$

Tableau IV.10: Variation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl exp 8

HCl / NaOH	3%	4%	5%
0,50%	17,4507	17,4425	17,4304
1%	17,4485	17,4377	17,4283
2%	17,4472	17,4363	17,4281
3%	17,4467	17,4355	17,4263
4%	17,4457	17,4350	17,4247
5%	17,4435	17,4327	17,4186

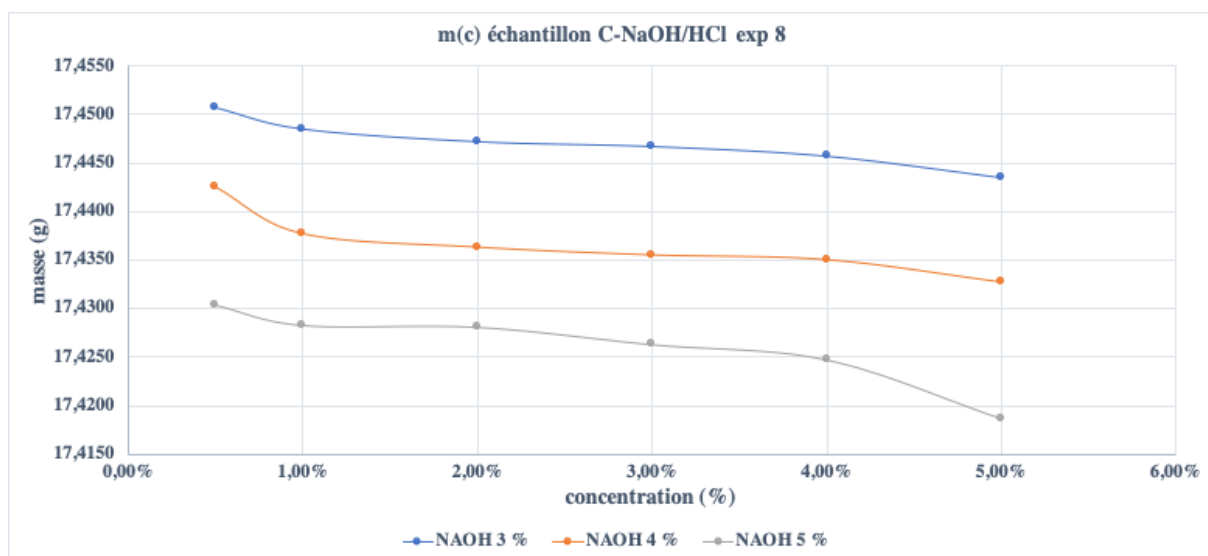


Figure IV.10: Dégradation de la masse de l'échantillon C dans NaOH et HCl

Les huit courbes obtenues lors des différents essais présentent toutes un comportement similaire : une diminution progressive de la masse des échantillons en fonction de la concentration de la solution. Cela indique une dissolution des couches superficielles sous l'effet des solutions chimiques utilisées. Nous allons donc analyser une courbe représentative (figure IV.5), car les autres suivent la même tendance.

Analyse graphique de la figure IV.5 : variation de la masse en fonction de la concentration de HCl pour l'échantillon traité avec NaOH.

- ❖ **Pour NaOH 3%** : La perte de masse diminue légèrement après chaque cycle de concentration croissante en HCl, indiquant une dissolution modérée de l'échantillon.
- ❖ **Pour NaOH 4%** : La perte de masse est plus marquée, montrant que la neutralisation initiale avec NaOH 4 % amplifie l'interaction avec l'HCl. Cela indique que le traitement avec NaOH à 4 % rend l'échantillon plus réactif vis-à-vis de l'acide.
- ❖ **Pour NaOH 5%** : La perte de masse devient significative, suggérant une attaque chimique maximale sur l'échantillon après traitement au NaOH 5 %.
- ❖ **Pour des concentrations faibles d'HCl (0,5 % - 2 %)** : La perte de masse reste relativement faible pour toutes les concentrations de NaOH, indiquant une faible interaction chimique.
- ❖ **Pour des concentrations modérées d'HCl (2,5 % - 4 %)** : Une augmentation notable de la perte de masse est visible, en particulier pour les échantillons traités avec NaOH à 4 % et 5 %.

- ❖ Pour des concentrations élevées d'HCl (4,5 % - 5 %) : La perte de masse devient maximale, traduisant une dissolution chimique agressive.

C. Encrasse des tubes de l'échangeur à plaques :

Tableau IV.11: Variation de la masse et perte de masse de l'échantillon A dans (H₂SO₄)

Concentration (%)	La masse (g)	Perte de masse (g)	La masse initiale (g)
0,00%	15,20948	0	15,20948
0,50%	15,20062	0,00886	15,20948
1%	15,1977	0,00292	15,20948
1,50%	15,19628	0,00434	15,20948
2%	15,1944	0,00622	15,20948

