



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 août 1955 -SKIKDA
Faculté de Technologie
Département de Pétrochimie



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière: Industries Pétrochimiques

Spécialité: Génie Pétrochimique

Thème:

**Etude de l'encrassement au niveau des chaudières
industrielles par méthode gravimétrique**

Réalisé par:

- Amairi Louai Mohamed Elmekki
- Bekairia Riad

Encadré par:

Dr. MECHATI Fedia

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

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

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

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

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage au sein de l'entreprise **SONATRACH**. Leur soutien inestimable, leur expertise et leurs encouragements ont grandement enrichi mon expérience professionnelle, Particulièrement à **M. Mohamed LANTRI** pour sa présence et son aide tout au long de notre stage.

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

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

Dédicace

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont rendu cette journée possible, en premier lieu, ma mère et mon père qui sont restés avec moi et m'ont soutenu de tout ce qu'ils pouvaient tout au long de mon parcours éducatif et surtout de ma vie.

*Il est également dédié à mon frère et ma sœur ainsi qu'aux familles **Amairi** et **Bouزيد** pour leur soutien émotionnel tout au long de mon parcours.*

N'oublions pas les professeurs du département de Pétrochimie qui nous ont aidé par leurs connaissances et leur patience

enfin cela va à tous mes amis et collègues qui sans eux je ne pourrais pas réussir ces 5 dernières années en résidence universitaire

Louai

Dédicace

Tout d'abord, je dédie ce travail à mes parents et à mes frères qui ont contribué par leur soutien et leur gentillesse à mon égard.

Et je le dédie à mes amis, collègues, professeurs et à tous ceux qui ont contribué à m'amener là où je suis.

Riad

Résumé

Les chaudières industrielles occupent une place centrale dans de nombreux secteurs industriels, où elles jouent un rôle essentiel dans la production de vapeur et de chaleur nécessaires aux processus de fabrication. Ce mémoire examine en profondeur le thème du nettoyage des chaudières industrielles, un élément crucial pour maintenir l'efficacité et la fiabilité des installations industrielles, en particulier dans l'industrie pétrolière. Le but de cette étude est de trouver la meilleure méthode de nettoyage des encrassements dans les chaudières industrielles, et pour cela nous avons réalisé différentes méthodes de nettoyage au niveau du laboratoire, en utilisant un échantillon en acier 1020 et la méthode gravimétrique, et en essayant différentes solutions, avec différentes concentrations et températures, nous avons pu obtenir des résultats. Nous avons ensuite discuté et analysé ces résultats afin de déterminer la méthode de nettoyage la plus efficace.

Mots clés : chaudière, chaudière industrielle, encrassement.

Abstract

Industrial boilers occupy a central place in many industrial sectors, where they play a vital role in producing the steam and heat needed for manufacturing processes. This dissertation takes an in-depth look at the topic of industrial boiler cleaning, a crucial element in maintaining the efficiency and reliability of industrial plants, particularly in the petroleum industry. The aim of this study is to find the best method for cleaning fouling in industrial boilers, and for this we carried out different cleaning methods at the laboratory level, using a 1020 steel sample and the gravimetric method, and by trying different solutions, with different concentrations and temperatures, we were able to obtain results. We then discussed and analyzed these results to determine the most effective cleaning method.

Keywords: boiler, industrial boiler, fouling.

المخلص

تحتل المراجل (أو الغلايات) الصناعية مكانة مركزية في العديد من القطاعات الصناعية، حيث تلعب دورا حيويا في إنتاج البخار والحرارة اللازمة لعمليات التصنيع. تلقي هذه الأطروحة نظرة متعمقة على موضوع تنظيف الغلايات الصناعية، وهو عنصر حاسم في الحفاظ على كفاءة وموثوقية المنشآت الصناعية، وخاصة في صناعة البترول. الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد الطريقة الأفضل لتنظيف القاذورات في الغلايات الصناعية، ولهذا قمنا بتنفيذ طرق تنظيف مختلفة على مستوى المختبر، وذلك باستخدام عينة فولاذية 1020 والطريقة الوزنية، ومن خلال تجربة حلول مختلفة بتركيزات ودرجات حرارة مختلفة تمكنا من الحصول على النتائج. ثم قمنا بمناقشة وتحليل هذه النتائج لتحديد طريقة التنظيف الأكثر فعالية.

