



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 - SIKDA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Ingénierie et gestion de l'eau

Proposition D'un Protocole De Nettoyage Contre L'entartrage des Circuit de vapeur et chaudières

Réalisé par : -Bouamama Chaima

-Chenkhore Zineb

-Lebdioui Marwa

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

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1	Dr. Saadoun. AB		Université de 20 Août 1955 - Skikda	Encadrant
2	Pr. Boussaha. H		Université de 20 Août 1955 - Skikda	Président
3	Dr. Chekroud		Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examineur
4	Dr. Boudaoud. N		Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examineur

Année Universitaire 2025- 2026.

Remerciements :

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

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, Dr. Saadoun Abdelaziz, pour ses orientations, sa confiance et son suivi tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et notre vive reconnaissance à Pr. Boussaha Hadi, qui nous a accompagnés avec dévouement, nous a apporté son aide précieuse, ses conseils avisés et son soutien constant. Sa disponibilité et son implication remarquable ont été d'une grande valeur et ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail. Nous lui en sommes profondément reconnaissants.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Dr. Abdelkrim Djilani pour sa disponibilité, son aide précieuse, ses conseils avisés et son soutien apporté tout au long de ce travail. Son accompagnement et son implication ont été d'une grande importance et ont contribué à la réussite de ce mémoire. Nous lui exprimons notre profonde gratitude et notre haute considération.

Nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury, Dr. Boudaoud N. et Dr. Chekroud, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail.

Nous adressons également notre plus profonde gratitude à nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements permanents, leur patience et leur soutien moral tout au long de notre parcours. Sans leur confiance et leurs prières, l'aboutissement de ce travail n'aurait pas été possible. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre immense reconnaissance et de notre profond respect.

Nous adressons également nos sincères remerciements à nos amis ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire et nous ont soutenus moralement tout au long de ce parcours.

À tous ceux qui nous ont accompagnés, encouragés et soutenus durant cette aventure académique, nous exprimons notre profonde gratitude et nos plus sincères remerciements.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, ma mère et mon père, qui ont toujours été mon plus grand soutien et la source de ma force. Par leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs prières, ils ont éclairé mon chemin et m'ont permis de poursuivre mes études avec confiance et détermination. Que Dieu les protège et les récompense pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

À mon cher frère Zine Eddine et à ma chère sœur Maria, pour leur affection, leur soutien constant et leur présence précieuse à mes côtés.

J'adresse ma profonde gratitude à Monsieur Boussaha El Hadi pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail. Grâce à son encadrement, ses orientations pertinentes et sa confiance, ce mémoire a pu être mené à bien dans les meilleures conditions. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect et de ma sincère reconnaissance.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur Sadoune Abdelaziz pour son aide précieuse, sa disponibilité et ses orientations pertinentes. Ses conseils avisés et l'intérêt qu'il a porté à ce travail ont constitué un soutien appréciable tout au long de cette étude. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et de mon profond respect.

J'adresse également mes vifs remerciements à Monsieur Djilani Karim pour son aide précieuse au sein du laboratoire, sa disponibilité permanente, son professionnalisme ainsi que son accompagnement durant les travaux expérimentaux. Son soutien, ses conseils et son assistance ont largement contribué au bon déroulement des manipulations et à la réussite de cette étude.

À mes chères tantes, pour leur affection sincère, leur bienveillance, leurs encouragements constants et leurs prières qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours. Leur présence a toujours été pour moi une source de réconfort et de motivation.

À tous les membres de ma famille, pour leur soutien, leurs encouragements et leur confiance.

À mes chers amis, pour leur présence, leur soutien moral et les précieux moments partagés tout au long de cette aventure.

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

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

Bouamama Chaima

Je dédie ce modeste travail à celui qui a été mon premier soutien et la source de ma force, mon cher père, qui m'a appris les valeurs de la patience et de la persévérance.

À la personne la plus précieuse dans ma vie, ma chère mère, pour son amour, ses sacrifices et ses prières qui ont toujours illuminé mon chemin.

À mes frères Youssef et Louay, qui ont toujours été mon soutien, ainsi qu'à ma sœur Malika, source de ma force et de ma détermination.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mon encadreur, Monsieur Bousaha El Hadi, pour son accompagnement, ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma haute considération et de mon profond respect.

J'adresse également mes vifs remerciements et toute ma reconnaissance à Monsieur Saadoun Abdelaziz.

À tous les membres de ma famille, et plus particulièrement à ma tante, que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis.

À mes chers amis, et plus particulièrement à ma chère amie Zineb, pour son soutien, ses encouragements et sa présence à mes côtés.

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

Lebdioui Marwa

Je dédie ce modeste travail à celui qui a été mon premier soutien et la source de ma force, mon cher père, qui m'a appris les valeurs de la patience et de la persévérance.

À la personne la plus précieuse dans ma vie, ma chère mère, pour son amour, ses sacrifices et ses prières qui ont toujours illuminé mon chemin.

À mes frères Mohamed et Ahmed, qui ont toujours été mon soutien, ainsi qu'à mes sœurs Iman, Lamis et Chaïma, sources de ma force et de ma détermination.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mon encadreur, Monsieur Bousaha El Hadi, pour son accompagnement, ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma haute considération et de mon profond respect.

J'adresse également mes vifs remerciements et toute ma reconnaissance à Monsieur Saadoun Abdelaziz.

À tous les membres de ma famille.

À mes chers amis, et plus particulièrement à ma chère amie Marwa, pour son soutien, ses encouragements et sa présence à mes côtés.

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

Chenkhore Zineb

Résumé :

L'encrassement des échangeurs de chaleur constitue un problème majeur dans les installations industrielles en raison de son impact sur les performances thermiques et les coûts d'exploitation. Ce travail a pour objectif d'étudier les phénomènes d'encrassement et d'évaluer l'efficacité du nettoyage chimique à l'aide de solutions de NaOH et de HCl. Des essais expérimentaux ont été réalisés sur des échantillons métalliques encrassés, en suivant l'évolution de leur masse au cours du temps. Les résultats obtenus montrent une diminution progressive de la masse, traduisant l'élimination des dépôts présents à la surface des échantillons. Le traitement par NaOH a permis d'atteindre une masse finale très proche de la masse propre, révélant une bonne efficacité tout en limitant l'altération du matériau. Le nettoyage par HCl s'est également montré efficace pour dissoudre le tartre, mais un temps d'exposition prolongé peut entraîner une attaque du métal et favoriser la corrosion. Cette étude met en évidence l'importance du contrôle des conditions de nettoyage afin d'assurer une élimination optimale des dépôts tout en préservant l'intégrité des équipements industriels.

Mots-clés : Encrassement, échangeur de chaleur, nettoyage chimique, NaOH, HCl, tartre, corrosion.

Abstract :

Fouling in heat exchangers is a major issue in industrial installations because of its negative effects on thermal performance and operating costs. The objective of this work is to study fouling phenomena and evaluate the effectiveness of chemical cleaning using NaOH and HCl solutions. Experimental tests were carried out on fouled metallic samples by monitoring the variation of their mass over time. The obtained results showed a progressive decrease in mass, indicating the gradual removal of deposits from the sample surface. NaOH treatment led to a final mass very close to the clean reference mass, demonstrating effective cleaning while minimizing damage to the material. HCl cleaning was also effective in dissolving scale deposits; however, excessive exposure time may attack the metal and promote corrosion. This study highlights the importance of controlling cleaning conditions to achieve efficient deposit removal while preserving the integrity of industrial equipment.

Keywords: Fouling, heat exchanger, chemical cleaning, NaOH, HCl, scaling, corrosion.

ملخص

يُعدّ تلوث وتكلس المبادلات الحرارية من المشاكل الرئيسية التي تواجه المنشآت الصناعية، لما يسببه من انخفاض في كفاءة انتقال الحرارة وارتفاع تكاليف التشغيل والصيانة. تهدف هذه الدراسة إلى دراسة ظاهرة الترسّبات وتقييم فعالية التنظيف الكيميائي باستعمال محاليل هيدروكسيد الصوديوم (NaOH). أُجريت تجارب على عينات معدنية متسخة مع متابعة تغير كتلتها بمرور الزمن. أظهرت النتائج انخفاضاً (HCl) وحمض الهيدروكلوريك (NaOH) تدريجياً في الكتلة نتيجة إزالة الرواسب المتراكمة على سطح العينات. وقد أثبت التنظيف بواسطة هيدروكسيد الصوديوم فعالية جيدة، حيث أصبحت الكتلة النهائية قريبة جداً من كتلة العينة النظيفة مع الحفاظ على سلامة المعدن. كما أظهر حمض الهيدروكلوريك فعالية كبيرة في إزالة التكلسات، إلا أن زيادة مدة المعالجة قد تؤدي إلى تآكل المعدن. وتبرز هذه الدراسة أهمية التحكم في ظروف التنظيف لتحقيق إزالة فعالة للرواسب مع الحفاظ على سلامة المعدات الصناعية.

الكلمات المفتاحية

الترسّبات، المبادلات الحرارية، التنظيف الكيميائي، هيدروكسيد الصوديوم، حمض الهيدروكلوريك، التكلس، التآكل :

Liste De Figure :

N°	Titre de la figure	Page
Figure I.1	Chaudière industrielle	4
Figure I.2	Système de refroidissement	7
Figure II.1	Entartrage d'une chaudière à tubes de fumée	28
Figure II.2	Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière	29
Figure II.3	Représentation schématique du processus d'encrassement (Formation de dépôt)	38
Figure II.4	Procédé de nettoyage mécanique des tubes	40
Figure II.5	Chaudière à vapeur industrielle en cours de nettoyage hydraulique	41
Figure II.6	Nettoyage par launch de projectiles (racleurs/brosses)	43
Figure III.1	Balance électronique de précision	47
Figure III.2	L'hydroxyde de sodium	49
Figure III.3	Le mélange pendant la formation du tartre	49
Figure III.4	Les échantillons après le séchage du tartre	50
Figure III.5	Pesage d'échantillon	50
Figure III.6	Opération d'encrassement	51
Figure III.7	Un échantillon après la formation d'encrassement	52
Figure III.8	Nettoyage d'échantillon entartré sous température	58

N°	Titre de la figure	Page
Figure III.9	Un tartre réel	59
Figure III.10	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	60
Figure III.11	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	60
Figure III.12	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	61
Figure III.13	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	62
Figure III.14	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	63
Figure III.15	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	63
Figure III.16	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	64
Figure III.17	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	65
Figure III.18	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	65
Figure III.19	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	66
Figure III.20	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	67
Figure III.21	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	68
Figure III.22	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	68
Figure III.23	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	69

N°	Titre de la figure	Page
Figure III.25	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	71
Figure III.26	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	72
Figure III.27	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	73
Figure III.28	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	73
Figure III.29	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	74
Figure III.30	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	75
Figure III.31	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	76
Figure III.32	Masse d'échantillon encrassé en fonction du temps	77
Figure III.33	Masse d'échantillon en fonction du temps	82
Figure III.34	Masse d'échantillon entartré en fonction du temps	83
Figure III.35	Masse du tartre en fonction du temps	86
Figure III.36	Masse du tartre en fonction du temps	87
Figure III.37	Masse du tartre en fonction du temps	89

Liste des tableaux

N°	Titre du tableau	Page
Tableau I.1	Classification des chaudières	5
Tableau III.1	Taux d'encrassement d'échantillons	59
Tableau III.2	Taux d'encrassement d'échantillons	60
Tableau III.3	Taux d'encrassement d'échantillons	61
Tableau III.4	Taux d'encrassement d'échantillons	62
Tableau III.5	Taux d'encrassement d'échantillons	63
Tableau III.6	Taux d'encrassement d'échantillons	63
Tableau III.7	Taux d'encrassement d'échantillons	64
Tableau III.8	Taux d'encrassement d'échantillons	64
Tableau III.9	Taux d'encrassement d'échantillons	65
Tableau III.10	Taux d'encrassement d'échantillons	66
Tableau III.11	Taux d'encrassement d'échantillons	67
Tableau III.12	Taux d'encrassement d'échantillons	68
Tableau III.13	Taux d'encrassement d'échantillons	69
Tableau III.14	Taux d'encrassement d'échantillons	70
Tableau III.15	Taux d'encrassement d'échantillons	71
Tableau III.16	Taux d'encrassement d'échantillons	72
Tableau III.17	Taux d'encrassement d'échantillons	73
Tableau III.18	Taux d'encrassement d'échantillons	74
Tableau III.19	Taux d'encrassement d'échantillons	75
Tableau III.20	Taux d'encrassement d'échantillons	76
Tableau III.21	Taux d'encrassement d'échantillons	77
Tableau III.22	Taux d'entartrage d'échantillons	78

Tableau III.23	Taux d'entartrage d'échantillons	80
Tableau III.24	Taux d'entartrage d'échantillons	82
Tableau III.25	Taux d'entartrage d'échantillons	83
Tableau III.26	Taux du tartre d'échantillons	85
Tableau III.27	Taux du tartre d'échantillons	86
Tableau III.28	Taux du tartre d'échantillons	87

Liste D'abréviation :

ASME : American Society of Mechanical Engineers

DLC : Diamond-Like Carbon

EPRI : Electric Power Research Institute

HCl : Acide chlorhydrique

NaOH : Hydroxyde de sodium

NIST : National Institute of Standards and Technology

pH : Potentiel Hydrogène

TAV : Turbine à Vapeur

CaCO₃ : Carbonate de calcium

CaSO₄ : Sulfate de calcium

Mg(OH)₂ : Hydroxyde de magnésium

kW : Kilowatt

W : Watt

°C : Degré Celsius

kg : Kilogramme

g : Gramme

min : Minute

m² : Mètre carré

Sommaire

Introduction Générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les chaudières	Page
Introduction	3
I.1 Définition des chaudières	3
I.2 Rôle des chaudières	4
I.3 Classification des chaudières	5
I.4 Principe de fonctionnement	6
I.5 Système de refroidissement des chaudières	6
I.5.1 Nécessité du refroidissement dans les chaudières	7
I.5.2 Protection des matériaux	7
I.5.3 Maintien du rendement énergétique	8
I.5.4 Sécurité opérationnelle	8
I.5.5 Durée de vie des équipements	8
I.6 Mécanisme de transfert thermique	9
I.6.1 La conduction	9
I.6.2 Le rayonnement	9
I.6.3 La convection	10
I.7 Typologie des circuits de refroidissement	11
I.7.1 Circuits ouverts	11
I.7.2 Circuits semi-ouverts	12
I.7.3 Circuits fermés	13
I.8 L'eau comme fluide de refroidissement	13
I.9 Propriétés physico-chimiques de l'eau de refroidissement	15
I.10 Qualité de l'eau de refroidissement	16
I.11 Problèmes liés à l'eau de refroidissement	19
I.12 Conséquences sur les performances énergétiques et la durée de vie des chaudières	23

CHAPITRE II : Généralités sur l'encrassement dans les chaudières à tubes d'eau	Page
II.1 Introduction	25
II.2 Définition	25
II.3 Classification : différents types d'encrassement	25
II.4 Classification suivant la nature du dépôt	30
II.5 Généralités sur le tartre	32
II.6 Formation du tartre	33
II.7 Le tartre et ses conséquences	33
II.8 Le tartre et les équipements industriels	34
II.9 Apparition et développement de l'encrassement	34
II.10 Effet de l'encrassement dans l'industrie pétrolière	37
II.11 Processus d'encrassement	38
II.12 Détection de l'encrassement	39
II.13 Action de prévention – Remèdes	39
II.14 Nettoyage d'une chaudière	40
II.15 Conclusion	42
CHAPITRE III: Partie expérimentale	Page
Introduction	44
III.1 Approche d'étude	44
III.2 Méthodes de préparation des matériaux	44
III.3 Matériaux utilisés	45
III.4 Dans notre étude	46
III.5 Produits d'encrassement	47
III.6 Procédés de nettoyage	48
III.7 Procédure expérimentale	49
III.8 Préparation des solutions	52
III.9 Protocole de nettoyage	55
III.10 Résultats et discussions	59
III.11 Conclusion	91
Conclusion générale	92

Introduction générale

Les chaudières industrielles occupent une place essentielle dans de nombreux secteurs d'activité en assurant la production de vapeur et d'énergie thermique nécessaires au fonctionnement de différents procédés industriels. Grâce à leur rôle central dans les opérations de chauffage et de transfert de chaleur, elles contribuent directement à la performance et à la continuité des installations.

Cependant, au cours de leur exploitation, les chaudières sont confrontées à plusieurs problèmes pouvant affecter leur rendement. Parmi les plus fréquents figure l'encrassement, qui se traduit par l'accumulation progressive de dépôts sur les surfaces d'échange thermique. Ce phénomène entraîne une diminution de l'efficacité des transferts de chaleur, une augmentation de la consommation énergétique ainsi qu'une dégradation prématurée des équipements. En l'absence d'un entretien adéquat, l'encrassement peut également provoquer des arrêts de production et générer des coûts d'exploitation importants.

Face à cette problématique, le nettoyage des chaudières industrielles constitue une opération indispensable pour maintenir leurs performances et assurer leur bon fonctionnement. Le choix d'une méthode de nettoyage adaptée dépend de plusieurs facteurs, notamment de la nature des dépôts, du degré d'encrassement et des caractéristiques de l'installation concernée.

Dans ce contexte, le présent travail a pour objectif d'étudier le phénomène d'encrassement des chaudières industrielles ainsi que les différentes techniques utilisées pour son élimination. Une attention particulière est portée au procédé de nettoyage en place (NEP) et à l'évaluation de son efficacité à travers une étude pratique basée sur l'analyse gravimétrique.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur les chaudières industrielles, leur fonctionnement, leurs principaux composants et les problèmes rencontrés lors de leur exploitation. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'encrassement, à ses mécanismes de

formation, à ses conséquences et aux différentes méthodes de nettoyage disponibles. Le troisième chapitre décrit la démarche expérimentale adoptée pour simuler une opération de nettoyage et évaluer son efficacité. Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus, suivies des conclusions et recommandations issues de cette étude.

Chapitre I

Généralité sur Les chaudière

Introduction

La production et le transport de chaleur occupent une place importante dans le fonctionnement de nombreux processus et d'installations variées comme les centres commerciaux, les gares ou les aéroports. Ce chapitre s'intéresse à certaines méthodes de production et de transport de chaleur, notamment la combustion, le chauffage à la vapeur d'eau sous pression, ainsi que l'utilisation de fluides thermiques.

La production de chaleur peut s'obtenir de plusieurs façons :

- par combustion de matières solides (feu de cheminée à foyer ouvert ou fermé, chaudières à charbon, à copeaux de bois, incinérateurs).
- par combustion de liquides (fuel domestique, fuel industriel, flux de procédés divers).
- par combustion de gaz (gaz naturel, propane ou butane, gaz de procédé, gaz résiduaire).
- grâce à une pompe à chaleur.
- par effet joule dans des résistances électriques.
- par induction électromagnétique.
- etc.

I.1.Définition des chaudières

Une chaudière est un appareil qui permet de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (l'eau en général).

C'est un équipement servant à la transformation de l'eau liquide en vapeur selon la température et la pression définies par la destination de cette vapeur sous l'effet d'apport de chaleur, généralement réalisé par la combustion d'un combustible dans le foyer de la chaudière. Il peut être aussi extérieur (gaz chauds de différents processus).[1]



Figure I.1: Chaudière industrielle

I.2.Rôle des chaudières

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

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

Elles ont pour rôle :

D'apporter l'énergie nécessaire (vapeur de réchauffage, entraînement de turbine) ;
D'intervenir dans les procédés (réaction chimique, vapeur de dilution, de stripping) ;

De constituer un élément de sécurité (vapeur d'étouffement).[1]

I.3.Classification des chaudières

Il existe une grande variété de types de chaudières. On peut les classifier suivant différents critères selon le tableau I.1 ci-dessous :

Tableau I.1 : Classification des chaudières.[2]

Classification par gammes de puissance	Classification par type de fluide caloporteur	Classification par application	Classification par source de chaleur	Classification par construction	Classement par type de circulation
• Puissance < 70 kW : chaudières individuelles. • Puissance > 70 kW : chaudières de type industriel	• L'eau (eau chaude, eau surchauffée) • La vapeur d'eau (vapeur saturée, vapeur surchauffée) • Des fluides thermiques • Des sels fondus	• Chauffage central • Production d'énergie électrique avec TAV • chauffage d'eau sanitaire	• Chaudières à combustion : (combustibles liquides, solides ou gazeux) • Chaudières de récupération • Chaudières électriques	• Chaudières à tubes de fumées • Chaudières à tubes d'eau	• A circulation naturelle • A circulation assistée • A circulation forcée

I.4.Principe de fonctionnement

Une chaudière a besoin d'un carburant ou d'une source d'énergie : bois, fioul, gaz, électricité ou air.