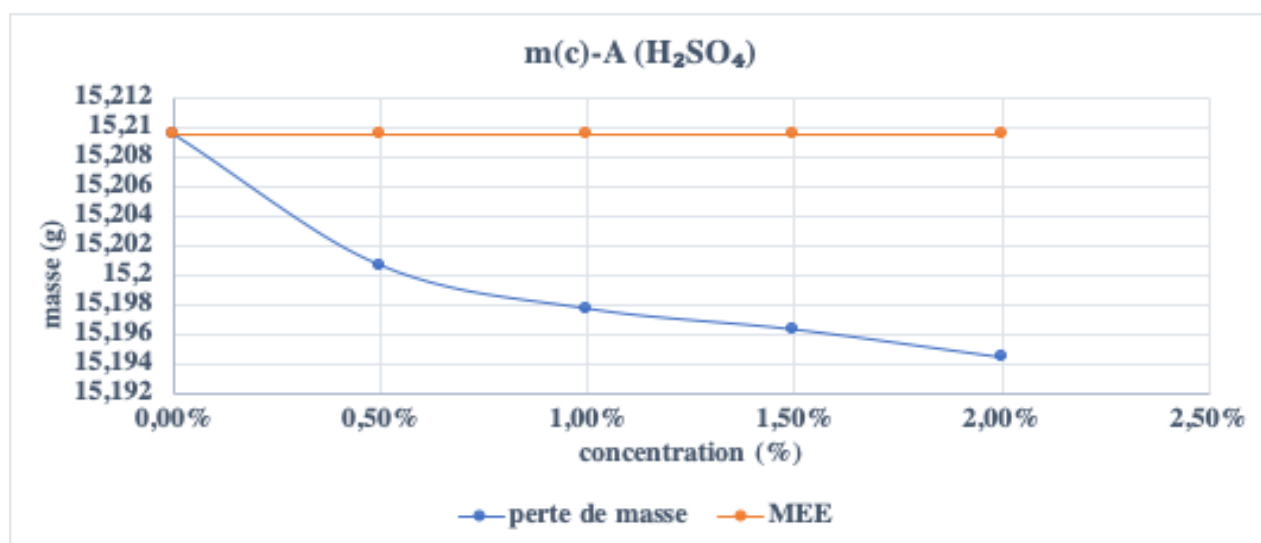


Figure IV.11: Dégradation de l'échantillon A en fonction des concentration H₂SO₄ (%)

La figure IV.11 illustre l'évolution de la masse de l'échantillon A en fonction de la concentration en H₂SO₄ (%).

- ❖ À 0,5 % : on observe un choc d'attaque dès la première concentration (0,5 %), entraînant une perte de masse significative, qui passe de 15,20948 g à 15,20062 g.

❖ Ensuite, à chaque augmentation de concentration (1 %, 1,5 %, 2 %), la masse continue de diminuer progressivement comme l'indique les valeurs ci-dessous :

- 15,19770 g à 1 %
- 15,19628 g à 1,5 %
- 15,19440 g à 2 %

Cela montre clairement que plus la concentration en acide augmente, plus l'attaque devient intense, et plus la perte de matière s'accroît

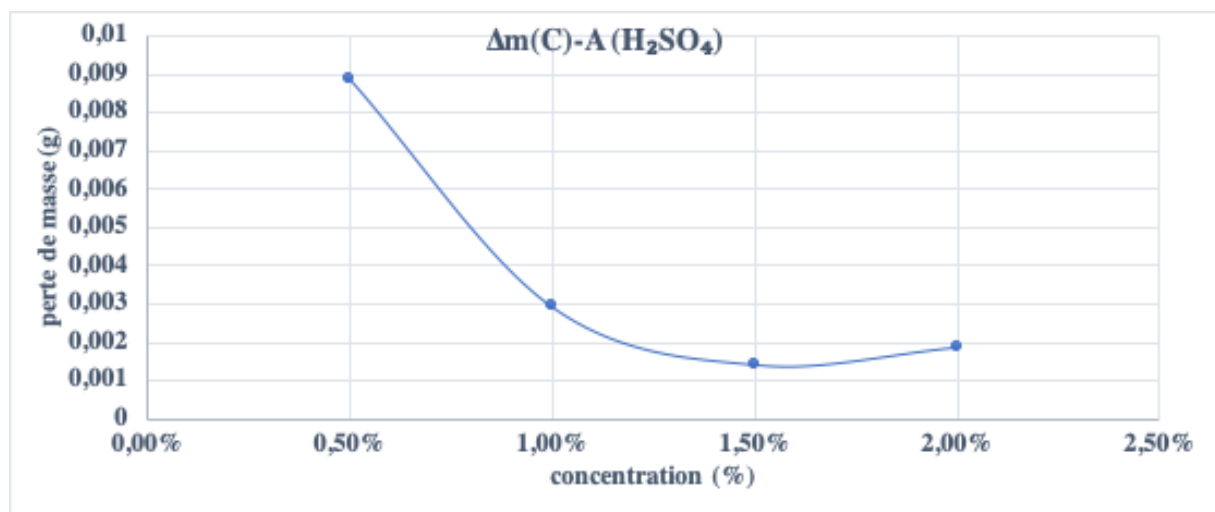


Figure IV.12: Perte de masse de l'échantillon A en fonction de la concentration (H₂SO₄) (%)

La courbe IV.12 montre l'évolution de la perte de masse de l'échantillon A après son immersion dans une huile moteur 10W40, suivie d'une exposition à des concentrations croissantes d'acide H₂SO₄ allant de 0,5% à 2%.