الكلمات المفتاحية: الغلايات، الغلايات الصناعية، الانسداد.

Liste des Figures

Figure I.1 : schéma de fonctionnement de chaudière	5
Figure I.2 : Chaudière de récupération	9
Figure I.3 : Schéma d'une chaudière à tubes de fumées	10
Figure I.4 : schéma d'une Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur.	10
Figure I.5 : l'extérieur de la chaudière à tube d'eau.....	12
Figure I.6 : Les ballons, supérieur et inférieur	16
Figure I.7 : Surchauffeur	17
Figure I.8 : Economiseur	17
Figure I.9 : chaudière à circulation naturelle	22
Figure I.10 : chaudière à circulation contrôlée	23
Figure I.11 : chaudière à circulation forcée	24
Figure II.1 : Les différentes couches d'encrassement	27
Figure II.2 : Dégradation (encrassement sous corrosion)	28
Figure II.3 : encrassement par entartrage	30
Figure II.4 : Encrassement particulaire	31
Figure II.5 : Nettoyage à l'aide d'un pistolet hydraulique	36
Figure II.6 : Outil de nettoyage mécanique.....	36
Figure III.1 : Echantillons de L'acier C-1020.	43
Figure III.2 : Les échantillons après le polissage.	44
Figure III.3 : Balance électronique	44
Figure III.4 : chlorure de sodium	45
Figure III.5 : Bicarbonate de sodium.	46
Figure III.6 : solution $\text{NaHCO}_3 + \text{CaCl}_2$	47
Figure III.7 : des échantillons entartrés.	47
Figure III.8 : Peinture organique non alimentaire.	48
Figure III.9 : L'hydroxyde de sodium.	49
Figure III.10 : Acide chlorhydrique.	49
Figure III.11 : pesage 2 g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et 2 g de NaHCO_3	50
Figure III.12 : Le mélange pendant la formation du tartre.	50
Figure III.13 : Les échantillons après le séchage du tartre.....	51
Figure III.14 : Pesage d'échantillons	51
Figure III.15 : Avant l'échauffement d'huile.....	52
Figure III.16 : Après l'échauffement d'huile	52

Figure III.17 : un échantillon après la formation d'encrasse.	53
Figure III.18 : Echantillons teintés (avant séchage).	53
Figure III.19 : Echantillons teintés et entartrés	54
Figure III.20 : Solution aqueuse de NaOH (3%).	55
Figure III.21 : Nettoyage d'échantillons entartrés.	57
Figure IV.1 : masse d'échantillon 1ENT en fonction de temps	62
Figure IV.2 : masse de l'échantillon 2ENT en fonction de temps	62
Figure IV.3 : masse de l'échantillon 3ENT en fonction de temps	63
Figure IV.4 : masse de l'échantillon 4ENT en fonction de temps	65
Figure IV.5 : masse de l'échantillon 5ENT en fonction de temps	66
Figure IV.6 : masse de l'échantillon 6ENT en fonction de temps	66
Figure IV.7 : masse de l'échantillon 7ENC en fonction de temps	68
Figure IV.8 : masse de l'échantillon 8ENC en fonction de temps	69
Figure IV.9 : masse de l'échantillon 9ENC en fonction de temps	71
Figure IV.10 : masse de l'échantillon 10ENC en fonction de temps	71
Figure IV.11 : masse de l'échantillon 11PNT en fonction de temps	74
Figure IV.12 : masse de l'échantillon 12PNT en fonction de temps	76

