

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DU 20 AOUT 1955 SIKKDA

Faculté de Technologie
Département : Pétrochimie



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : industries pétrochimiques

Spécialité : Raffinage et pétrochimie

Réalisé par :

NEKROUF Sofiane

BOUCHIKHI Mustapha Abdelwahab

Encadré par :

Pr. BOUSSAHA Elhadi

Thème

**Proposition d'un protocole de décapage chimique contre
l'encrassement des échangeurs de chaleur**

Soutenu publiquement le : 01 / 07 / 2026 devant le jury composé de :

N.Ramdane	MCA	Présidente	Université 20 Août 1955-Skikda
Chelghame	MCA	Examinatrice	Université 20 Août 1955-Skikda
Z.Marsa	MCA	Examinatrice	Université 20 Août 1955-Skikda
Boussaha	MCA	Encadrant	Université 20 Août 1955-Skikda

Année Universitaire: 2025/2026

Remerciements

Nous remercions tout d'abord à dieu tout puissant pour la volonté, la puissance qu'il nous a donné durant tous ces années

Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études master 2 de la filière Pétrochimie, spécialité Raffinage et pétrochimie.

Nous remercions tout particulièrement Pr BOUSSAHA El Hadi, mon encadrant, pour son soutien inestimable, ses conseils avisés et son encadrement rigoureux tout au long de ce projet.

Nous tenons également à exprimer ma reconnaissance envers l'ensemble des enseignants du département de Pétrochimie pour la qualité de leur enseignement, ainsi que pour les connaissances et compétences qu'ils ont su nous transmettre durant ces cinq années.

Mes remerciements vont également à mes camarades de promotion pour leur soutien, leur camaraderie et les échanges enrichissants qui ont contribué à créer un environnement d'apprentissage stimulant.

Enfin, je voudrais exprimer ma gratitude à ma famille pour leur soutien moral et leurs encouragements constants, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible.

Ce mémoire est le fruit de nombreux efforts collectifs et je suis profondément reconnaissant à tous ceux qui ont apporté leur contribution, de près ou de loin, à son aboutissement.

Merci à tous.

Dédicace :

Je dédie ce travail :

À ma mère en témoignage de mon affection et mon admiration pour son courage et sa dignité et à qui je ne saurai jamais exprimer toute ma reconnaissance...

À mon père qui m'a tout donné et qui a su de ses précieux conseils m'inspirer le sens de la dignité, du courage et du travail, qu'il trouve ici l'accomplissement de tous ses vœux...

À mes sœurs, à qui je souhaite beaucoup de réussite.

À tous mes amis et camarades en témoignage de mes plus profondes amitiés et ma sincère sympathie.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sofiane Nekrouf

Dédicace :

Je dédie ce travail :

À ma famille, pour son amour, son soutien indéfectible, ses encouragements et les sacrifices consentis tout au long de mon parcours. Leur confiance et leur présence ont toujours été une source de motivation et de force.

À mes amis, pour leur amitié sincère, leur soutien moral et les moments de partage qui ont contribué à rendre cette expérience plus enrichissante.

À mon professeur encadreur, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son accompagnement et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

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

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu durant cette étape importante de ma vie académique.

Avec toute ma reconnaissance et mon respect.

Bouchikhi Mustapha abdelwahab

Résumé :

Les échangeurs de chaleur sont considérés comme l'un des principaux équipements utilisés dans les procédés industriels pour optimiser l'efficacité énergétique. L'encrassement et l'entartrage font partie des plus grands problèmes rencontrés lors de leur fonctionnement, entraînant une baisse des performances thermiques, des pertes de charge et des risques de corrosion. L'objectif principal de cette étude est de trouver le protocole idéal pour nettoyer ces équipements. Nous avons réalisé des protocoles de nettoyage chimique sur des échantillons d'acier C-1020 artificiellement encrassés et choisi une méthode classique et efficace, à savoir la méthode gravimétrique (perte de masse). La variation des principaux paramètres tels que la concentration des solutions de soude (NaOH) et d'acide chlorhydrique (HCl), la température et le temps de contact, nous a permis d'obtenir des résultats. Pour les optimiser, nous avons analysé les données obtenues afin de déterminer l'efficacité de nettoyage de chaque produit, démontrant que l'acide chlorhydrique est particulièrement performant pour éliminer le tartre minéral tandis que la soude caustique s'avère idéale pour dissoudre les dépôts organiques et huileux.

Mots clés : Échangeurs de chaleur, encrassement, entartrage, pertes de charge, corrosion, nettoyage chimique, méthode gravimétrique.

المخلص :

تُعتبر المبادلات الحرارية من المعدات الرئيسية المستخدمة في العمليات الصناعية لتحسين كفاءة الطاقة. ويُعد الاتساخ والتكلس من أكبر المشاكل التي تواجه تشغيلها، مما يؤدي إلى انخفاض الأداء الحراري، وزيادة هبوط الضغط، ومخاطر التآكل. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إيجاد البروتوكول الأمثل لتنظيف هذه المعدات. حيث قمنا بتنفيذ بروتوكولات تنظيف كيميائي على عينات من الفولاذ C-1020 المتسخة اصطناعيًا، واخترنا طريقة كلاسيكية وفعالة، وهي طريقة القياس الوزني (فقدان الكتلة). وقد أتاح لنا تغيير المعاملات الرئيسية مثل تركيز محلول الصودا الكاوية (NaOH) وحمض الهيدروكلوريك (HCl)، ودرجة الحرارة، وزمن التلامس، الحصول على النتائج. ولتحسين هذه النتائج، قمنا بتحليل البيانات التي تم الحصول عليها لتحديد كفاءة التنظيف لكل منتج، مما أظهر أن حمض الهيدروكلوريك فعال بشكل خاص في إزالة التكلس المعدني، بينما تبين أن الصودا الكاوية مثالية لإذابة الرواسب العضوية والزيتية.

الكلمات المفتاحية : المبادلات الحرارية، الاتساخ، التكلس، هبوط الضغط، التآكل، التنظيف الكيميائي، القياس الوزني.

Abstract :

Heat exchangers are considered one of the main equipments used in industrial processes to optimize energy efficiency. Fouling and scaling are among the greatest problems encountered during their operation, leading to a decrease in thermal performance, pressure drops, and corrosion risks. The main objective of this study is to find the ideal protocol for cleaning these equipments. We carried out chemical cleaning protocols on artificially fouled C-1020 steel samples and chose a classic and effective method, namely the gravimetric (mass loss) method. The variation of the main parameters such as the concentration of sodium hydroxide (NaOH) and hydrochloric acid (HCl) solutions, temperature, and contact time, allowed us to obtain results. To optimize them, we analyzed the obtained data to determine the cleaning efficiency of each product, demonstrating that hydrochloric acid is particularly effective in removing mineral scale, while caustic soda proves ideal for dissolving organic and oily deposits.

Keywords: Heat exchangers, fouling, scaling, pressure drops, corrosion, chemical cleaning, gravimetric method

LISTE DES FIGURES :

Chapitre I : Généralités sur les échangeurs de chaleur

Figure I.1 : échangeur de chaleur.....	4
Figure I.2 : Transfert thermique par conduction.....	4
Figure I.3 : Transfert thermique par convection.....	5
Figure I.4 : Transfert thermique par rayonnement.....	5
Figure I.5 : Classification d'un échangeur en fonction de sa compacité.....	7
Figure I.6 : Echangeur monotube en serpentin.....	8
Figure I.7 : Echangeurs coaxial cintré.....	8
Figure I.8 : Echangeurs à tube séparés.....	9
Figure I.9 : Echangeurs à tube rapprochés.....	9
Figure I.10 : Echangeur a tubes ailette.....	10
Figure I.11 : Ailette continues.....	10
Figure I.12 : Ailette indépendantes.....	11
Figure I.13 : Ailette annulaires.....	11
Figure I.14 : Ailette spiralée.....	11
Figure I.15 : Ailettes transversales.....	12
Figure I.16 : Echangeur a faisceau tubulaire.....	12
Figure I.17 : Echangeur a plaque.....	13
Figure I.18 : Échangeurs à plaques et joints.....	14
Figure I.19 : Échangeurs à plaques soudées ou cassettes.....	15

Chapitre II : Généralité sur l'encrassement

Figure II.1 : Echangeur sale et propre.....	20
Figure II.2 : Dépôt de slime bactérien, hydrocarbures et oxydes métalliques dans un échangeur de chaleur eau hydrocarbures (Raffinerie de pétrole).....	21
Figure II.3 : Entartrage d'une chaudière à tubes de fumée (P= 15 bars).....	22
Figure II.4 : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière MP.....	22
Figure II.5 : Importante corrosion.....	23
Figure II.6. Formation de dépôt.....	31

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1 : Échantillon en acier avant traitement.....	39
Figure III.2 : échantillon après le découpage et polissage.....	41
Figure III.3 : exemple de deux échantillons sur la balance.....	41
Figure III.4 : huile 10W40 propre avant l'utilisation.....	42
Figure III.5 : chlorure de calcium CaCl_2	43
Figure III.6 : structure de NaHCO_3	43
Figure III.7 : poudre de bicarbonate de sodium.....	44
Figure III.8 : chlorure de calcium et bicarbonate de sodium.....	44
Figure III.9 : Hydroxyde de sodium utilisé dans le protocole de nettoyage.....	45
Figure III.10 : Acide chlorhydrique (HCl) utilisé pour l'élimination des dépôts.....	46
Figure III.11 : solution aqueuse de NaOH.....	47
Figure III.12 : solution aqueuse de HCl.....	49
Figure III.13 : échantillons au cours d'encrassement.....	50
Figure III.14 : pesé 10g de NaHCO_3 et 10g de CaCl_2	50
Figure III.15 : 10g de NaHCO_3 + 10g de CaCl_2 après l'addition de l'eau.....	51
Figure III.16 : formation du tartre après 30 min de chauffage.....	51
Figure III.17 : le dépôt du tartre après huit jours de séchage.....	52
Figure III.18: pesé un échantillon entartre.....	52
Figure III.19 : Nettoyage d'échantillons entartrés.....	54
Figure III.20 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (2 %) et HCl (0.25 %).....	58
Figure III.21 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (1 %) et HCl (0.25 %).....	59
Figure III.22 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de Naoh (3 %) et HCl (0.25 %).....	61
Figure III.23 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de Naoh (5 %) et HCl (0.25 %).....	62
Figure III.24 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5 %) et HCl (0.5 %).....	63
Figure III.25 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (2% 3% et 5%).....	64

Figure III.26: Évolution de la masse du dépôt en fonction de la concentration pour les solutions de HCl (0.25 % 0.5% 0.75% 1% 3% et 5%).....	65
Figure III.27 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (0.25 % 0.5% 0.75% 1% 3% et 5%).....	66
Figure III.28 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (1% 3% et 5%).....	67
Figure III.29 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de Naoh(5%) et HCl (1% 3% et 5%).....	68
Figure III.30 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de Naoh(5%) et HCl (5%).....	79

LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre II : Généralité sur l'encrassement

Tableau II.1 : Caractéristiques géométriques des plaques.....	31
Tableau II.2: Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur.....	32

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques acier C :1020.....	40
Tableau III.2 : Différents concentration des expériences.....	53
Tableau III.3 : Concentrations des solutions de NaOH utilisées pour le nettoyage.....	54
Tableau III.4 : Concentrations des solutions de Hcl utilisées pour le nettoyage.....	55
Tableau III.5 : Effet de la concentration de HCl après 24 min.....	56
Tableau III.6 : Concentrations des solutions de nettoyage utilisées pour l'échantillon encrassé (ENC).....	56
Tableau III.7 : Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon ENC.....	57
Tableau III.8 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.....	57
Tableau III.9: résultats de nettoyage d'un echantillon entarté.....	59
Tableau III.10 : résultats de nettoyage d'un echantillon entarté.....	60
Tableau III.11 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.....	62
Tableau III.12 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.....	63
Tableau III.13 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.....	64
Tableau III.14 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.....	65
Tableau III.15 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.....	67
Tableau III.16 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.....	68
Tableau III.17 : résultats de nettoyage d'un echantillon encrassé.....	69

LISTE D'ABREVIATION :

Catégorie	Symbole / Abréviation	Signification / Description
Formules Chimiques	NaOH	Hydroxyde de sodium (Soude caustique)
	HCl	Acide chlorhydrique
	CaCO ₃	Carbonate de calcium (Tartre)
	CaCl ₂	Chlorure de calcium
	NaHCO ₃	Bicarbonate de sodium (Bicarbonate de soude)
	NaCl	Chlorure de sodium (Sel de table)
	CO ₂	Dioxyde de carbone
	H ₂ O	Eau
	Na ⁺	Cation sodium
	HCO ₃ ⁻	Anion bicarbonate
	OH ⁻	Anion hydroxyde
Grandeurs Physiques	R_e	Limite d'élasticité (en MPa)
	R_m	Résistance à la traction (en MPa)
	d	Densité
	M	Masse molaire (en g/mol)
	p	Pureté
	C	Concentration de la solution
	V	Volume de la solution
Unités de Mesure	m	Masse (en grammes)
	%	Pourcentage (utilisé pour les concentrations)
	m ² /m ³	Mètre carré par mètre cube (Compacité)
	mm	Millimètre (Unité de longueur)
	μm	Micromètre (Taille des particules)
	kg/m ³	Kilogramme par mètre cube (Masse volumique)

	°C	Degré Celsius (Unité de température)
	MPa	Mégapascal (Unité de contrainte/pression)
	GPa	Gigapascal (Module d'élasticité)
	HB	Dureté Brinell
	W/(m·K)	Watt par mètre-kelvin (Conductivité thermique)
	K ⁻¹	Kelvin à la puissance moins un (Coefficient de dilatation)
	J / (kg · K)	Joule par kilogramme-kelvin (Chaleur spécifique)
	mL	Millilitre (Unité de volume)
	g	Gramme (Unité de masse)
	min	Minute (Unité de temps)
	bars	Bar (Unité de pression)
Abréviations Générales	pH	Potentiel Hydrogène
	MP	Moyenne Pression

TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	

SOMMAIRE

Chapitre I : Généralités sur les échangeurs de chaleur

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition.....	3
I.3. Fonctionnement d'un échangeur thermique.....	4
I.4. Critères de classification des échangeurs de chaleur.....	6
I.4.1. Classification selon la technologie.....	6
I.4.2. Classement suivant le mode de transfert de chaleur :.....	6
I.4.3. Classification suivant le procédé de transfert de chaleur.....	6
I.4.4. Classement fonctionnel.....	6
I.4.5. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange.....	7
I.4.6. Classement suivant la compacité de l'échangeur.....	7
I-5-Principaux types d'échangeur de chaleur.....	7
I-5-1-Echangeurs tubulaires.....	7
I-5-1-1-Echangeur monotube.....	8
I-5-1-2-Echangeur coaxial.....	8
I-5-1-3-Echangeur multitubulaire.....	9
I-5-2- Echangeur a plaque.....	13
I-5-2-1. Échangeurs à plaques et joints.....	13
I-5-2-2. Échangeurs à plaques soudées ou cassettes.....	14
I-5-3-Echangeur a changement de phase.....	15
I-5-3-1- Condenseur.....	15
I-5-3-2- Evaporateur.....	15
I-6-Aspect externe d'un échangeur de chaleur.....	16
I-7-Aspect interne d'un échangeur de chaleur.....	16

I-8-Conclusion.....	17
---------------------	----

Chapitre II : Généralité sur l'encrassement

II.1. Introduction.....	19
II.2. Définition.....	19
II.3. Classification : différents types d'encrassement.....	20
II.3.1. L'encrassement par réaction chimique.....	21
II.3.2. L'encrassement biologique.....	21
II.3.3. L'entartrage.....	21
II.3.4. L'encrassement particulaire.....	22
II.3.5. Encrassement par corrosion.....	23
II.3.6. Encrassement par gel.....	23
II.4. Classification suivant la nature du dépôt.....	23
II.4.1. Dépôts durs.....	23
II.4.2. Dépôts poreux.....	24
II.4.3. Dépôts mous.....	24
II.5. Généralités sur le tartre.....	24
II.6. Formation du le tartre.....	24
II.7. Le tartre et ses conséquences.....	26
II.8. Le tartre et les équipements industriels.....	27
II.9. Apparition et développement de l'encrassement.....	28
II.9.1. Les processus fondamentaux de l'encrassement.....	28
II.9.1.1. L'initiation.....	28
II.9.1.2. Transport.....	29
II.9.1.3. Déposition.....	29
II.9.1.4. Le réentraînement (Enlèvement).....	29
II.9.1.5. Le Vieillissement.....	30
II.10. L'effet de l'encrassement dans l'industrie pétrolière.....	30
II.11. Processus d'encrassement.....	30
II.12. Détection de l'encrassement.....	31
II.13. Action de prévention – Remèdes.....	32
II.14. Nettoyage d'une chaudière.....	34
II.14.1. Nettoyage mécanique.....	34

II.14.2. Nettoyage hydraulique.....	35
II.14.3. Nettoyage chimique.....	36
II.14.4. Nettoyage par projectile.....	36
II.15. Conclusion.....	36

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction.....	38
III.2 But de l'étude.....	38
III.3. Méthodologie de l'étude.....	38
III.4. Méthodes et matériaux.....	39
III.4.1. Méthodes.....	39
III.4.2. Matériaux utilisés.....	39
III.4.2.1 Préparation des échantillons.....	39
III.4.2.2 Matière encrassée et entartrée.....	42
III.4.2.3. Choix des solutions.....	45
III.4.2.4. Préparation des solutions.....	46
III.5 Mode opératoire.....	49
III.5.1 L'encrassement.....	49
III.5.2 L'entartrage.....	50
III.6 Protocole de nettoyage chimique.....	53
III.6.1 Protocoles de nettoyage de l'entartrage.....	53
III.6.2 Protocole de nettoyage de l'encrassement des huiles.....	54
III.7. Résultats et interprétations.....	57
III.8. Conclusion.....	70

Introduction générale

Introduction générale :

Dans le secteur industriel, les échangeurs de chaleur jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de l'efficacité énergétique en assurant le transfert de chaleur entre deux fluides sans mélange. Toutefois, leurs performances sont progressivement dégradées par le phénomène d'encrassement, caractérisé par l'accumulation de dépôts sur les surfaces d'échange. Cette accumulation réduit le transfert thermique, augmente les pertes de charge, favorise la corrosion et entraîne des coûts élevés de maintenance ainsi que des arrêts de production.