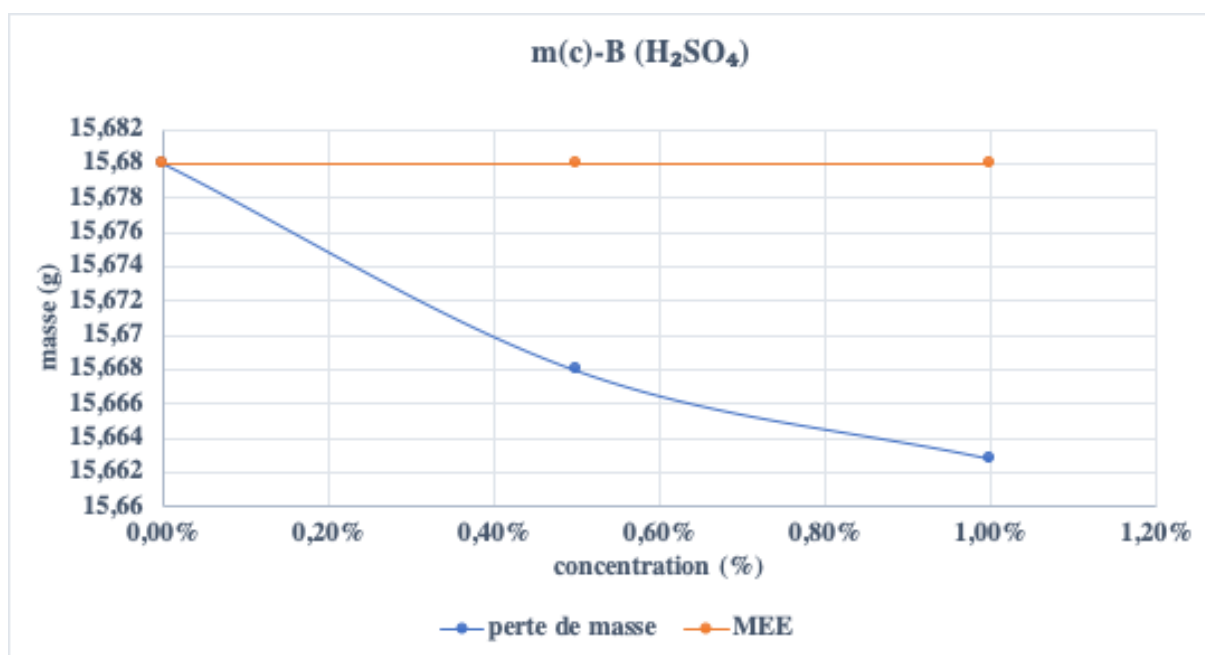
Un choc d'attaque important est observé à 0,5 %, avec une perte de masse importante de la couche d'huile, ce qui indique une attaque rapide et intense de l'échantillon par l'acide sulfurique.

Ensuite, de 1 % à 2 %, la perte de masse augmente progressivement à chaque élévation de concentration.

Cela signifie que l'intensité de l'attaque croît avec la concentration, entraînant une dissolution progressive de la masse de la couche d'huile.

Tableau IV.12: Variation de la masse et de la perte de masse de l'échantillon B dans H₂SO₄

Concentration (%)	La masse (g)	Perte de masse (g)	La masse initiale (g)
0,00%	15,68005	0	15,68005
0,50%	15,66795	0,0121	15,68005
1%	15,6628	0,0051	15,68005

**Figure IV.13:** Dégradation de l'échantillon B en fonction des concentration H₂SO₄ (%)

La courbe IV.13 illustre l'évolution de la masse de l'échantillon B en fonction de la concentration en H₂SO₄.

Un choc initial est observé dès 0,5 %, ce qui a entraîné une baisse significative de la masse, due au détachement rapide de la couche d'huile présente à la surface.

Cette couche ayant été arrachée dès le départ, la masse diminue ensuite de manière plus modérée à 1 %, car il reste peu de matière à enlever, facilitant ainsi l'attaque acide.