Liste de tableaux

Tableau I.1 : avantages et inconvénients des chaudières à tube d'eau et tube de fumée	12
Tableau I.2 : comparaison de performance entre les chaudières à tube d'eau et tube de fumée	13
Tableau III.1 : Propriété mécanique d'acier C-1020.	43
Tableau III.2 Composition chimique de l'acier C-1020.	43
Tableau III.3 : Caractéristiques principales de chlorure de calcium dihydraté.	45
Tableau III.4 : Caractéristiques principales de bicarbonate de sodium.	46
Tableau III.5 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 1,2,3)	56
Tableau III.6 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 4,5,6)	57
Tableau III.7 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 7,8)	58
Tableau III.8 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 9,10)	58
Tableau III.9 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 11)	58
Tableau III.10 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 12)	59
Tableau IV.1 : Taux d'entartrage d'échantillon 1ENT	60
Tableau IV.2 : Taux d'entartrage d'échantillon 2ENT	61
Tableau IV.3 : Taux d'entartrage d'échantillon 3ENT	61
Tableau IV.4 : Taux d'entartrage d'échantillon 4ENT	64
Tableau IV.5 : Taux d'entartrage d'échantillon 5ENT	64
Tableau IV.6 : Taux d'entartrage d'échantillon 6ENT	65
Tableau IV.7 : Taux d'encrassement d'échantillon 7ENC	67
Tableau IV.8 : Taux d'encrassement d'échantillon 8ENC	68
Tableau IV.9 : Taux d'encrassement d'échantillon 9ENC	70
Tableau IV.10 : Taux d'encrassement d'échantillon 10ENC	70
Tableau IV.11 : Taux d'encrassement d'échantillon 11PNT	73
Tableau IV.12 : Taux d'encrassement d'échantillon 12PNT	75

Liste d'abréviation

T : Température (°C)

P : Pression (bar)

pH : Potentiel d'hydrogène

BFW : Eau d'alimentation

σ : Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)

C : Concentration (Mol/L)

M : masse (g)

D : densité (g/cm^3)

V : Volume

COV : Composés organiques volatils

NEP : Nettoyage en place

CIP : Clean-in-place

ENT : Entartrage

ENC : Encrassement

PNT : Peinture

Table des matières

Introduction générale -----	1
Chapitre I : Les chaudières industrielles	
Introduction -----	3
I.1 Historique de chaudières -----	3
I.2 Définition des chaudières -----	4
I.3 Rôle des chaudières -----	4
I.4 Principe de fonctionnement d'une chaudière -----	5
I.5 Les différents types des chaudières -----	6
I.5.1 Les chaudières à tubes de fumées -----	6
I.5.2 Les chaudières à tubes d'eau -----	6
I.5.3 Chaudière à eau chaude -----	7
I.5.4 Chaudière à fluide caloporteur -----	8
I.5.5 Chaudière de récupération -----	8
I.6 Classification des générateurs de vapeur -----	9
I.6.1 Les chaudières à tubes de fumées -----	9
I.6.2 les chaudières à tubes d'eau -----	10
I.7 Comparaison entre chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumée -----	12
I.7.1 Avantages et inconvénient -----	12
I.7.2 Comparaison de performance -----	13
I.8 Eléments constructifs d'une chaudière tubes à eau -----	13
I.8.1 Garnissage des parois (enveloppe) -----	13
I.8.2 Le foyer (La chambre de combustion) -----	14
I.8.3 Les bruleurs -----	14
I.8.4 L'écran de tubes -----	15
I.8.5 Faisceau de convection -----	15
I.8.6 Surchauffeur -----	16
I.8.7 L'économiseur -----	17
I.8.8 Réchauffeur d'air -----	18
I.8.9 Le ventilateur de soufflage -----	18
I.8.10 Les appareils de sécurité -----	18
I.9 Les problèmes rencontrés dans les chaudières -----	18
I.9.1 Agglomération -----	18

I.9.2	Claquant-----	19
I.9.3	Encrassement-----	20
I.10	Circulation dans une chaudière -----	20
I.10.1	La circulation naturelle -----	21
I.10.2	La circulation contrôlée-----	22
I.10.3	La circulation forcée -----	23
I.11	Utilisation de la vapeur -----	24
	Coclusion -----	24

Chapitre II : l'encrassement

	Introduction-----	25
II.1	Définition d'encrassement -----	26
II.2	Les types d'encrassement -----	27
II.2.1	Encrassement par précipitation-----	27
II.2.2	Encrassement par corrosion-----	27
II.2.3	Encrassement biologique-----	28
II.2.4	Encrassement par réaction chimique -----	28
II.2.5	Encrassement par solidification -----	29
II.2.6	Entartrage -----	29
II.2.7	Encrassement particulière -----	31
II.3	Processus d'encrassement-----	31
II.3.1	L'initiation-----	31
II.3.2	Transfert des particules à la paroi -----	31
II.3.3	Fixation (ou Adhésion) des particules -----	32
II.3.4	Réentraînement des particules déposées -----	32
II.3.5	Vieillessement du dépôt-----	32
II.4	Classification suivant la nature du dépôt-----	32
II.4.1	Dépôt dur -----	32
II.4.2	Dépôt poreux-----	33
II.4.3	Dépôt mou-----	33
II.5	Aspect économique de l'encrassement-----	33
II.5.1	Coûts liés à la conception de l'chaudière -----	33
II.5.2	Coûts liés au fonctionnement de la chaudière-----	33