Pour les chaudières à combustion, le carburant est brûlé et cette action produit de la chaleur.

Pour les modèles électriques ou thermodynamiques, il n'y a pas de combustion mais l'utilisation d'une source d'énergie invisible.

Dans tous les cas, l'énergie utilisée sert à produire de la chaleur qui se transmet aux circuits reliés aux émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants) et/ou à l'alimentation en eau chaude.

Les vapeurs dégagées et résidus de combustion sont évacués, sauf dans les modèles à condensation où la vapeur est réutilisée en circuit interne.

I.5.Système de refroidissement des chaudières

Les chaudières industrielles fonctionnent à des températures et pressions élevées afin de produire de la vapeur ou de l'eau chaude destinée aux procédés industriels ou à la production d'énergie. Le contrôle thermique est donc essentiel pour garantir la sécurité, le rendement et la durabilité des équipements.

Le refroidissement intervient principalement pour :

- maintenir l'intégrité des parois métalliques.
- contrôler la température des fumées.
- protéger les composants sensibles.
- assurer un fonctionnement stable et sécurisé.

Les principes de conception et de sécurité des chaudières sont largement encadrés par les recommandations de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME), notamment dans le *Boiler and Pressure Vessel Code*. [3]



• **Figure I.2:** système de refroidissement

I.5.1 Nécessité du refroidissement dans les chaudières

Le refroidissement dans une chaudière n'est pas seulement un élément de performance thermique, mais une exigence fondamentale de sécurité et de fiabilité.

I.5.2 Protection des matériaux

Les parois des chaudières sont soumises à des températures élevées provenant des gaz de combustion. Sans un refroidissement adéquat par circulation d'eau, la température des tubes pourrait dépasser la limite de résistance des matériaux, entraînant :

- déformation plastique.
- fissuration thermique.
- rupture sous pression.

Le refroidissement permet d'évacuer la chaleur excédentaire et de maintenir les contraintes mécaniques dans des limites acceptables.

I.5.3 Maintien du rendement énergétique

Un transfert thermique efficace entre les gaz chauds et l'eau garantit une meilleure conversion de l'énergie thermique en vapeur utile. Une mauvaise dissipation peut provoquer :

- surchauffe localisée.
- baisse du coefficient d'échange thermique.
- augmentation de la consommation de combustible.

Selon les principes décrits par Frank P. Incropera et al., la performance d'un échange thermique dépend directement du contrôle des températures de surface et du régime d'écoulement.

I.5.4 Sécurité opérationnelle

L'absence ou l'insuffisance de refroidissement peut entraîner des accidents graves, notamment des explosions dues à une surpression ou à une rupture de tube.

Les codes de sécurité de l'American Society of Mechanical Engineers imposent des dispositifs de contrôle thermique et des systèmes de circulation d'eau adaptés pour éviter ces risques.

I.5.5 Durée de vie des équipements

Un refroidissement maîtrisé limite :

- la corrosion accélérée.
- les contraintes thermomécaniques.
- la fatigue des matériaux.

Cela permet d'augmenter la durée de service des chaudières et de réduire les coûts de maintenance.

I.6 Mécanisme de transfert thermique

I.6.1 La conduction

On sait que la température est une fonction croissante de l'agitation moléculaire dans un corps, qu'il soit solide, liquide ou gazeux. Considérons pour l'instant un corps solide au sein duquel la température varie. L'agitation moléculaire élevée de la zone chaude communiquera de l'énergie cinétique aux zones plus froides par un phénomène appelé conduction de la chaleur.

La conduction est un phénomène de diffusion qui permet donc à la chaleur de se propager à l'intérieur d'un corps solide.

Il en est de même pour un liquide ou un gaz mais on verra par la suite que pour eux, la convection est un autre mode de transfert de chaleur possible. Notons enfin que la conduction de la chaleur n'est pas possible dans le vide puisqu'il n'y a pas de support moléculaire pour cela.

I.6.2 Le rayonnement

La chaleur du soleil frappe pourtant notre planète alors qu'il n'y a aucun support solide, liquide ou gazeux au-delà de l'atmosphère terrestre. Ceci signifie donc que l'énergie thermique peut tout de même traverser le vide. Ce mode de transfert s'appelle le rayonnement. Il correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par tout corps.

Quelle que soit sa température. Comme on l'imagine, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus élevé que sa température est grande.

Comme pour la conduction, ce sont les interactions entre atomes et molécules qui sont à l'origine de ce rayonnement. Elles peuvent le générer, ce qui diminue leur énergie, ou encore l'absorber, ce qui l'augmente. De par sa nature, le rayonnement n'intervient que dans les milieux transparents (gaz, verre, vide) ou semi-opaque (gaz + fumées de CO₂, gaz + vapeur d'eau).

I.6.3 La convection

Un débit ou une circulation de liquide ou de gaz peut transporter avec lui une certaine quantité d'énergie thermique. Ce transport de chaleur porte le nom de convection thermique. Ce transport de l'énergie par un écoulement est analogue au transport d'autres quantités scalaires (non vectorielles): transport d'une concentration de sel par de l'eau, transport de l'humidité par l'air, ... On retiendra donc que dans la convection, la chaleur se sert du fluide comme véhicule pour se déplacer. Sans entrer dans les détails, notons qu'il existe deux types de transferts convectifs:

- La convection forcée dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe ou gravité pour un liquide, ventilateur pour de l'air).
- **La convection naturelle**

lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède. Il y aura ainsi circulation naturelle du fluide sous l'effet de la chaleur qui, par ailleurs, sera transportée avec lui on parle de convection naturelle. Si l'on prend l'exemple d'un chauffage domestique, l'eau chaude qui arrive dans les radiateurs circule par convection forcée, entretenue par le circulateur (petite pompe située dans la chaufferie) tandis que l'air des pièces de la maison circule par convection naturelle depuis le radiateur autour duquel il s'échauffe jusqu'au plafond vers lequel il s'élève avant de redescendre pour former un circuit fermé.

En convection on caractérise le flux de chaleur Φ qui est extrait par le fluide de température

T_0 d'une paroi de surface S à la température T_P par :

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_P - T_0)$$

Où Φ est en Watt, S en m^2 ,

T en Kelvin et où h désigne le coefficient d'échange entre la paroi et le fluide (en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

I.7 Typologie des circuits de refroidissement

Il existe trois types de circuits de refroidissement :

I.7.1Circuits ouverts

Dans un circuit ouvert l'eau froide est prélevée d'une mer, une rivière, un forage ou d'un réseau de distribution ; ne passe qu'une seule fois dans l'appareil à refroidir puis est rejetée dans le milieu environnant.

Les vitesses de circulation sont généralement élevées et de ce fait l'accroissement de température est faible. Il faut néanmoins lutter contre l'entartrage aux points chauds, lorsqu'on utilise des eaux fortement minéralisées.

Pour les eaux de rivières et de forage, on injecte une faible quantité de réactif à base de phosphate, et pour les eaux de mer fortement chargées en chlorures, on utilise uniquement du chlore pour éviter la prolifération des algues, des moules dues à la chaleur et la lumière.

Ces avantages sont la simplicité d'exploitation, le faible cout d'investissement. Ces inconvénients sont la consommation excessive des produits chimiques et le traitement rejets (température élevée).

Le circuit est caractérisé par le débit Q d'eau de refroidissement et par l'écart de température de l'eau entre l'entrée et la sortie des équipements refroidis :
 $\Delta T (^{\circ}X) = T_s - T_e$ [2]

Tels que : $\Delta T (^{\circ}X)$: l'écart de température

T_s : température de l'eau sortie

T_e : température de l'eau entre[4]

I.7.2Circuits semi-ouverts

L'eau est recyclée après refroidissement par passage dans une tour de refroidissement dans laquelle est refroidie à son tour par contact avec l'air. Ce type de circuit est très utilisé dans l'industrie.

Il existe différents types de tour de refroidissement, classés généralement par le mode de création du contact d'air appelée aussi tirage. Le tirage peut être :

- Naturel : dans ce type de tour dite aussi hyperbolique en raison de sa forme, la circulation de l'air se fait à contre-courant par rapport à l'eau à refroidir. On retrouve ce type de tour généralement de très grandes dimensions dans les centrales thermiques et nucléaires.

- Forcé : dans ce type de tour l'air, circule, dans la tour sous l'effet d'une ventilation mécanique provoquée par un ventilateur latéral qui pousse l'air dans la tour.

- Induit : l'air est aspiré à travers la tour par un ventilateur situé au sommet de la tour.

Ce type de tour est très fréquent.

Le transfert de chaleur de l'eau à l'air ambiant s'effectue par convection et par évaporation d'une partie de cette eau jusqu'à saturation de l'air en humidité. Selon la température et l'humidité de l'air à l'entrée du réfrigérant, 5 à 15% de la chaleur sont évacués par convection. La consommation d'eau représente une fraction du débit recyclé et correspond :

- À l'évaporation ;
- À l'entraînement de gouttelettes (entraînement vésiculaire) ;
- Aux purges de déconcentration ;
- À des prélèvements directs et aux fuites.

L'eau d'appoint doit généralement être traitée avant d'être admise dans le circuit. Les avantages des circuits semi-ouverts sont la possibilité de gros débits, une faible consommation d'eau d'appoint, une consommation réduite de réactifs, et une meilleure protection contre la corrosion et l'entartrage que dans le cas des circuits ouverts.[4]

I.7.3Circuits fermés

L'eau circule en boucle fermée, une source froide, généralement un aéro-réfrigérant élimine la chaleur prise au procédé. Mise à part les fuites il n'y a pas de consommation autre que le remplissage du circuit. Ceci nécessite un conditionnement chimique de l'eau fortement dosé. Ces avantages sont l'impact très faible sur l'environnement, le coût de l'eau et des réactifs négligeables et le peu de contrôle à effectuer. Ces inconvénients sont un coût de construction très élevé, une consommation électrique très importante et un abaissement de température dans l'aéro-réfrigérant limité.[4]

I.8 L'eau comme fluide de refroidissement

I.8.1 Rôle de l'eau dans le transfert de chaleur

L'eau est l'un des fluides les plus utilisés dans les systèmes de refroidissement industriels, énergétiques et mécaniques en raison de sa grande capacité à absorber et transporter la chaleur. Dans un système thermique, l'eau intervient principalement par convection, conduction et parfois par changement de phase (évaporation).

Le transfert thermique par convection s'exprime généralement par la loi de Newton du refroidissement où h est le coefficient d'échange thermique à la surface d'échange et ΔT la différence de température entre la surface et le fluide.

Dans les centrales thermiques et nucléaires, l'eau est utilisée comme fluide caloporteur pour absorber la chaleur issue de la combustion ou de la fission nucléaire, puis la transférer vers un condenseur ou une tour de refroidissement (International Atomic Energy Agency, 2018).[5]

Elle est également utilisée dans les échangeurs thermiques industriels (American Society of Mechanical Engineers, 2017).

I.8.2Propriétés thermiques de l'eau

Les propriétés thermiques exceptionnelles de l'eau expliquent son efficacité comme fluide de refroidissement :

- Capacité thermique massique élevée ($\sim 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ à 25°C)
- Chaleur latente de vaporisation importante ($\sim 2260 \text{ kJ/kg}$ à 100°C)
- Bonne conductivité thermique ($\sim 0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ à 25°C)

Sa capacité thermique élevée lui permet d'absorber une grande quantité d'énergie avec une variation modérée de température, ce qui améliore la stabilité thermique des installations.

Selon National Institute of Standards and Technology (NIST), les propriétés thermophysiques de l'eau varient avec la température et la pression, ce qui doit être pris en compte dans la conception des systèmes thermiques.[6]

I.8.3 Avantages de l'utilisation de l'eau

L'utilisation de l'eau comme fluide de refroidissement présente plusieurs avantages :

1. Disponibilité abondante et faible coût
2. Non toxicité comparée à d'autres fluides caloporteurs
3. Excellente efficacité thermique
4. Facilité de circulation grâce à sa faible viscosité

Elle est largement employée dans les tours aéroréfrigérantes et les circuits fermés industriels (Electric Power Research Institute, 2012).[7]

I.8.4 Contraintes et limites liées à son utilisation

Malgré ses avantages, l'eau présente certaines limites :

- Corrosion des matériaux métalliques

- Entartrage (scaling) dû aux sels dissous
- Encrassement biologique (biofouling)
- Consommation importante en ressources hydriques

Ces phénomènes peuvent réduire l'efficacité thermique et augmenter les coûts de maintenance. Les guides techniques de World Health Organization (2017) soulignent l'importance du contrôle chimique et microbiologique dans les circuits d'eau.[8]

I.9 Propriétés physico-chimiques de l'eau de refroidissement

I.9.1 Paramètres physiques influençant le refroidissement

Les paramètres physiques influençant les performances thermiques sont :

- Température
- Débit
- Pression
- Viscosité
- Conductivité thermique

L'augmentation du débit améliore généralement le coefficient de convection. Les relations sont décrites par les nombres adimensionnels de Reynolds et de Nusselt (Frank P. Incropera et al., 2007).[8]

I.9.2 Paramètres chimiques de l'eau

Les paramètres chimiques jouent un rôle essentiel dans la durabilité des installations :

- pH (contrôle de la corrosion)
- Dureté (Ca^{2+} , Mg^{2+})

- Alcalinité
- Oxygène dissous
- Conductivité électrique
- Présence d'ions chlorure et sulfate

Un pH légèrement alcalin (entre 7,5 et 9) est généralement recommandé pour limiter la corrosion. Les normes de qualité sont encadrées par différentes institutions internationales telles que International Organization for Standardization (ISO 14001 pour la gestion environnementale).[9]

I.10 Qualité de l'eau de refroidissement

La qualité de l'eau de refroidissement est un facteur déterminant pour assurer la performance thermique, la durabilité des équipements et la sécurité des installations industrielles. Une eau mal contrôlée peut entraîner corrosion, entartrage, encrassement biologique et pertes énergétiques significatives.

I.10.1 Normes, recommandations et exigences industrielles

La gestion de la qualité de l'eau de refroidissement est encadrée par plusieurs normes et recommandations internationales visant à garantir la sécurité, la performance et la conformité environnementale des installations.

Parmi les principales références :

- Les normes de gestion environnementale de International Organization for Standardization (ISO 14001) qui imposent un contrôle des impacts environnementaux liés aux rejets d'eau industrielle.[10]
- Les recommandations techniques de American Society of Mechanical Engineers (ASME) concernant la qualité de l'eau dans les chaudières et systèmes thermiques.[11]

- Les directives sanitaires de World Health Organization concernant la qualité microbiologique de l'eau industrielle.
- Les standards techniques de American Petroleum Institute (API) pour les installations pétrolières et gazières.[12]

Ces normes définissent des limites pour :

- le pH
- la conductivité
- la dureté totale
- la teneur en oxygène dissous
- la concentration en chlorures et sulfates
- la charge microbiologique

Le respect de ces exigences permet de limiter la corrosion, d'optimiser les transferts thermiques et de réduire les arrêts non planifiés.

I.10.2 Classification des eaux utilisées en refroidissement

Les eaux utilisées en refroidissement peuvent être classées selon leur origine et leur mode d'utilisation.

1. Selon l'origine

- **Eaux naturelles** (rivières, lacs, nappes phréatiques)
- **Eau de mer** (forte salinité, utilisée dans les centrales côtières)
- **Eaux industrielles recyclées**
- **Eaux déminéralisées ou adoucies**

Les centrales côtières, par exemple, utilisent fréquemment l'eau de mer comme fluide de refroidissement, ce qui nécessite des matériaux résistants à la corrosion saline (International Atomic Energy Agency, 2018).[13]

2. Selon le mode de circulation

- **Système ouvert (circuit ouvert)** : l'eau est prélevée puis rejetée après usage.
- **Système fermé** : l'eau circule en boucle avec contrôle chimique permanent.
- **Système semi-ouvert (tour de refroidissement)** : évaporation partielle et appoint d'eau.

Les circuits fermés nécessitent une eau de qualité plus stable afin d'éviter l'accumulation progressive de sels dissous.

I.10.3 Influence de la qualité de l'eau sur le fonctionnement des chaudières

La qualité de l'eau influence directement le rendement thermique et la durée de vie des chaudières industrielles.

1. Entartrage

La présence de calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) entraîne la formation de dépôts calcaires sur les surfaces d'échange thermique. Une couche de tartre de seulement 1 mm peut réduire significativement l'efficacité thermique et augmenter la consommation de combustible.

2. Corrosion

Un pH inadapté, la présence d'oxygène dissous ou d'ions chlorure favorisent la corrosion interne. Cela peut provoquer des perforations, fuites et ruptures sous pression.

3. Moussage et entraînement d'eau

Une forte concentration en solides dissous peut provoquer la formation de mousse dans les chaudières, entraînant une contamination de la vapeur.

Selon le code chaudière de American Society of Mechanical Engineers, le contrôle strict de la qualité de l'eau d'alimentation est indispensable pour prévenir les défaillances mécaniques.[14]

Une mauvaise gestion peut entraîner :

- baisse du rendement énergétique
- augmentation des coûts de maintenance
- risques d'explosion dans les cas extrêmes

I.11 Problèmes liés à l'eau de refroidissement

I.11.1La corrosion

Le phénomène de corrosion se traduit par une interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant qui se concrétise par un transfert d'électron d'une anode vers une cathode.

La corrosion entraîne une dégradation d'état des surfaces ; des pertes d'échange thermique; la destruction du métal (M) par libération d'ions métalliques dans l'eau; une augmentation des besoins de maintenance des installations.

On aboutit à la destruction de matière et/ou à la formation de produits de corrosion du métal.

Les causes principales de la corrosion sont la diversité des matériaux, la teneur en oxygène de l'eau ou de composés oxydants forts, et la concentration en sels d'acides forts (Chlorures, Sulfates, Nitrates).

Ainsi, la corrosion va dépendre des métaux ou des alliages utilisés (métallurgie, état de surface, métaux en présence); des conditions d'exploitation (vitesses de passage, états

de surface, particularité du circuit, ...); de la qualité de l'eau teneur en oxygène; salinité de l'eau; température; pH .

Il existe plusieurs formes de corrosion :

- Corrosion uniforme ou généralisée : perte uniforme d'épaisseur ;
- Corrosion localisée;
- Corrosion galvanique due à la présence de matériaux de différentes natures ;
- Corrosion caverneuse (sous dépôt) ;
- Corrosion par piqûres.

Il existe également des causes physiques/mécaniques :

- Corrosion /érosion/abrasion/cavitation : frottement et usure;
- Corrosion sous contrainte : fissuration.

Certaines bactéries peuvent par leurs activités métaboliques induire des phénomènes de corrosion :

Bactéries du fer : Fe^{2+} à Fe^{3+} ;

Bactéries sulfato-réductrices : MgSO_4 à H_2S ;

Bactéries dites "du soufre" : H_2S à S ou H_2SO_4 ;

Nitrobacteria : NH_4^+ à NO_3^- .

I.11.2L'entartrage

L'entartrage est un phénomène qui correspond à la précipitation de sels minéraux en fonction de leur solubilité et de leur concentration.

L'entartrage entraîne :

- Une dégradation d'état des surfaces ;
- Des pertes d'échange thermique;
- Des risques de corrosion sous les dépôts formés;
- Une augmentation des besoins de la maintenance des installations.

L'entartrage intervient lors de :

- L'élévation de la température;
- L'augmentation de la concentration en sels;
- La variation du pH ;
- Diminution de la teneur en CO₂.

Le phénomène est basé sur la formation de dépôts de sels insolubles à la surface des matériaux le plus souvent par modification de l'équilibre calco-carbonique :

L'entartrage - équilibre calco-carbonique peut s'agir également du dépassement du seuil de solubilité d'un sel ; dès que l'on atteint dans l'eau une quantité suffisante d'ions, un précipité peut se former. Dans le cas du sulfate de calcium, par exemple, le produit de la concentration des ions est supérieur à la constante de solubilité, il y aura précipitation des sels excédentaires.