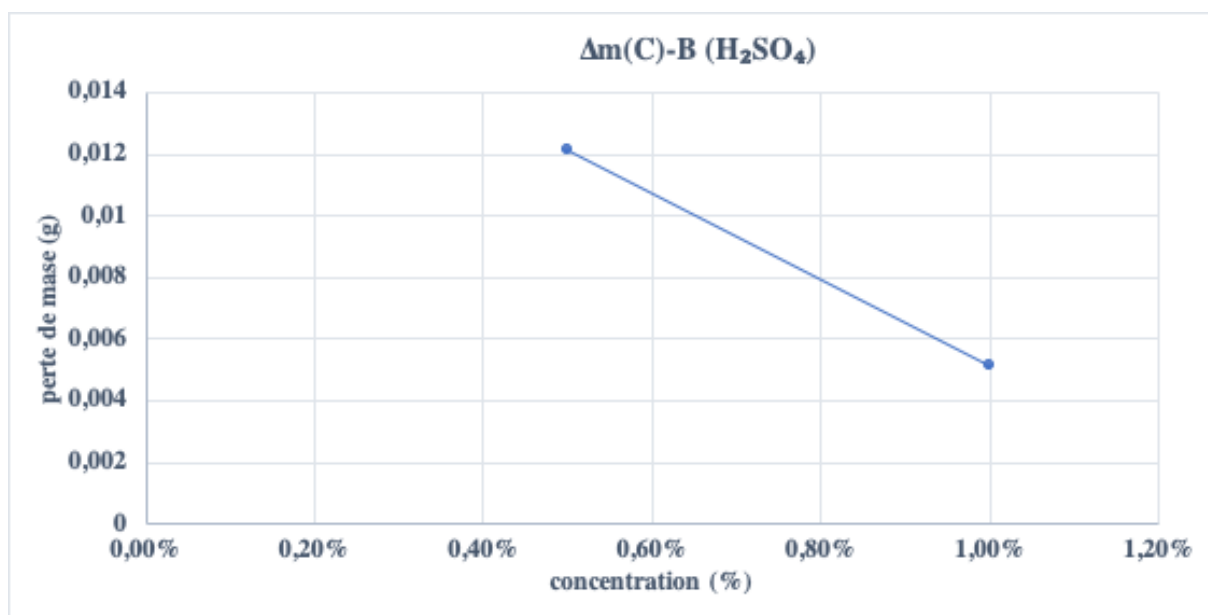


Figure IV.14: Perte de masse de l'échantillon B en fonction du concentrations (H_2SO_4) (%)

La courbe IV.14 illustre perte de la masse de l'échantillon B en fonction de la concentration de H_2SO_4 .

- ❖ Dès la première concentration de 0,5 %, un choc d'attaque est observé, accompagné d'une perte de masse importante (0,0121 g). Ce phénomène s'explique par le détachement brutal de la couche d'huile présente à la surface de l'échantillon.
- ❖ À 1 %, la perte de masse diminue (0,0051 g), ce qui indique que la majeure partie de la couche avait déjà été enlevée lors de la première attaque, laissant peu de matière vulnérable à l'action de l'acide.

Cela pourrait être lié à l'état initial de la surface, où des traces visibles de rouille ont été observées avant les essais. Cette rouille a probablement empêché la formation uniforme du film d'huile.

D. Peinture de protection

1. Traitement avec l'acide sulfurique (5% H_2SO_4)

Tableau IV.13: variation de la masse et perte de masse de l'échantillon A dans (H_2SO_4) à 5%

Le temps	La masse (g)	Perte de masse
30 S	15,56771	0,00004
60 S	15,5677	0,00005
90 S	15,56751	0,00024
120 S	15,56734	0,00041
150 S	15,56708	0,00067
180 S	15,56698	0,00077
210 S	15,565	0,00275
240 S	15,56468	0,00307
270 S	15,56408	0,00367
300 S	15,56341	0,00434
330 S	15,56285	0,0049
360 S	15,56274	0,00501
390 S	15,56218	0,00557
420 S	15,56195	0,0058
450 S	15,56184	0,00591
480 S	15,56173	0,00602
510 S	15,56135	0,0064
540 S	15,56112	0,00663
570 S	15,5572	0,01055
750 S	15,5568	0,01095
930 S	15,5567	0,01105
1110 S	15,5565	0,01125
4710 S	15,5558	0,01195
8310 S	15,5552	0,01255
11910 S	15,5542	0,01355
15510 S	15,5541	0,01365
19110 S	15,5531	0,01465
26310 S	15,5523	0,01545
37 110 S	15,552	0,01575

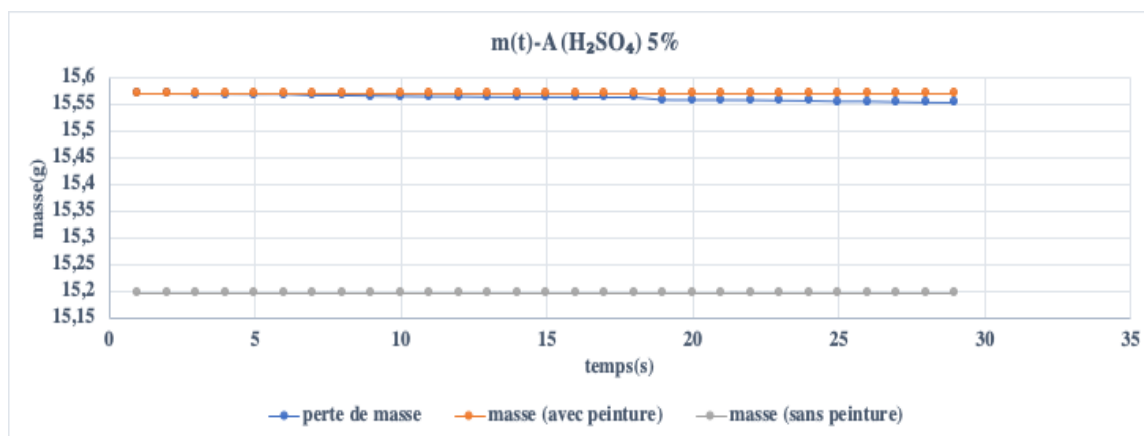


Figure IV .15 : Variation de la masse du revêtement dans (H_2SO_4) à 5% en fonction du temps - (A)

La figure IV.15 présente l'évolution de la masse de la peinture dans une solution de H_2SO_4 à 5% en fonction du temps d'immersion. La courbe indique que la dégradation de la masse de la peinture reste négligeable au cours du temps, traduisant ainsi une stabilité significative et l'absence d'attaque notable. Ce comportement s'explique par la présence du revêtement protecteur appliqué après décapage, qui empêche toute agression acide sur la surface métallique.