Dans ce contexte, ce mémoire vise à étudier l'efficacité de différents procédés de nettoyage chimique destinés à éliminer les dépôts d'encrassement. L'étude repose sur une méthode gravimétrique permettant d'évaluer la perte de masse d'échantillons d'acier C1020 encrassés par de l'huile lubrifiante et du carbonate de calcium, après traitement avec des solutions de soude caustique (NaOH) et d'acide chlorhydrique (HCl) à différentes concentrations et durées de contact.

Le mémoire est structuré en trois chapitres : le premier présente les généralités sur les échangeurs de chaleur, la deuxième traite du phénomène d'encrassement, de ses mécanismes et des méthodes de prévention et de nettoyage, tandis que le troisième décrit la méthodologie expérimentale ainsi que l'analyse des résultats obtenus. Une conclusion générale synthétise les principaux résultats et propose des perspectives d'amélioration des opérations de maintenance des échangeurs de chaleur.

Chapitre I

Généralités sur les échangeurs de chaleur

I.1. Introduction

Dans les procédés industriels, les fluides doivent souvent être chauffés ou refroidis, subissant parfois des changements de phase selon les opérations qu'ils subissent. L'échange de chaleur nécessite des apports énergétiques importants, d'où l'importance de systèmes capables de récupérer et d'optimiser l'utilisation de cette chaleur. Les échangeurs de chaleur jouent un rôle crucial à cet égard : on estime que près de 90 % [1].de l'énergie thermique utilisée dans l'industrie passe par un échangeur au moins une fois. Leur rôle est donc fondamental, non seulement pour garantir l'efficacité énergétique des procédés, mais aussi pour réduire les coûts de production et l'impact environnemental lié à la consommation d'énergie.

I.2. Définition

Un échangeur de chaleur est un système qui serve à transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou complexe de refroidir ou chauffer directement.

L'échangeur thermique dispose de réseaux parallèles à travers lesquelles circulent les fluides à des températures différentes. Ces derniers sont séparés par une paroi aux capacités conductrices optimales. C'est l'écart de température entre les deux fluides qui permet l'échange de chaleur. [2]

Un échangeur thermique ne mélange pas les deux fluides, il permet simplement le transfert de chaleur entre les deux.

Pour cela, les deux fluides sont séparés par une paroi très conductrice (cuivre, aluminium, inox, acier).

Au niveau de l'échangeur, le premier fluide entre chaud et ressort refroidi, tandis que le second fluide entre froid et ressort plus chaud.



Figure I.1 : échangeur de chaleur. [3]

I.3. Fonctionnement d'un échangeur thermique

Le transfert d'énergie thermique est une transmission de cette énergie d'une région à une autre, sous l'influence d'une différence de température. On reconnaît classiquement trois modes de transmission de chaleur : la conduction, la convection et le Rayonnement. [4]

La conduction : définie comme étant le mode de transmission de la chaleur provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux au repos, ou encore entre deux milieux en contact physique. (Les atomes se transmettent la chaleur de proche en proche). Le transfert de chaleur par conduction caractérise les transferts de chaleur qui s'effectuent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes. C'est le cas des surfaces d'échange des échangeurs de chaleur.

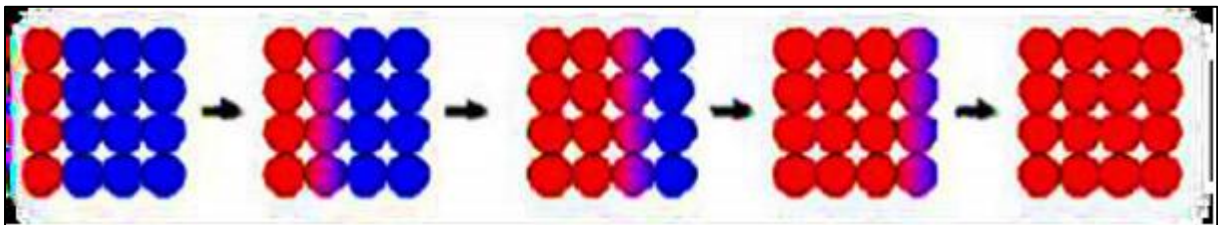


Figure I.2 : Transfert thermique par conduction. [5]

La convection : consiste en une transmission de chaleur par le mouvement réel des molécules en raison d'une différence de température. C'est un Processus caractéristique des liquides et des gaz : les particules proches d'une source de chaleur. Présentent une température plus élevée et par conséquent, une densité inférieure par rapport aux autres, ces particules s'élèvent à l'intérieur du fluide et sont remplacées par des particules plus froides. Ainsi, une transmission de chaleur se produit par l'intermédiaire du mouvement des différentes Particules. Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses. Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz. La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques.

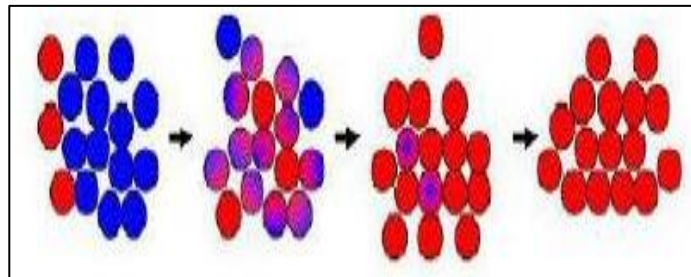


Figure I.3 : Transfert thermique par convection. [5]

Le Rayonnement : c'est l'écoulement de chaleur par ondes électromagnétique d'un corps haute température vers un corps à température plus basse. Il y a rayonnement lorsque les corps sont séparés par des molécules soit lorsqu'ils se trouvent dans le vide. Le rayonnement permet le transfert de chaleur sans aucun intermédiaire matériel (comme le soleil qui transmet la chaleur vers les planètes) [5].



Figure I.4 : Transfert thermique par rayonnement. [5]

I.4. Critères de classification des échangeurs de chaleur

I.4.1. Classification selon la technologie

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

A tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.

A plaques : à surface primaire ou à surface secondaire.

Autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

I.4.2. Classement suivant le mode de transfert de chaleur:

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération des fumées...etc.), il y a souvent un mode de transfert prédominant [6]

I.4.3. Classification suivant le procédé de transfert de chaleur

- Échangeurs avec contact direct : Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés, et atteignent une température finale (température d'équilibre).
- Échangeurs avec contact indirect : Les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi [7]

I.4.4. Classement fonctionnel

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique.

On rencontre alors les différents cas suivants :

- les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;
- les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapo-condenseurs [8].

I.4.5. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires.
- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc. [9].

I.4.6. Classement suivant la compacité de l'échangeur

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. Un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à 700 m²/m³ ; cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m²/m³.

Une classification en fonction de la compacité est représentée sur la figure I.5. [10].

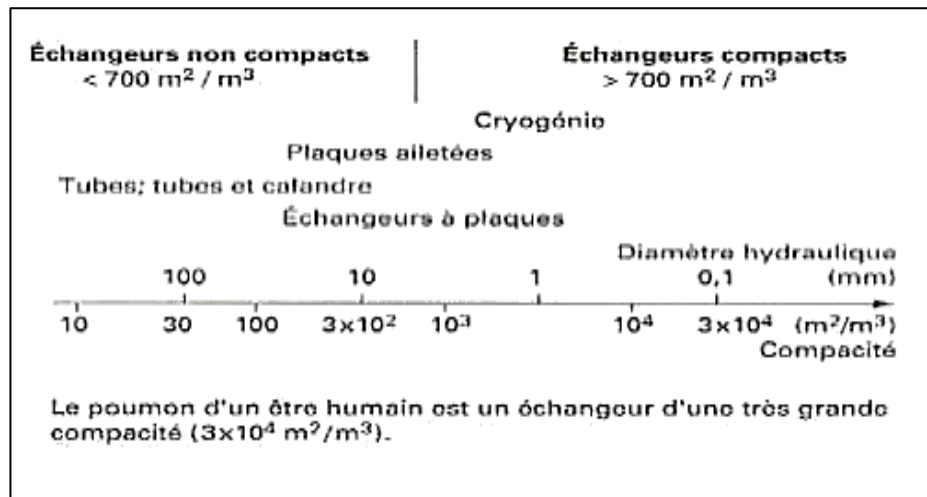


Figure I.5 : Classification d'un échangeur en fonction de sa compacité. [10]

I-5-Principaux types d'échangeur de chaleur

I-5-1-Echangeurs tubulaires

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

I-5-1-1-Echangeur monotube

Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent.

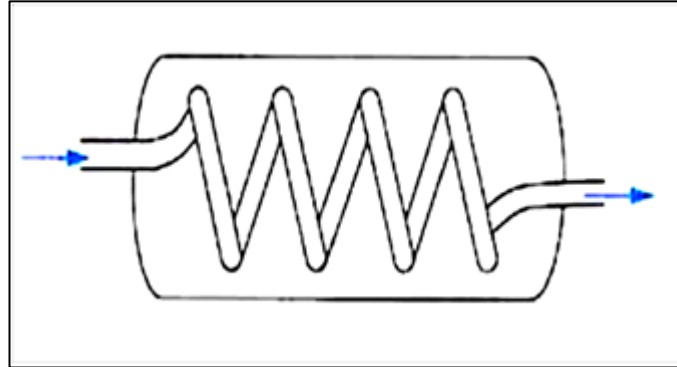


Figure I.6 : Echangeur monotube en serpent. [11]

I-5-1-2-Echangeur coaxial

Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.

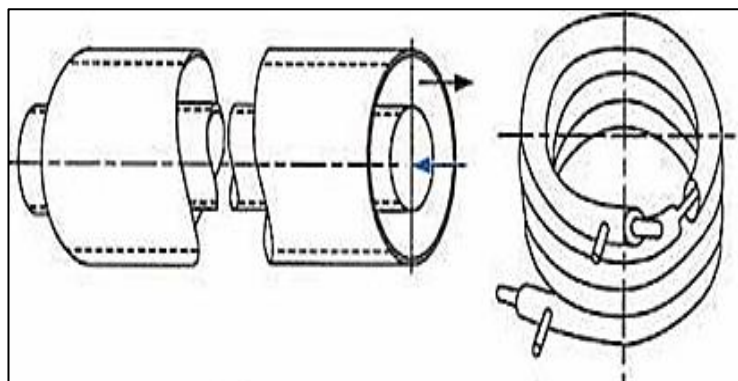


Figure I.7 : Echangeurs coaxial cintré. [11]

I-5-1-3-Echangeur multitubulaire

Existant sous quatre formes :

I-5-1-3-a-Echangeur a tubes séparés

à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

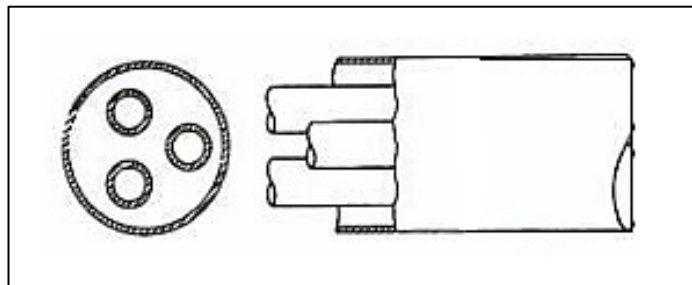


Figure I.8 : Echangeurs à tube séparés. [11]

I-5-1-3-b-Echangeur a tubes rapprochés

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.

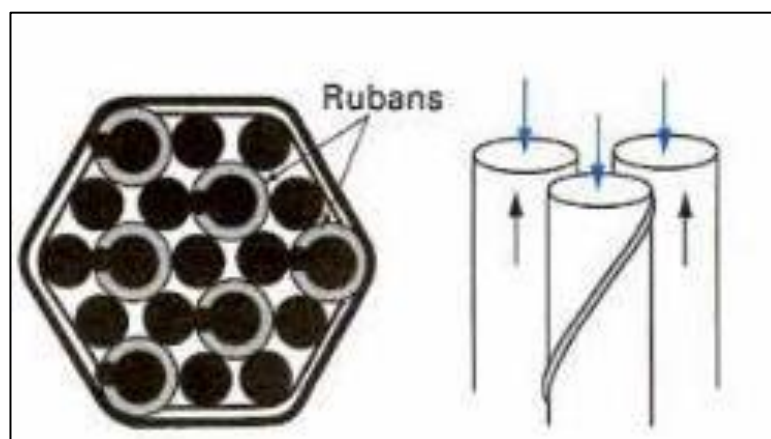


Figure I.9 : Echangeurs à tube rapprochés. [11]

I-5-1-3-c- Echangeur a tubes ailette

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique ; différents types d'ailettes sont toutefois présentés au suivant :

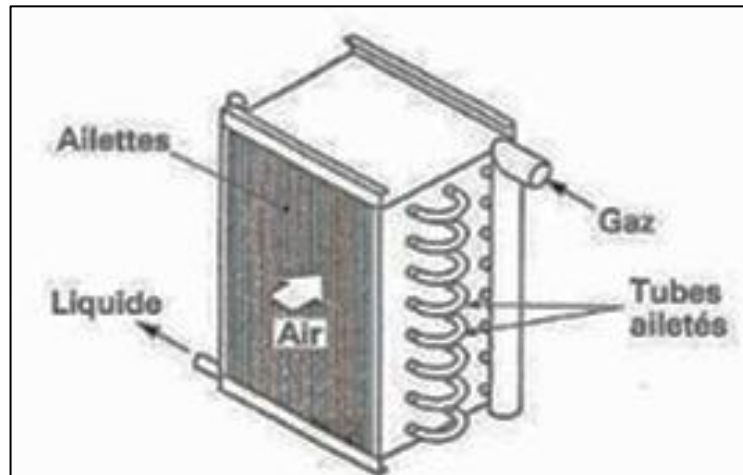


Figure I.10 : Echangeur a tubes ailette. [11]

Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons

Ailettes transversales : On ne considère que les ailettes extérieures aux tubes ; elles peuvent être continues ou indépendantes.

Les ailettes continues : sont traversées par plusieurs tubes de forme généralement rectangulaire, elles sont souvent fabriquées par emboutissage puis fixées par dilatation des tubes. Un collet fixe l'écartement entre les ailettes. Elles peuvent être planes ou ondulées ; l'ondulation provoque une perturbation de l'écoulement qui améliore l'échange thermique.

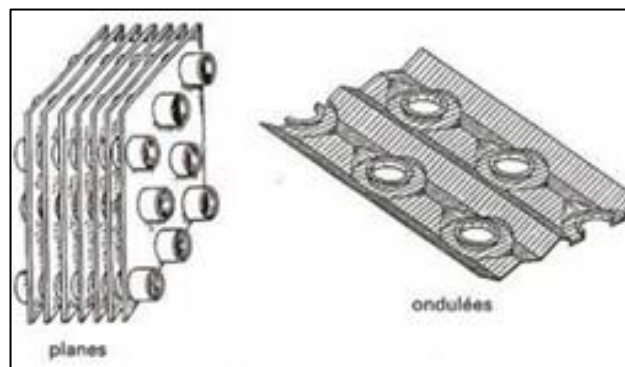


Figure I.11 : Ailette continues. [11]

Les ailettes indépendantes : sont traversées par un seul tube. Elles peuvent être pleines ou segmentées.

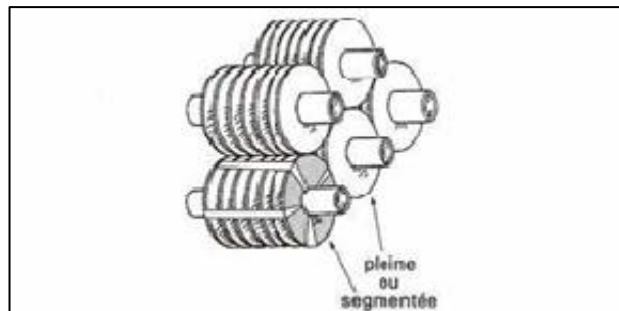


Figure I.12 : Ailette indépendantes. [11]

Les ailettes indépendantes peuvent être de différentes sortes :

- **Ailettes annulaires :** en principe des ailettes pleines.