L'entartrage - précipitation de sels en excès

D'une manière générale les tartres rencontrés sont listés ci-dessous :
carbonate de calcium : faible produit de solubilité / dépôts durs et adhérents ;
sulfate de calcium : précipitation à température élevée / dépôts durs et adhérents ;
tartres silicatés : en fonction du pH et de la température, on peut former des silicates de calcium ou magnésium qui vont donner des tartres difficilement éliminables ;
phosphates de calcium : en présence de sels de dureté, les phosphates forment des boues relativement peu solubles ; hydroxyde de magnésium Mg(OH)₂ : dépôts non adhérents.

I.11.3L'encrassement biologique (Biofilm et légionnelles)

Les micro-organismes sont impliqués dans les phénomènes d'épuration de l'environnement. Selon son origine, l'eau contiendra plus ou moins de micro-organismes. Ils auront le même type d'activité dans les installations que dans leur milieu d'origine.

Les micro-organismes qui nous intéressent sont ceux qui sont à l'origine des problèmes considérés ou ceux qui sont des indicateurs d'une évolution défavorable du milieu concerné. Il s'agit :

Des bactéries ;

Des moisissures ;

Des algues ;

Des protozoaires.

La croissance bactérienne en général peut avoir pour conséquences :

La formation de biofilm → bouchage, perturbation de procédés de fabrication, non-qualité ; la corrosion des matériaux → percement ;

La dégradation de matières premières → perturbation de procédés de fabrication, problème organoleptique ;

La contraction de maladies → intoxications, Légionellose.

Les micro-organismes se caractérisent par le fait qu'ils se multiplient plus ou moins rapidement selon les conditions rencontrées dans les circuits. Parmi eux, les micro-organismes le plus souvent en cause sont les bactéries. La présence de micro-organismes dans une installation peut engendrer la formation d'un dépôt très isolant thermiquement, couramment appelé biofilm.

La croissance bactérienne dépendra de plusieurs paramètres qui, s'ils ont tous une valeur optimale permettront une croissance maximale. Ces paramètres sont :

La température ;

Le pH ;

La salinité ;

Le potentiel redox (niveau d'oxygénation d'une eau) ;

La présence ou absence d'inhibiteur (biocides) ou de facteur de croissance (« équivalent » des vitamines) ;

Les nutriments organiques, plus la molécule sera simple, plus elle serait assimilable par le plus grand nombre d'espèces ;

La symbiose ou la compétition entre les espèces microbiennes.

Certaines bactéries peuvent causer des dysfonctionnements de notre organisme, jusqu'à entraîner le décès de la personne. Depuis 1998 les TAR (Tours AéroRéfrigérantes) sont considérées comme pouvant être à l'origine de pathologie car l'eau de la tour peut contenir des organismes pathogènes, en particulier les légionelles (*Legionella* en latin). Ces bactéries peuvent, si toutes les conditions sont réunies provoquer la contraction d'une maladie: la Légionellose.

I.12.Conséquences sur les performances énergétiques et la durée de vie des chaudières

I.12.1 Limites des modèles théoriques

Bien que les modèles théoriques soient indispensables, ils présentent plusieurs limites.

1. Simplifications excessives

Les hypothèses de régime permanent ou de propriétés constantes ne reflètent pas toujours la réalité industrielle, où les conditions varient dans le temps.

2. Phénomènes complexes non pris en compte

- Turbulence avancée
- Encrassement progressif des surfaces
- Corrosion et dépôts
- Transferts couplés chaleur-masse

La dynamique réelle d'une chaudière implique souvent des phénomènes multi physiques difficiles à modéliser analytiquement.

3. Nécessité de validation expérimentale

Les modèles doivent être validés par des mesures réelles pour garantir leur fiabilité. C'est pourquoi les simulations CFD et les essais industriels sont complémentaires.

Les travaux en thermique industrielle soulignent que les modèles simplifiés restent pertinents pour l'optimisation globale, mais insuffisants pour prédire avec précision les défaillances locales.[8]

Référence bibliographique

[1] Etude technico-économique du remplacement des chaudières de procédé au Complexe GL1/Z.

[2] [Alain, 2001] : Alain RIOU et Jean-Pierre DEPAUW. Différents types de chaudières industrielles , collection Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, Mars 2001.

[3]American Society of Mechanical Engineers (2019). *Boiler and Pressure Vessel Code*.

[4]Duvivier. L, (2006). Traitement des eaux de refroidissement, Ed TEC & DOC, Paris

Yunus A. Çengel & Afshin J. Ghajar (2015). Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications.[5]

□International Atomic Energy Agency (2018). Power Reactor Information System.

National Institute of Standards and Technology (2023). Thermophysical Properties of Water.[6]

World Health Organization (2017). Guidelines for Drinking-water Quality.[8]

Electric Power Research Institute (2012).

[7]Electric Power Research Institute (2012). Cooling Water Management.

[8]Frank P. Incropera et al. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer.

[9]International Organization for Standardization (2015). ISO 14001.

World Health Organization (2017).

[10]International Organization for Standardization (2015). ISO 14001.[10]

[11]American Society of Mechanical Engineers (2019). Boiler and Pressure Vessel Code.

[12]American Petroleum Institute (2016). Standards for Water Systems.

[13]International Atomic Energy Agency (2018). Cooling Systems in Power Plants

Electric Power Research Institute (2012). Cooling Water Management Guide.

[14]American Society of Mechanical Engineers (2019). Boiler and Pressure Vessel Code

Yunus A. Çengel & Afshin J. Ghajar (2015). *Heat and Mass Transfer*.

Chapitre II

***Généralité sur l'encrassement dans
les chaudières à tube d'eau***

II.1. Introduction

Les recherches actuelles dans le domaine du transfert thermique industriel s'articulent autour de deux axes distincts mais fondamentalement complémentaires. Le premier volet est dédié au développement de techniques de détection précoce de l'encrassement. Le second axe, auquel s'inscrit la présente étude, se concentre sur la formulation de produits spécifiques et la conception d'appareillages optimisés pour le nettoyage et l'élimination de ces dépôts indésirables [1].

II.2. Définition

Au sens général, l'encrassement (*fouling*) se définit comme l'accumulation progressive de substances solides indésirables sur une interface d'échange thermique, altérant ainsi l'efficacité de nombreuses opérations industrielles. Ce dépôt, dont la cinétique évolue continuellement au cours du temps, présente une composition variable : il peut être constitué de structures cristallines, de sédiments, de résidus biologiques, de sous-produits de réactions chimiques, ou résulter de la combinaison complexe de plusieurs de ces éléments [2].

II.3. Classification : différents types d'encrassement

La classification des phénomènes d'encrassement peut s'opérer selon la cinétique du mécanisme limitant, les conditions opératoires du générateur de vapeur, ou la nature géométrique et physico-chimique du dépôt prédominant. À l'instar des travaux de référence d'Epstein, nous adopterons cette dernière approche de classification, qui permet de distinguer six configurations majeures :

- L'encrassement par réaction chimique ;
- L'encrassement biologique (bio-encrassement) ;
- L'entartrage (encrassement par précipitation) ;
- L'encrassement particulaire ;

- L'encrassement par gel ;
- L'encrassement par solidification [1].
-

II.3.1. L'encrassement par réaction chimique

Ce type d'encrassement résulte de réactions chimiques se produisant au voisinage immédiat ou directement sur la surface d'échange thermique, conduisant à la précipitation de produits solides. Il s'agit fréquemment de phénomènes de polymérisation favorisant la formation de dépôts à haut poids moléculaire. Si la cinétique de ces réactions est fortement influencée par la température et la présence d'éléments catalyseurs, la vitesse globale de dépôt dépend également de la dynamique de surface et des phénomènes de transfert de masse. Ce mécanisme est fréquemment observé dans les industries agroalimentaires, le secteur nucléaire et les procédés de raffinage pétrolier [3].

II.3.2. L'encrassement biologique

L'encrassement biologique, ou bio-encrassement, provient du développement et de la prolifération de micro-organismes qui forment un biofilm adhérent sur la surface d'échange. On distingue principalement trois classes de micro-organismes responsables de ce phénomène :

- **Les bactéries** : dont la croissance est stimulée par un apport nutritionnel spécifique, notamment les hydrocarbures ;
- **Les algues** : dont la prolifération est conditionnée par l'exposition au rayonnement solaire requis pour la photosynthèse ;
- **Les champignons** : dont le développement est tributaire des fluctuations des conditions ambiantes, telles que l'humidité (H), la température (T) ou le pH [4].

II.3.3. L'entartrage

L'entartrage d'une surface de transfert est un phénomène de cristallisation hétérogène de sels minéraux à partir d'une solution aqueuse sursaturée. Ce mécanisme est intrinsèquement lié à la composition physico-chimique de l'eau industrielle et se traduit par la formation d'incrustations dures et fortement adhérentes sur les parois, généralement métalliques. La précipitation survient lorsque les sels inorganiques dissous subissent des variations de température (échauffement ou refroidissement) modifiant leur limite de solubilité.

Pour qu'un phénomène d'entartrage s'amorce et se développe, deux conditions cinétiques et thermodynamiques doivent être simultanément satisfaites :

- Le produit de solubilité du sel au sein du fluide doit être dépassé (état de sursaturation) ;
- La vitesse de nucléation et de croissance cristalline doit être suffisamment élevée.

Dans les installations industrielles alimentées par des eaux salines ou dures, les dépôts sont principalement constitués de carbonate de calcium (CaCO_3), d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et de sulfate de calcium (CaSO_4) [1].

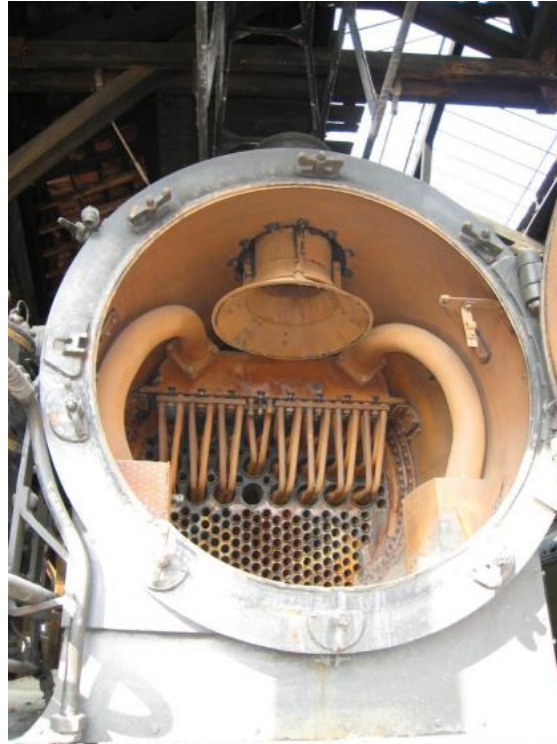


Figure II.1 : Entartrage d'une chaudière à tubes de fumée ($P = 15$ bars) [5].

Les principales causes de l'entartrage

La précipitation des ions calcium et bicarbonate sous forme de polymorphes de carbonate de calcium (CaCO_3 , principalement la calcite) est activée par plusieurs facteurs opérationnels :

- Les cycles de réchauffages successifs du fluide ;
- L'exposition à des températures de paroi élevées ;
- Les perturbations hydrodynamiques au sein des conduites (phénomènes de brassage, chocs de pression, variations de vitesse) ;
- Le stockage prolongé de l'eau sans traitement ;
- Le contact direct avec la phase gazeuse (air).

L'ensemble de ces propriétés physico-chimiques définit le potentiel entartrant ou le caractère agressif d'une eau [6].

II.3.4. L'encrassement particulaire

Ce phénomène désigne le dépôt et l'accumulation progressive sur les surfaces d'échange de particules solides initialement en suspension et transportées par le vecteur fluide. Les cas industriels les plus représentatifs incluent :

- Les circuits d'eau de chaudière chargés en produits particuliers issus de la corrosion en amont ;
- Les circuits d'eau des tours de refroidissement aéroréfrigérantes ;
- Les écoulements gazeux industriels transportant des cendres volantes, des résidus solides de combustion ou des poussières issues de l'incinération de déchets [2].



Figure II.2 : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière [5].

II.3.5. Encrassement par corrosion

L'encrassement par corrosion résulte d'interactions chimiques ou électrochimiques directes entre le matériau de la surface de transfert thermique et le fluide process. Les produits de corrosion formés in situ dégradent la conductivité thermique de la paroi et modifient sa rugosité, ce qui catalyse l'ancrage d'autres agents encrassants.

Les faciès de corrosion peuvent être de nature uniforme (perte d'épaisseur régulière et homogène), localisée par piqûres (attaque confinée à de micro-zones provoquant des perforations), microscopiquement fissurante, ou sélective (dissolution préférentielle d'un élément d'un alliage).

Ce mode d'encrassement agit comme un promoteur synergique pour les autres types de dépôts. En effet, les oxydes de corrosion créent des sites de nucléation actifs pour les solutions sursaturées, piègent mécaniquement les particules en suspension, constituent des cavités protectrices favorables au développement de biofilms bactériens, et peuvent exercer un effet catalytique sur certaines réactions de polymérisation organiques [7].

II.3.6. Encrassement par gel

Ce mécanisme correspond soit à la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange maintenue sous le point de congélation (formation d'une couche de glace interne), soit à la précipitation par cristallisation des constituants à haut point de fusion d'un mélange liquide au contact d'une paroi froide (comme le dépôt de fractions paraffiniques lors du transport de pétroles bruts) [7].

Note : L'entartrage (par précipitation) et l'encrassement par gel sont regroupés historiquement sous la dénomination générique d'**encrassement par cristallisation**.

II.4. Classification suivant la nature du dépôt

Selon la classification établie par Nelson [8], basée sur les caractéristiques mécaniques et morphologiques des dépôts en conditions opératoires, on distingue trois grandes catégories : les dépôts durs, les dépôts poreux et les dépôts mous.

II.4.1. Dépôts durs

Cette catégorie regroupe principalement le tartre minéral cristallin, les oxydes de corrosion adhérents, la rouille et le coke thermique dense. Généralement, l'épaisseur et la résistance thermique de ces dépôts croissent de manière non linéaire au cours du

temps. La résistance conductive globale de la couche est intimement liée à la conductivité propre de la phase minérale ou métallique la constituant.

Ces structures compactes résistent aux méthodes de nettoyage douces telles que le soufflage à la vapeur ou le rinçage à l'eau chaude. Leur élimination requiert impérativement des traitements chimiques acides ciblés ou des actions mécaniques abrasives lourdes (outils de détartrage, brosses métalliques rotatives).

II.4.2. Dépôts poreux

Bien qu'ils partagent parfois une composition chimique similaire à celle des dépôts durs, ces structures se caractérisent par une porosité interne élevée. Les exemples typiques comprennent :

- Le coke poreux ou le charbon issus du craquage thermique des coupes lourdes de pétrole (résidus de distillation atmosphérique ou sous vide, asphaltes, goudrons) ;
- Les mélanges de boues, de sédiments et de poussières précipités à partir des eaux industrielles ou des bruts pétroliers non dessalés, souvent amalgamés avec des oxydes de corrosion.

Ces dépôts s'avèrent parfois plus pénalisants que les dépôts denses. Le fluide process ou l'air emprisonné au sein de la matrice poreuse possède une conductivité thermique nettement inférieure à celle du squelette solide du dépôt, ce qui réduit drastiquement le coefficient de transfert thermique global. L'utilisation exclusive du soufflage de vapeur reste insuffisante pour leur extraction.

II.4.3. Dépôts mous

Ces dépôts incluent la vase, les boues meubles, la calamine non adhérente, la poussière de coke pulvérulente ainsi que les débris organiques ou végétaux (feuilles, fibres). La résistance thermique induite ne dépend pas majoritairement de la nature de la phase solide, mais plutôt des propriétés thermophysiques du liquide interstitiel piégé.

Ces structures peu cohérentes s'éliminent aisément par des procédés physiques (tringlage, brossage souple, soufflage à la vapeur ou à l'air comprimé, ou simple lavage à l'eau chaude). Contrairement aux dépôts durs et poreux qui résistent aux forces de cisaillement hydrodynamiques, la majorité des dépôts mous subit une érosion naturelle significative et peut être hydrodynamiquement entraînée en maintenant une vitesse d'écoulement supérieure à 4 ft/s (soit $1,22 \text{ m/s}$).

II.5. Généralités sur le tartre

Le tartre correspond à une structure minérale cristalline hétérogène issue de la germination et de la croissance de cristaux au sein d'une solution en état de sursaturation. Ces dépôts se caractérisent par une forte cohésion interne et une adhérence élevée au substrat. Dès que le produit ionique des sels en solution excède leur limite de solubilité, la précipitation s'amorce, préférentiellement sur les parois d'échange thermiquement sollicitées, la solubilité de la majorité de ces sels étant inversement proportionnelle à la température (solubilité rétrograde).

Bien que l'entartrage ne présente pas un caractère destructeur immédiat comparé à la corrosion, il constitue une problématique industrielle majeure. Le tartre agit comme un isolant thermique performant qui obère l'efficacité des installations, provoquant :

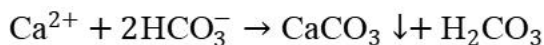
- Une chute drastique du rendement thermique des échangeurs et chaudières ;
- Une réduction de la section utile des conduites, entraînant des pertes de charge sévères ;
- Une réduction du débit massique du fluide ;
- Une surchauffe thermique critique des parois métalliques exposées aux flux de chaleur, pouvant conduire à la ruine mécanique du matériau ;
- Une augmentation exponentielle de la consommation d'énergie (gaz, électricité);
- Une baisse d'efficacité des agents tensioactifs et des additifs de traitement.

Les principales phases minérales incriminées dans les circuits de refroidissement et de génération de vapeur sont la silice (SiO_2), le sulfate de calcium (CaSO_4), le phosphate de calcium ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) et le carbonate de calcium (CaCO_3) [9].

II.6. Formation du tartre

Les mécanismes régissant la précipitation du carbonate de calcium sont complexes et dépendent simultanément de paramètres interdépendants : la dureté calcique (titre hydrotimétrique), l'alcalinité totale (titre alcalimétrique complet), la salinité globale (solides dissous totaux), la température et le pH de la solution.

La séquence de précipitation suit les équilibres chimiques successifs suivants :



II.7. Le tartre et ses conséquences

L'accumulation de tartre génère de multiples dysfonctionnements opérationnels au sein des installations industrielles :

- Le déséquilibre hydraulique et thermique des réseaux ;
- La perte globale d'efficacité des transferts d'énergie ;
- Le colmatage partiel ou total des éléments chauffants et des faisceaux de tubes de chaudière ;
- Le dysfonctionnement des organes de régulation (pompes, vannes motorisées) ;
- La création de zones d'ombrage et de niches écologiques propices à la colonisation microbiologique (corrosion induite par les micro-organismes) ;
- L'augmentation significative de la facture énergétique ;
- La dégradation prématurée et la réduction de la durée de vie des équipements ;

- La diminution des coefficients globaux d'échange thermique couplée à une réduction drastique des débits de fluide [10].

II.8. Le tartre et les équipements industriels

En milieu industriel, l'implémentation de stratégies préventives contre l'entartrage s'avère indispensable pour garantir la durabilité, la sécurité et l'optimisation économique des installations thermiques. Les bénéfices directs incluent :

- Le maintien nominal des performances thermiques des chaudières ;
- La rationalisation ou l'évitement des procédés d'adoucissement d'eau centralisés ;
- L'application d'actions synergiques à caractère préventif et curatif ;
- La réduction drastique des risques d'arrêts de production non programmés ;
- La diminution substantielle des coûts d'exploitation et de maintenance.

Dans les installations hautement sensibles, un faible voile de tartre peut rapidement dégrader les performances globales avec des répercussions directes sur la sûreté des procédés. L'intégration de systèmes de traitement de l'eau (physiques, chimiques ou électrochimiques) permet de protéger les installations en modifiant la cinétique de cristallisation du carbonate de calcium, favorisant une phase moins adhérente et non incrustante (l'aragonite) au détriment de la calcite.

Parallèlement, des opérations de détartrage curatif ciblé sont régulièrement planifiées sur les différents types de générateurs (chaudières à tubes d'eau ou à tubes de fumée), associant des actions de déstructuration du tartre dur à des systèmes de filtration et de bouclage pour piéger les sédiments libérés [11].