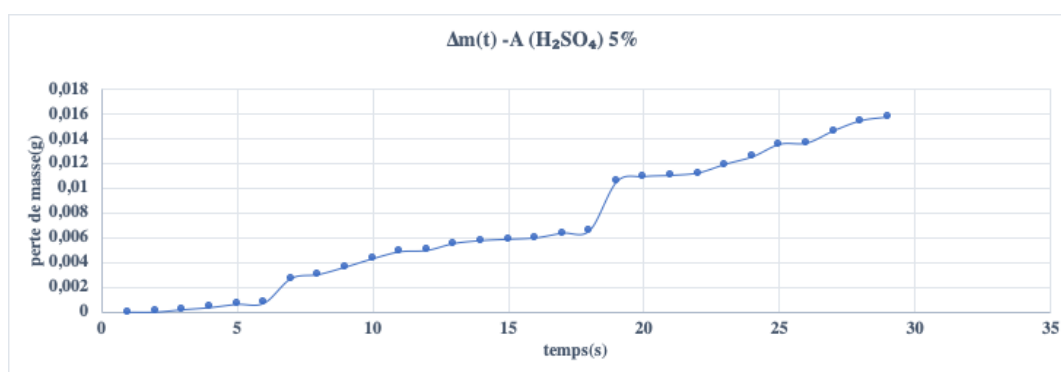


Figure IV.16: Perte de masse du revêtement dans (H_2SO_4) à 5% en fonction du temps (A)

La figure IV.16 illustre l'évaluation de la résistance du revêtement sur l'échantillon A dans un milieu acide (H_2SO_4 à 5%) en fonction du temps d'immersion. Une légère augmentation progressive de la perte de masse de la peinture de protection, laquelle reste toutefois faible, démontrant que le revêtement peinture offre une bonne résistance face à l'attaque de le H_2SO_4 à 5 %.

Par conséquent, on peut conclure que le revêtement appliqué assure efficacement son rôle protecteur.

Tableau IV.14: Variation de la masse et perte de masse de l'échantillon B

Le temps (30 s)	La masse (g)	Perte de masse
30 S	16,01565	0,00028
60 S	16,01565	0,00028
90 S	16,01545	0,00048
120 S	16,0153	0,00063
150 S	16,01527	0,00066
180 S	16,01508	0,00085
210 S	16,014	0,00193
240 S	16,01227	0,00366
270 S	16,0124	0,00353
300 S	16,01194	0,00399
330 S	16,01133	0,0046
360 S	16,01063	0,0053
390 S	16,01051	0,00542
420 S	16,01022	0,00571
450 S	16,0098	0,00613
480 S	16,00945	0,00648
510 S	16,00903	0,0069
540 S	16,00866	0,00727
570 S	16,00818	0,00775
750 S	16,0049	0,01103
930 S	16,0046	0,01133
1110 S	16,0044	0,01153
4710 S	16,0043	0,01163
8310 S	16,0035	0,01243

11910 S	16,0029	0,01303
15510 S	16,0019	0,01403
19110 S	16,0009	0,01503
26310 S	16,0005	0,01543
37 110 S	15,9999	0,01603

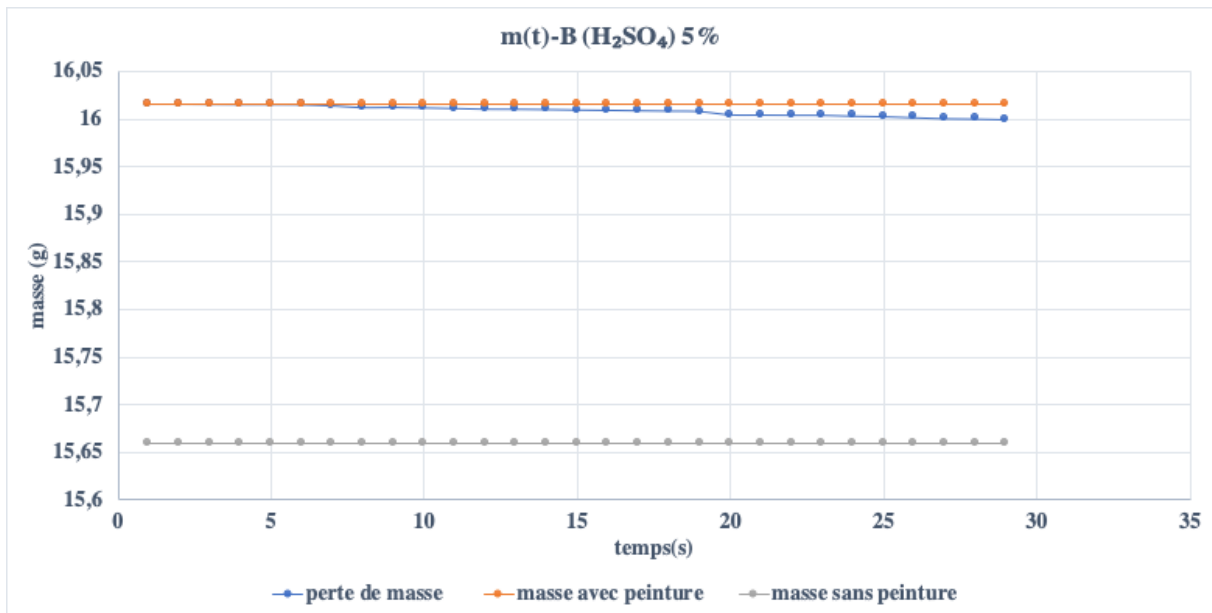


Figure IV.17 : Variation de la masse du revêtement dans (H₂SO₄) à 5% fonction du temps (B)