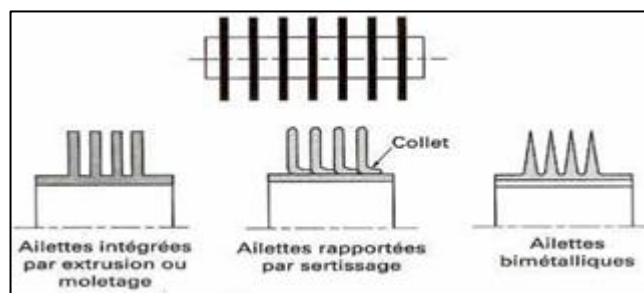


Figure I.13 : Ailette annulaires. [11]

- **Ailette hélicoïdale (spiralee) :** pleine ou segmentée, bien adaptée aux grandes longueurs de tubes. Elle est généralement obtenue par enroulement d'un ruban serti ou soudé sur le tube. Si la hauteur de l'ailette est grande devant le rayon du tube, l'ailette est segmentée.

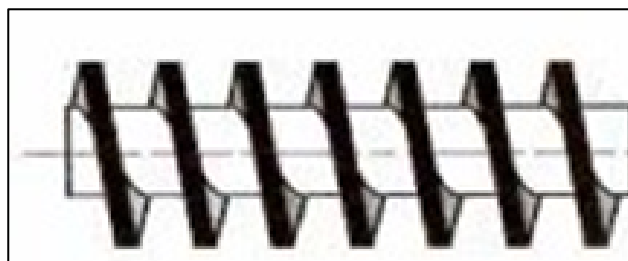


Figure I.14 : Ailette spiralee. [11]

- **Autres types d'ailettes transversales :** On peut observer sur la figure suivante quelques autres types d'ailettes fréquemment utilisés. De nombreux constructeurs utilisent des ailettes qui leur sont spécifiques.

Les assemblages usuels des tubes à ailettes transversales sont soit en quinconce (pas triangulaire), soit en ligne (pas carré).

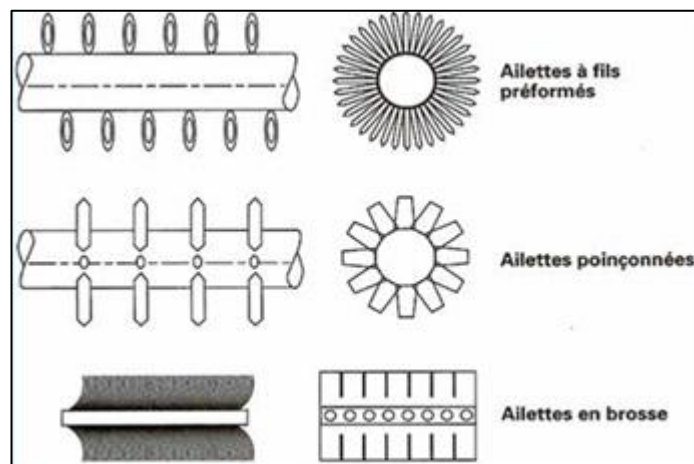


Figure I.15 : Ailettes transversales. [11]

I-5-1-3-d-Echangeur a faisceau tubulaire

C'est l'échangeur actuellement le plus répandu ; de ce fait, le paragraphe suivant lui est donc consacré.[11]

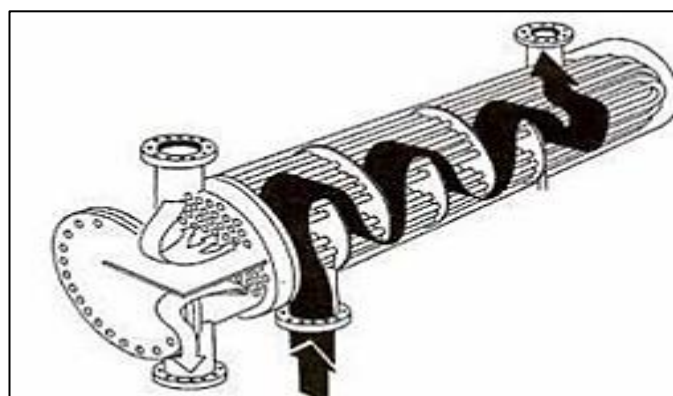


Figure I.16 : Echangeur a faisceau tubulaire. [11]

I-5-2- Echangeur a plaque

En règle générale, les échangeurs à plaques sont constitués par un empilement de plaques écartées les unes des autres par des entretoises pour former un ensemble de conduits plats. Un fluide circule dans les conduits pairs, l'autre dans les conduits impairs selon le schéma ci-dessous :

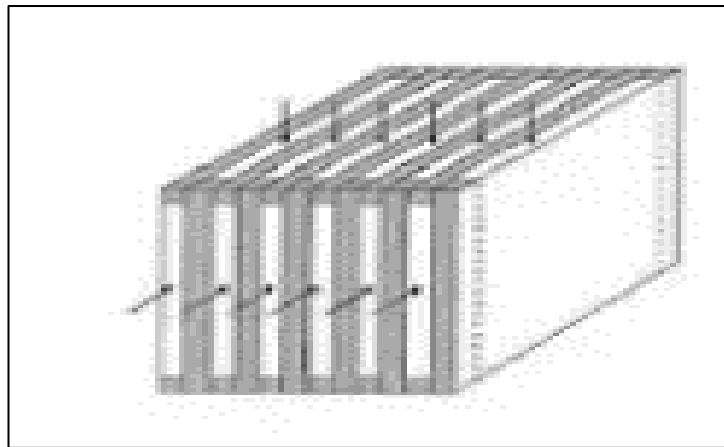


Figure I.17 : Echangeur a plaque. [12]

On peut distinguer principalement deux types d'échangeurs à plaques : ceux à plaques et joints et ceux à plaques brasées (ou cassettes).

I-5-2-1. Échangeurs à plaques et joints

Ils sont constitués d'un grand nombre de plaques de métal minces, particulièrement conçues pour transférer la chaleur d'un liquide à un autre. Ces plaques de métal minces sont séparées et étanchées par un jeu des joints en caoutchouc qui fournit la distribution désirable des liquides sur le paquet de plaques. Le paquet de plaques est installé dans un encadrement, qui fournit les raccords pour les liquides et la compression appropriée des plaques et qui se fait au moyen d'un jeu de tirants.

L'assemblage des blocs de l'appareil permet d'obtenir le compromis recherché entre un bon coefficient de transfert et une perte de charge admissible. Les plaques ont des formes variées et dépendent du constructeur de l'appareil, ces formes sont gravées en relief (3D, sous forme

d'ailettes) : elles ont pour rôle d'assurer la distribution du liquide et d'augmenter la turbulence ainsi que la surface d'échange (par conséquent, augmenter le coefficient d'échange).

Les principales limitations des échangeurs à plaques sont liées aux :

- Limitations de pression.
- Limitations de températures à cause des joints.
- Prix au m² relativement élevé par rapport aux échangeurs tubulaires.

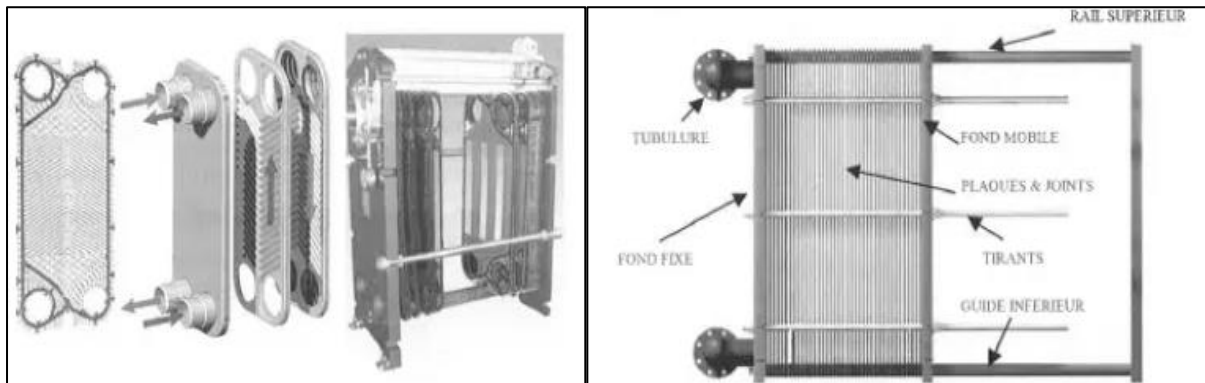


Figure I.18 : Échangeurs à plaques et joints. [12]

I-5-2-2. Échangeurs à plaques soudées ou cassettes

Contrairement aux échangeurs à plaques et joints, ces appareils ne possèdent ni bâti, ni tirant, les plaques étant assemblées entre elles par des brasures en inox.

Les fluides circulent à contre-courant et le transfert thermique se fait par conduction au travers des plaques. Généralement, toute la matière de l'échangeur à plaques brasées participe à l'échange de chaleur, ce qui en fait une technologie très compacte et très simple à installer. Ces échangeurs sont utilisés lorsqu'un haut coefficient d'échange est recherché en priorité (fluides propres, ne provoquant pas de problèmes d'encrassements). Exemples : eau déminéralisée, ammoniaque, industrie pharmaceutique et chimique fine (où une grande résistance à la corrosion est demandée), industrie alimentaire.[12]

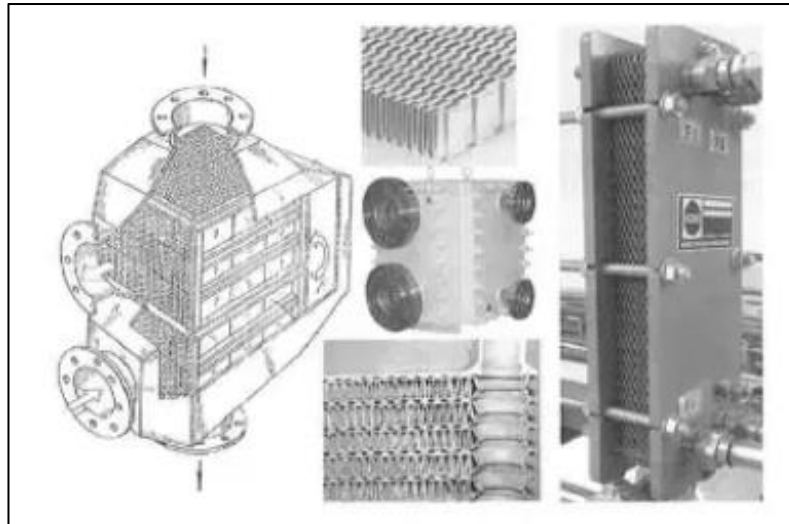


Figure I.19 : Échangeurs à plaques soudées ou cassettes. [12]

I-5-3-Echangeur a changement de phase

L'un des deux fluides peut subir un changement de phase à l'intérieur de l'échangeur. C'est le cas des évaporateurs si le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, ou des condenseurs si le fluide chaud se condense de l'état de vapeur à l'état liquide.

On distingue :

I-5-3-1- Condenseur

Le but de ces échangeurs est de condenser une vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. Ils concernent des secteurs d'activité très variés comme la production d'énergie (centrale thermique), les industries chimiques (colonnes à distillation), les industries du génie climatique, de l'agro-alimentaire, du séchage, etc. Le fluide à condenser est rarement un corps pur, mais le plus souvent une vapeur en présence d'autres gaz incondensables.

La condensation de la vapeur saturée est obtenue par échange thermique avec un fluide froid appelé réfrigérant. Un condenseur nécessite un liquide de refroidissement abondant et bon marché et, pour cela, on utilise principalement l'eau et parfois l'air.

I-5-3-2- Evaporateur

Ces appareils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide, ou produire de la vapeur. Le fluide chauffant peut-être une phase liquide qui transmet sa chaleur sensible ou de la vapeur cédant sa chaleur latente de condensation sur la paroi.[13]

I-6-Aspect externe d'un échangeur de chaleur

L'aspect extérieur d'un échangeur de chaleur porte principalement sur sa configuration, son enveloppe, ses raccordements et les dispositifs de support nécessaires à son intégration dans un système thermique. Selon le type d'échangeur (à plaques, à tubes, à ailettes, etc.), le corps externe peut adopter des formes cylindriques, rectangulaires ou modulaires, et être fabriqué à partir de matériaux tels que l'acier inoxydable, l'aluminium ou le cuivre, en fonction du fluide utilisé et des températures opératoires. L'enveloppe joue un rôle crucial en assurant la protection mécanique et le confinement des fluides. Elle doit être conçue pour résister à la pression interne ainsi qu'aux conditions environnementales comme la corrosion, l'humidité ou les vibrations. Les raccordements, correspondant aux entrées et sorties des fluides, sont souvent standardisés afin de simplifier leur installation et leur entretien. Enfin, l'aspect extérieur inclut également les dispositifs d'isolation thermique, les supports de fixation, et parfois des instruments de mesure tels que les thermocouples ou manomètres, qui permettent de surveiller le fonctionnement de l'équipement.

I-7-Aspect interne d'un échangeur de chaleur

L'aspect interne se rapporte à la conception des structures dédiées au transfert thermique ainsi qu'aux trajets empruntés par les fluides en circulation. C'est à ce niveau que s'effectue l'échange thermique entre le fluide chaud et le fluide froid via une surface spécifique. Dans les échangeurs à tubes, cette surface est constituée de faisceaux de tubes au sein desquels ou autour desquels les fluides circulent. En revanche, les échangeurs à plaques intègrent des plaques minces ondulées, conçues pour générer de la turbulence et optimiser le coefficient de transfert thermique. Des ailettes internes ou externes peuvent être intégrées afin d'augmenter la surface d'échange et améliorer l'efficacité globale.

Une conception intérieure bien pensée cherche à maximiser le transfert de chaleur tout en réduisant les pertes de pression et en limitant l'usure des composants.

I-8-Conclusion

Les échangeurs de chaleur occupent une place essentielle dans les procédés industriels en assurant le transfert d'énergie thermique entre deux fluides sans contact direct. La compréhension de leur principe de fonctionnement, des différents modes de transfert de chaleur ainsi que de leurs critères de classification permet de mieux appréhender leur diversité et leurs domaines d'application. Les principaux types d'échangeurs, notamment les échangeurs tubulaires, à plaques et à changement de phase, présentent chacun des caractéristiques spécifiques répondant à des exigences de fonctionnement particulières. Le choix d'un échangeur dépend ainsi de plusieurs paramètres, tels que la nature des fluides, les conditions de service, les performances thermiques recherchées et les contraintes économiques. Ces notions fondamentales constituent une base indispensable pour la suite de cette étude, qui portera sur l'analyse, le dimensionnement et l'évaluation des performances des échangeurs de chaleur.

Chapitre II

Généralité sur l'encrassement

II.1. Introduction

L'encrassement, des équipements de transfert thermique, ayant un impact significatif sur le parc de production. L'encrassement entraîne une consommation importante et une perte d'énergie en affectant les performances telle que : la diminution du coefficient de transfert de chaleur, la réduction de la conductivité thermique, l'augmentation de la chaleur des liquides chauds, la réduction de la section de passage du fluide entraînant de réduit du débit de fluide (augmentation de perte de charge), d'autre part le début et l'aide de corrosion. Sans doute à ce que la corrosion et l'encrassement sont deux problèmes majeurs qui affectent toutes les activités industrielles. Les actifs se dégradent et nécessitent une surveillance et un entretien continus pour éviter les problèmes à grande échelle ou des méthodes bien planifiées doivent être trouvées pour le commander et traiter. [14]

II.2. Définition

L'encrassement est défini comme la déposition des substances indésirable sur les surfaces des équipements industrielle. Dans les échangeurs de chaleurs, l'encrassement est une couche de dépôt qui s'accumule à la surface d'échange de chaleur et qui entravent le transfert de chaleur. Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments [15]. Les échangeurs de chaleur industriels fonctionnent rarement avec des liquides qui ne provoquent pas l'encrassement. La croissance des dépôts provoque une dégradation des performances thermo hydrauliques de l'échangeur de chaleur avec le temps. L'encrassement affecte la consommation d'énergie des procédés industriels. Les couches d'encrassement ont une conductivité thermique plus faible que les fluides ou la paroi de conduction, d'où elles augmentent la résistance thermique globale. L'encrassement des échangeurs de chaleur représente une dépense élevée. C'est quelque chose qui est indésirable et contre-productif. La présence d'encrassement sur les surfaces d'échange de chaleur entraîne des coûts supplémentaires.

II.3. Classification : différents types d'encrassement

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, selon les conditions d'utilisations de l'échangeur ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt : pour cela on distingue selon [16,17, 18]

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

Mais la plupart des dépôts réels sont le résultat de la combinaison d'au moins deux des types cités, un type peut prédominer et accélérer à la contribution des autres. En considérant qu'une seule catégorie de ce phénomène plusieurs recherches ont été faites pour prévoir des méthodes performantes qui mettent en évidence des différents moyens pour minimiser l'encrassement ; la plupart des travaux se sont basés seulement sur le type d'encrassement particulaire (phénomène de déposition et de réentraînement) [19].