II.5.3 Coûts liés à l'arrêt de l'installation	34
II.6 Les paramètres influençant l'encrassement	34
II.6.1 Vitesse d'écoulement	34
II.6.2 Température	34
II.6.3 Nature de surface et de matériaux de fabrication	34
II.6.4 Nature de la charge	34
II.7 Détection des encrassements dans les chaudières	35
II.8 Les méthodes de nettoyage	35
II.8.1 Nettoyage mécanique	35
II.8.2 Nettoyage chimique hors ligne	37
II.8.3 Autres méthodes	39
II.8.4 Sélection de la méthode de nettoyage	40
II.8.5 Action de prévention	40
Conclusion	40

Chapitre III : Méthodes et preparation

Introduction	41
III.1 approche d'étude	41
III.2 Méthodes et préparation des matériaux	41
III.2.1 Méthodes de nettoyage	41
III.2.2 Matériaux utilisés	42
III.3 Procédés de nettoyage	49
III.4 Procédure expérimentale	50
III.4.1 L'entartrage	50
III.4.2 L'encrassement	51
III.4.3 La peinture	53
III.5 Préparation des solutions	54
III.5.1 La soude NaOH	54
III.5.2 L'acide chlorhydrique HCl	55
III.6 Protocole de nettoyage chimique :	56
III.6.1 Protocoles de nettoyage d'entartrage:	56
III.6.2 Protocole de nettoyage de l'encrasse des huiles	57
III.6.3 Protocole de nettoyage de tartre et peinture	58

Conclusion-----	59
-----------------	----

Chapitre IV : Résultat et discussions

Introduction-----	60
IV.1 Résultats et discussions de la méthode gravimétrique-----	60
IV.1.1 Résultats et discussions de nettoyage de l'entartrage-----	60
IV.1.2 Résultats et discussions de nettoyage de l'encrassement des huiles-----	67
IV.1.3 Résultats et discussions de nettoyage de tartre (avec peinture) -----	72
Conclusion-----	77
Conclusion générale -----	77
Références bibliographiques -----	78

Introduction générale

Les chaudières industrielles jouent un rôle indispensable dans l'industrie pétrolière, où elles fournissent la chaleur et la vapeur nécessaires pour divers processus de production. Dans les raffineries de pétrole, les chaudières sont utilisées pour générer de la vapeur qui est ensuite employée dans le craquage thermique, la distillation fractionnée, et d'autres procédés de conversion chimique. Cette vapeur est essentielle pour chauffer les hydrocarbures à des températures élevées, permettant ainsi leur séparation en différents produits finis tels que l'essence, le diesel, et d'autres dérivés pétroliers. De plus, les chaudières assurent également le chauffage des installations, le nettoyage des équipements, et le maintien de la température des réservoirs de stockage. Ainsi, elles sont un élément clé pour garantir l'efficacité, la sécurité et la continuité des opérations dans l'industrie pétrolière. Cependant, l'un des défis majeurs auxquels ces systèmes sont confrontés est l'encrassement, un phénomène qui peut considérablement altérer leurs performances et entraîner des coûts supplémentaires importants. [1]

L'encrassement des chaudières résulte de l'accumulation de dépôts sur les surfaces internes, ce qui réduit la transmission de chaleur et augmente la consommation de combustible. Ce phénomène, bien que commun, varie en nature et en gravité en fonction des conditions d'exploitation et des caractéristiques des fluides utilisés. La gestion efficace de l'encrassement est donc essentielle pour maintenir les chaudières en bon état de fonctionnement et prolonger leur durée de vie. [2]

Ce mémoire se propose d'explorer en profondeur le thème du nettoyage des chaudières industrielles. Il se structure autour de quatre chapitres principaux qui abordent successivement les généralités sur les chaudières, les phénomènes d'encrassement, une étude pratique pour simuler la méthode de nettoyage en place (NEP), une analyse des résultats obtenus accompagnée d'une discussion critique.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les chaudières. Il fournit un aperçu historique, définit ce qu'est une chaudière et explique son principe de fonctionnement. Nous y aborderons également les différents types de chaudières, leur classification, ainsi que les problèmes techniques courants et les éléments constructifs essentiels.