La figure IV.17 illustre l'évolution la masse de la peinture dans (H₂SO₄) à 5% en fonction du temps :

La masse diminue très lentement avec le temps, ce qui montre que la peinture se dégrade très faiblement. Cela signifie que la peinture est de bonne qualité et protège bien contre l'acide

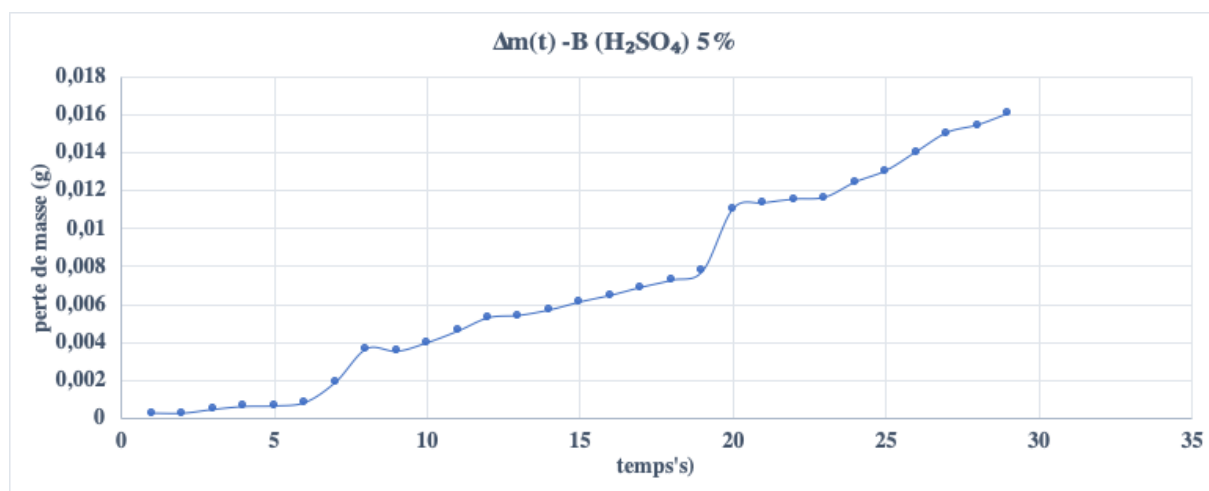


Figure IV.18: Perte de masse du revêtement dans (H₂SO₄) à 5% en fonction du temps - (B)

La figure IV.18 présente l'évaluation de la résistance du revêtement sur l'échantillon B dans un milieu acide à 5 % de H₂SO₄ en fonction du temps. La perte de masse augmente lentement avec le temps, ce qui indique de l'efficacité et de la bonne résistance du revêtement à la dégradation.

2. Traitement avec l'acide chlorhydrique (5% HCL) :

Tableau IV.15: Variation de la masse et perte de masse de l'échantillon dans (HCL) à 5%

Le temps (s)	La masse (g)	Perte de masse
30 S	17,63798	0,00003
60 S	17,63796	0,00005
90 S	17,63792	0,00009
120 S	17,63785	0,00016
150 S	17,63782	0,00019
180 S	17,63781	0,0002
210 S	17,63704	0,00097
240 S	17,63689	0,00112
270 S	17,63662	0,00139
300 S	17,6364	0,00161
330 S	17,63634	0,00167
360 S	17,63602	0,00199

390 S	17,63581	0,0022
420 S	17,63571	0,0023
450 S	17,63551	0,0025
480 S	17,63545	0,00256
510 S	17,63531	0,0027
540 S	17,63476	0,00325
570 S	17,63453	0,00348
600 S	17,63411	0,0039
630 S	17,63386	0,00415
660 S	17,6337	0,00431
690 S	17,6334	0,00461
720 S	17,6333	0,00471
750 S	17,6326	0,00541
960 S	17,6325	0,00551
1110 S	17,6319	0,00611
1290 S	17,631	0,00701
1470 S	17,6306	0,00741
1650 S	17,6303	0,00771
5250 S	17,6299	0,00811
8850 S	17,6286	0,00941
12450 S	17,6275	0,01051
16050 S	17,627	0,01101
19650 S	17,6243	0,01371
26 850 S	17,6232	0,01481
37650 S	17,618	0,02001