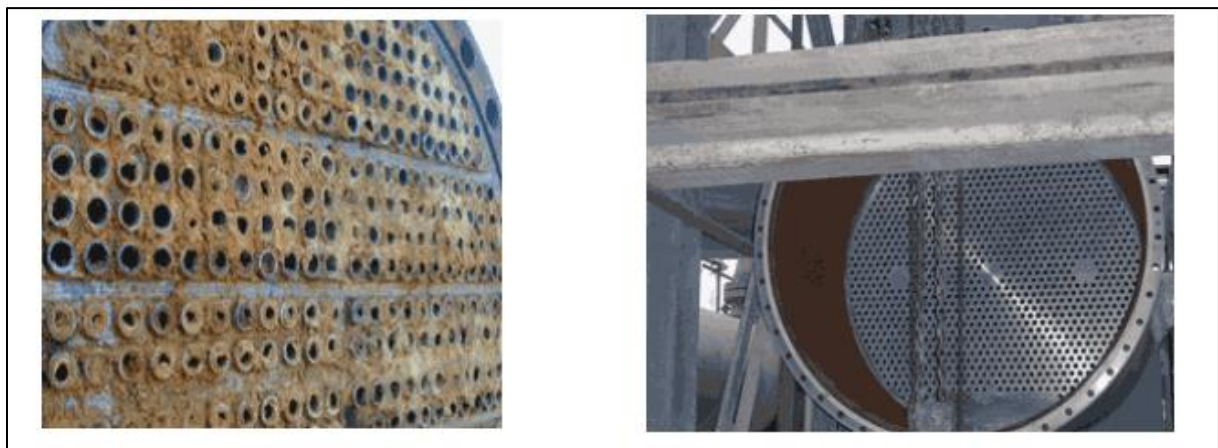


Figure II.1 : Echangeur sale et propre. [19]

II.3.1. L'encrassement par réaction chimique

Il est dû à une réaction chimique qui se produit près d'une surface d'échange de chaleur et que les produits solides de la réaction s'y déposent, cette réaction est souvent une polymérisation et il en résulte la formation d'un dépôt de substance de hauts poids moléculaires. [20,21]

II.3.2. L'encrassement biologique

Il est dû au développement de micro-organismes qui créent un film au contact de la surface d'échange, il peut être causé par trois grands types de microorganismes : les bactéries, les algues et les champignons. [22]

- Le développement bactérien est dû à un apport nutritif (hydrocarbures, ammoniacs),
- Le développement des algues est dû à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse,
- Les champignons se développent avec l'apport de nutriments mais surtout dus aux changements de conditions physiques ambiantes (pH, humidité, température).

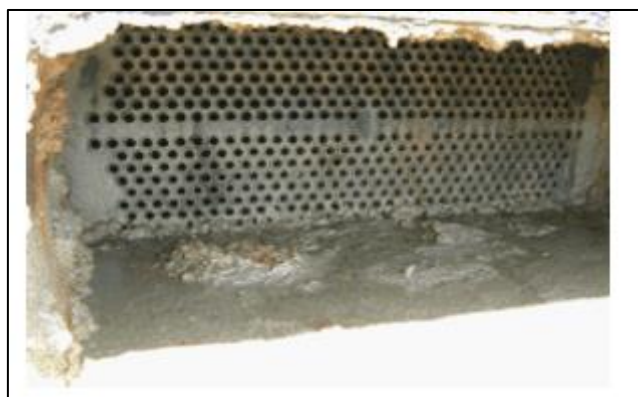


Figure II.2 : Dépôt de slime bactérien, hydrocarbures et oxydes métalliques dans un échangeur de chaleur eau hydrocarbures (Raffinerie de pétrole). [22]

II.3.3. L'entartrage

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide [23]. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être réunies :

- La limite de solubilité doit être dépassée, c'est à dire qu'il y ait saturation : c'est l'aspect thermodynamique

- La vitesse de déposition doit être suffisamment rapide : c'est l'aspect cinétique. [24,25]



Figure II.3 : Entartrage d'une chaudière à tubes de fumée (P= 15 bars). [24]

II.3.4. L'encrassement particulaire

La plupart des écoulements, de fluides industriels (liquides ou gazeux) transportent des particules en suspension dont la taille varie d'une fraction de μm à quelques dizaines de μm ; le dépôt est inévitable d'une partie de ces particules sur la surface d'échange [26] :

- L'eau de chaudière contenant des produits de corrosion.
- L'eau de tours de refroidissement.
- Les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- Les fumées industrielles de résidus solides de combustion.



Figure II.4 : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière MP. [26]

II.3.5. Encrassement par corrosion

C'est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement, on distingue :

- 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 ou l'attaque est limitée à des zones de très petites surfaces ($\approx 1\text{mm}^2$).
- La corrosion fissurant à l'échelle microscopique intergranulaire ou Trans granulaire.
- La corrosion sélective ou seul un élément d'un alliage subit une attaque sélective. [27]



Figure II.5 : Importante corrosion. [26]

II.3.6. Encrassement par gel

Il s'agit de solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous refroidie, c'est un sujet de plusieurs études sur les pipes soit théorique ou expérimental. [28]

II.4. Classification suivant la nature du dépôt

II.4.1. Dépôts durs

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

II.4.2. Dépôts poreux

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

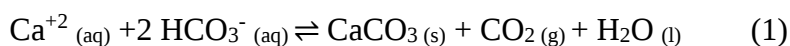
II.4.3. Dépôts mous

C'est le cas de boues, poudres de coke ou de fibres végétales. La résistance dans ce cas est plutôt liée au fluide emprisonné qu'au matériau constituant la matrice. Un simple soufflage peut donner des résultats satisfaisants lors du nettoyage. [29]

II.5. Généralités sur le tartre

Le tartre, également connu sous le nom d'entartrage, constitue la forme d'encrassement la plus répandue et la plus préjudiciable dans les systèmes d'échange thermique industriels. Il se caractérise par la formation et le dépôt de substances solides cristallines sur les surfaces d'échange, résultant principalement de la précipitation de sels minéraux dissous dans le fluide caloporteur [30]. Le composant majoritaire de ces dépôts est le carbonate de calcium (CaCO_3), mais d'autres sels tels que les sulfates de calcium (CaSO_4) ou les silicates peuvent également contribuer à sa formation, en fonction de la composition chimique de l'eau et des conditions opératoires [31].

Le processus d'entartrage est intrinsèquement lié à l'équilibre calco-carbonique de l'eau. Lorsque cet équilibre est perturbé par des variations de température, de pression ou de pH, la solubilité des sels minéraux diminue, entraînant leur cristallisation et leur dépôt. La réaction globale de formation du carbonate de calcium peut être simplifiée comme suit [32] :



II.6. Formation du le tartre

La formation du tartre sur les surfaces d'échange thermique est un phénomène complexe qui se déroule en plusieurs étapes clés, influencées par des paramètres physico-chimiques et hydrodynamiques [33]. Ce processus de cristallisation peut être décomposé comme suit :

- **Nucléation (ou germination)**

C'est l'étape initiale où les ions Ca^{2+} CO_3^{2-} en solution s'agrègent pour former des germes cristallins stables. Cette phase est favorisée par un état de sursaturation du fluide et par la présence de sites de nucléation hétérogène sur la surface de l'échangeur (rugosités, impuretés) [34].

- **Croissance cristalline**

Une fois les germes formés, ils continuent de croître par l'incorporation d'ions supplémentaires provenant de la solution sursaturée. Cette croissance conduit à la formation d'une couche solide et cohérente de tartre sur la paroi [33].

- **Polymorphisme**

Le carbonate de calcium peut cristalliser sous différentes formes polymorphiques, dont les principales sont la calcite, l'aragonite et la vaterite. La calcite est la forme la plus stable thermodynamiquement et la plus difficile à éliminer en raison de sa structure dense et de son adhérence élevée, tandis que l'aragonite est plus fragile et moins adhérente [30].

Les facteurs prépondérants influençant la cinétique de formation du tartre sont :

- **La Température**

Le CaCO_3 présente une solubilité inverse, ce qui signifie que sa solubilité diminue à mesure que la température augmente. Par conséquent, la précipitation est accélérée sur les surfaces les plus chaudes de l'échangeur, où la température du fluide est la plus élevée [31].

- **Le pH**

Une augmentation du pH déplace l'équilibre calco-carbonique vers la formation d'ions carbonate (CO_3^{2-}), favorisant ainsi la précipitation du CaCO_3 [30].

- **La concentration des ions**

Des concentrations élevées en ions Ca^{2+} HCO_3^- et augmentent le degré de sursaturation et, par conséquent, la probabilité de nucléation et de croissance cristalline [33].

II.7. Le tartre et ses conséquences

- **Conséquences hydrauliques**

L'accumulation d'une épaisseur de tartre dans les équipements conduit à une diminution des sections de passage, ce qui occasionne une augmentation de la résistance hydraulique des réseaux qui conduit dans tous les cas à une augmentation de dépense énergétique des pompes dans le cas de réseaux fermes.

- **Conséquences bactériologiques**

Il a été montré que les réservoirs, les réseaux et points de puisage (tel que les robinets les clapets.... etc.) des réseaux d'eau chaude sanitaire pourraient, s'ils étaient entartrés, être favorables à « l'accueil » et à la prolifération de legionella. Ceci conduit à des opérations de détartrage nécessaires avant toute désinfection.

- **Conséquences technologiques**

L'entartrage peut avoir pour conséquences technologiques :

- Le blocage des organes de manœuvre des robinetteries
- Le blocage des soupapes de sécurité
- La diminution du volume utile des réservoirs
- L'entraînement due particules en suspension qui peuvent être abrasives

- **Conséquences énergétiques et thermique**

Les tartes ont des conductivités thermiques très faibles en observe des matériaux utilisés dans la construction des échangeurs (acier ou cuivre). Les matériaux ne sont pas tous sensibles à l'entartrage de la même façon. Pour qu'un entartrage puisse se produire il faut :

- Une précipitation de sels minéraux
- Un accrochage des sels aux parois

Cette dernière phase n'est pas forcément réalisable, ainsi les matériaux de qui présentent des coefficients de dilatabilité très élevés seront relativement peu sensible à l'entartrage s'ils sont soumis à des variations de température et donc à des dilatations. De même pour les aciers inoxydables de part leur état de surface. L'augmentation dans de fortes proportions des dépôts entraînent une augmentation de la résistance thermique des parois est donc une diminution du coefficient d'échange [34].

II.8. Le tartre et les équipements industriels

La présence de tartre affecte de manière significative la performance et la fiabilité de nombreux équipements industriels, chacun présentant des vulnérabilités spécifiques à ce phénomène. La gestion de l'entartrage est donc cruciale pour maintenir l'efficacité opérationnelle et prolonger la durée de vie des installations.

- **Impact sur les chaudières**

Les chaudières sont particulièrement sensibles à l'entartrage en raison des températures élevées et des cycles d'évaporation qui concentrent les sels minéraux. Le tartre se dépose sur les surfaces de chauffe, réduisant le transfert de chaleur vers l'eau et augmentant la température des parois métalliques. Cela peut entraîner une surchauffe localisée, des contraintes thermiques excessives et, à terme, la déformation ou la rupture des tubes de la chaudière. Une couche de tartre de seulement mm peut augmenter la consommation de combustible de 5 à 10 % pour maintenir la même production de vapeur [35].

- **Impact sur les condenseurs**

Dans les condenseurs, le tartre se forme sur les surfaces d'échange où le fluide chaud (vapeur) cède sa chaleur au fluide froid (eau de refroidissement). L'entartrage réduit l'efficacité de la condensation, ce qui se traduit par une augmentation de la pression de condensation et une diminution du vide dans le condenseur. Pour les turbines à vapeur, ΔP cela se traduit par une baisse de rendement et une augmentation de la consommation spécifique de vapeur. La réduction du coefficient de transfert thermique due au tartre peut nécessiter une augmentation du débit d'eau de refroidissement, entraînant une surconsommation d'énergie pour les pompes [36].

- **Impact sur les tours de refroidissement**

Les tours de refroidissement sont des systèmes ouverts où l'eau est évaporée pour dissiper la chaleur. Ce processus entraîne une concentration progressive des sels minéraux dans l'eau restante, favorisant l'entartrage des garnissages et des échangeurs associés. Le tartre réduit l'efficacité de l'échange air-eau, diminue la capacité de refroidissement de la tour et peut obstruer les buses de pulvérisation, affectant la distribution de l'eau. De plus, les dépôts de tartre peuvent servir de substrat pour le développement de biofilms, aggravant le problème d'encrassement [37].

- **Impact sur les échangeurs de chaleur à plaques**

Les échangeurs de chaleur à plaques, avec leurs canaux étroits et leurs surfaces d'échange étendues, sont très efficaces mais également très sensibles à l'entartrage. Les dépôts de tartre réduisent rapidement la section de passage, augmentant les pertes de charge et diminuant drastiquement le coefficient de transfert thermique. La complexité de la géométrie des plaques rend le nettoyage mécanique difficile, et les dépôts peuvent créer des points chauds qui endommagent les joints d'étanchéité, entraînant des fuites [33].

II.9. Apparition et développement de l'encrassement

II.9.1. Les processus fondamentaux de l'encrassement

Phénoménologiquement, l'encrassement est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes. Epstein [38] a décomposé les mécanismes d'encrassement selon 5 événements séquentiels :

II.9.1.1. L'initiation

L'initiation comme étant le temps nécessaire avant la formation du dépôt sur une surface propre. Il faut signaler que, dans la grande majorité des études expérimentales traitant de l'encrassement particulière sur des tubes d'échangeurs [39], la phase d'initiation du processus d'encrassement n'est pas détectée. Pendant l'initiation, la surface est conditionnée par l'encrassement qui aura lieu plus tard.

La température de surface, le matériau et la rugosité influencent le retard initial (l'induction) ou la période d'incubation. Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur la surface d'échange.

Beaucoup de travaux de recherche donnent de plus en plus l'importance à cette phase initiale avant la formation du noyau cristallin encrassant. Actuellement, l'un des principaux objectifs des chercheurs est de donner un modèle capable de décrire la phase d'initiation de l'encrassement. Parmi leurs objectifs : augmenter du temps d'induction (le plus long possible). L'utilisation de nouveaux matériaux de surface, tel que le DLC (Diamond-Like Carbon), permet de prolonger la phase d'induction [40].

La surface rugueuse tend à diminuer le délai de la période. Elle fournit une situation favorable pour la cristallisation pendant que les rainures fournissent des régions pour le dépôt des particules.

II.9.1.2. Transport

Pendant cette phase, les substances d'encrassements du volume de fluide sont transportées à la surface de transfert. Le transport est gouverné par un nombre de phénomènes y compris la diffusion, la sédimentation et la thermophorèse (thermophoresis). Une grande quantité d'information disponible pour chacun de ces phénomènes est appliquée pour étudier les mécanismes de transports pour les différentes catégories d'encrassement.

La thermophorèse est le mouvement de petites particules dans l'écoulement de fluide quand le gradient de température est présent. Les murs froids attirent les particules colloïdales pendant que les murs chauds repoussent ces particules. La thermophorèse est importante pour des particules autour de 5 μm de diamètre et devient dominante autour de 0.1 μm . Un autre type de ces processus est électrophorèse (electrophoresis). L'impact inertiel et les tourbillons de turbulence peuvent être présentés. Le modèle théorique qui expose ce processus est disponible dans la littérature [41].

II.9.1.3. Dépôt

Une partie de la matière encrassant transportée est attachée à la surface. Les forces agissantes des particules proches de la surface sont importantes à déterminer l'attachement. En plus, les propriétés du matériel tel que la densité, la viscosité et les conditions de surface sont importantes. L'adhésion des particules sous l'effet des forces de Van der Waals, des forces électrostatiques ou capillaires.

Les forces de London-Van der Waals sont dues aux interactions entre les moments dipolaires générés par le mouvement des électrons autour des noyaux d'atomes neutres voisins. Dans des fluides de phase unique, les forces résultantes entre particules et entre les particules et la paroi sont toujours attractives. Pour $d_p \leq 100 \mu\text{m}$, les forces de Van Der Waals l'emportent sur les forces de gravité. [42]

II.9.1.4. Le réentraînement (Enlèvement)

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

responsables de cet enlèvement. Les forces de cisaillement dépendent du gradient de la vitesse à la surface, de la viscosité du fluide et de la rugosité de la surface.

II.9.1.5. Le Vieillissement

Le vieillissement du dépôt caractérisé par un changement de texture et une usure dudit dépôt. Une fois le dépôt est posé sur la surface, le vieillissement commence. Les propriétés mécaniques de ce dépôt seront modifiées durant cette phase, à cause du changement de cristal ou de la structure chimique, par exemple, l'empoisonnement lent du micro-organisme causé par la corrosion à la surface affaiblira et appauvrira la couche du bio-encrassement. La réaction chimique attire la surface du dépôt pour modifier la composition chimique du dépôt, et de cette façon changer les propriétés mécaniques.

II.10. L'effet de l'encrassement dans l'industrie pétrolière

L'encrassement représente l'un des défis techniques et économiques les plus critiques au sein de l'industrie pétrolière. Ce phénomène, caractérisé par l'accumulation de dépôts indésirables (sels, coke, asphaltènes) sur les parois des équipements, dégrade significativement l'efficacité du transfert thermique. Sur le plan thermodynamique, ces dépôts agissent comme des isolants, imposant une surconsommation de combustible pour maintenir les températures de procédé, ce qui accroît l'empreinte carbone des installations. Parallèlement, la réduction de la section de passage des fluides engendre des pertes de charge hydrauliques majeures, sollicitant davantage les unités de pompage. Au-delà des pertes de performance immédiates, l'encrassement impose des arrêts de production fréquents pour maintenance et nettoyage, impactant lourdement la rentabilité opérationnelle et la durée de vie des équipements.