Le deuxième chapitre se concentre sur le phénomène d'encrassement. Nous explorerons ses mécanismes et les différents types de dépôts qui peuvent se former. Ce chapitre discutera également des impacts économiques de l'encrassement, des paramètres influençant sa formation et des diverses méthodes de nettoyage disponibles, notamment le nettoyage mécanique et

Introduction Générale

chimique. Nous examinerons également les critères de sélection de la méthode de nettoyage la plus appropriée en fonction des circonstances spécifiques.

Dans ce troisième chapitre, nous présentons une étude pratique utilisant l'analyse gravimétrique pour essayer de simuler la méthode de nettoyage au niveau de laboratoire. Cette partie pratique vise à illustrer comment les concepts théoriques précédemment abordés se traduisent dans des contextes réels. Les méthodes utilisées, les données collectées et les analyses effectuées seront détaillées pour offrir une vue concrète de l'efficacité de chaque méthode de nettoyage.

Le chapitre final analyse les résultats obtenus de l'étude gravimétrique, en offrant une discussion approfondie sur les implications de ces résultats. Nous évaluerons l'efficacité des méthodes de nettoyage utilisées et proposerons des recommandations pour l'amélioration des pratiques de maintenance des chaudières industrielles.

Notre mémoire se terminera avec une conclusion.

Chapitre I

Les chaudières industrielles

Introduction

Les chaudières industrielles jouent un rôle crucial dans le fonctionnement de nombreux secteurs industriels en fournissant la chaleur nécessaire à divers processus de production. Que ce soit pour générer de la vapeur, chauffer des fluides ou produire de l'énergie, ces équipements sont indispensables pour assurer l'efficacité et la continuité des opérations. Ce chapitre explore les principes fondamentaux des chaudières industrielles, leurs types, leur fonctionnement et leur importance dans le contexte industriel moderne. Nous aborderons également les aspects liés à leur conception, leur maintenance, ainsi que les normes de sécurité et environnementales à respecter. Une compréhension approfondie de ces éléments est essentielle pour optimiser leur performance et garantir leur fiabilité à long terme. [1]

I.1 Historique de chaudière

Les débuts de l'ère industrielle marquent les prémices de la chaudière comme dispositif visant à chauffer les foyers. Dispositif inventé par Marc Seguin, un ingénieur français, la chaudière tubulaire à vapeur vient révolutionner le principe de l'utilisation de l'énergie thermique en développant considérablement la puissance de chauffe. Même si l'on doit la création des premières chaudières tubulaires à Charles Dallery en 1780, l'utilisation de ce type de chaudière à tubes intérieurs et non plus extérieurs permet de multiplier par 6 la puissance de chauffe. Les premières locomotives à vapeur utilisent ainsi la technologie de Marc Seguin, puis sont apparues par la suite les premières chaudières à vocation exclusivement domestique. Différents combustibles font cependant leur apparition à l'instar du charbon, du gaz ou du fioul, plus propices à chauffer les bâtiments. Un fluide caloporteur ou calorporteur vient ainsi transporter l'énergie thermique par la combustion, qui est ensuite redistribuée dans différents éléments en fonte ou en acier pour chauffer toutes les pièces d'une habitation. [3]

Dispositif phare de la révolution industrielle, la chaudière est massivement utilisée depuis la fin du XIXème siècle. Invention concomitante à la production massive de charbon et de fioul nécessaire à l'industrialisation, la chaudière pour les particuliers prend son essor dans les ménages à partir des années 50. Avec l'apparition des premiers foyers au fuel les éléments en fonte des chaudières deviennent de plus en plus performants, surtout après la crise pétrolière de 1973 propice aux économies de chauffage et à une production optimale de chaleur. Les chaudières appliquées aux chauffages centraux deviennent également plus performantes et profitent de rendements bien meilleurs. L'histoire de la chaudière prend ainsi toute son importance en termes de chauffage à destination des particuliers avec l'utilisation de différentes sources d'énergie. Primitivement chauffés au charbon puis au fuel, les particuliers disposent dorénavant de

nombreux combustibles plus propres et plus économiques. L'arrêt progressif de la technologie du brûleur signe en effet la réduction massive des gaz brûlés, et à partir des années 80 les chaudières à eau se développent. C'est cependant avec l'arrivée des chaudières à basse température que les technologies de chauffage deviennent les plus performantes et les moins énergivores, notamment avec l'apparition des chaudières à condensation puis des pompes à chaleur réversibles combinant les énergies. [3]