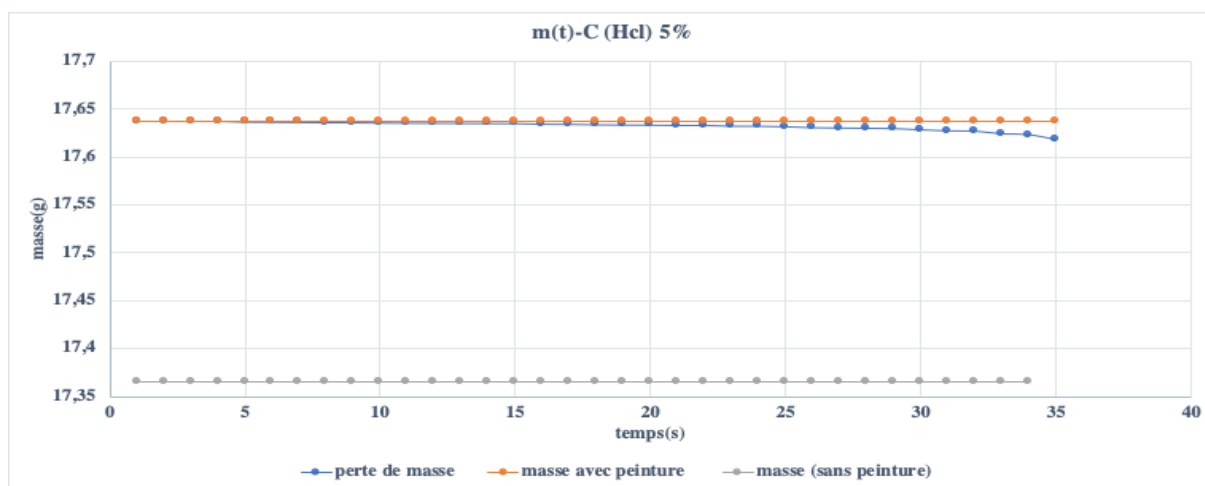


Figure IV.19: Variation de masse du revêtement dans (HCl) à 5% en fonction du temps (c)

La Figure IV.19 illustre la variation de masse du revêtement dans une solution à 5 % de HCl selon le temps d'exposition (échantillon C). La diminution progressive de la masse indique une faible dégradation du revêtement.

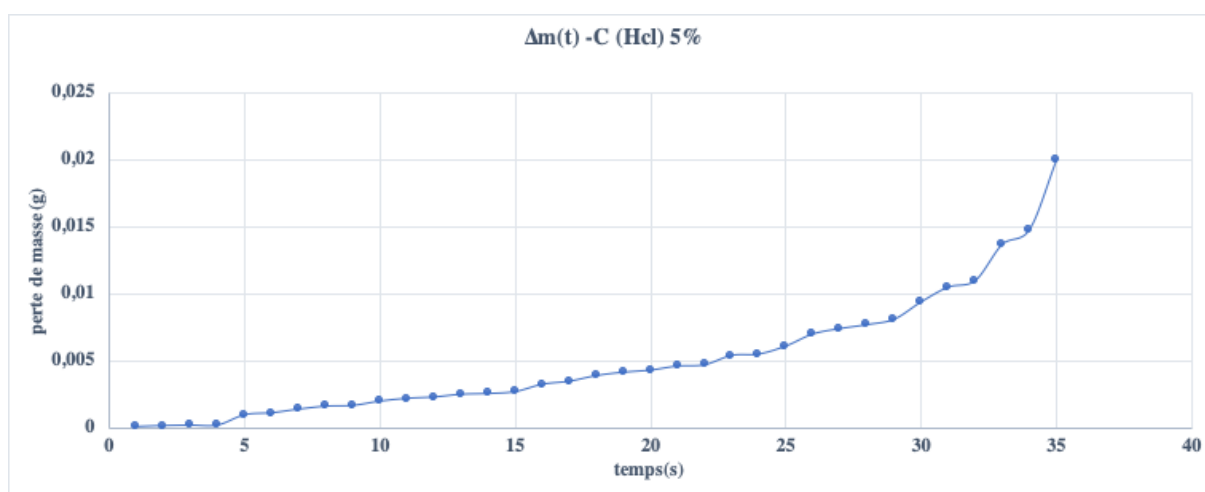


Figure IV.20: Perte de masse du revêtement dans (HCl) à 5% en fonction du temps (c)

La Figure IV.20 expose l'évaluation de la résistance du revêtement sur l'échantillon C dans un milieu acide à 5 % de HCL en fonction du temps. La perte de masse s'accroît graduellement, révélant une corrosion présente mais limitée.

Tableau IV.16: Evaluation des échantillons traités avec ou sans peinture

	La masse maximale (g)	La masse minimale (g)	La perte de masse	Observation
Sans peinture Figure IV.4	17,6232	17,5000	0,1232	-Une diminution progressive de la masse des échantillons, particulièrement dans des solutions de NaOH et HCl à différentes concentrations. -La perte de masse est plus significative dans HCl que dans NaOH. Ce qui reflète la nature plus corrosive de l'acide chlorhydrique.
Avec peinture Figure IV.9	17,6180	17,6100	0,0080	L'absence de variation de masse sur une longue période, témoigne de la robustesse et de la résistance chimique du revêtement dans un milieu acide (HCl à 5%).