II.11. Processus d'encrassement

L'ensemble du processus d'encrassement est généralement considéré comme le résultat net de deux sous-processus simultanés ; un processus de dépôt et un processus de suppression (Figure II.6). Tous les sous-processus peuvent être résumés comme suit [43] :

- Formation de matériaux d'encrassement dans la masse du fluide.
- Transport de matières d'encrassement à l'interface dépôt-fluide.
- Réaction Attachement / formation à l'interface dépôt-fluide.
- Suppression du dépôt d'encrassement.
- Transport à partir de l'interface liquide-dépôt à la masse du fluide.

.

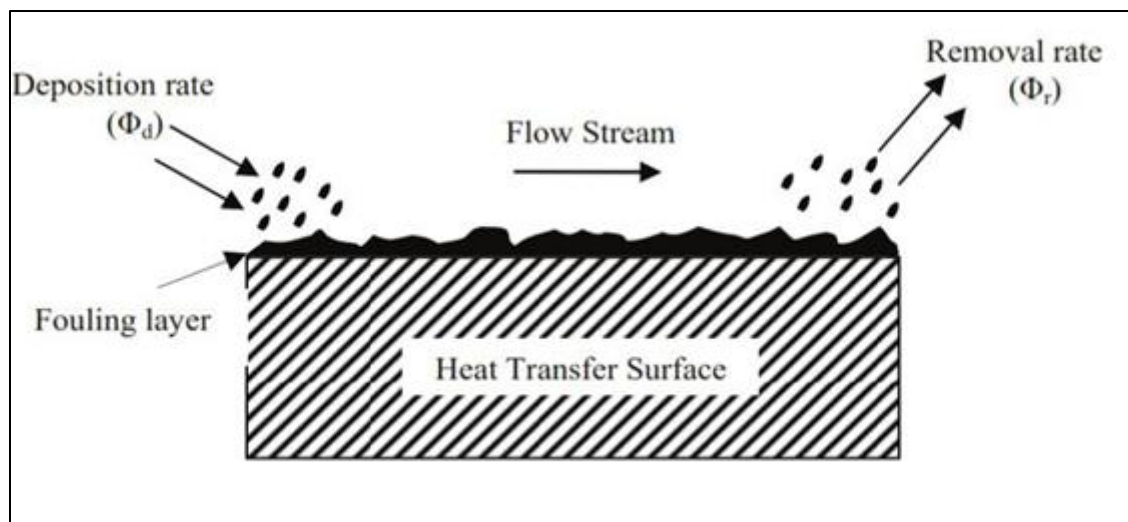


Figure II.6 : Formation de dépôt. [43]

II.12. Détection de l'encrassement

En régime permanent, l'encrassement peut être détecté par la simple analyse de la variation de l'efficacité.

Comparaison du rendement actuelle de l'échangeur par rapport aux caractéristiques du fabricant, aussi que la surface d'échange, la capacité thermique et le coefficient de transfert sale.[44]

Tableau II.1 : Caractéristiques géométriques des plaques. [44]

Matériau	Acier inoxydable
Conductivité thermique de la plaque	$16,3 \text{ w. m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Longueur	728 mm
Largeur	1 mm
Epaisseur	1 mm

II.13. Action de prévention – Remèdes

Il existe de nombreuses méthodes pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur, le choix de l'une ou de plusieurs de celle-ci dépend de l'efficacité de la méthode, du type d'encrassement et ainsi de nombreux paramètres économiques. Le tableau suivant résume les différentes actions pendant les quatre stades de vie de l'échangeur. [45]

Tableau II.2: Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur. [45]

Phase fonctionnement	Phase construction et montage	Phase fonctionnement	Phase d'arrêt
• Choix de type d'échangeur • choix de la géométrie et de la configuration • choix des conditions de fonctionnement (température, débit...)	• assurance qualité sur la fabrication • protection pendant le transport et lors du stockage • opération de nettoyage et de passivation.	• maintien des conditions de fonctionnement (températures, débit...) • prétraitement des fluides • utilisation d'additifs (inhibiteurs, antitartres, dispersants, acides)	• démontage et nettoyage manuel • attaque mécanique du dépôts (perçage...) • nettoyage hydraulique à la lance (vapeur, air)

Pendant la phase de dimensionnement

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

- quel est le type d'échangeur le mieux adapté au problème posé ?
- quels sont les paramètres physiques qui permettent de réduire la tendance à l'encrassement ?

A/ Sensibilité à l'encrassement des divers types d'échangeurs

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

B/ Paramètres physiques permettant de réduire la tendance à l'encrassement

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

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

Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route

La construction des équipements de transfert thermique peut s'étendre sur une durée relativement longue et les surfaces d'échange sont alors exposées à des conditions diverses. L'encrassement peut être initié lorsque les essais sous pression de l'échangeur sont réalisés avec une eau de mauvaise qualité, non suffisamment rincée à l'eau propre et à l'azote. En conséquence, il est nécessaire de protéger les surfaces d'échange de tout environnement favorisant la corrosion ou le dépôt.

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

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

de débit pour pouvoir suivre l'évolution du degré d'encrassement et agir en conséquence lors d'un arrêt prolongé de l'installation, il faut prendre des précautions nécessaires (vidange, mise sous vide, traitement, ...) pour éviter, d'une part la corrosion rapide des surfaces et d'autre part l'apparition d'un encrassement biologique de l'appareil.[46]

Pendant la phase de fonctionnement

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

Au moment de l'arrêt de l'échangeur

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

II.14. Nettoyage d'une chaudière

Dans de nombreux cas, que les techniques de traitement des fluides et de nettoyage en continu soient ou non utilisées, il est nécessaire de procéder à un nettoyage complet de l'appareil.

II.14.1. Nettoyage mécanique

Le nettoyage mécanique pendant les phases d'arrêts peut être effectué sur l'échangeur en place lorsque l'espace disponible le permet ou sur une aire de nettoyage (échangeur démonté), plusieurs techniques peuvent être mise en œuvre :

- **Nettoyage à l'eau sous pression**

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

- **Nettoyage à l'aide d'outils**

Cette technique est utilisée pour enlever les dépôts mêmes très durs à l'intérieur des tubes rectilignes de chaudières, de condenseurs, ou de tous autres échangeurs de chaleur. Ces outils peuvent être :

- A moteur d'entraînement électrique ou pneumatique entraînant une transmission flexible en rotation à l'extrémité de laquelle sont montés des outils tels que : des outils à molettes travaillant par frappe élastique, des outils à lames ou à éléments expansibles travaillant par grattage, des écouvillons (ou brosses).
- A moteur d'entraînement pneumatique pénétrant dans les tubes, montés à l'extrémité d'un tuyau d'alimentation en air, les outils utilisés :
 - Outils à molettes.
 - Outils à lames.
 - Tarières sur joint de cadran pour casser les dépôts durs.
- A moteur d'entraînement pneumatique ou électrique à percussion entraînant des tubes épais rabotant entre eux et à l'extrémité desquels sont montés les outils de nettoyage :
 - Taillant pour enlèvement de dépôts très durs et épais.
 - Trépans pour enlèvement de tous dépôts.
 - Traceurs pour enlèvement de certains dépôts mous ou pâteux.
 - Ecouvillons.
 - Mèches hélicoïdales pour enlèvement de dépôts collants.
- Pistolet hydraulique (pression d'utilisation : 6 à 15 bars) propulsant des écouvillons spéciaux dans les tubes : ils permettent d'enlever des dépôts de boues ou d'algues dans des tubes déperit diamètres. [47]

II.14.2. Nettoyage hydraulique

Le nettoyage hydraulique utilise des jets d'eau à très haute pression (700 à 2800 bars) pour désintégrer et éliminer les dépôts. Cette méthode est très efficace contre les encrassements tenaces et convient aux échangeurs tubulaires. Bien qu'écologique car utilisant de l'eau pure, elle nécessite l'arrêt et l'ouverture de l'équipement, et présente un risque d'endommagement si la pression est mal gérée.

II.14.3. Nettoyage chimique

Nettoyage chimique Il présente de nombreux avantages :

- Opération rapide et efficace.
 - Les surfaces d'échange ne subissent pas de dégâts mécaniques importants.
 - Les solutions chimiques pénètrent jusqu'aux zones, inaccessibles de l'échangeur et le traitement de toute la surface d'échange est réalisé.
 - Il nécessite moins de main d'œuvre et peut se réaliser sans démontage de l'appareil.
- [48]

II.14.4. Nettoyage par projectile

Consiste à propulser un projectile (brosse en nylon, racleur plastique ou métallique) à travers les tubes de l'échangeur avec de l'air ou de l'eau sous pression. Cette technique est rapide et très efficace pour les grands faisceaux tubulaires droits, notamment pour les dépôts mous à moyens. Ses limites résident dans son inadaptation aux tubes coudés ou aux échangeurs à plaques.

II.15. Conclusion

L'encrassement des échangeurs de chaleur représente un phénomène complexe aux conséquences multiples : perte d'efficacité thermique, augmentation des pertes de charge, surconsommation énergétique et risques de corrosion. La diversité des mécanismes en cause – particulaire, chimique, biologique, ou encore l'entartrage – nécessite une approche adaptée à chaque situation.

Parmi ces formes, l'entartrage, lié à la précipitation de sels minéraux, demeure l'une des plus dommageables en raison de son adhérence et de sa faible conductivité thermique. La compréhension des étapes successives de l'encrassement (initiation, transport, dépôt, réentraînement et vieillissement) est essentielle pour anticiper son apparition et optimiser les moyens de prévention.

La maîtrise de ce phénomène repose sur des actions complémentaires : choix des matériaux, conception adaptée, traitement des fluides, suivi des performances et mise en œuvre de méthodes de nettoyage adaptées. Une approche intégrée, combinant prévention et maintenance, permet de limiter les impacts économiques et opérationnels tout en prolongeant la durée de vie des équipements.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

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

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

III.2 But de l'étude

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

III.3. Méthodologie de l'étude

Le travail sera réalisé par :

- Suivi les paramètres suivants :

Paramètres donnés :

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

Paramètres mesurés :

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

III.4. Méthodes et matériaux

III.4.1. Méthodes

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

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

III.4.2. Matériaux utilisés

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

III.4.2.1 Préparation des échantillons

- Choix des plaques
- Acier C 1020



Figure III.1: Échantillon en acier avant traitement.

Définition

Le C 1020 est un produit en acier Il est obtenu par voie électrolytique et est utilisé comme emballage. Il est concurrencé par l'aluminium, en particulier pour la fabrication des boîtes-boisson.

Tableau III.1: Caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques acier C :1020

Catégorie	Propriété	Valeur Indicative
Physique	Densité	7 850 kg/m ³
	Point de fusion	1 482 – 1 521 °C
Mécanique	Limite d'élasticité (R)	350 MPa
	Résistance à la traction (R)	410 – 440 MPa
	Module d'élasticité (Young)	205 GPa
	Dureté Brinell	121 HB (recuit)
	Allongement à la rupture	15 %
Thermique	Conductivité thermique	51,9 W/(m·K)
	Coefficient de dilatation thermique	$11,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
	Chaleur spécifique	477 J/(kg·K)

▪ Découpages des plaques

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

▪ Polissage des plaques

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



Figure III.2: échantillon après le découpage et polissage.

- **Pesée les plaques**

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



Figure III.3: exemple de deux échantillons sur la balance.

III.4.2.2 Matière encrassée et entartrée

- **Le fluide encrassant**
- **Huile lubrifiante 10W40**

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

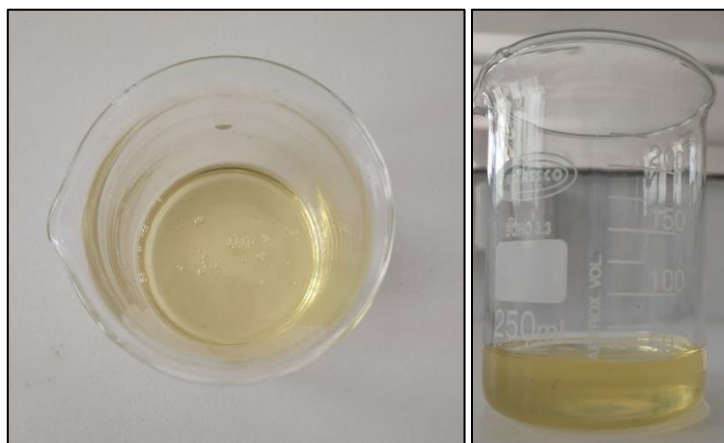


Figure III.4: huile 10W40 propre avant l'utilisation.

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

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

- **CaCl_2**

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

Le chlorure de calcium est largement utilisé comme agent de dessiccation, antigel, durcisseur de fromage, agent de séchage, etc. Ses propriétés hygroscopiques lui permettent d'éliminer l'humidité de l'air, ce qui le rend utile dans les produits déshydratants et les systèmes de réfrigération.

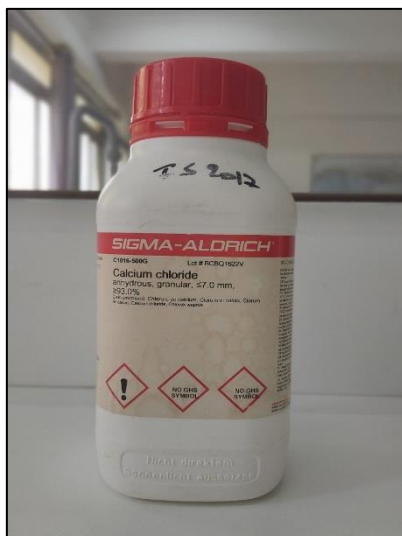


Figure III.5: chlorure de calcium CaCl_2 .

- NaHCO_3

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

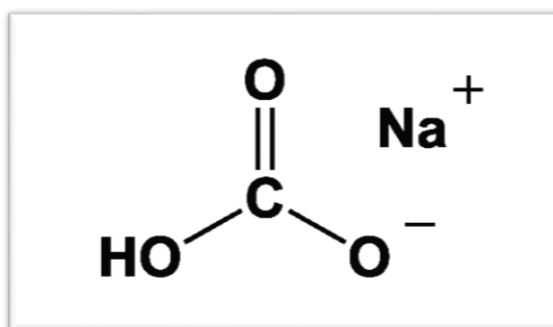


Figure III.6: structure de NaHCO_3 .

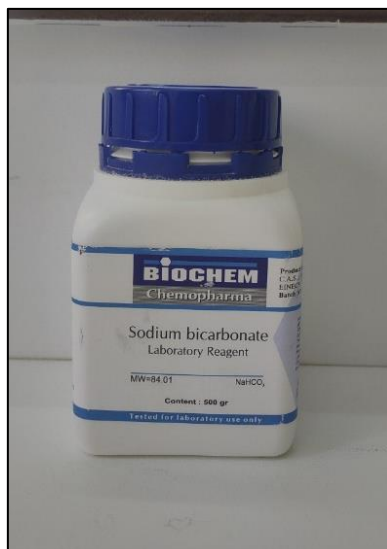


Figure III.7: poudre de bicarbonate de sodium.

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

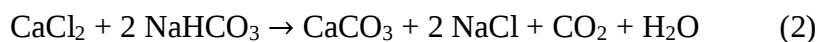
- **Description de la préparation du tartre**

Mélanger 10 g de CaCl_2 (poudre blanche) avec 10 g de bicarbonate de soude (poudre blanche) dans un bécher, puis ajouter 80 mL d'eau du robinet afin d'obtenir une pâte. Ensuite, introduire un échantillon propre après polissage, puis déposer le mélange sur une plaque chauffante à 250 °C pendant 30 minutes. À la fin, récupérer un échantillon entartre caractérisé par la déposition d'une couche de tartre.



Figure III.8: chlorure de calcium et bicarbonate de sodium.

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



III.4.2.3. Choix des solutions

- **La soude NaOH**

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

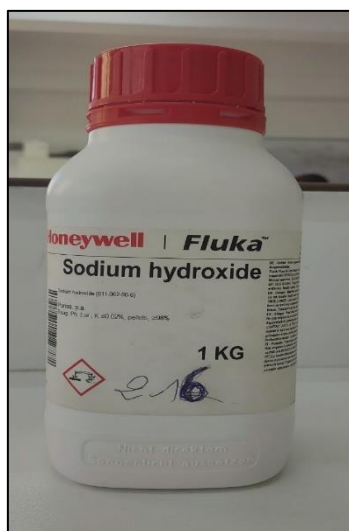


Figure III.9: Hydroxyde de sodium utilisé dans le protocole de nettoyage.