II.9. Apparition et développement de l'encrassement

II.9.1. Les processus fondamentaux de l'encrassement

D'un point de vue phénoménologique, l'encrassement constitue un problème transitoire de transfert de chaleur et de masse régi par des interactions physiques et chimiques couplées. Epstein [Epstein 1983] a formalisé ce phénomène en le décomposant en une séquence de cinq étapes distinctes [12] :

II.9.1.1. L'initiation

L'initiation (ou période d'induction) correspond au laps de temps s'écoulant entre la mise en service d'une surface propre et l'apparition mesurable du premier dépôt. Il convient de souligner que dans la majorité des études expérimentales portant sur l'encrassement particulière des chaudières [Glen et al. 1992, Grillot 1989, Grillot et Icart 1997], cette phase d'induction est extrêmement brève, voire indétectable [13].

Durant cette phase, l'interface subit un conditionnement physico-chimique. La température de la paroi, la nature métallurgique du matériau et sa rugosité de surface conditionnent fortement cette période d'incubation. Les efforts de recherche actuels visent à modéliser précisément cette phase afin de développer des solutions permettant de maximiser le temps d'induction. L'application de revêtements innovants à faible énergie de surface, tels que le DLC (*Diamond-Like Carbon*), permet de retarder significativement l'ancrage des germes cristallins [Bohnet et al. 2003]. Inversement, une rugosité de surface élevée accélère l'encrassement en offrant des sites de nucléation thermodynamiquement favorables au sein des micro-rayures et des cavités [14].

II.9.1.2. Transport

Cette étape décrit le transfert de masse des espèces encrassantes depuis le cœur du fluide vers l'interface thermique. Ce transport est régi par différents mécanismes

physiques dépendants de la taille des entités : la diffusion moléculaire ou brownienne, la sédimentation gravitationnelle, l'impaction inertielle et la thermophorèse.

La thermophorèse définit le déplacement de petites particules induit par un gradient de température au sein du fluide : les parois froides tendent ainsi à attirer les particules colloïdales tandis que les parois chaudes exercent un effet répulsif. Ce mécanisme s'avère particulièrement significatif pour des particules de diamètre proche de $5\ \mu\text{m}$ et devient prédominant pour les fractions submicroniques inférieures à $0,1\ \mu\text{m}$. Des phénomènes d'électrophorèse dus aux charges de surface ainsi que des transports par transport turbulent (*eddy diffusion*) interviennent également. Plusieurs modèles théoriques décrivant ces flux de transfert sont documentés dans la littérature [Nishio et al. 1974] [15].

II.9.1.3. Dépôt

Une fois la matière d'encrassement transportée au voisinage immédiat de la paroi, une fraction de celle-ci s'y attache durablement. L'efficacité de cette étape de dépôt est gouvernée par le bilan des forces s'exerçant à l'échelle microscopique, ainsi que par les propriétés rhéologiques du fluide (viscosité, densité) et l'état de surface.

L'adhésion particulaire est dictée par les forces de Van der Waals, les interactions électrostatiques (théorie DLVO) et les forces capillaires. Les interactions de London-Van der Waals résultent de dipôles induits instantanés entre atomes neutres adjacents. Dans un écoulement monophasique, pour des particules de diamètre $d_p \leq 100\ \mu\text{m}$, les forces attractives de Van der Waals l'emportent sur les forces de gravité, favorisant l'ancrage permanent de la particule sur la paroi [Rodliffe et Means 1979] [16].

II.9.1.4. Le réentraînement (Enlèvement)

Le réentraînement correspond à l'arrachement et à l'expulsion d'une partie du dépôt sous l'action des forces de cisaillement hydrodynamiques exercées par le fluide, ou par

des mécanismes d'érosion et d'écaillage. Une fraction de la matière peut être réentraînée immédiatement après l'impact, tandis qu'une autre est éliminée ultérieurement suite à la fragilisation de la matrice. Les forces de cisaillement à l'interface dépôt-fluide dépendent directement du gradient de vitesse à la paroi, de la viscosité cinématique du fluide et de la macrorugosité du dépôt en croissance [17].

II.9.1.5. Le Vieillissement

Dès que le dépôt est stabilisé sur la surface, la phase de vieillissement s'amorce. Elle se caractérise par des modifications structurales, chimiques ou cristallographiques internes qui altèrent les propriétés mécaniques de la couche. Par exemple, l'action corrosive sous-jacente à la paroi peut empoisonner ou fragiliser la base d'un biofilm bactérien (bio-encrassement), conduisant à son détachement. De même, des réactions chimiques secondaires ou des phénomènes de recristallisation au sein du dépôt modifient sa composition, augmentant généralement sa compacité et sa résistance mécanique au réentraînement [17].

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

Dans le secteur du raffinage et de la pétrochimie, l'encrassement des échangeurs de chaleur engendre de graves conséquences opérationnelles. D'une part, il augmente la résistance thermique globale, ce qui réduit l'efficacité de récupération de chaleur, diminue le flux thermique transféré, augmente la température de paroi du côté chaud et abaisse la température du fluide du côté froid, tout en favorisant la corrosion sous dépôt. D'autre part, la réduction de la section de passage utile induit une restriction du débit, une augmentation drastique des pertes de charge, une surpression en amont des installations et une hausse importante de la puissance de pompage requise. Enfin, ce phénomène peut générer des instabilités d'écoulement diphasique, des risques de

cavitation, des vibrations hydrodynamiques destructrices et le blocage complet des faisceaux tubulaires [18].

II.11. Processus d'encrassement

Le développement global de l'encrassement est modélisé comme le bilan net de deux actions simultanées et antagonistes : le taux de dépôt ($\dot{m}_d$) et le taux de réentraînement ou de suppression ($\dot{m}_r$).

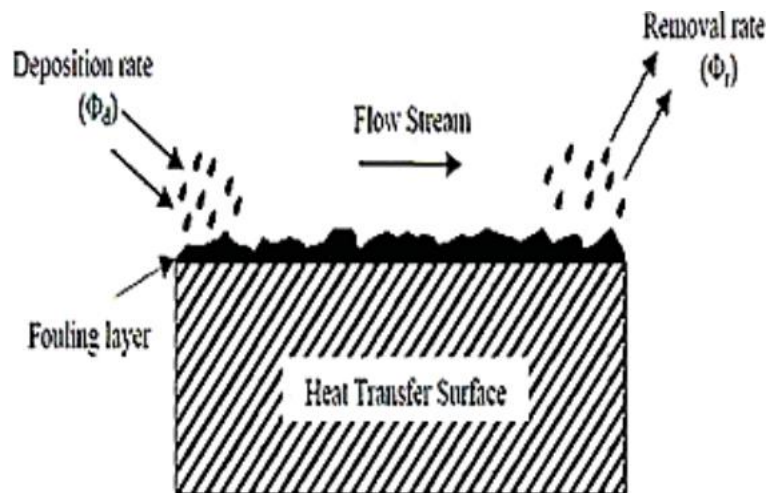


Figure II.3 : Représentation schématique du processus d'encrassement (Formation de dépôt) [17].

Ce bilan global intègre la séquence des sous-processus suivants :

1. Génération et croissance des agents encrassants au sein de la masse du fluide ;
2. Transport convectif et diffusif de ces entités vers l'interface dépôt-fluide ;
3. Réactions d'attachement, d'adhésion ou de réticulation à l'interface ;
4. Détachement et arrachement mécanique du dépôt sous l'effet de l'écoulement ;
5. Transport des matières érodées depuis l'interface vers le cœur du fluide [19].

II.12. Détection de l'encrassement

En régime thermique permanent, l'apparition de l'encrassement peut être surveillée indirectement par le suivi des indicateurs de performance thermique (diminution du rendement global). Le protocole consiste à comparer l'efficacité thermique en temps réel du générateur de vapeur vis-à-vis des spécifications nominales du constructeur, en évaluant l'évolution de la surface d'échange utile, de la capacité thermique et de la résistance thermique additionnelle induite par le coefficient de transfert encrassé [17].

II.13. Action de prévention – Remèdes

Bien que l'élimination absolue de l'encrassement soit techniquement difficile à atteindre, plusieurs stratégies préventives permettent de minimiser sa cinétique de formation :

- L'épuration physico-chimique du fluide (élimination des sels instables, des composés inorganiques, de l'oxygène dissous, des gaz incondensables, des dérivés soufrés/azotés et des hydrocarbures insaturés précurseurs de gommages) ;
- La filtration rigoureuse des matières particulaires en suspension ;
- L'injection continue d'inhibiteurs de corrosion spécifiques ;
- L'additivation du fluide par des antioxydants, des désactivateurs de métaux ou des agents anti-encrassants dispersants ;
- Le contrôle rigoureux des paramètres opératoires (maintien de températures de peau inférieures aux seuils critiques, impositions de vitesses d'écoulement élevées pour maximiser le cisaillement, et régulation des couples pression/température pour proscrire la vaporisation locale).
- En phase curative, les méthodes de nettoyage classiques se classent en trois grandes catégories :
 - Les procédés mécaniques conventionnels ;
 - Les techniques hydrodynamiques (jets d'eau haute ou très haute pression, avec ou sans adjonction de micro-abrasifs) ;

- Les traitements chimiques de lavage.

Il est établi que la couche d'encrassement ne présente pas une morphologie homogène, mais se structure généralement en quatre sous-couches de propriétés distinctes [2].

II.14. Nettoyage d'une chaudière

L'optimisation des performances thermo-hydrauliques des chaudières impose l'exécution de cycles périodiques de nettoyage. L'objectif est d'éliminer l'intégralité des dépôts afin de restaurer l'état de surface initial des tubes, prolongeant ainsi leur cycle de vie opérationnel [17].

II.14.1. Nettoyage mécanique

Ces opérations nécessitent la mise hors ligne de l'équipement. Le nettoyage mécanique est fréquemment privilégié pour sa rapidité de mise en œuvre. Néanmoins, son efficacité globale reste imparfaite, car il peut laisser subsister un film d'encrassement résiduel adhérent. De plus, les frottements répétés des têtes d'outils rotatives ou des axes de nettoyage contre le substrat métallique risquent d'endommager la paroi interne des tubes par usure abrasive.



Figure II.4 : Procédé de nettoyage mécanique des tubes [17].

II.14.2. Nettoyage hydraulique

Cette technique hors ligne met en œuvre des jets d'eau à très haute pression. Bien que performante, cette méthode requiert un temps d'intervention substantiel. Une vigilance rigoureuse doit être observée lors du réglage de la pression afin de ne pas altérer la structure des tubes ou les revêtements internes. Une mauvaise maîtrise des paramètres peut générer des micro-fissurations ou exacerber la corrosion ultérieure, des dommages qui ne se révèlent souvent qu'après la remise en service de l'installation.



Figure II.5 : Chaudière à vapeur industrielle en cours de nettoyage hydraulique [17].

II.14.3. Nettoyage chimique

Le nettoyage chimique hors ligne repose sur la circulation de solutions formulées, souvent à base d'acides faibles additivés d'inhibiteurs de corrosion. Cette approche offre une excellente efficacité de dissolution, supérieure aux méthodes physiques sur les dépôts complexes. Toutefois, elle présente des inconvénients majeurs : un coût financier élevé, des temps de contact prolongés et des contraintes environnementales strictes liées à la neutralisation et au traitement des effluents chimiques usés. De surcroît, il est fréquent qu'un traitement chimique doive être complété par une action mécanique de finition pour éliminer les résidus carbonés ou minéraux insolubles.

II.14.4. Nettoyage par projectile

Cette variante de nettoyage hors ligne consiste à propulser des projectiles spécifiques à travers les tubes à l'aide d'un fluide moteur (eau ou air comprimé). L'outil est sélectionné en fonction de la nature du dépôt. Les racleurs en plastique moulé sont couramment employés pour les sédiments mous, tandis que les brosses cylindriques sont adaptées aux biofilms microbiologiques ou au nettoyage des tubes à surface augmentée (tubes ailetés internes).

Pour le traitement des incrustations dures, des projectiles métalliques intégrant des lames en acier trempé montées sur ressorts en U ont été développés, permettant de gratter le tartre sans entamer le métal. Des versions adaptées en acier inoxydable sont également spécifiées pour éviter toute contamination ferreuse des tubes.



Figure II.6 : Nettoyage par launch de projectiles (racleurs/brosses) [17].

II.15. Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser une synthèse bibliographique approfondie des mécanismes physiques, chimiques et biologiques régissant l'encrassement des surfaces d'échange thermique dans les chaudières industrielles. Il ressort de cette étude que le développement de ces dépôts constitue une barrière thermique critique, pénalisant l'efficacité énergétique et la récupération des calories.

L'analyse des critères de dimensionnement, de l'évaluation des pertes d'énergie et de la gestion économique des installations montre que les données théoriques prédictives restent complexes à formaliser, et que la conduite de ces équipements repose encore largement sur des approches empiriques dictées par le savoir-faire industriel.

Références bibliographiques

- [1] N. Epstein, "Fouling in Heat Exchangers," in *Heat Exchangers: Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design*, New York: McGraw-Hill, 1981, pp. 701–734.
- [2] T. R. Bott, *Fouling of Heat Exchangers*, Amsterdam: Elsevier Science, 1995.
- [3] A. P. Watkinson and D. I. Wilson, "Chemical reaction fouling: a review," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 14, no. 4, pp. 361–374, 1997.
- [4] W. G. Characklis and K. C. Marshall, *Biofilms*, New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [5] Techniques de l'Ingénieur, "Générateurs de vapeur et chaudières industrielles : Exploitation et maintenance," Référence BM4120, 2015.
- [6] H. Roques, *Fondements théoriques du traitement chimique des eaux*, Paris: Technique et Documentation Lavoisier, 1990.
- [7] E. F. C. Somerscales and J. G. Knudsen, *Fouling of Heat Transfer Equipment*, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1981.
- [8] W. L. Nelson, *Petroleum Refinery Engineering*, New York: McGraw-Hill, 1958.
- [9] Z. Amjad, *Mineral Scale Formation and Inhibition*, Springer Science & Business Media, 1996.
- [10] H. Müller-Steinhagen, *Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Technologies*, Essen: Publico Publications, 2000.
- [11] AWWA (American Water Works Association), *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water*, McGraw-Hill, 2011.

- [12] N. Epstein, "Thinking about heat transfer fouling: A 5 $\times$ 5 matrix," *Heat Transfer Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 43–56, 1983.
- [13] J. M. Grillot and G. Icart, "Fouling of tinned extended surfaces in exhaust gas of diesel engines," *Heat Transfer Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 23–34, 1997.
- [14] M. Bohnet, W. Augustin, and H. Schönfeld, "Mitigation of fouling in heat exchangers by using modified surface coatings," in *Proceedings of Christoffersen Fouling Conference*, institutional repository, 2003.
- [15] G. Nishio, S. Kitani, and J. Takada, "Thermophoretic deposition of aerosol particles in a heat-exchanger pipe," *Nuclear Science and Engineering*, vol. 54, no. 4, pp. 432–444, 1974.
- [16] R. S. Rodliffe and R. M. Means, "Factors influencing the deposition of particulate corrosion products on nuclear steam generator surfaces," Central Electricity Generating Board (CEGB), Report, 1979.
- [17] S. Kakac, H. Liu, and A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, 3rd ed., CRC Press, 2012.
- [18] A. P. Wiegmann, "Crude Oil Fouling: Review of Underlying Mechanisms," *Petroleum Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 321–344, 2002.
- [19] D. Q. Kern and R. E. Seaton, "A theoretical analysis of thermal surface fouling," *British Chemical Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 258–262, 1959.

Chapitre III

Partie Expérimental

Introduction:

La corrosion, l'encrassement et le tartre sont parmi les principaux phénomènes responsables de la dégradation des équipements industriels et de la diminution de leur efficacité. Dans ce travail pratique, nous avons étudié le comportement d'échantillons d'acier soumis à différents milieux chimiques. Après un polissage et une pesée initiale, les échantillons ont été immergés dans des solutions de HCl (1 ; 1,5 ; 2 et 2,5 %) et de NaOH (1 ; 2 ; 3 et 4 %) afin d'évaluer l'influence de la concentration sur la corrosion. Ensuite, l'étude de l'encrassement a été réalisée en utilisant de l'huile déposée sur les échantillons, qui ont été placés dans des solutions de HCl et de NaOH avec des concentrations variables pendant une durée d'une heure. Enfin, la formation du tartre a été étudiée à partir de solutions de CaCl_2 et de carbonate de sodium, en effectuant des pesées toutes les 10 minutes pour suivre l'évolution du dépôt. Une autre étude a été réalisée à une température de 60 °C afin d'évaluer la résistance et le comportement du tartre sous l'effet de la température

III.1 approche d'étude

- La concentration des solutions chimiques
- Mesurer la perte de masse des dépôts
- La température de nettoyage fixée à 60°C

III.2 Méthodes de préparation des matériaux**III.2 Méthode de nettoyage**

Dans cette méthode de nettoyage, nous avons utilisé différentes solutions chimiques, notamment une solution alcaline de NaOH ainsi que des solutions acides à base de HCl et d'acide citrique. L'étude a été réalisée en faisant varier les concentrations de chaque solution afin d'évaluer leur efficacité sur l'élimination de l'entartrage et de l'encrassement déposés sur les échantillons.

Les échantillons ont été pesés avant leur immersion dans les solutions de nettoyage, puis à des intervalles de temps déterminés. Par la suite, l'effet de la température a également été étudié en appliquant le même protocole expérimental à différentes températures.

L'efficacité du nettoyage a été évaluée par une analyse gravimétrique basée sur le suivi de la perte de masse des échantillons au cours du temps. Cette approche permet de quantifier l'élimination des dépôts et de comparer l'influence des paramètres opératoires, tels que la concentration des solutions, la température et le temps de traitement, conformément aux principes de la technique de nettoyage en place (NEP).

III.3 Matériaux utilisés

III.3.1 Préparation des échantillons

1. L'acier C1020

L'acier C1020 est un acier doux (acier à faible teneur en carbone) largement utilisé dans l'industrie pour la fabrication de pièces mécaniques, de structures métalliques, de tuyauteries et d'équipements nécessitant une bonne formabilité et une bonne soudabilité.

2. Composition chimique typique

- Carbone (C) : 0,18 – 0,23 %
- Manganèse (Mn) : 0,30 – 0,60 %
- Phosphore (P) : $\leq 0,04$ %
- Soufre (S) : $\leq 0,05$ %
- Fer (Fe) : le reste

3. Principales caractéristiques

- Bonne soudabilité.
- Bonne ductilité et malléabilité.

- Usinage facile.
- Résistance mécanique modérée.
- Faible résistance à la corrosion sans traitement de protection.

III.4 Dans notre étude

Les échantillons utilisés dans cette étude sont constitués d'acier C1020, un acier au carbone à faible teneur en carbone (environ 0,20 %), choisi pour sa large utilisation dans les installations industrielles et sa sensibilité aux phénomènes d'entartrage et d'encrassement, ce qui en fait un matériau adapté à l'évaluation de l'efficacité des procédés de nettoyage.

III.4.1 Polissage des échantillons

Nous avons procédé au polissage des échantillons afin d'éliminer les traces de corrosion présentes à leur surface et d'obtenir une surface lisse et homogène. Cette opération a été réalisée à l'aide de papiers abrasifs de différentes granulométries, utilisés successivement pour assurer une préparation adéquate de la surface. Après le polissage, les échantillons ont été rincés à l'eau distillée afin d'éliminer les résidus générés lors de cette étape, puis soigneusement séchés à l'aide d'un chiffon propre avant les manipulations suivantes.