I.2 Définition des chaudières

Une chaudière est un appareil permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (le plus généralement de l'eau). L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être soit la chaleur dégagée par la combustion (de charbon, de fioul, de gaz, de bois, de déchets, etc...), soit la chaleur contenue dans un autre fluide (chaudière de récupération sur gaz de combustion, sur gaz de procédés chimiques, chaudière "nucléaire" recevant la chaleur du circuit primaire...), soit encore d'autres sources de chaleur (chaudières électriques, par exemple).

Le fluide caloporteur peut être soit chauffé, soit chauffé et vaporisé, soit chauffé, vaporisé et surchauffé dans la chaudière.

Le fluide chaud est ensuite utilisé pour différents usages, tels que :

- **Le chauffage des locaux:** l'eau chaude circule dans des radiateurs ou des planchers chauffants pour diffuser la chaleur dans le bâtiment.
- **La production d'eau chaude sanitaire:** l'eau chaude est utilisée pour la douche, le bain, la vaisselle, etc.
- **Processus industriels:** la vapeur ou l'eau chaude peuvent être utilisées dans divers processus industriels, comme la stérilisation, la cuisson ou le séchage.

Les chaudières industrielles sont des chaudières de grande puissance (supérieure à 70 kW) conçues pour répondre aux besoins spécifiques des industries. Elles sont utilisées pour produire de la vapeur ou de l'eau chaude à haute température et en grande quantité [4].

I.3 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 vapeur surchauffée) [5].

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, entrainement de turbine)
- D'intervenir dans les procédés (réaction chimique, vapeur de dilution, de stripping)
- De constituer un élément de sécurité (vapeur d'étouffement) [6].

I.4 Principe de fonctionnement d'une chaudière

Le principe général d'une chaudière est similaire pour tout type de combustible (gaz, mazout, bois). La chaudière produit de la chaleur grâce à la combustion du combustible. La combustion a lieu lorsque le combustible est en contact avec la flamme du brûleur et de l'air frais. Elle crée des fumées de combustion très chaudes.

L'eau ou le fluide calorporteur circule dans la chaudière dans des conduits en contact direct avec ces fumées. Plus les conduits se rapprochent de la zone de combustion (appelée le foyer), plus la température des fumées est grande. Ainsi, l'eau de chauffage circule souvent dans le sens contraire des fumées afin de pouvoir être chauffée graduellement en s'approchant du foyer avant de sortie de la chaudière pour être distribuée [7].