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

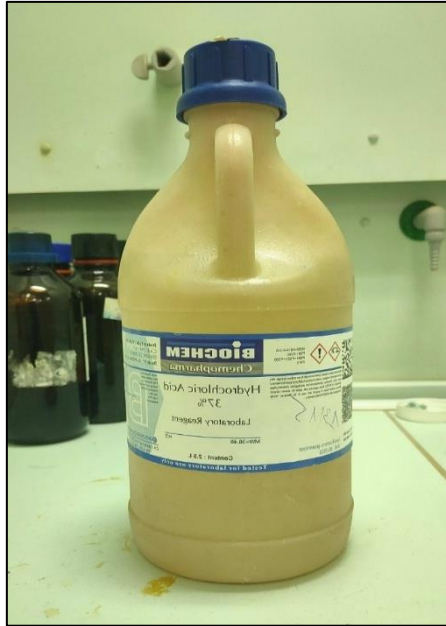


Figure III.10: Acide chlorhydrique (HCl) utilisé pour l'élimination des dépôts.

III.4.2.4. Préparation des solutions

- **La soude NaOH**

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

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

1. solution de concentration 0.5 % de NaOH :

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

$$m_1 \longrightarrow 0.5 \%$$

$$m_1 = 1.25\text{g}$$

2. solution de concentration 1% de NaOH :

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

$$m_1 \longrightarrow 1 \%$$

$$m_1 = 2.5\text{g}$$

3. solution de concentration 2% de NaOH :

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

$$m_1 \longrightarrow 2\%$$

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

4. solution de concentration 3% de NaOH :

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

$$m_1 \longrightarrow 3\%$$

$$m_1 = 7.5\text{g}$$

5. Solution de concentration 5% de NaOH :

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

$$m_1 \longrightarrow 5\%$$

$$m_1 = 12.5\text{g}$$

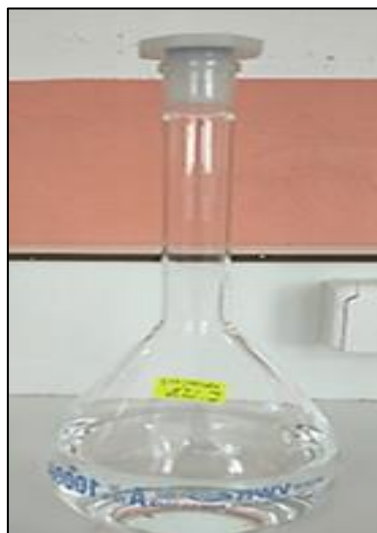


Figure III.11: solution aqueuse de NaOH.

- **L'acide chlorhydrique HCl**

La solution aqueuse de l'acide chlorhydrique doit être préparée à partir des paramètres du flacon de HCl concentré qui indiquent (une densité $d= 1.2$; masse molaire $M= 36.5$; une pureté $p= 37\%$), On a préparé 6 solutions de L'acide chlorhydrique HCl de différente concentration pour prendre une concentration d'HCl on a calculé le volume de chaque concentration avec les lois suivantes :

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

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

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

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

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

$$V_1 = \frac{0.25}{37} \times 500$$

$$V_1 = 3.38 \text{ ml}$$

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

$$V_1 = \frac{0.5}{37} \times 500$$

$$V_1 = 6.67 \text{ ml}$$

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

$$V_1 = \frac{0.75}{37} \times 500$$

$$V_1 = 10.14 \text{ ml}$$

4. solution de concentration 1 % d'HCl :

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

$$V_1 = 13.52 \text{ ml}$$

5. solution de concentration 3 % d'HCl :

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

$$V_1 = 40.56 \text{ ml}$$

6. solution de concentration 5 % d'HCl :

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

$$V_1 = 67.6 \text{ ml}$$



Figure III.12: solution aqueuse de HCl.

III.5 Mode opératoire**III.5.1 L'encrassement**

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



Figure III.13: échantillons au cours d'encrassement.

III.5.2 L'entartrage

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



Figure III.14: pesé 10g de NaHCO_3 et 10g de CaCl_2 .

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

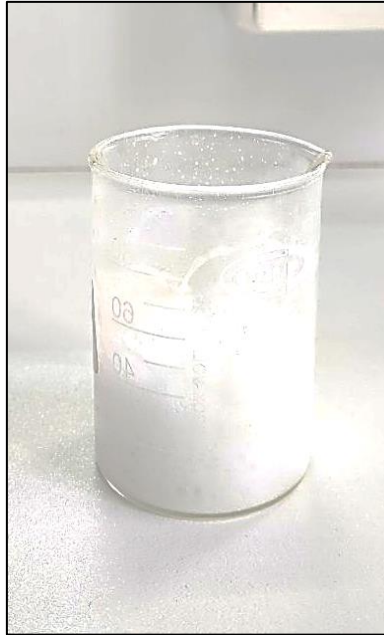


Figure III.15: 10g de NaHCO_3 + 10g de CaCl_2 après l'addition de l'eau.

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



Figure III.16: formation du tartre après 30 min de chauffage.

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

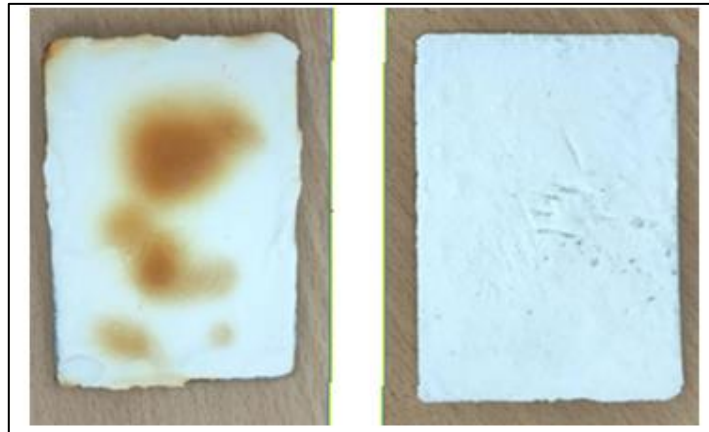


Figure III.17: le dépôt du tartre après huit jours de séchage.

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

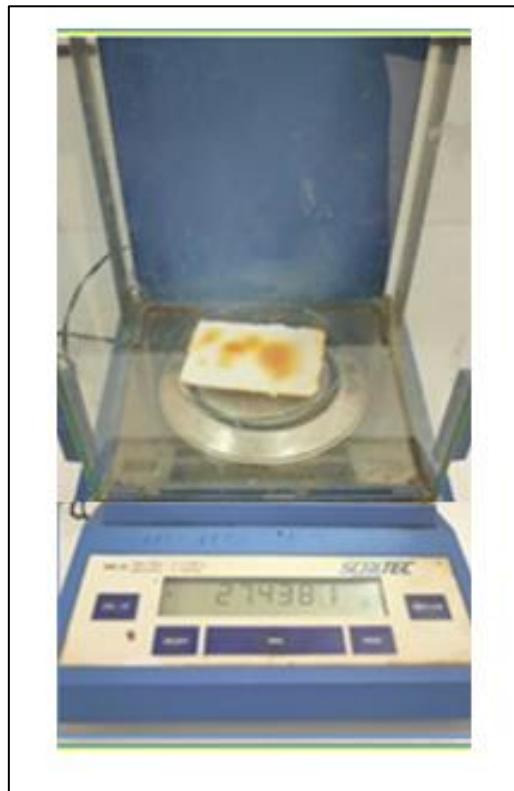


Figure III.18: pesé un échantillon entartré.

III.6 Protocole de nettoyage chimique

Nous avons suivi les protocoles suivants au niveau de laboratoire

III.6.1 Protocoles de nettoyage de l'entartrage

Protocole 01

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

Tableau III.2: Différents concentration des expériences

Echantillons	Solutions	
	NaOH(%)	HCL(%)
Entartrage	2	0.25
	1	0.25
	3	0.25
	5	0.25
	5	0.5



Figure III.19: Nettoyage d'échantillons entartrés.

III.6.2 Protocole de nettoyage de l'encrassement des huiles

Protocole 01

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

Tableau III.3: Concentrations des solutions de NaOH utilisées pour le nettoyage.

Echantillon	Solutions
	NaOH (%)
Encrassements	2
	3
	5

Protocole 02

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

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

Echantillon	Solutions
	HCl(%)
ENC	0.25
	0.5
	0.75
	1
	3
	5

Protocole 03 :

- Cet essai a été réalisé selon le protocole 02, en utilisant des solutions d'HCl de différentes concentrations : 1 %, 3 % et 5 %.
- Contrairement à l'expérience précédente, l'échantillon a été laissé dans la solution pendant 24 minutes à une température de 30°C.
- À la fin de chaque essai, l'échantillon a été retiré puis pesé afin d'étudier l'effet de la concentration de HCl et du temps de nettoyage sur la diminution de sa masse.

Tableau III.5: Effet de la concentration de HCl après 24 min.

	Solutions
Echantillon	HCL(%)
Encrassement	1
	3
	5

Protocole 04 :

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

Tableau III.6 : Concentrations des solutions de nettoyage utilisées pour l'échantillon encrassé (ENC).

	Solutions	
Echantillon	NaOH(%)	HCL(%)
ENC	5	1
		3
		5

Protocole 05:

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

Tableau III.7: Concentrations de NaOH et de HCl utilisées pour le nettoyage de l'échantillon ENC.

Echantillon	Solutions	
	NaOH(%)	HCL(%)
ENC	5	5

III.7. Résultats et interprétations

Les expériences appliquées aux échantillons ont abordé aux résultats suivants :

- **Résultats du protocole 1**

Tableau III.8: résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

temps(min)	Solutions	
	NaOH (2%)	HCl (0,25%)
3	15,15	9,61
6	12,82	7,235
9	11,52	6,02
12	10,18	5,21

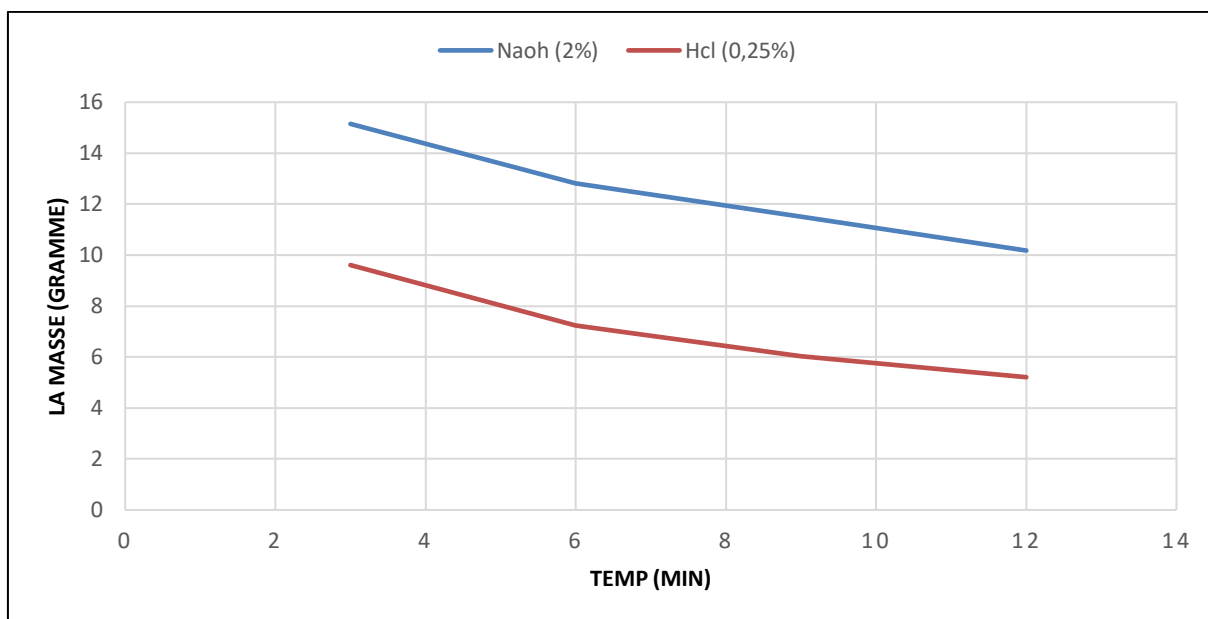


Figure III.20: Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (2 %) et HCl (0.25 %).

Échantillon entartrés

Interprétation des résultats Protocole 1 (NaOH 2 % vs HCl 0,25 %)

Les résultats montrent une diminution continue de la masse du dépôt avec l'augmentation du temps de nettoyage pour les deux solutions. La perte de masse est plus importante avec HCl 0,25 % qu'avec NaOH 2 %, ce qui traduit une meilleure efficacité de l'acide dans l'élimination du tartre. Cette différence s'explique par la nature essentiellement minérale du tartre, constitué principalement de carbonate de calcium (CaCO_3), qui réagit directement avec l'acide chlorhydrique selon une réaction de dissolution. En revanche, la soude agit principalement sur les matières organiques et présente donc une efficacité plus limitée sur les dépôts calcaires. Les résultats montrent également que la vitesse de dissolution est plus importante au début du traitement, puis ralentit progressivement à mesure que la quantité de tartre diminue.

▪ Résultats du protocole 2

Tableau III.9: résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

temps(min)	Solutions	
	NaOH (1%)	HCl (0,25%)
3	6,64	5,8
6	6,34	5,65
9	6,15	5,53
12	5.96	5,43

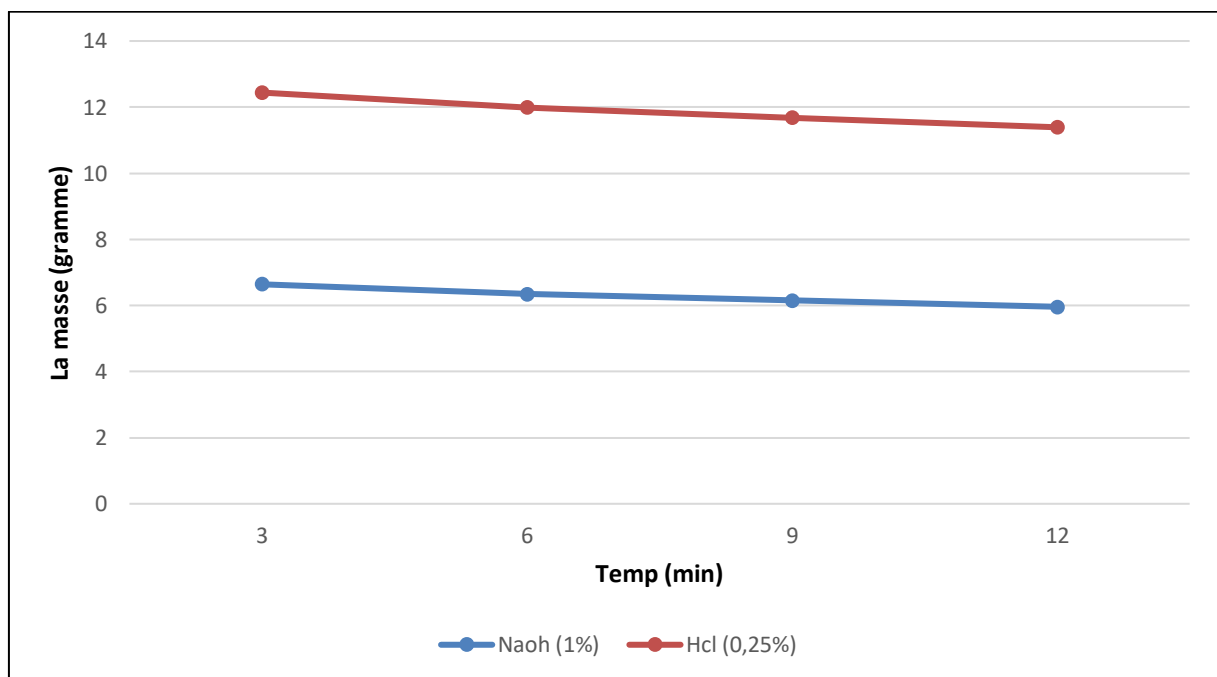


Figure III.21 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (1 %) et HCl (0.25 %).

- **Interprétation des résultats Protocole 2 (NaOH 1 % vs HCl 0,25 %)**

La diminution de la masse reste faible pour les deux solutions, traduisant une élimination limitée du dépôt. Cette faible efficacité est principalement liée à la faible concentration de NaOH (1 %), insuffisante pour favoriser une dissolution rapide des matières organiques éventuellement présentes dans le dépôt. Malgré sa faible concentration, HCl conserve une meilleure efficacité grâce à son action directe sur les carbonates constituant le tartre. Ces résultats montrent que la concentration de la solution de nettoyage constitue un facteur déterminant de l'efficacité du procédé.