III.4.2 Pesage d'échantillons

L'utilisation d'une balance électronique pour déterminer la masse de chaque échantillon

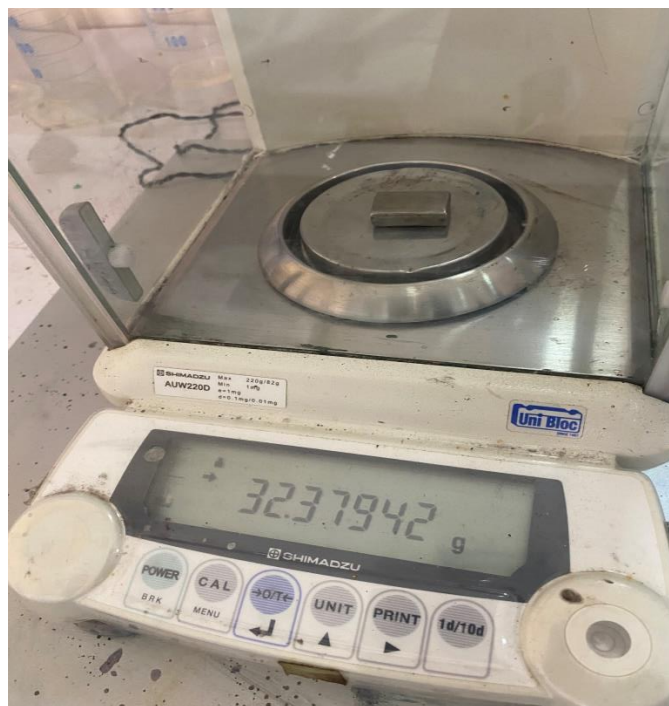


Figure III.1 : Balance électronique de précision

III.5 Produits d'encrassement

III.5.1 Huile d'encrassement

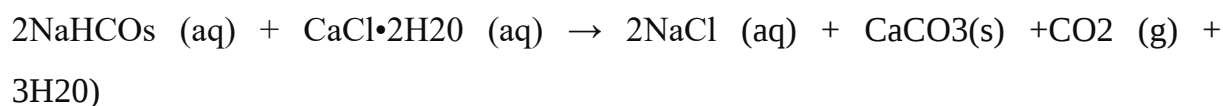
L'encrassement des échantillons a été réalisé à l'aide d'une huile moteur **Naftal 10W-40**. Cette huile est une huile multigrade semi-synthétique adaptée aux moteurs essence et diesel. Elle se caractérise par une viscosité SAE 10W-40, une bonne stabilité thermique, une résistance à l'oxydation et une bonne protection contre l'usure. Elle conserve sa fluidité à basse température et maintient un film lubrifiant efficace à haute température.

III.5.2 Produits d'entartrage

Pour préparer le tartre, une solution de chlorure de calcium (CaCl_2) a été mise en contact avec une solution de bicarbonate de sodium préparée à partir d'eau du robinet. La réaction entre les deux composés a conduit à la formation d'un dépôt calcaire. Le précipité obtenu a ensuite été récupéré afin de former une pâte de tartre utilisée pour l'encrassement des échantillons avant les essais de nettoyage.

III.5.3 La formation du tartre

Le tartre se forme selon l'équation suivante :



III.6 Procédés de nettoyage

III.6.1 Choix des solutions

III.6.1.1 La soude caustique(NaOH)

L'hydroxyde de sodium (NaOH), ou soude caustique, est une base forte constituée d'ions sodium (Na^+) et hydroxyde (OH^-). Très soluble dans l'eau, il se dissocie complètement en solution et libère des ions OH^- responsables de son caractère fortement alcalin. Sa dissolution est exothermique et il est largement utilisé dans le traitement des eaux, la fabrication des savons et diverses industries chimiques. En raison de sa forte corrosivité, sa manipulation nécessite des mesures de sécurité adaptées.

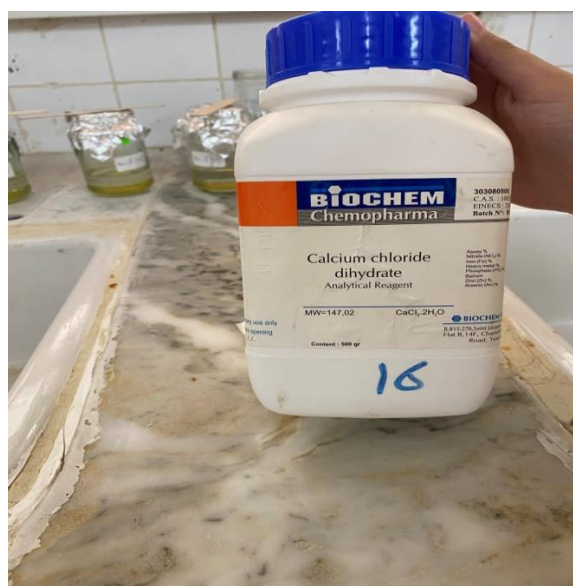


Figure III.2 : L'hydroxyde de sodium**III.6.1.2 L'acide chlorhydrique(HCL)**

L'acide chlorhydrique (HCl) est une solution aqueuse de chlorure d'hydrogène. C'est un acide minéral fort, incolore et très corrosif. Grâce à ses propriétés acides, il est largement employé dans les laboratoires et dans de nombreux procédés de l'industrie chimique comme réactif et pour le contrôle du pH.

III.7 Procédure expérimental**III.7.1 L'entartrage**

- Introduire 30 mL d'eau du robinet dans un bécher.
 - Ajouter 9 g de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et 9 g de NaHCO_3 .
 - Agiter le mélange jusqu'à la formation d'un précipité blanc de CaCO_3 (tartre).
- L'échantillon est plongé dans la solution préparée, puis le bécher est placé sur une plaque chauffante à 250 °C jusqu'à la formation d'un dépôt de tartre sur la surface de l'échantillon.

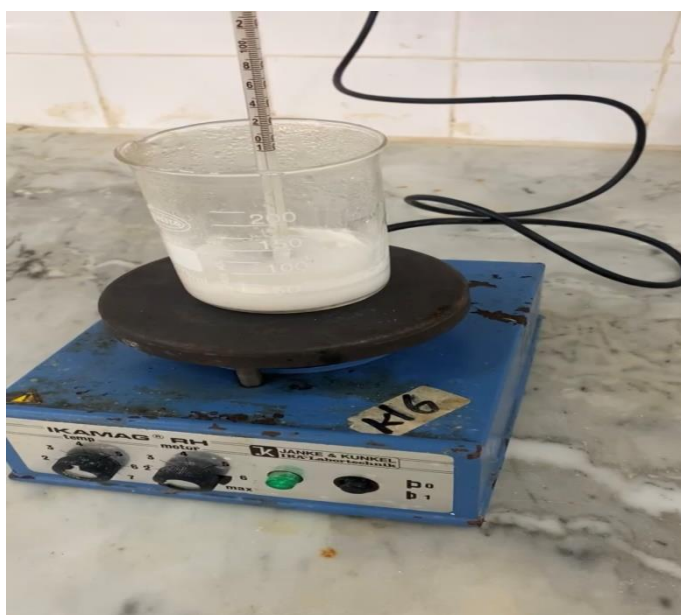


Figure III.3 : Le mélange pendant la formation du tartre

- Ensuite, on laisse la formation des dépôts sécher pendant 8 jours



FigureIII.4 : Les échantillons après le séchage du tartre

- Après séchage, l'échantillon entartre est pesé.



FigureIII.5 : Pesage d'échantillon

III.7.2 L'encrassement

L'encrassement de l'échantillon a été réalisé à l'aide d'une huile préalablement traitée par acide/terre. Une faible quantité d'huile a été répartie de manière homogène sur la surface de l'échantillon à l'aide d'un chiffon propre afin d'assurer un recouvrement uniforme. L'échantillon a ensuite été soumis à un traitement thermique sur une plaque chauffante réglée à 200 °C pendant une durée d'environ 60 minutes. Cette étape a favorisé l'oxydation et la polymérisation partielle de l'huile, conduisant à la formation d'une couche adhérente simulant les dépôts d'encrassement à la surface de l'échantillon.



FigureIII.6 : opération d'encrassement

- Après cette étape, la formation d'une couche d'encrassement à la surface de l'échantillon a été observée, indiquant l'adhésion des dépôts huileux générés lors du traitement thermique.



Figure III.7 : Un échantillon après la formation d'encrasse

III.8 Préparation des solutions

III.8.1 La soude caustique NaOH

Nous avons préparé 4 solutions de la soude de différentes concentrations :

1. Solution de concentration 1% de NaOH

Chaque 100 ml d'eau distillé $\longrightarrow$ on met 1g du NaOH

2. Solution de concentration 2% de NaOH

Chaque 100 ml d'eau distillé $\longrightarrow$ on met 2g du NaOH

3. Solution de concentration 3% de NaOH

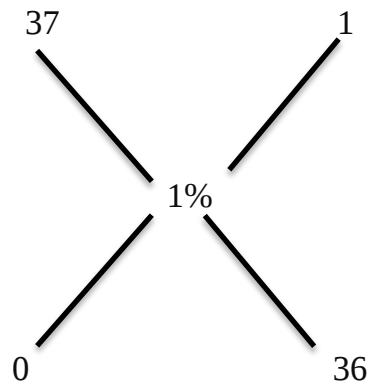
Chaque 100 ml d'eau distillé $\longrightarrow$ on met 3g du NaOH

4. Solution de concentration 4% de NaOH

Chaque 100 ml d'eau distillé $\longrightarrow$ on met 4g du NaOH

III.8.2 préparation solution HCL

Nous avons préparé 4 solutions de l'HCL de différentes concentrations :

1. Solution de concentration 1% d'HCL

$$V = 1/1,18$$

$$V = 0,84 \text{ ml (HCL)}$$

$$V = 36 \text{ ml (H}_2\text{O)}$$

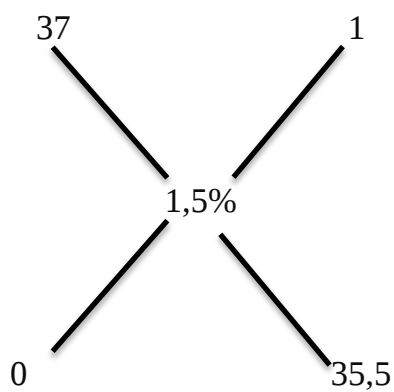
$$V_t = 36,84 \text{ ml}$$

$$0,84 \longrightarrow 36,84$$

$$X \longrightarrow 100$$

$$X = 0,84 \cdot 100 / 36,84$$

$$X = 2,28$$

2. Solution de concentration 1,5% d'HCL

$$V=1,5/1,18$$

$$V=1,27 \text{ ml (HCL)}$$

$$V=35,5\text{ml}(\text{H}_2\text{O})$$

$$V_t=36,77\text{ml}$$

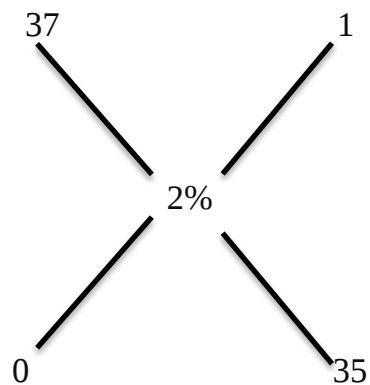
$$0,84 \longrightarrow 36,77$$

$$X \longrightarrow 100$$

$$X= 0,84 \cdot 100/36,84$$

$$X=2,28$$

3. Solution de concentration 2% d'HCL



$$V=2/1,18$$

$$V=0,84 \text{ ml (HCL)}$$

$$V=35 \text{ ml}(\text{H}_2\text{O})$$

$$V_t=35,84\text{ml}$$

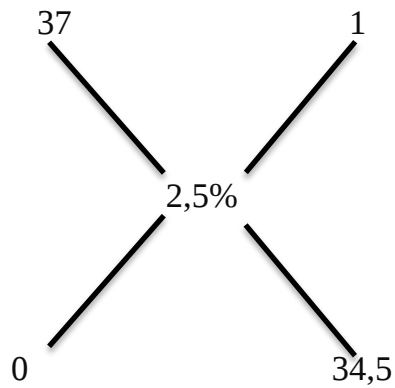
$$0,84 \longrightarrow 3,84$$

$$X \longrightarrow 100$$

$$X= 0,84 \cdot 100/36,84$$

$$X=2,34$$

4. Solution de concentration 2,5% d'HCL



$$V=2,5/1,18$$

$$V=2,11 \text{ ml (HCL)}$$

$$V=34,5 \text{ ml (H}_2\text{O)}$$

$$V_t=36,61 \text{ ml}$$

$$0,84 \longrightarrow 36,61$$

$$X \longrightarrow 100$$

$$X= 0,84 \cdot 100/36,61$$

$$X=2,29$$

III.9 Protocole de nettoyage

III.9.1 Protocole de nettoyage encrassement

III.9.1.1 Protocole de nettoyage d'encrassement par NaOH

- Un échantillon encrassé a été pesé afin de déterminer sa masse initiale.
- L'échantillon a été immergé dans une solution de NaOH à 1 %.

- Toutes les 10 minutes, l'échantillon était retiré, séché superficiellement puis pesé afin de suivre l'évolution de sa masse.
- Après chaque pesée, l'échantillon était transféré vers la solution de concentration immédiatement supérieure selon la séquence : 1 % → 2 % → 3 % → 4 %.
- Après son séjour dans la solution à 4 %, l'échantillon était réintroduit dans la solution à 1 %, marquant le début d'un nouveau cycle.
- Cette séquence de traitement a été répétée pendant une durée totale de 520 minutes.
- L'efficacité du nettoyage a été évaluée à partir de la perte de masse de l'échantillon au cours du temps, jusqu'à l'élimination complète de l'encrassement.

III.9.1.2 Protocole de nettoyage de l'entartrage par solution de NaOH

Un échantillon entartré a été préalablement pesé afin de déterminer sa masse initiale. L'échantillon a été immergé dans une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) de concentration 4 %.

Toutes les 2 minutes, l'échantillon a été retiré de la solution, rincé légèrement, séché superficiellement puis pesé afin de suivre l'évolution de sa masse.

Après chaque pesée, l'échantillon a été immédiatement réintroduit dans la solution de NaOH.

Cette procédure a été poursuivie jusqu'à stabilisation de la masse de l'échantillon, indiquant l'élimination complète des dépôts de tartre.

La durée totale nécessaire pour atteindre cet état a été de 54 minutes. L'efficacité du détartrage a été évaluée à partir de la variation de la masse de l'échantillon en fonction du temps, permettant d'apprécier la capacité de la solution de NaOH à dissoudre les dépôts incrustés.

III.9.1.3 Protocole de nettoyage de l'entartrage par solution d'HCl

Un échantillon entartré a été préalablement pesé afin de déterminer sa masse initiale.

* L'échantillon a été immergé dans une solution d'acide chlorhydrique (HCl) de concentration 2,5 %.

* Toutes les 2 minutes, l'échantillon était retiré de la solution, séché superficiellement puis pesé afin de suivre l'évolution de sa masse.

* Après chaque pesée, l'échantillon était immédiatement réintroduit dans la solution d'HCl.

* Cette procédure a été poursuivie jusqu'à ce que la masse de l'échantillon atteigne sa masse initiale, indiquant l'élimination complète du tartre.

* La durée totale nécessaire pour atteindre cet état a été de 16 minutes.

* L'efficacité du détartrage a été évaluée à partir de la variation de masse de l'échantillon au cours du temps.

III.9.2 Protocoles de nettoyage d'entartrage avec température:

- Nous avons placé les échantillons entartrés dans un bécher contenant 30 ml de solution basique de NaOH.

- Nous avons effectué le nettoyage en utilisant des solutions de NaOH à une concentration de 4%, à une température de 60°C, pendant 4 minutes. Toutes les 30 second, nous avons prélevé des échantillons pour mesurer leur masse.

- Ensuite, nous avons transféré les échantillons dans une autre solution aqueuse d'HCL, à une concentration de 2,5%, une température de 60°C et un volume de 30 ml. Nous avons suivi la diminution de leur masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.



Figure III.8 : nettoyage d'échantillon entartré sous température

III.9.3 Protocole de dissolution du tartre réel

Un échantillon de tartre réel a été préalablement pesé afin de déterminer sa masse initiale. L'échantillon a ensuite été immergé dans une solution d'acide chlorhydrique (HCl) de concentration 2,5 %.

Afin de suivre la cinétique de dissolution, l'échantillon a été retiré du milieu réactionnel à intervalles réguliers, rincé si nécessaire, séché superficiellement puis pesé. Durant la phase initiale de l'expérience, les mesures de masse ont été effectuées toutes les minutes. Après chaque pesée, l'échantillon était immédiatement réintroduit dans la solution acide.

À mesure que la vitesse de dissolution diminuait, la fréquence des mesures a été adaptée en augmentant progressivement les intervalles de pesée à 5 minutes puis à 10 minutes. Cette procédure a été poursuivie jusqu'à la dissolution complète du tartre.

La solution d'HCl a été renouvelée périodiquement au cours de l'essai afin de maintenir des conditions réactionnelles constantes. Ce renouvellement permet de compenser la consommation progressive de l'acide et d'éviter l'accumulation des produits de réaction dans le milieu, susceptibles de ralentir le processus de dissolution. Le suivi de la perte de masse de l'échantillon a ainsi permis d'évaluer l'efficacité du

traitement de détartrage et d'étudier la cinétique de dissolution du tartre en milieu acide.



Figure III.9 :un tartre réels.

III.10 Résultats et discussions

Tableau III.1 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
0	32,3822	32,3768	32,3822
10	32,3819	32,3768	32,3822
20	32,3819	32,3768	32,3822
30	32,3817	32,3768	32,3822
40	32,3817	32,3768	32,3822

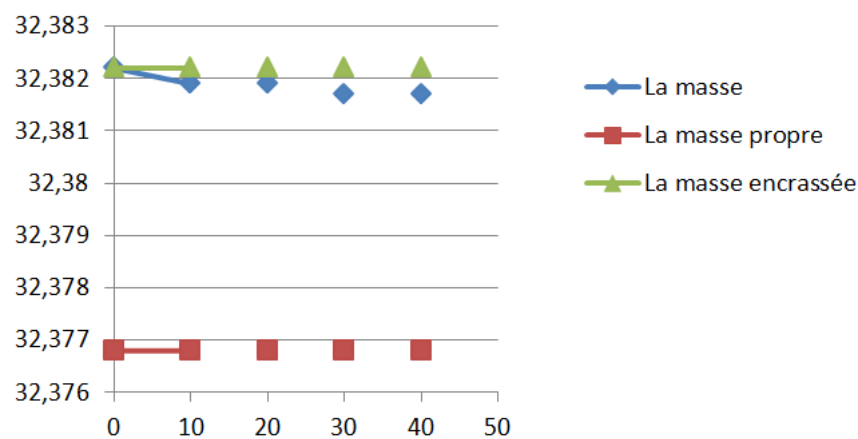


Figure III.10: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.2 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
50	32,3814	32,3768	32,3822
60	32,3814	32,3768	32,3822
70	32,3814	32,3768	32,3822
80	32,3813	32,3768	32,3822

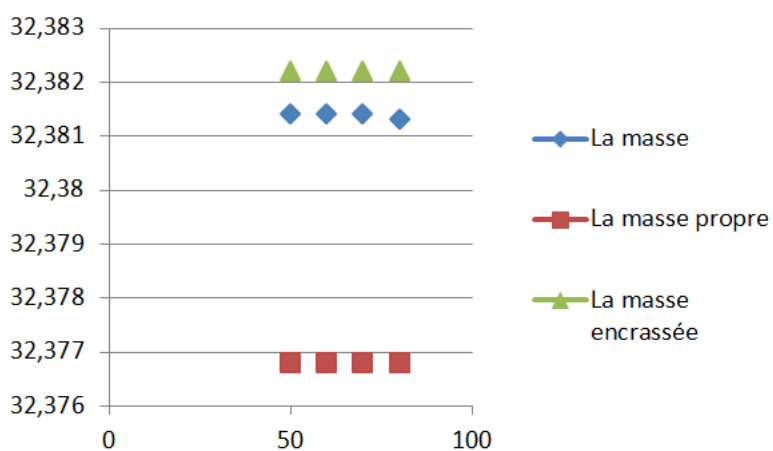
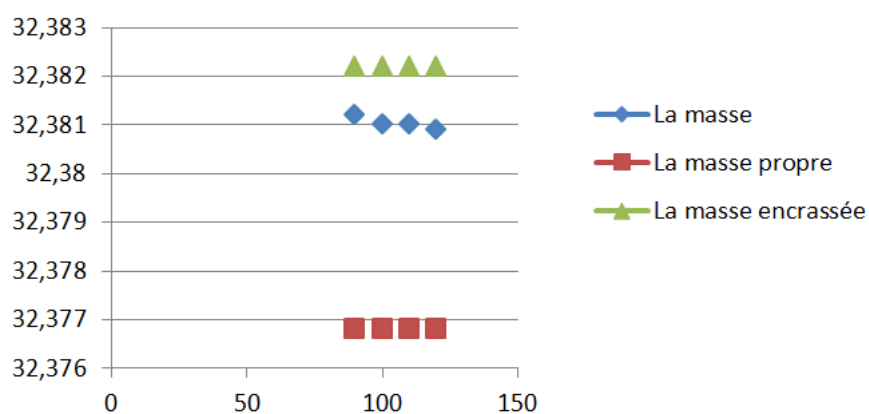