❖ **Interprétation et efficacité de la peinture :**

- L'application de la peinture réduit considérablement l'interaction entre l'acide et la surface métallique, comparativement aux résultats obtenus sans revêtement, la peinture offre une protection efficace contre la corrosion tout en préservant la masse initiale de l'échantillon
- Dans NaOH et HCl sans peinture, la pente des courbes traduit une dégradation rapide. La peinture démontre une meilleure performance dans le milieu acide HCl à 5%, suggérant ainsi une résistance chimique adaptée aux environnements corrosifs acides.

Tableau IV.17: Variation de la masse et perte de masse des échantillons traités avec la peinture

Concentration de H ₂ SO ₄	État de l'échantillon	Masse maximale (g)	Masse minimale (g)	Perte de masse (g)	Observation
12 %	Sans peinture Figure IV.2	15,36000	15,19550	0,16450	Attaque acide importante due à l'absence de protection.
5 %	Avec peinture Figure IV.16	15,56771	15,55200	0,01571	Protection efficace de la peinture, attaque minimale.

❖ Interprétation et efficacité de la peinture :

Les résultats obtenus montrent une nette différence entre l'échantillon non protégé exposé à une solution d'acide sulfurique à 12 % et celui recouvert de peinture exposé à une solution à 5 %. En effet, l'échantillon sans peinture a subi une perte de masse significative (0,16450 g), traduisant une corrosion marquée due à l'agressivité de la solution acide. À l'inverse, l'échantillon peint n'a perdu que 0,01571 g, indiquant une très faible attaque du matériau.

Ces résultats expérimentaux confirment ainsi l'intérêt majeur de l'utilisation de revêtements protecteurs dans les environnements corrosifs. Le revêtement testé dans cette étude s'est révélé particulièrement performant dans les solutions acides telles que HCL et H₂SO₄.

IV.3 Conclusion

L'analyse des résultats a permis de souligner les avantages et les limites des méthodes actuelles de nettoyage. Une peinture résistante aux acides a été appliquée sur les surfaces exposées afin de réduire l'encrassement. Par ailleurs, des recommandations ont été émises pour optimiser les pratiques de maintenance, contribuant ainsi à diminuer les coûts liés à l'encrassement tout en améliorant la performance des échangeurs.

Conclusion Générale

Conclusion Générale & Perspectives

L'étude menée a permis d'évaluer la résistance de peintures dans des environnements acide. À travers les analyses gravimétriques et les essais expérimentaux, il a été démontré que les revêtements utilisés offrent une certaine protection contre l'encrassement et la corrosion. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'importance de sélectionner des peintures ayant une résistance chimique adaptée aux conditions d'exploitation.

L'utilisation de peintures résistantes dans des environnements industriels agressifs, tels que ceux rencontrés dans les unités pétrochimiques, contribuent significativement à la durabilité des équipements, à la réduction des opérations de maintenance, et donc à une meilleure rentabilité des installations. Enfin, cette étude propose des recommandations pour le choix de peintures protectrices adaptées limitant le phénomène d'encrassement qui est généralement sources de la corrosion et d'usure, ainsi qu'une optimisation des protocoles de nettoyage pour maintenir les performances thermiques des échangeurs de chaleur.

Par ailleurs, des perspectives intéressantes pour approfondir ce travail, incluent l'amélioration des procédés de traitement, la réalisation de tests en éliminant l'effet de la température, ainsi que l'évaluation des performances des revêtements dans des milieux érosifs. Ces pistes permettront d'affiner davantage les solutions proposées pour répondre aux contraintes des environnements industriels exigeants.

Annexes

ANNEXE 1 : ACIDE SULFAMIQUE

Étiquette



ACIDE SULFAMIQUE

Attention

- **H315** - Provoque une irritation cutanée
- **H319** - Provoque une sévère irritation des yeux
- **H412** - Nocif pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme

Les conseils de prudence P sont sélectionnés selon les critères de l'annexe 1 du règlement CE n° 1272/2008.

226-218-8

✓ Les propriétés physiques de l'acide sulfamique :

Nom Substance	Détails
Acide sulfamique	Formule NH SO H
	N° CAS 5329-14-6
	État Physique Solide
	Masse molaire 97,09
	Point de fusion 205 °C
	Densité 2,126 g/cm à 25 °C
	Pression de vapeur 0,78 Pa à 20 °C 2,5 Pa à 100 °C

ANNEXE 2 : l'acier au carbone C_1020

✓ La composition chimique de l'acier au carbone C_1020

Élément%	Moyenne +/-	
Fe 98.23	98.23	0.00
Mn0.37	0.37	0.00
W0.05	0.05	0.00
Cr0.04	0.04	0.00
Mo 0.02	0.02	0.00
Nb0.01	0.01	0.00
Cu <0.00	0.00	0.00
V <0.00	0.00	0.00
Fe97.37	97.80	0.431
Mn 0.47	0.42	0.050
Ti0.07	0.03	0.044
W0.01	0.03	0.021
Cr 0.00	0.03	0.027
Mo 0.02	0.02	0.001
Ni 0.06	0.01	0.047
Nb <0.00	0.00	0.013
Fe 98.51	98.51	0.000
Mn 0.33	0.33	0.000
Nb<0.00	0.00	0.000
Cr <0.00	0.00	0.000
Mo <0.00	0.00	0.000
V <0.00	0.00	0.000
Ni <0.00	0.00	0.000
Cu <0.00	0.00	0.000