- **Résultats du protocole 3**

Tableau III.10 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

temps(min)	Solutions	
	NaOH (3%)	HCl (0,25%)
3	5.13	5.697
6	4,93	4,669
9	4,8	4,657
12	4,74	4,649

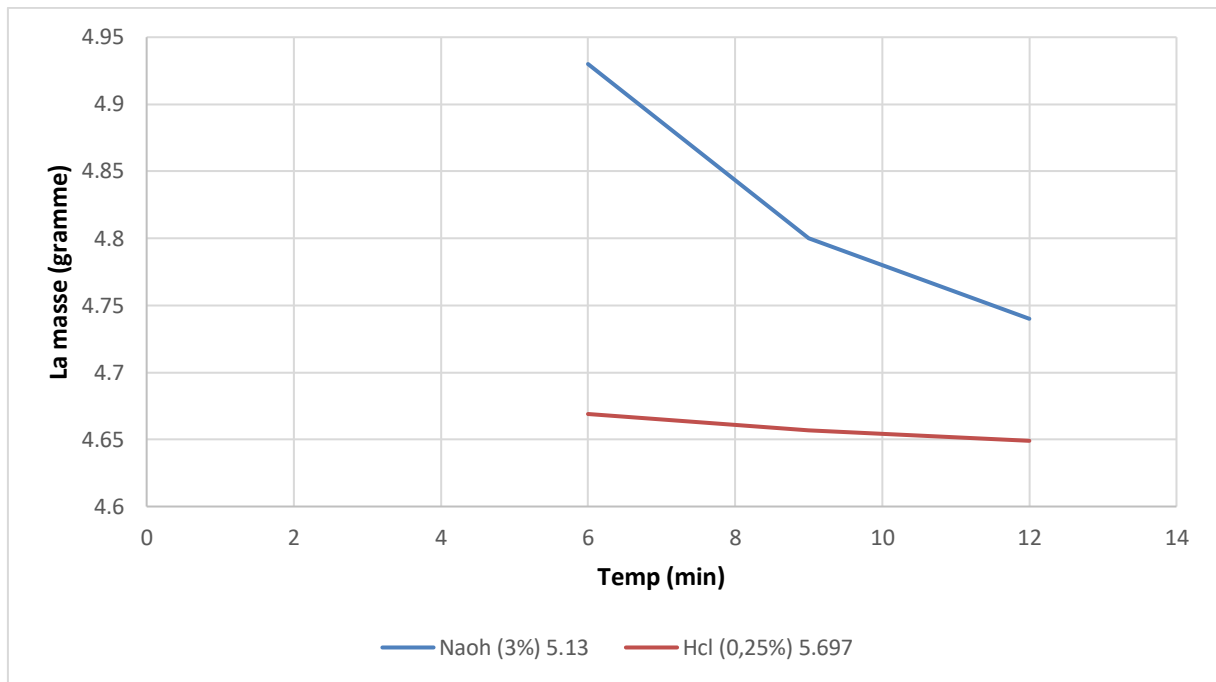


Figure III.22 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (3 %) et HCl (0.25 %).

- Interprétation des résultats Protocole 3 (NaOH 3 % vs HCl 0,25 %)**

L'augmentation de la concentration de NaOH de 1 % à 3 % améliore légèrement l'élimination du dépôt, ce qui confirme que l'efficacité de la soude dépend de sa concentration. Toutefois, HCl conserve une diminution de masse comparable malgré une concentration beaucoup plus faible, ce qui confirme sa plus grande capacité à dissoudre les dépôts calcaires. Les faibles variations observées après 6 minutes suggèrent que la majeure partie du tartre facilement accessible est éliminée durant les premières minutes du traitement.

▪ Résultats du protocole 4

Tableau III.11 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

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

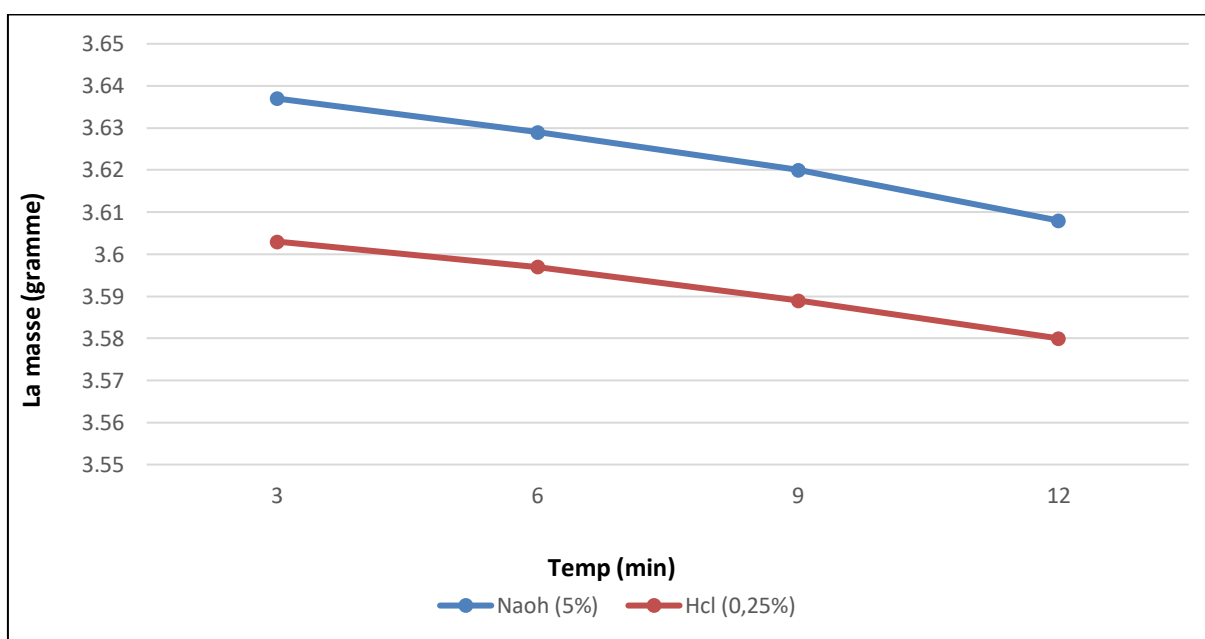


Figure III.23 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5 %) et HCl (0.25 %).

• Interprétation des résultats Protocole 4 (NaOH 5 % vs HCl 0,25 %)

Les variations de masse deviennent très faibles entre 3 et 12 minutes. Cette stabilisation indique que la majeure partie du dépôt a déjà été éliminée et que le nettoyage atteint progressivement un état proche de l'équilibre. L'augmentation de la concentration de NaOH à 5 % n'entraîne donc qu'un gain limité, probablement parce que la quantité résiduelle de tartre devient faible et

moins accessible aux solutions de nettoyage. Les deux solutions présentent ainsi des performances relativement proches en fin de traitement.

▪ **Résultats du protocole 5**

Tableau III.12 : résultats de nettoyage d'un échantillon entarté.

temps(min)	Solutions	
	NaOH (5%)	HCl (0,5%)
3	4,576	4,571
6	4,575	4,532
9	4,574	4,518
12	4,573	4,518

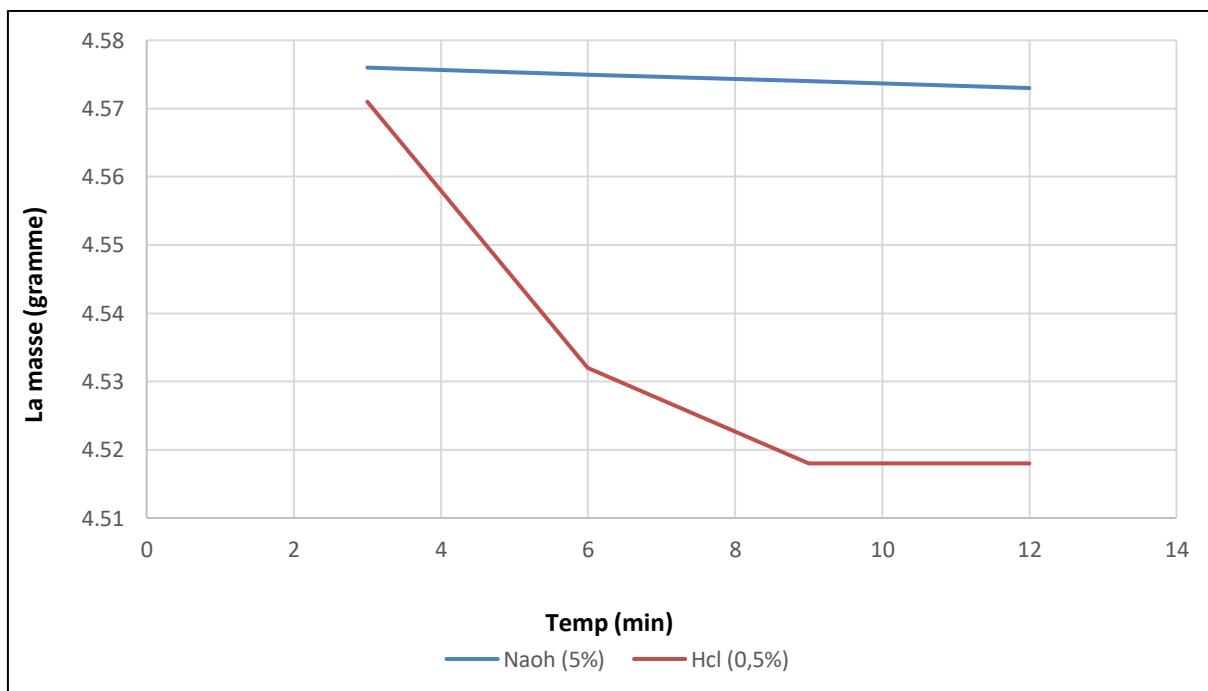


Figure III.24 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5 %) et HCl (0.5 %).

- **Interprétation des résultats Protocole 5 (NaOH 5 % vs HCl 0,5 %)**

La masse reste pratiquement constante avec NaOH 5 %, alors qu'une légère diminution supplémentaire est observée avec HCl 0,5 %. Cette évolution montre que l'augmentation de la concentration de HCl améliore encore la dissolution du tartre résiduel. À l'inverse, l'augmentation de la concentration de NaOH n'apporte pratiquement plus de bénéfice, ce qui confirme que la soude est moins adaptée à l'élimination des dépôts calcaires. Ces résultats mettent en évidence que HCl reste le réactif le plus efficace pour le détartrage.

Échantillon encrassé

- **Résultats du protocole 1**

Tableau III.13: résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.

temps(min)	Solutions		
	NaOH (2%)	NaOH (3%)	NaOH (5%)
3	4,658	4,663	4,661
6	4,657	4,661	4,66
9	4,655	4,658	4,659
12	4,653	4,655	4,657

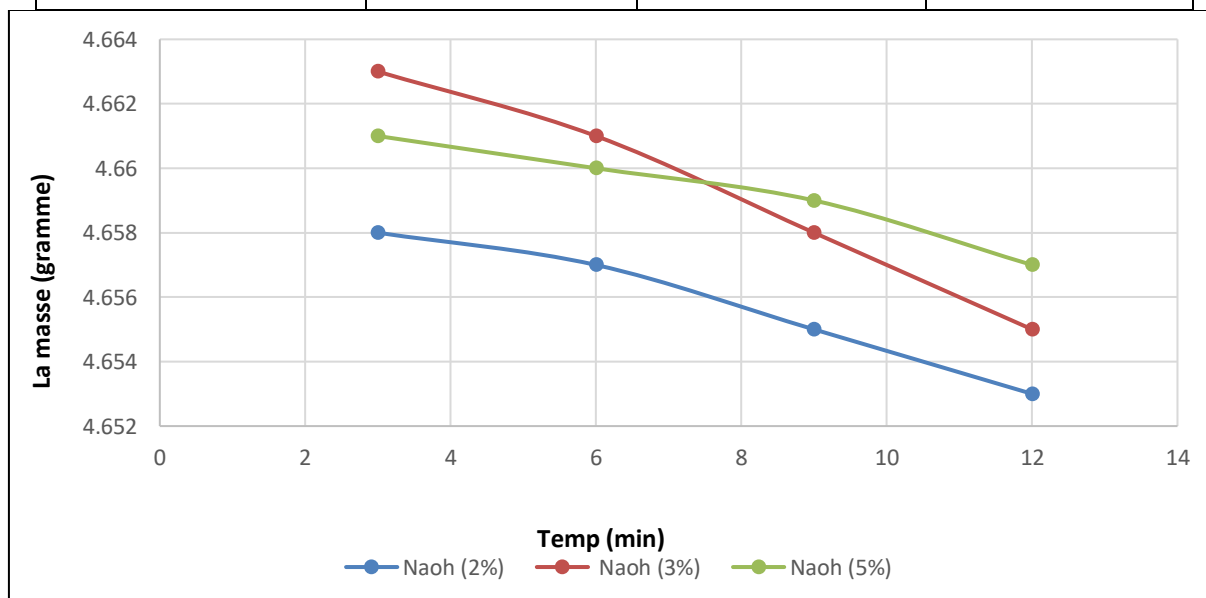


Figure III.25 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (2% 3% et 5%).

Échantillon encrassés

• Interprétation des résultats Protocole 1 (NaOH 2 %, 3 % et 5 %)

Les trois concentrations de NaOH conduisent à une diminution très faible de la masse. Les différences entre 2 %, 3 % et 5 % restent limitées, ce qui indique que l'augmentation de la concentration améliore peu l'efficacité du nettoyage dans les conditions expérimentales. Cette faible évolution peut s'expliquer par la nature de l'encrassement, dont une partie est peu sensible à l'action alcaline ou fortement adhérente à la surface. Le temps de contact apparaît ainsi comme un facteur plus influent que la concentration de NaOH.

▪ Résultats du protocole 2

Tableau III.14 : résultats de nettoyage d'un échantillon encrassé.

Hcl(%)	0,25	0,5	0,75	1	3	5
La masse	4,659	4,658	4,656	4,655	4,652	4,65

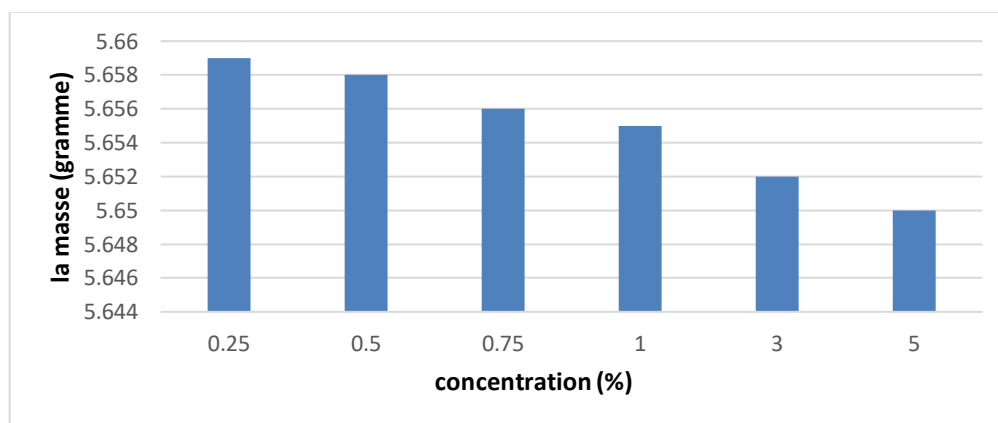


Figure III.26 : Évolution de la masse du dépôt en fonction de la concentration pour les solutions de HCl (0.25 % 0.5% 0.75% 1% 3% et 5%).

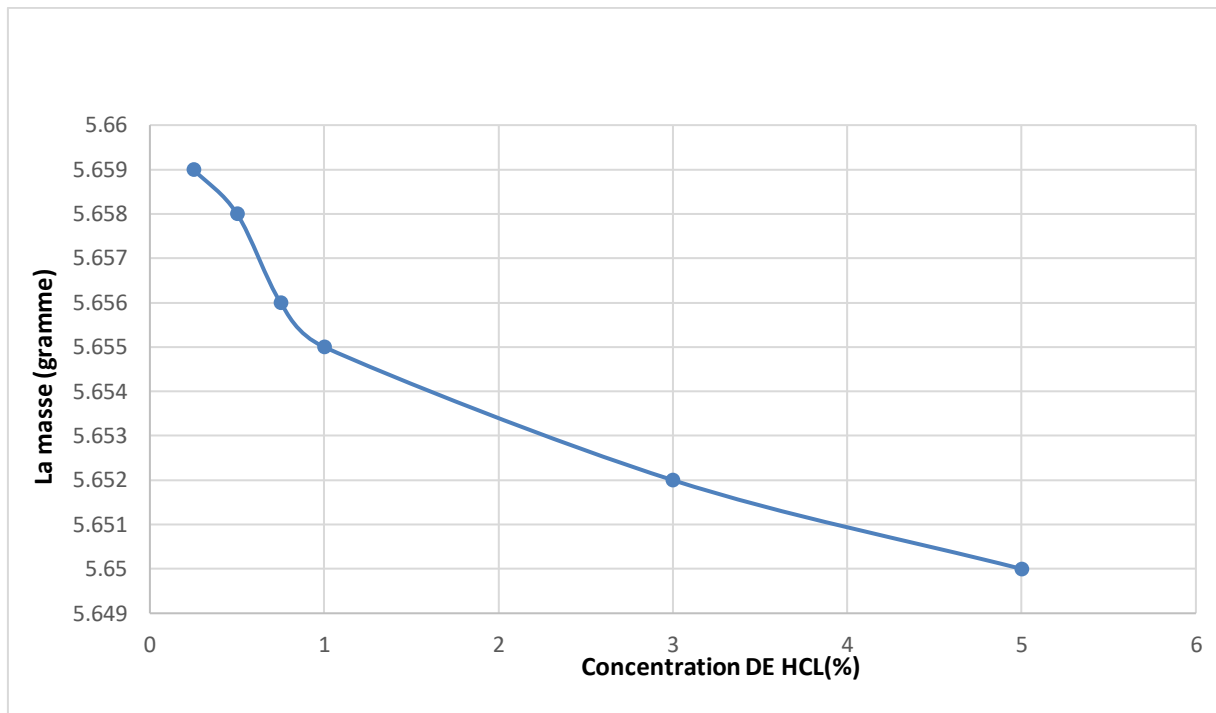


Figure III.27 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (0.25 % 0.5% 0.75% 1% 3% et 5%).