Figure III.11: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.3 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
90	32,3812	32,3768	32,3822
100	32,3810	32,3768	32,3822
110	32,3810	32,3768	32,3822
120	32,3809	32,3768	32,3822

**Figure III.12** : masse d'échantillon encrassé en fonction de temps**Tableau III.4** taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
130	32,3808	32,3768	32,3822
140	32,3808	32,3768	32,3822
150	32,3805	32,3768	32,3822
160	32,3805	32,3768	32,3822

--	--	--	--

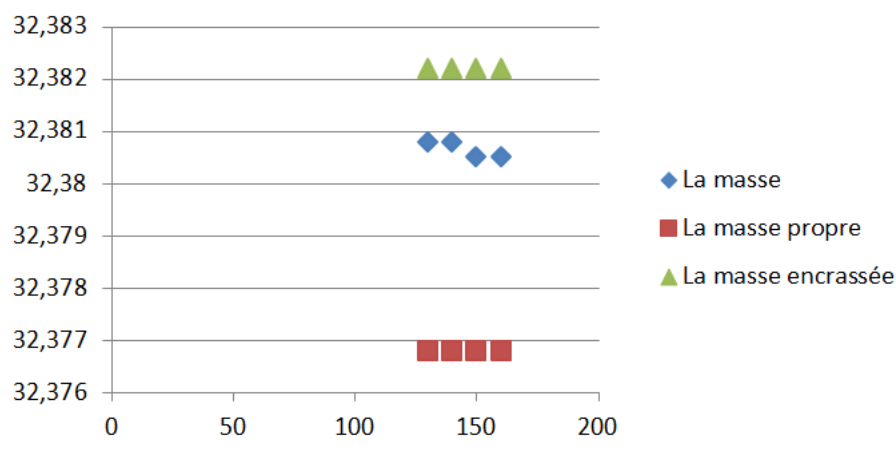


Figure III.13 : masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.5 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
170	32,3803	32,3768	32,3822
180	32,3803	32,3768	32,3822
190	32,3801	32,3768	32,3822
200	32,3801	32,3768	32,3822

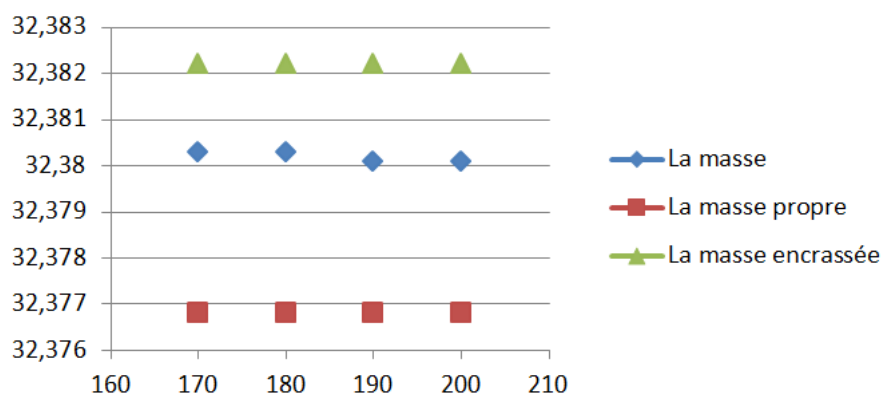
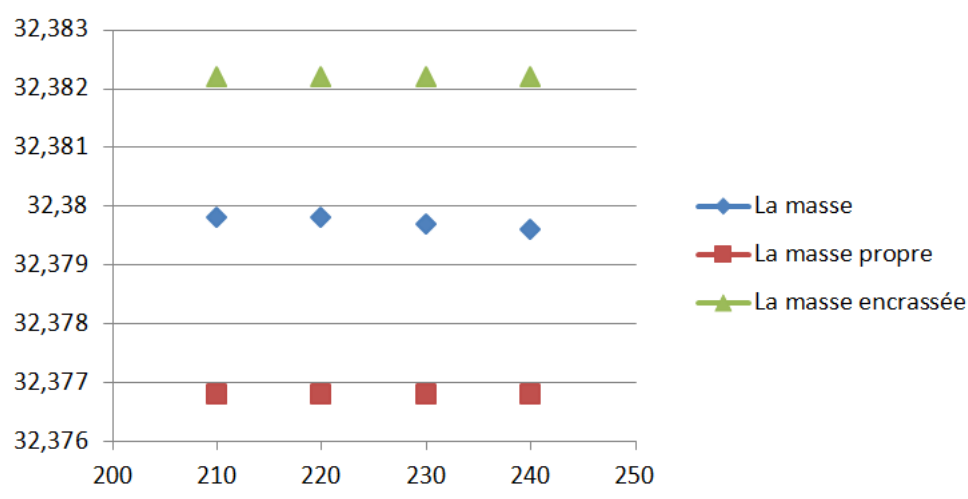


Figure III.14: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps**Tableau III.6** taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
210	32,3798	32,3768	32,3822
220	32,3798	32,3768	32,3822
230	32,3797	32,3768	32,3822
240	32,3796	32,3768	32,3822

**Figure III.15 :** masse d'échantillon encrassé en fonction de temps**Tableau III.7** taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
250	32,3795	32,3768	32,3822
260	32,3793	32,3768	32,3822

270	32,3793	32,3768	32,3822
280	32,3793	32,3768	32,3822

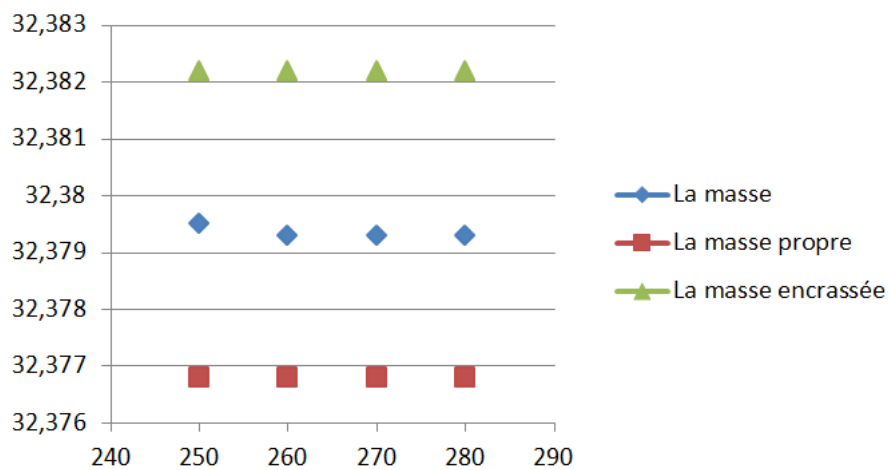


Figure III.16: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.8 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
290	32,3791	32,3768	32,3822
300	32,3791	32,3768	32,3822
310	32,379	32,3768	32,3822
320	32,3789	32,3768	32,3822

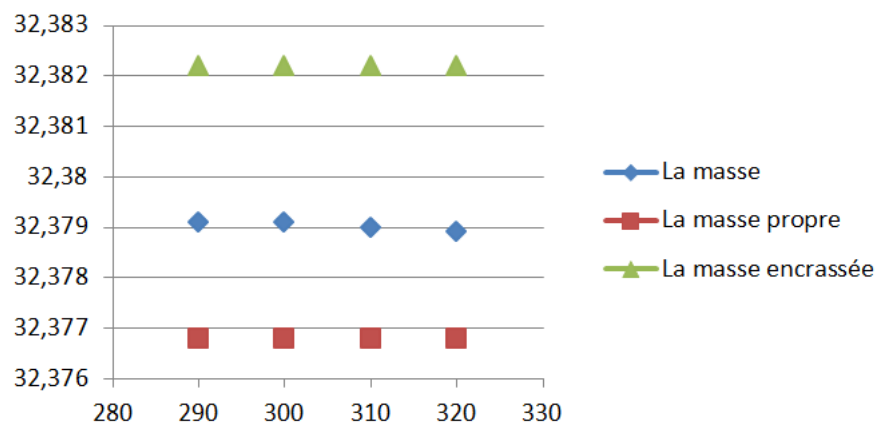


Figure III.17 : masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.9 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
330	32,3788	32,3768	32,3822
340	32,3788	32,3768	32,3822
350	32,3787	32,3768	32,3822
360	32,3786	32,3768	32,3822

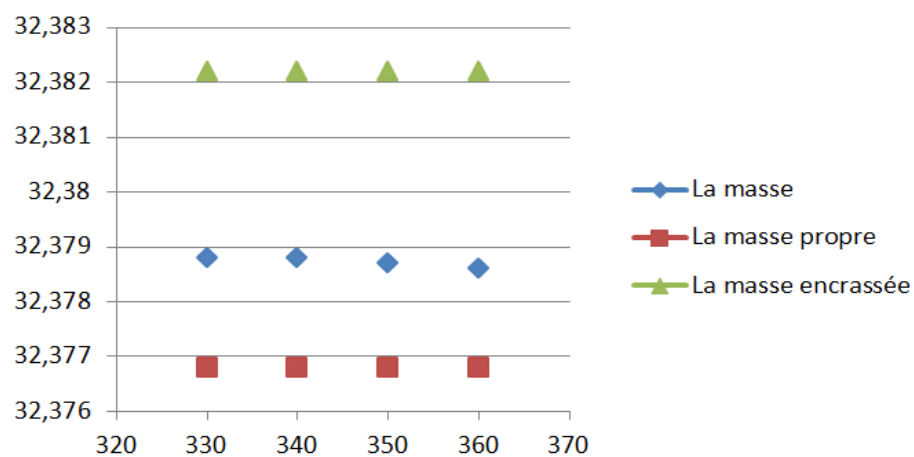
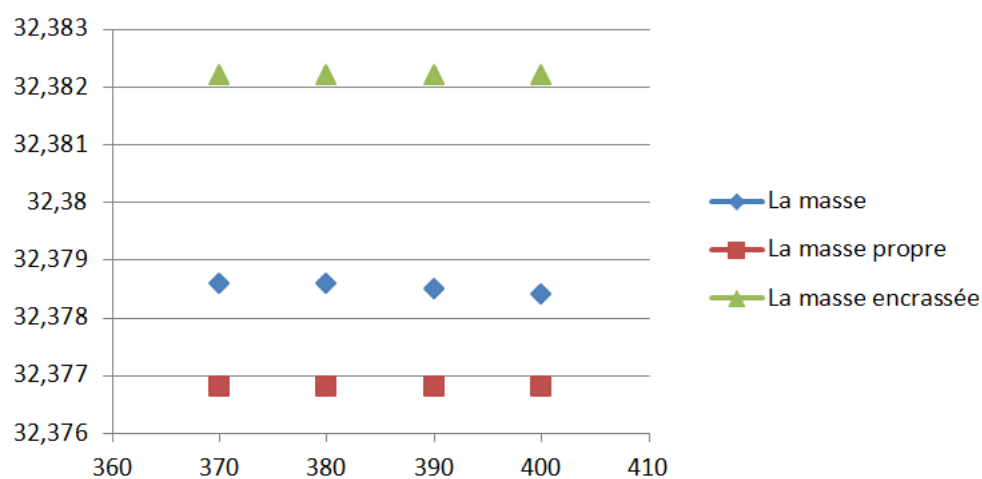


Figure III.18: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.10 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
370	32,3786	32,3768	32,3822
380	32,3786	32,3768	32,3822
390	32,3785	32,3768	32,3822
400	32,3784	32,3768	32,3822

**Figure III.19:** masse d'échantillon encrassé en fonction de temps**Tableau III.11** taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
410	32,3784	32,3768	32,3822
420	32,3783	32,3768	32,3822
430	32,3783	32,3768	32,3822

440	32,3783	32,3768	32,3822
-----	---------	---------	---------

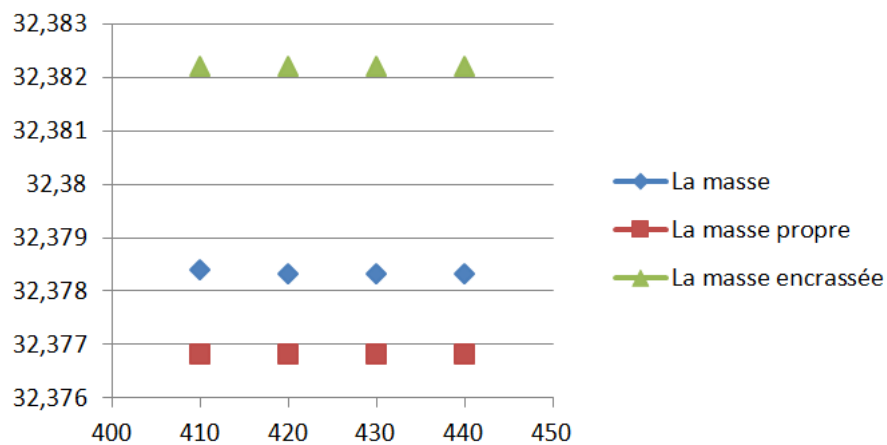


Figure III.20: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.12 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
450	32,3782	32,3768	32,3822
460	32,3782	32,3768	32,3822
470	32,3781	32,3768	32,3822
480	32,3781	32,3768	32,3822

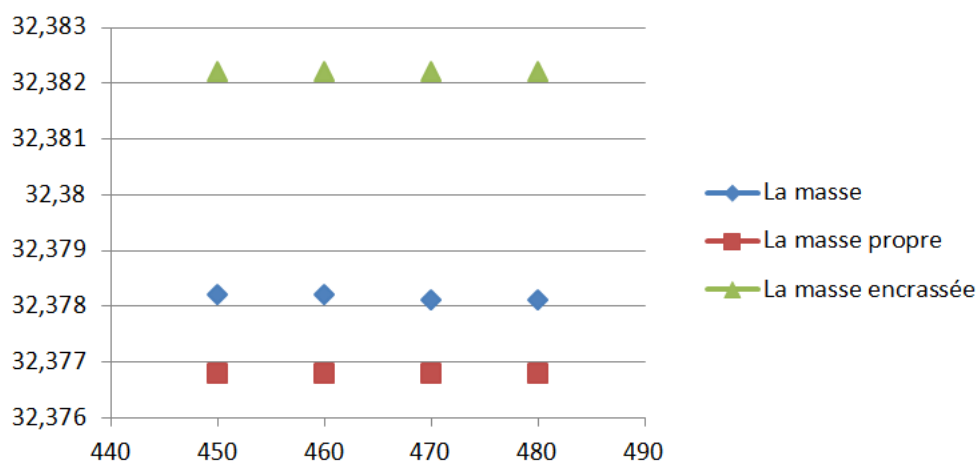


Figure III.21: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.13 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
490	32,3780	32,3768	32,3822
500	32,3780	32,3768	32,3822
510	32,3780	32,3768	32,3822
520	32,3776	32,3768	32,3822

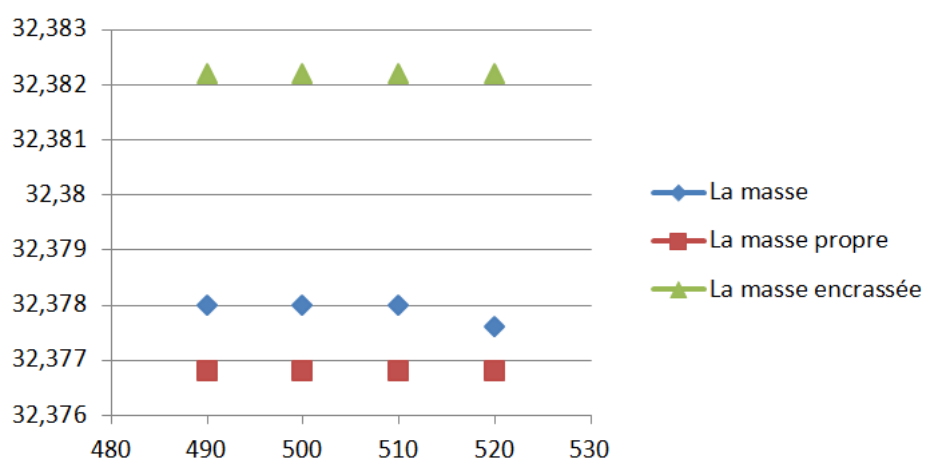


Figure III.22: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.14 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
530	32,3775	32,3768	32,3822
540	32,3772	32,3768	32,3822
550	32,3769	32,3768	32,3822
560	32,3765	32,3768	32,3822

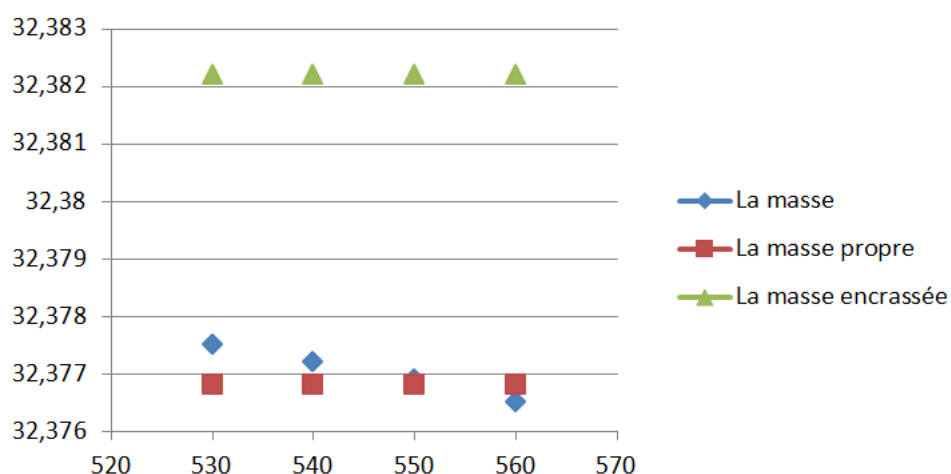


Figure III.23: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

•Discussion de la courbe de nettoyage de l'encrassement par NaOH

Les courbes représentent l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du traitement de nettoyage de l'encrassement par une solution de NaOH. L'axe des ordonnées correspond à la masse (g), tandis que l'axe des abscisses représente le temps de traitement (min).

D'après la courbe, on observe une diminution progressive de la masse totale de l'échantillon au cours du temps. Cette diminution traduit l'élimination progressive des dépôts d'encrassement présents à la surface métallique. La vitesse de perte de masse

est plus importante au début du traitement, puis elle devient plus faible à mesure que la quantité de dépôts restants diminue. Cette évolution indique que les couches superficielles sont éliminées plus rapidement, tandis que les résidus les plus adhérents nécessitent un temps de traitement plus long.

Par ailleurs, la masse de l'échantillon se rapproche progressivement de la masse propre de référence, ce qui montre que le nettoyage par NaOH est efficace pour éliminer l'encrassement. À la fin de l'essai, la masse obtenue est très proche de la masse propre, ce qui signifie que la majorité des dépôts a été éliminée sans variation importante de la masse du métal.

En conclusion, la courbe met en évidence l'efficacité du nettoyage chimique par NaOH dans l'élimination des dépôts d'encrassement. La diminution progressive de la masse confirme la dissolution des dépôts, tandis que la proximité entre la masse finale et la masse propre indique que le traitement permet un nettoyage efficace tout en limitant l'altération du matériau métallique.

•Nettoyage d'encrassement par HCL

Tableau III.15 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
0	30,2966	30,2890	30,2966
10	30,2947	30,2890	30,2966
20	30,2943	30,2890	30,2966
30	30,2939	30,2890	30,2966
40	30,2935	30,2890	30,2966

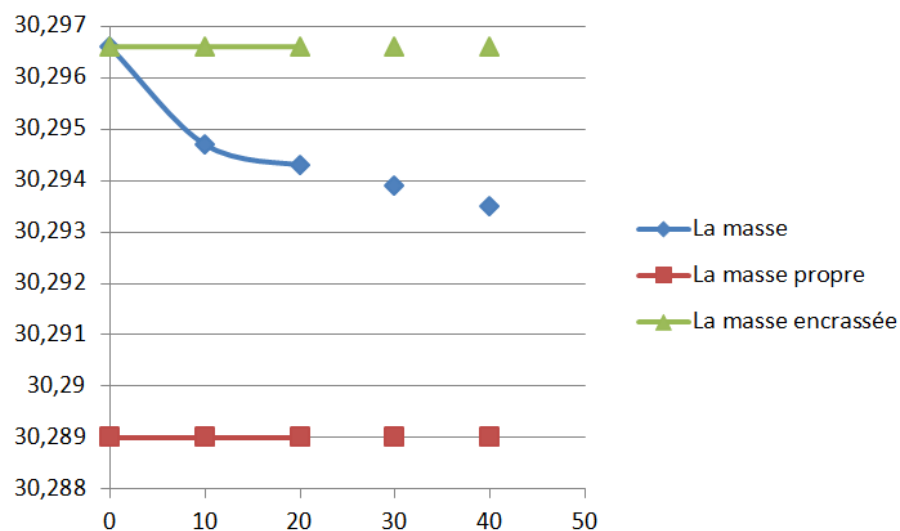


Figure III.25 : masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.16 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
50	30,2932	30,2890	30,2966
60	30,2925	30,2890	30,2966
70	30,2923	30,2890	30,2966
80	30,2921	30,2890	30,2966

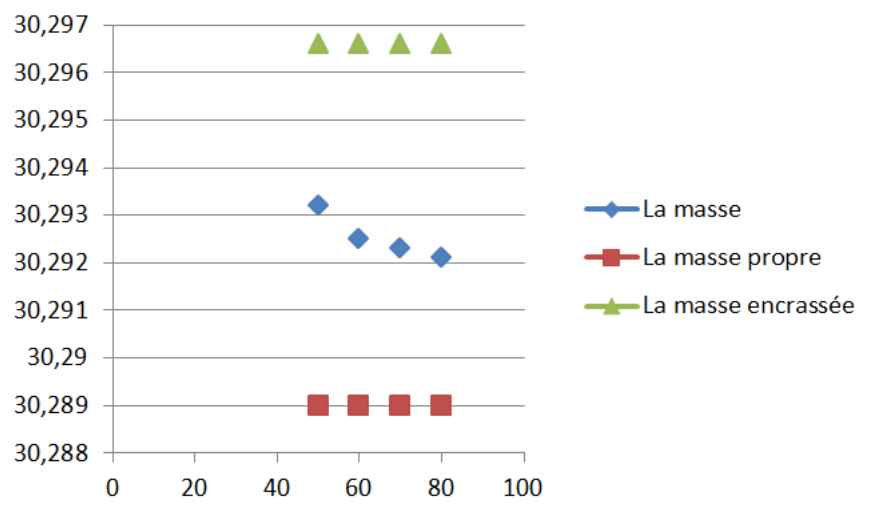


Figure III.26 : masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.16 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
90	30,2917	30,2890	30,2966
100	30,2916	30,2890	30,2966
110	30,2916	30,2890	30,2966
120	30,2915	30,2890	30,2966

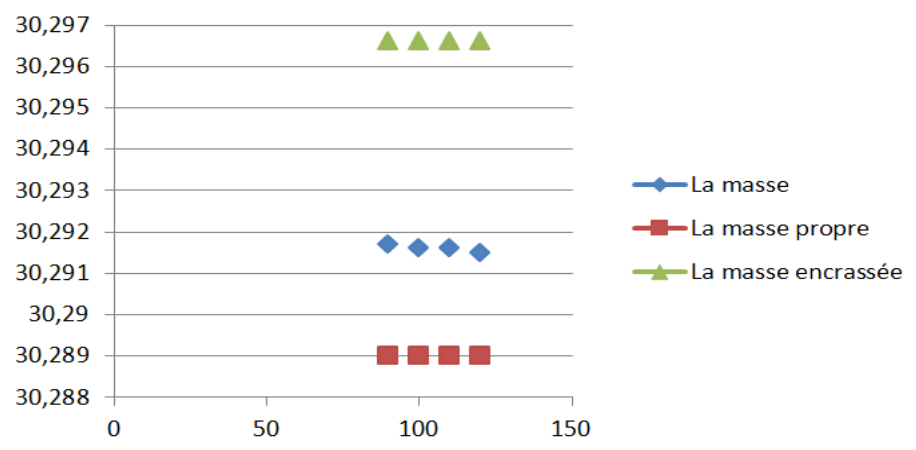


Figure III.27 : masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.17 :taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
130	30,2913	30,2890	30,2966
140	30,2912	30,2890	30,2966
150	30,2910	30,2890	30,2966
160	30,2910	30,2890	30,2966

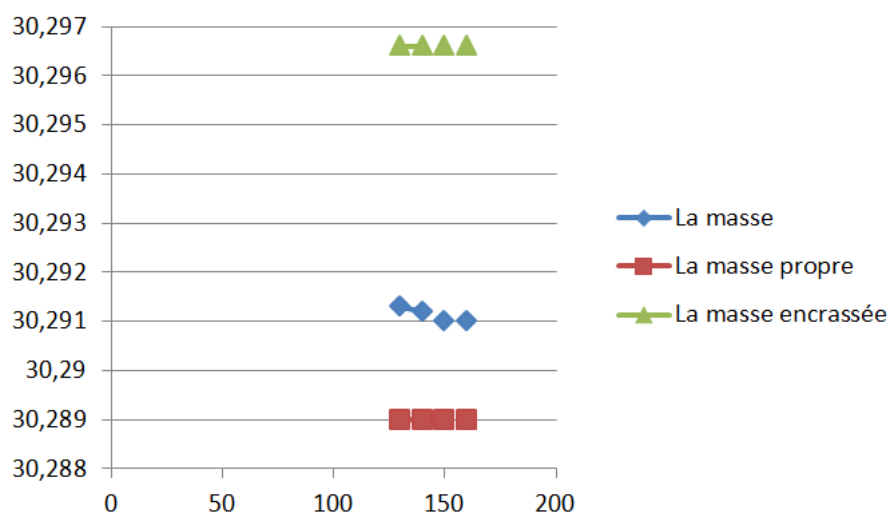
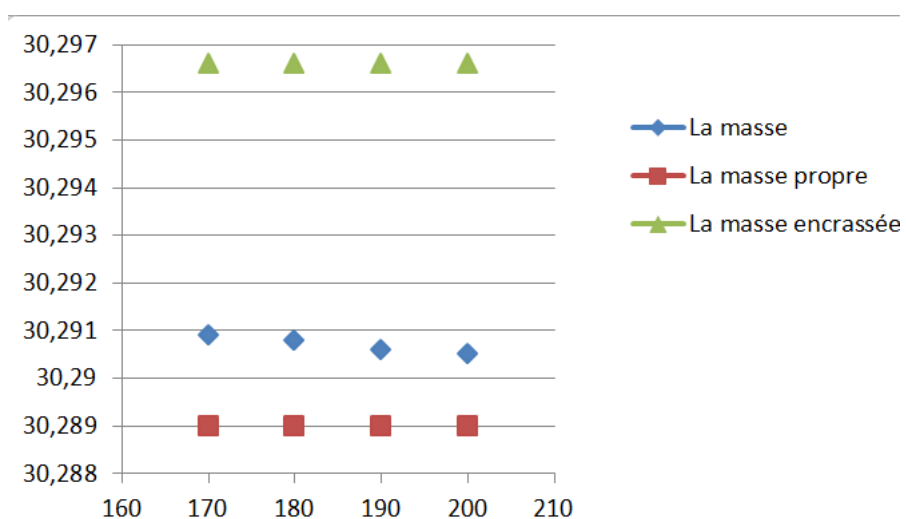


Figure III.28: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.18 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
170	30,2909	30,2890	30,2966
180	30,2908	30,2890	30,2966
190	30,2906	30,2890	30,2966
200	30,2905	30,2890	30,2966

**Figure III.29:** masse d'échantillon encrassé en fonction de temps**Tableau III.19** taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
210	30,2902	30,2890	30,2966
220	30,2901	30,2890	30,2966

230	30,2900	30,2890	30,2966
240	30,2898	30,2890	30,2966

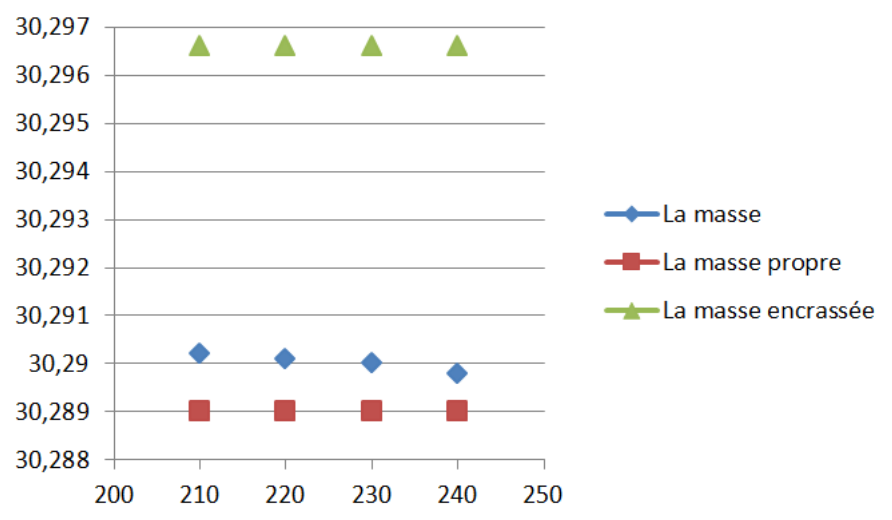


Figure III.30: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.20 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
250	30,2898	30,2890	30,2966
260	30,2896	30,2890	30,2966
270	30,2895	30,2890	30,2966
280	30,2892	30,2890	30,2966

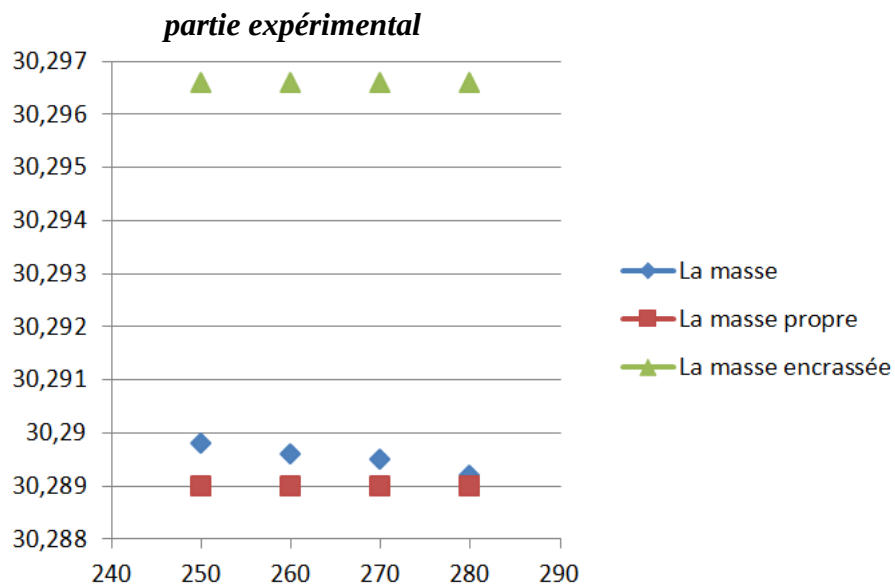


Figure III.31: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps

Tableau III.21 taux d'encrassement d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse encrassée
290	30,2890	30,2890	30,2966
300	30,2890	30,2890	30,2966
310	30,2889	30,2890	30,2966
320	30,2887	30,2890	30,2966

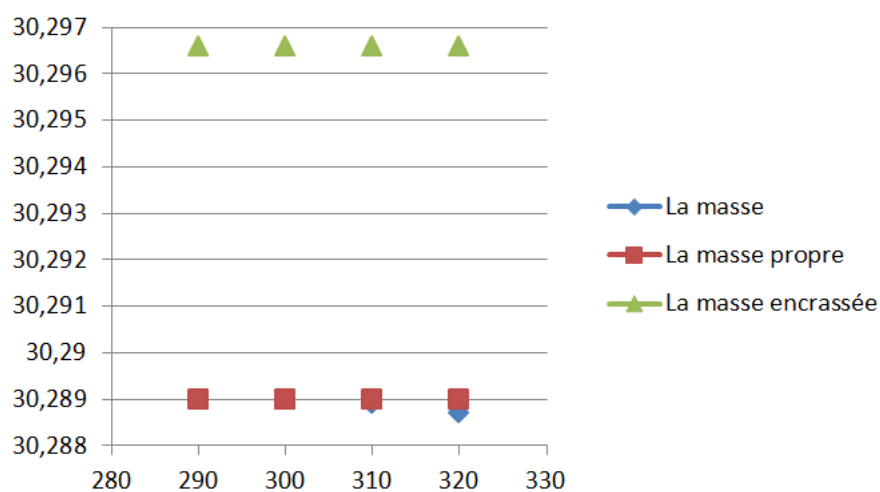


Figure III.32: masse d'échantillon encrassé en fonction de temps**•Discussion de la courbe de nettoyage de l'encrassement par HCl**

En observant la courbe, on remarque que la masse de l'échantillon diminue progressivement au cours du temps de traitement par HCl. Cette diminution traduit l'élimination du tartre présent à la surface de l'échantillon.

Au début du nettoyage, la vitesse de perte de masse est relativement élevée, ce qui montre une forte efficacité de l'acide chlorhydrique pour dissoudre les dépôts d'encrassement. Avec le temps, cette vitesse diminue progressivement en raison de la réduction de la quantité de tartre restante.

À partir de 320 minutes, la masse de l'échantillon devient légèrement inférieure à sa masse propre, ce qui indique que le HCl commence à attaquer le matériau métallique après l'élimination complète du tartre.

En conclusion, le nettoyage par HCl est efficace pour éliminer l'encrassement, comme le montre la diminution de la masse du tartre. Cependant, une durée de traitement trop longue peut provoquer une corrosion du métal. Il est donc nécessaire de contrôler le temps de nettoyage afin d'éviter d'endommager l'équipement.

Tableau III.22 taux d'entartrage d'échantillons

Le temps	La masse	La masse propre	La masse entartrée
0	37,1493	36,2832	37,1493
2	36,9350	36,2832	37,1493
4	36,8251	36,2832	37,1493
6	36,7882	36,2832	37,1493
8	36,5516	36,2832	37,1493
10	36,4602	36,2832	37,1493
12	36,4458	36,2832	37,1493
14	36,4399	36,2832	37,1493

16	36,4310	36,2832	37,1493
18	36,4066	36,2832	37,1493
20	36,4070	36,2832	37,1493
22	36,4045	36,2832	37,1493
24	36,3962	36,2832	37,1493
26	36,3884	36,2832	37,1493
28	36,3842	36,2832	37,1493
30	36,3830	36,2832	37,1493
32	36,3818	36,2832	37,1493
34	36,3816	36,2832	37,1493
36	36,3528	36,2832	37,1493
38	36,3429	36,2832	37,1493
40	36,3402	36,2832	37,1493
42	36,3191	36,2832	37,1493
44	36,3125	36,2832	37,1493
46	36,3065	36,2832	37,1493
48	36,2904	36,2832	37,1493
50	36,2893	36,2832	37,1493
52	36,2835	36,2832	37,1493
54	36,2820	36,2832	37,1493

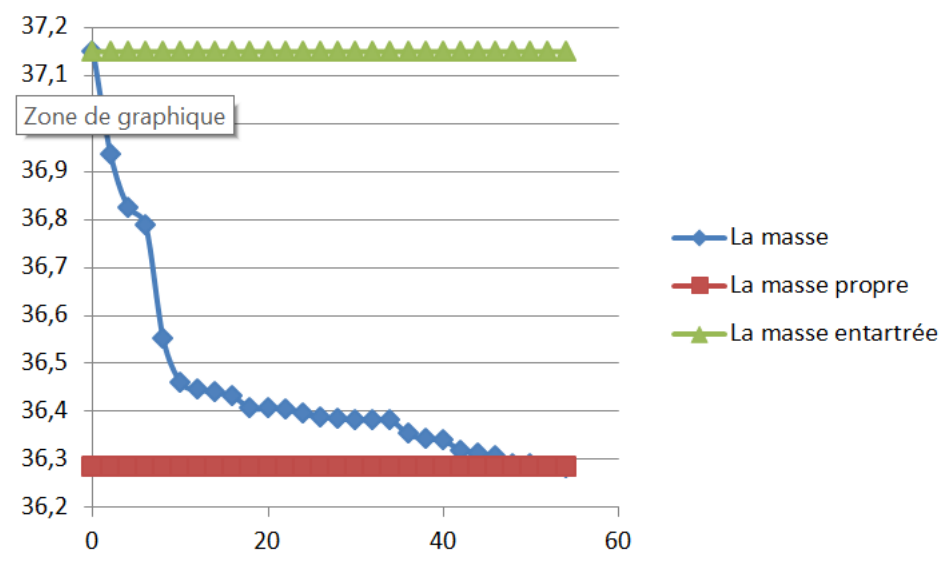


Figure III.31: masse d'échantillon entartré en fonction de temps

•Discussion de la courbe de nettoyage de l'entartrage par NaOH

La courbe représente l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du processus de nettoyage de l'entartrage à l'aide d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). L'axe des ordonnées correspond à la masse (g), tandis que l'axe des abscisses représente le temps de traitement (min).

L'analyse de la courbe montre une diminution rapide de la masse durant les premières minutes du traitement. Cette perte de masse importante traduit la dissolution des couches superficielles du tartre, qui sont plus facilement éliminées. Par la suite, la vitesse de diminution devient plus faible et la courbe tend progressivement vers un palier, indiquant que les dépôts restants sont plus compacts et plus adhérents à la surface.

On observe également que la masse de l'échantillon se rapproche progressivement de la masse propre de référence, ce qui témoigne de l'efficacité du NaOH dans l'élimination des dépôts d'entartrage. En fin d'essai, la masse obtenue est très proche de la masse propre, ce qui signifie que la majeure partie du tartre a été éliminée sans provoquer une perte significative de matière métallique.

En conclusion, la courbe met en évidence que le nettoyage chimique de l'entartrage par NaOH est efficace. La diminution progressive de la masse confirme l'élimination

des dépôts calcaires, tandis que la proximité entre la masse finale et la masse propre indique que le traitement permet d'obtenir un nettoyage satisfaisant tout en préservant l'intégrité de la surface métallique.

Tableau III.23 taux d'encrassement d'échantillons

temps	Masse	La masse propre	Masse entartrée
0	29,3727	28,6519	29,3727
2	28,7211	28,6519	29,3727
4	28,6968	28,6519	29,3727
6	28,6842	28,6519	29,3727
8	28,6702	28,6519	29,3727
10	28,6683	28,6519	29,3727
12	28,6609	28,6519	29,3727
14	28,6538	28,6519	29,3727
16	28,6509	28,6519	29,3727

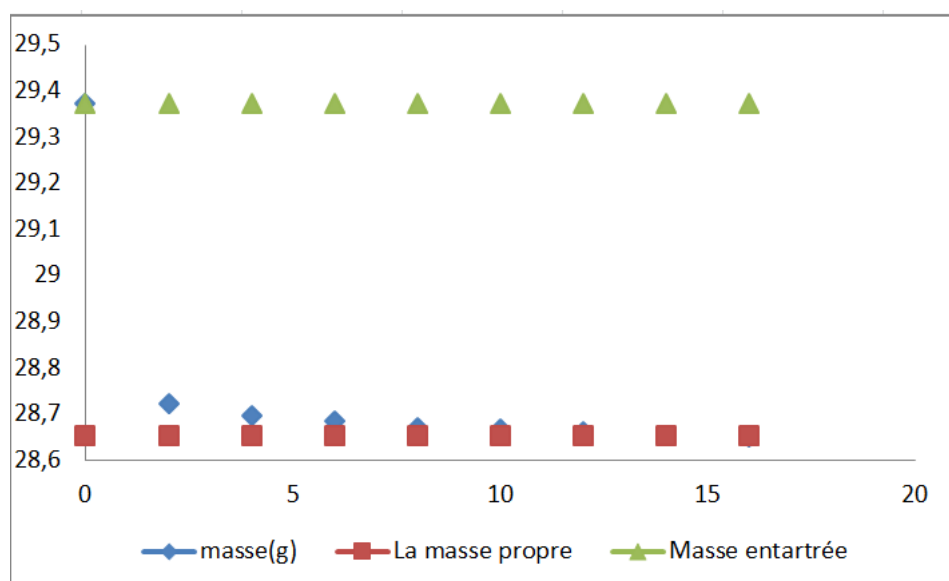


Figure III.32: masse d'échantillon entartré en fonction de temps

•Discussion de la courbe de nettoyage de l'entartrage par HCl

En observant la courbe, on remarque que la masse de l'échantillon diminue légèrement au cours du traitement par HCl, passant d'environ **28,72 g** à **28,66 g**. Cette diminution traduit la dissolution progressive du tartre présent à la surface de l'échantillon sous l'action de l'acide chlorhydrique.