- **Interprétation des résultats Protocole 2 (Influence de la concentration de HCl)**

L'augmentation progressive de la concentration de HCl de 0,25 % à 5 % entraîne une diminution régulière de la masse résiduelle. Cette évolution montre que l'efficacité du nettoyage augmente avec la concentration en acide. En effet, une concentration plus élevée fournit davantage d'ions H^+ capables de dissoudre les dépôts minéraux présents dans l'encrassement. Les résultats mettent ainsi en évidence une relation directe entre la concentration de HCl et les performances du nettoyage.

▪ Résultats du protocole 3

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

Temps(min)	Solutions		
	HCl1 %)	HCl (3%)	HCl (5%)
24	4,654	4,649	4,641

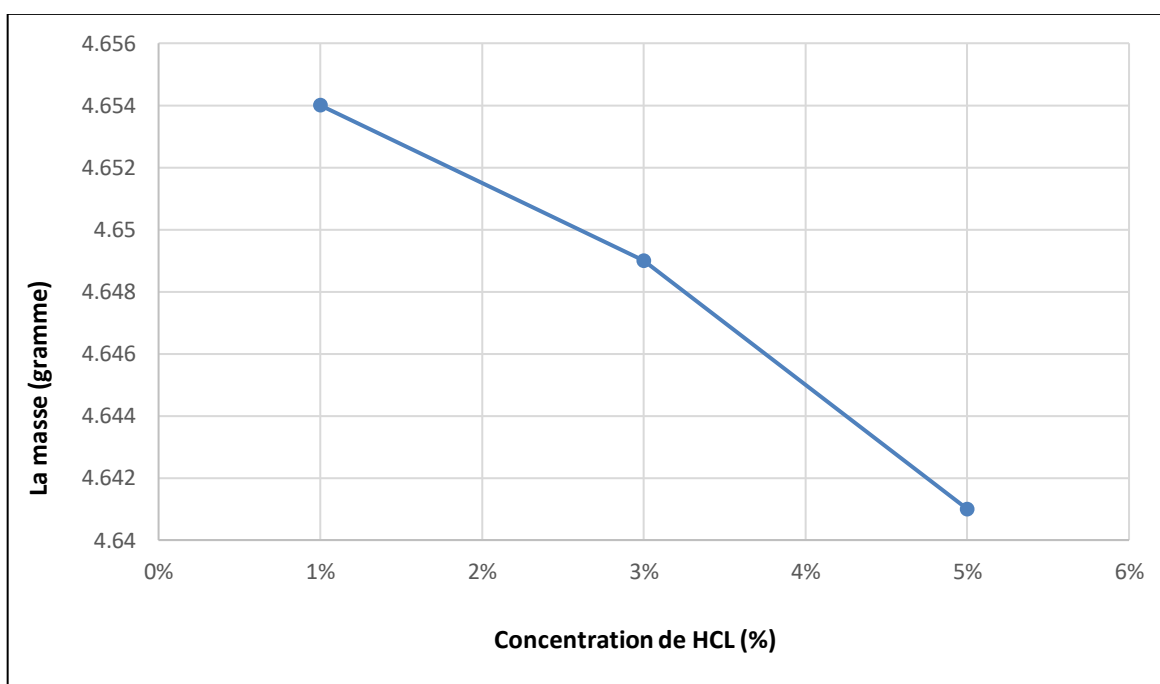


Figure III.28 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de HCl (1% 3% et 5%).

• Interprétation des résultats Protocole 3 (HCl 1 %, 3 % et 5 %)

Les résultats confirment que l'augmentation de la concentration de HCl améliore l'élimination des dépôts. La masse résiduelle diminue progressivement lorsque la concentration passe de 1 % à 5 %. Cette amélioration traduit une accélération des réactions de dissolution des composés minéraux, favorisée par une concentration plus importante en ions H^+ . Les performances obtenues avec HCl 5 % montrent que cette concentration est la plus efficace parmi celles étudiées.

▪ **Résultats du protocole 4 :**

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

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

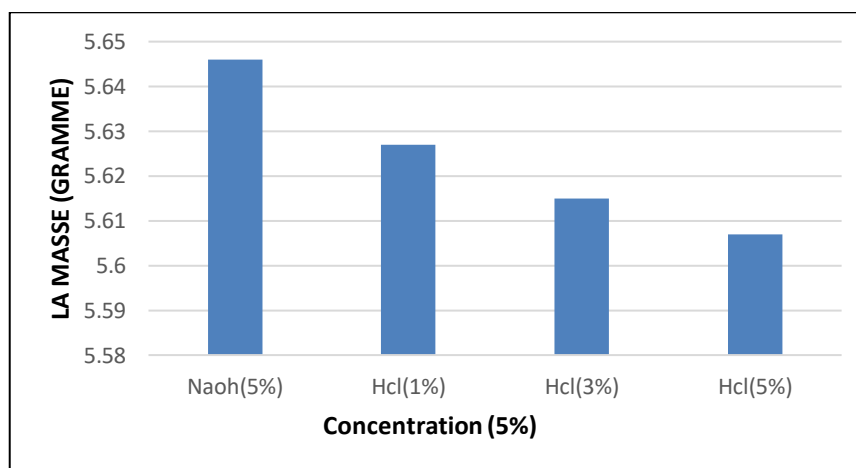


Figure III.29 : Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5%) et HCl (1% 3% et 5%).

• **Interprétation des résultats Protocole 4 (NaOH 5 % comparé à HCl)**

La comparaison des différentes solutions montre que les traitements à l'HCl conduisent systématiquement à des masses résiduelles plus faibles que NaOH 5 %. De plus, l'efficacité augmente avec la concentration d'HCl. Ces résultats indiquent que les dépôts présents sont majoritairement de nature minérale, ce qui explique la meilleure efficacité de l'acide chlorhydrique par rapport à la soude. HCl 5 % apparaît ainsi comme la solution la plus performante dans les conditions étudiées.

▪ Résultats du protocole 5

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

Temps(min)	Solutions	
	NaOH (5%)	HCl (5%)
24	3,606	3,574

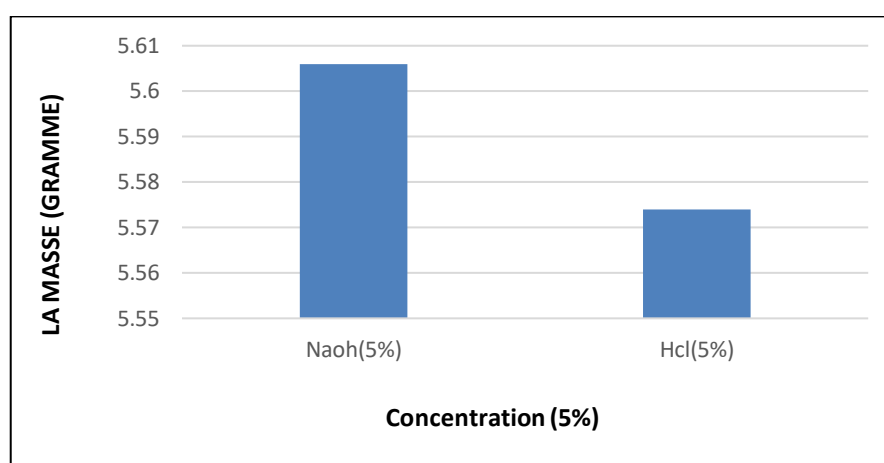


Figure III.30: Évolution de la masse du dépôt en fonction du temps de nettoyage pour les solutions de NaOH (5%) et HCl (5%).

• Interprétation des résultats Protocole 5 (NaOH 5 % vs HCl 5 % à 24 min)

L'allongement du temps de traitement jusqu'à 24 minutes permet une réduction supplémentaire de la masse résiduelle pour les deux solutions. Toutefois, la diminution est plus importante avec HCl 5 %, ce qui montre que l'acide continue de dissoudre les dépôts même après un temps de nettoyage prolongé. La soude atteint plus rapidement un plateau d'efficacité, tandis que HCl conserve une activité de dissolution plus élevée. Ces résultats confirment que le temps de contact et la concentration de HCl constituent deux paramètres essentiels pour optimiser le nettoyage des surfaces encrassées.

III.8. Conclusion

Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité du nettoyage chimique dépend principalement de la nature du dépôt, de la concentration des solutions utilisées, du temps de contact et de la température. La soude (NaOH) a présenté une bonne efficacité pour l'élimination des dépôts organiques et huileux, tandis que l'acide chlorhydrique (HCl) s'est révélé plus performant pour la dissolution du tartre. L'augmentation de la concentration et de la température a permis d'améliorer les performances de nettoyage. Cette étude a permis de proposer un protocole de nettoyage chimique applicable aux échangeurs de chaleur, afin de limiter les phénomènes d'encrassement et d'entartrage, d'améliorer les performances des équipements et de réduire les coûts de maintenance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a permis d'associer efficacement l'étude théorique des systèmes de transfert thermique à la résolution pratique du problème majeur que constitue leur encrassement en milieu industriel. L'analyse technologique a mis en évidence que, quelle que soit la diversité des échangeurs utilisés dans les procédés, leur efficacité à long terme reste entièrement tributaire de la propreté de leurs parois, un aspect constamment menacé par la cinétique d'encrassement à travers ses étapes d'initiation, de transport, de dépôt, de réentraînement et de vieillissement. Pour répondre aux conséquences néfastes de ce phénomène sur la productivité globale, la phase expérimentale menée sur des éprouvettes en acier AISI 1020 a permis de concevoir une solution concrète de maintenance par voie chimique appliquée à l'échangeur E115. Les essais de lessivage sur des échantillons préalablement encrassés par un fluide huileux (10w40) ont démontré que l'efficacité du nettoyage repose sur un équilibre fragile. Les solutions trop concentrées en réactifs entraînent une attaque acide excessive et une perte de masse critique du substrat, tandis que la réduction des concentrations et la maîtrise des temps de contact améliorent nettement la sélectivité du traitement. Le protocole optimal retenu, combinant l'action successive d'une solution basique de NaOH à 4 % pendant 10 minutes à 80 °C et d'une solution acide de HCl à 3 % pendant 5 minutes à 30 °C, assure une élimination efficace du dépôt tout en protégeant le métal sain. Cette approche validée fournit une base technique solide pour la mise en œuvre future d'un système de nettoyage en place (CIP) automatisé sous des conditions de circulation contrôlées, garantissant la durabilité et la sobriété énergétique des installations de grande envergure.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] F. Bouzid, Simulation thermique d'un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire et calandre, Mémoire de master, 2018.
- [2] « Échangeur de chaleur », Wikipédia. [En ligne]. Disponible : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur_de_chaleur
- [3] « Les échangeurs de chaleur », Encyclopédie de l'Énergie. [En ligne]. Disponible : <https://www.encyclopédie-energie.org/les-echangeurs-de-chaleur/>
- [4] J.-F. Sacadura, Initiation aux transferts thermiques, Paris : TEC & DOC.
- [5] M. Mekcem, Dimensionnement d'un échangeur à tube et calandre de l'unité de décarbonatation du complexe GL1 Skikda, Mémoire de master, Université d'Annaba, 2017.
- [6] S. Y. Chung and H. J. Sung, « Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow, Part 2: Heat transfer », International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 24, pp. 399–411, 2003.
- [7] M. Bouchemal et H. Laouici, Modélisation des échangeurs de chaleur, Mémoire de master, 2018.
- [8] F. Taourit, Étude du comportement dynamique et thermique de deux écoulements de fluide dans un échangeur de chaleur, Mémoire de master, Université de Tlemcen, 2013.
- [9] A. Ougana, Étude et dimensionnement d'un système de refroidissement Tchin-Lait Candia, Mémoire de master, Université de Béjaïa, 2019.
- [10] N. Deziri, Simulation de la conception d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre, Mémoire de master, Université d'Annaba, 2017.
- [11] Université d'Aïn Témouchent, Cours 5.
- [12] M. Bennajah et N. Chaouni, Échangeurs de chaleur.
- [13] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Heutz, C. Marvillet, P. Mercier et R. Vidil, « Description des échangeurs », Techniques de l'Ingénieur, réf. B2341.
- [14] Y. Harkat, Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur, Mémoire de magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, 2007.
- [15] J. Croix, « Généralités sur l'encrassement des échangeurs », Note Technique GRETH, no 83/12, 1983.
- [16] N. Epstein, « Fouling in Heat Exchangers », dans Fouling of Heat Transfer Equipment, 1981.

- [17] J. G. Knudsen et E. F. C. Somerscales, *Fouling of Heat Transfer Equipment*, Washington, DC : Hemisphere, 1975.
- [18] M. N. Bott, *Process Engineering*, p. 76, 1975.
- [19] E. F. C. Somerscales et J. G. Knudsen, « Personal communication », vol. 1, pp. 1–4, 1977.
- [20] *Memento Technique de l'eau – Degremont et Nalco*, Water Handbook, McGraw-Hill.
- [21] G. F. Froment, « Fouling of heat transfer surfaces by coke formation in petrochemical reactors », dans *Fouling of Heat Transfer Equipment*, p. 411, 1991.
- [22] N. Epstein, « Fouling: Technical aspects », dans *Fouling of Heat Transfer Equipment*, E. F. C. Somerscales et J. G. Knudsen, Éd., Washington, DC : Hemisphere, 1981.
- [23] J. Rodier, *L'analyse chimique et physicochimique de l'eau*, Paris : Dunod, 1971.
- [24] A. J. Karabelas, *Scale Formation in Tubular Heat Exchangers: Research Priorities*, 2002.
- [25] J. Leconte, « Protection contre la corrosion », *Techniques de l'Ingénieur*, réf. A830.
- [26] G. H. Nancollas et M. M. Reddy, « The crystallization of calcium carbonate: Part II – Calcite growth mechanism », *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 37, pp. 824–830, 1971.
- [27] J. Leconte, « Protection contre la corrosion », *Techniques de l'Ingénieur*, réf. A830.
- [28] D. Lund et N. Sandhu, « Chemical reaction fouling due to foodstuffs », dans *Fouling of Heat Transfer Equipment*, p. 437, 1998.
- [29] I. Haouli et I. Khelifi, *Étude de l'encrassement d'un échangeur de chaleur à plaques*, Mémoire de master, Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naâma, Algérie, 2020.
- [30] N. Kamar, *Maîtrise de l'entartrage dans des échangeurs de chaleur via l'utilisation de traitements physiques*, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2022.
- [31] A. Reggam et T. Makhlouf, *Étude des échangeurs de chaleur et problématiques de fonctionnement*, Mémoire de master, Université de Guelma, 2025.
- [32] B. Mebarki, *Polycopié pédagogique de cours : Transfert de chaleur*, Université de Béchar, 2022.
- [33] H. Ibrahim et I. Khelifi, *Étude de l'encrassement d'un échangeur de chaleur à plaques*, Mémoire de master, Centre Universitaire de Naâma, 2020.
- [34] K. Bakhti, *Prévention et lutte contre le phénomène d'entartrage dans les conduites d'eau dans la région de Ouargla*, Mémoire, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2006.

- [35] H. Al-Hajibrahim, « Fouling in heat exchangers: A review », *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 3, no 4, pp. 269–275, 2012.
- [36] H. Müller-Steinhagen, *Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Strategies*, IChemE, 2011.
- [37] X. Chen et al., « Fouling in cooling towers: Mechanisms, monitoring and control », *Water Research*, vol. 44, no 15, pp. 4478–4493, 2010.
- [38] N. Epstein, « Thinking about heat transfer fouling: A 5×5 matrix », *Heat Transfer Engineering*, vol. 4, no 1, pp. 43–56, 1983.
- [39] Glen et al., « Measurement and modelling of fouling on finned tubes », dans *Fouling Mechanisms: Theoretical and Practical Aspects*, Eurotherm Seminar 23, Grenoble, pp. 181–188, 1992.
- [40] F. Brahim, W. Augustin et M. Bohnet, « Numerical simulation of the fouling process », *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 42, pp. 323–334, 2003.
- [41] Nishio et al., « Thermophoretic deposition of aerosol particles in a heat-exchanger pipe », *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 13, pp. 408–415.
- [42] R. S. Rodliffe et F. A. Means, « Factors governing particulate corrosion product adhesion to surfaces in water reactor cooling circuits », *CEGB Report RD/BN4525*, Berkeley Nuclear Laboratories, UK, 1979.
- [43] Modélisation des échangeurs de chaleur, Mémoire de fin d'études, Université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel, Faculté des Sciences et de la Technologie.
- [44] M. M. Awad, *Fouling of Heat Transfer Surfaces*, Faculty of Engineering, Mansoura University, Égypte.
- [45] J. Marne et R. L. Webb, « Workshop on an assessment of gas-side fouling in fossil fuel exhaust environments », *DOE/ID-12138*, 1982.
- [46] C. Duffau et J. M. Grillot, *L'encrassement dans les échangeurs : description, prévention, remèdes*, GRETH, 1991.
- [47] Amirouche et Oualid, Étude thermique d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre E102A/B, Mémoire, Université de Boumerdès, 2014, pp. 24–25.
- [48] Amirouche et Oualid, Étude thermique d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre E102A/B, Mémoire, Université de Boumerdès, 2014, pp. 24–25.