La vitesse de perte de masse est plus importante au début du traitement, puis elle devient très faible à mesure que la quantité de tartre diminue. À partir de 8 à 10 minutes environ, la masse de l'échantillon devient pratiquement égale à la masse propre, ce qui indique que la majorité des dépôts a été éliminée.

On remarque également que la masse finale reste très proche de la masse propre de référence, ce qui montre que le HCl a principalement attaqué le tartre sans provoquer une corrosion significative du matériau métallique pendant la durée étudiée.

En conclusion, le nettoyage par HCl s'est révélé efficace pour éliminer l'entartrage. La diminution de la masse confirme l'élimination progressive des dépôts, tandis que la proximité entre la masse finale et la masse propre montre que les conditions opératoires utilisées permettent un nettoyage efficace tout en limitant l'attaque du métal.

Tableau III.24 taux d'entartrage d'échantillons

temps(s)	La masse	La masse propre	La masse entartrée
0	31,933	31,4351	31,933
30	31,8158	31,4351	31,933
60	31,7559	31,4351	31,933
90	31,7225	31,4351	31,933
120	31,6677	31,4351	31,933
150	31,609	31,4351	31,933
180	31,5016	31,4351	31,933
210	31,4366	31,4351	31,933
240	31,4318	31,4351	31,933

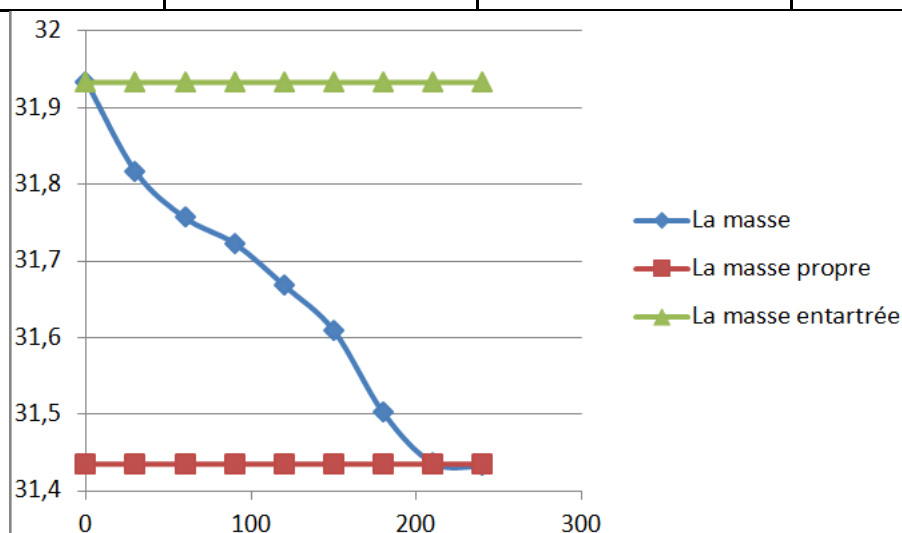


Figure III.33: masse d'échantillon en fonction de temps

•Discussion de la courbe de nettoyage de l'entartrage par NaOH à 60 °C

La courbe représente l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du nettoyage de l'entartrage à l'aide d'une solution de NaOH à une température de 60 °C. L'axe des ordonnées correspond à la masse (g), tandis que l'axe des abscisses représente le temps de traitement (min).

L'analyse de la courbe montre une diminution progressive de la masse de l'échantillon au cours du temps, ce qui traduit l'élimination progressive des dépôts de tartre présents à la surface. Au début du traitement, la perte de masse est relativement rapide, puis elle devient plus lente à mesure que la quantité de tartre diminue. Cette évolution indique que les couches superficielles, moins adhérentes, sont éliminées en premier, tandis que les dépôts plus compacts nécessitent un temps de traitement plus long.

L'augmentation de la température à 60 °C favorise les réactions de dissolution et améliore l'efficacité du nettoyage, ce qui explique la diminution continue de la masse jusqu'à atteindre une valeur très proche de la masse propre de l'échantillon. En fin de traitement, les deux valeurs sont pratiquement confondues, ce qui indique que la quasi-totalité des dépôts d'entartrage a été éliminée.

Tableau III.25 taux d'entartrage d'échantillons

Temps(s)	La masse(g)	La masse propre(g)	La masse encrassée(g)
0	30,7246	30,2791	30,7246
30	30,3671	30,2791	30,7246
60	30,2754	30,279	30,7246

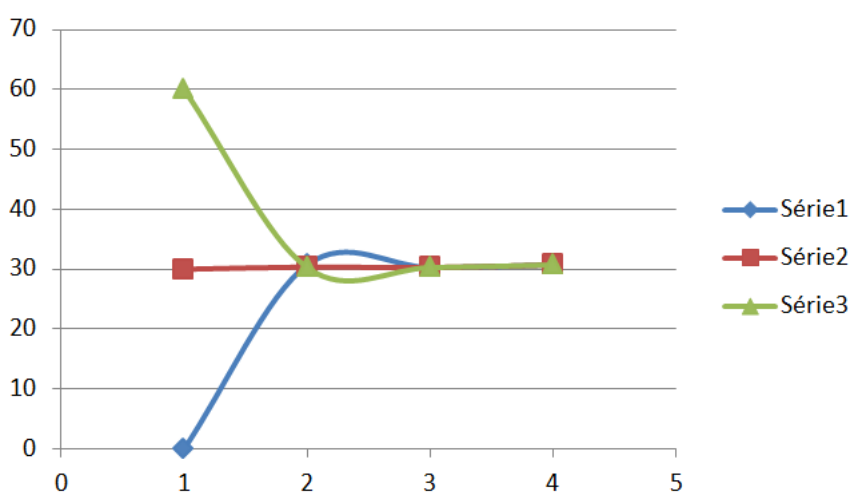


Figure III.34 : masse d'échantillon entartré en fonction de temps

•Discussion de la courbe de nettoyage de l'entartrage par HCl à 60 °C

En observant la courbe du nettoyage d'entartrage par HCl à 60 °C, on remarque une diminution très rapide de la masse de tartre au cours des premières minutes de traitement. L'augmentation de la température a accéléré la réaction chimique entre l'acide chlorhydrique et les dépôts de tartre, ce qui a permis une élimination plus efficace de l'encrassement.

Dès les premières minutes, la masse de l'échantillon se rapproche rapidement de la masse propre, ce qui montre que la majeure partie du tartre est dissoute en un temps relativement court. Par la suite, les courbes tendent à se stabiliser, indiquant que la quantité de tartre restante devient très faible et que le nettoyage est pratiquement achevé.

La température de 60 °C améliore donc considérablement l'efficacité du procédé de détartrage en augmentant la vitesse de dissolution des dépôts. Cependant, malgré cette efficacité élevée, il est nécessaire de contrôler la durée du traitement afin d'éviter une éventuelle attaque du matériau métallique par l'acide après l'élimination complète du tartre.

En conclusion, le nettoyage par HCl à 60 °C permet une élimination rapide et efficace de l'entartrage. L'augmentation de la température favorise la vitesse de nettoyage et réduit le temps nécessaire pour atteindre une surface propre, tout en nécessitant une surveillance afin de préserver l'intégrité de l'équipement.

Tableau III.26 taux du tartre d'échantillons

Le temps (min)	La masse	La masse propre
0	18,6825	18,6825
1	20,1017	18,6825
2	19,2545	18,6825
3	18,7293	18,6825

4	18,2674	18,6825
5	17,9144	18,6825
6	17,6073	18,6825
7	17,254	18,6825
8	17,2813	18,6825
9	17,0669	18,6825
10	17,1789	18,6825
11	17,313	18,6825
12	17,2618	18,6825
13	16,8418	18,6825
14	16,3422	18,6825
15	16,9468	18,6825
16	16,6757	18,6825
17	16,9158	18,6825
18	17,0455	18,6825
19	17,5322	18,6825
20	16,6313	18,6825
21	16,5458	18,6825
22	16,4167	18,6825
23	16,79	18,6825
24	16,7778	18,6825
25	16,6802	18,6825
26	15,669	18,6825

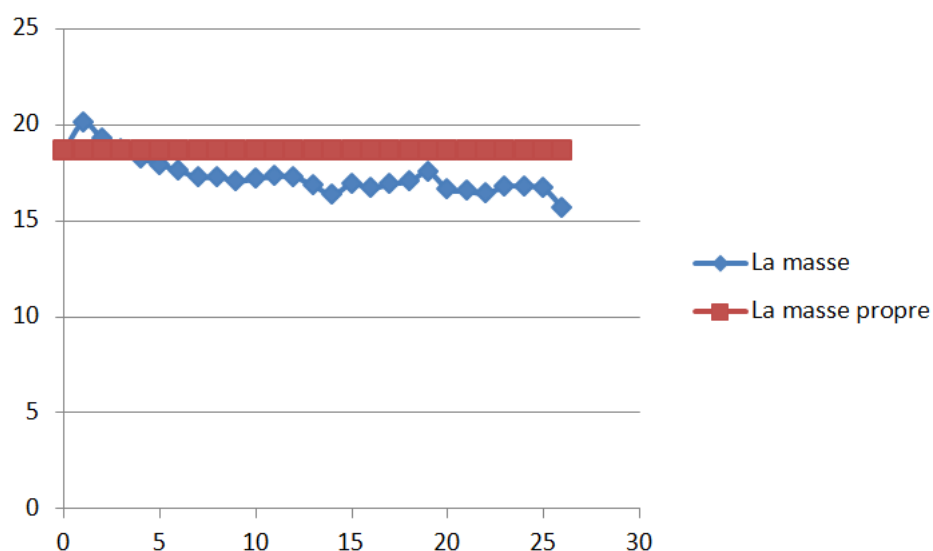


Figure III.35: masse du tartre en fonction de temps

Tableau III.27 taux du tartre d'échantillons

Le temps (min)	La masse	La masse propre
0	15,669	18,6825
5	15,1011	18,6825
10	14,6421	18,6825
15	14,2084	18,6825
20	13,9112	18,6825
25	13,4621	18,6825
30	13,3864	18,6825
35	13,2758	18,6825
40	13,077	18,6825
45	12,6061	18,6825

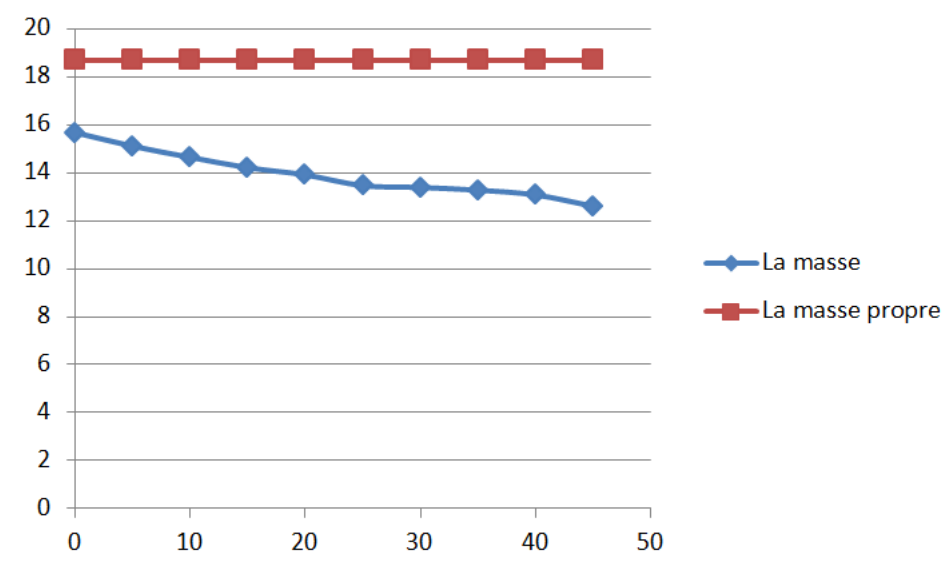


Figure III.36: masse du tartre en fonction de temps

Tableau III.28 taux du tartre d'échantillons

Le temps (min)	La masse	La masse propre
0	12,6061	18,6825
10	12,127	18,6825
20	12,016	18,6825
30	11,9636	18,6825
40	11,7801	18,6825
50	11,2996	18,6825
60	11,2834	18,6825
70	10,9362	18,6825
80	10,939	18,6825
90	9,9286	18,6825
100	10,033	18,6825
110	9,9079	18,6825
120	9,2568	18,6825
130	8,1568	18,6825
140	7,8775	18,6825

150	7,2474	18,6825
160	6,8336	18,6825
170	6,6021	18,6825
180	6,7023	18,6825
190	6,1313	18,6825
200	5,836	18,6825
210	5,5306	18,6825
220	5,7644	18,6825
230	5,5098	18,6825
240	5,3221	18,6825
250	4,7423	18,6825
260	4,5494	18,6825
270	4,6111	18,6825
280	4,0572	18,6825
290	4,0503	18,6825
300	3,9691	18,6825
310	3,7786	18,6825
320	3,7152	18,6825
330	3,1776	18,6825
340	3,0929	18,6825
350	2,8752	18,6825
360	2,1448	18,6825
370	1,9042	18,6825
380	1,5535	18,6825
390	1,4393	18,6825
400	1,1187	18,6825
410	0,9413	18,6825
420	0,9083	18,6825
430	0,603	18,6825

440	0,4724	18,6825
450	0,3867	18,6825
460	0,2977	18,6825
470	0,2266	18,6825
480	0,1552	18,6825

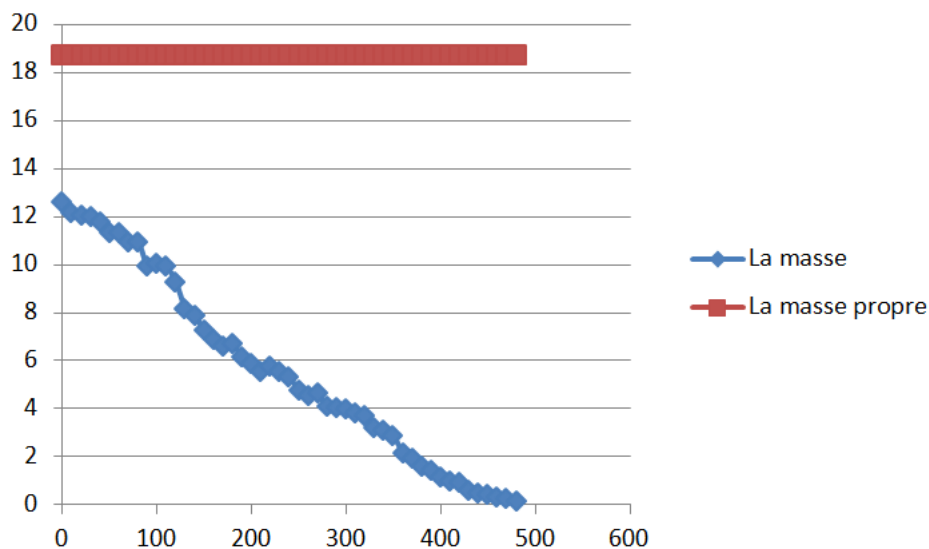


Figure III.37: masse du tartre en fonction de temps

Discussion de la courbe de nettoyage du tartre par HCl

Les trois courbes représentent l'évolution de la masse d'un véritable dépôt de tartre de chaudière soumis à un nettoyage chimique par une solution d'HCl à 2,5 %. Les mesures ont été réalisées à des intervalles de temps différents : toutes les 1 minute pour la première courbe, toutes les 5 minutes pour la deuxième et toutes les 10 minutes pour la troisième, jusqu'à la dissolution complète du tartre.

Pour la première courbe (mesure chaque minute), on observe une légère diminution de la masse au cours du temps. La perte de masse reste faible mais continue, ce qui indique que le HCl commence à attaquer progressivement les couches superficielles du tartre. La masse reste cependant proche de sa valeur initiale, ce qui traduit une vitesse de dissolution relativement lente au début du traitement.

Pour la deuxième courbe (mesure toutes les 5 minutes), la diminution de la masse est plus visible. Le tartre perd progressivement de la matière sous l'action de l'acide chlorhydrique, ce qui confirme l'efficacité du traitement. La pente de la courbe montre que la dissolution se poursuit de manière régulière avec le temps.

La troisième courbe (mesure toutes les 10 minutes) présente la diminution la plus importante. La masse du tartre décroît continuellement jusqu'à atteindre une valeur proche de zéro après environ 500 minutes de traitement. Cette évolution montre que l'HCl à 2,5 % est capable d'éliminer totalement le dépôt de tartre lorsque le temps de contact est suffisamment long.

D'une manière générale, les trois courbes mettent en évidence une relation directe entre le temps de contact et l'efficacité du détartrage. Plus la durée d'exposition à la solution d'HCl est importante, plus la quantité de tartre dissoute est élevée. La disparition progressive de la masse du dépôt constitue une preuve de l'efficacité de l'acide chlorhydrique dans le nettoyage des chaudières entartrées.

En conclusion, le traitement par HCl à 2,5 % permet une élimination progressive du tartre réel de chaudière. Les résultats montrent que la vitesse de dissolution augmente avec le temps de contact et que le tartre peut être totalement dissous après une durée de traitement suffisante, ce qui confirme l'efficacité de cette méthode de nettoyage chimique.

Conclusion

Les essais réalisés ont permis de mettre en évidence l'influence des milieux chimiques, de la concentration et de la température sur les phénomènes de corrosion, d'encrassement et d'entartrage. Les résultats obtenus ont montré que la variation des concentrations de HCl et de NaOH affecte la vitesse de corrosion ainsi que l'élimination des dépôts d'encrassement. L'étude du tartre a permis de suivre son évolution en fonction du temps grâce aux pesées successives et d'observer l'effet de la température de 60 °C sur sa résistance. Ces travaux ont permis de mieux comprendre les mécanismes de dégradation des matériaux et l'importance du contrôle des paramètres opératoires afin de limiter les problèmes de corrosion, d'encrassement et d'entartrage dans les installations industrielles.

Conclusion générale

Au terme de ce travail consacré au nettoyage de l'encrassement des chaudières industrielles, il apparaît que ces équipements occupent une place essentielle dans les installations industrielles grâce à leur capacité à produire l'énergie thermique nécessaire à de nombreux procédés. Leur bon fonctionnement est directement lié à l'état des surfaces d'échange thermique, qui peuvent être affectées par l'accumulation progressive de dépôts.

L'étude bibliographique réalisée nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement des chaudières industrielles ainsi que les différents types d'encrassement susceptibles de se former au cours de leur exploitation. Ces dépôts constituent un problème majeur puisqu'ils réduisent les échanges thermiques, augmentent la consommation énergétique et peuvent entraîner une dégradation prématurée des équipements.

Nous avons également mis en évidence les principales causes de l'encrassement, ses conséquences techniques et économiques, ainsi que les différentes méthodes de nettoyage utilisées dans l'industrie. Le choix de la méthode de nettoyage dépend principalement de la nature des dépôts, du degré d'encrassement et des caractéristiques de l'installation.

La partie pratique, basée sur une étude gravimétrique simulant le procédé de nettoyage, a permis d'évaluer l'efficacité de l'opération d'élimination des dépôts. Les résultats obtenus ont montré l'importance d'un nettoyage adapté pour restaurer les performances des surfaces encrassées et limiter les effets négatifs de l'accumulation des résidus.

En conclusion, le nettoyage régulier des chaudières industrielles constitue une opération indispensable pour maintenir un rendement optimal, réduire les coûts d'exploitation et prolonger la durée de vie des équipements. La mise en place d'un programme de maintenance préventive associé à des méthodes de nettoyage efficaces

représente ainsi une solution essentielle pour assurer la fiabilité et la performance des chaudières industrielles.