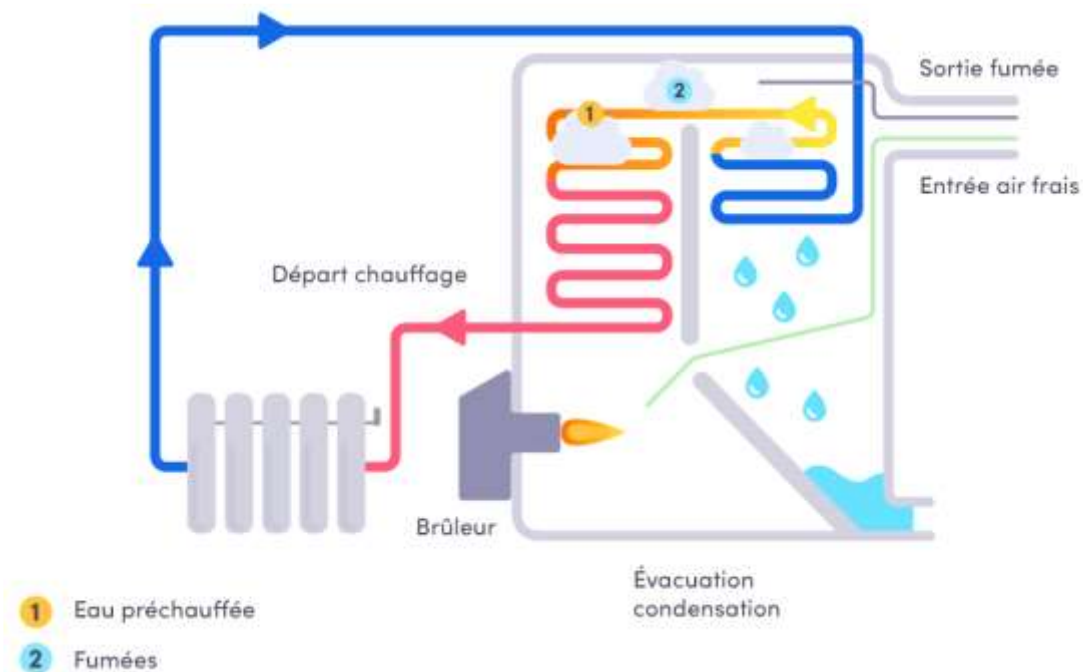


Figure I.1 : schéma de fonctionnement de chaudière [4]

Ce fonctionnement est similaire pour toutes les chaudières. Aujourd'hui, il existe des chaudières plus performantes qu'on appelle les chaudières à condensation. Avec le soutien de 2

Dans ces chaudières, il est possible de tirer profit d'une plus grande partie de la chaleur contenue dans les gaz de combustion en condensant la vapeur d'eau qu'ils contiennent. La

condensation de la vapeur d'eau libère elle aussi de la chaleur qui peut être transmise à l'eau de chauffage, avant que cette eau n'entre dans la partie de la chaudière où se trouve le brûleur. Ainsi, pour une même quantité de combustible brûlé, une plus grande production de chaleur peut être réalisée [7].

I.5 Les différents types des chaudières

I.5.1 Les chaudières à tubes de fumées

Dans ce type de chaudière, les fumées issues de la combustion circulent à l'intérieur des tubes droits disposés dans une calandre d'eau formant le réservoir d'eau. Les tubes sont disposés de telle façon que l'échange de chaleur entre les fumées et l'eau liquide soit réalisée en plusieurs passes. Les générateurs servent à produire de la vapeur saturante à une pression ne dépassant pas généralement les 30 bars

Les avantages

Les chaudières à tubes de fumées sont choisies pour les raisons suivantes :

- Perte minimum par rayonnement.
- Facilité d'exploitation.
- La teneur en eau est excellente pour des applications de chauffage.
- N'exige pas un établissement spécial.
- Prix faible par rapport à l'autre type.
- Peut souvent être classée en seconde catégorie, ce qui ne nécessite pas de chaufferie complètement indépendante [8].

I.5.2 Les chaudières à tubes d'eau

Les chaudières à tubes d'eau ont été développées entre 1958 et 1978, elles sont destinées à travailler à des puissances et pressions trop élevées (660 MW et 220 bars). Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur supérieur à 20 tonnes/h, en moyenne et haute pression. Il possède deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieur) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs.

Dans cet ensemble, circule l'eau qui se transforme en vapeur. Les gaz chauds produits par la combustion sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs où se produit la vaporisation. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur [9].

I.5.3 Chaudière à eau chaude

I.5.3.1 Principes de fonctionnement

Les chaudières eau chaude ont des similitudes avec les chaudières vapeur, bien qu'elles soient complètement remplies d'eau alors que les chaudières vapeur fonctionnent avec un dôme vapeur au-dessus du plan d'eau.

La flamme puis les fumées de combustion transitent vers la cheminée au travers du tube foyer et des tubes de fumée à l'intérieur du corps de la chaudière. L'eau chauffée est acheminée vers le process à l'aide d'une simple pompe à circulation, puis renvoyée à la chaudière pour être chauffée à nouveau. Toute perte d'eau doit être compensée par de l'eau douce traitée chimiquement pour éviter la corrosion.

Le réservoir sous pression de la chaudière est généralement un tube cylindrique horizontal fermé et entouré d'un matériau isolant. Les chaudières eau chaude les plus courantes ont deux ou trois passages ; chaque passage étant un ensemble différent de tubes que le gaz de combustion chaud traverse avant de faire un tour à l'intérieur de la chaudière. Certaines chaudières dites à "foyer borgne" permettent de disposer d'un équipement plus compact car les gaz de combustion se replient sur eux-mêmes dans la chambre de combustion .

I.5.3.2 Utilisation des chaudières eau chaude

Les chaudières eau chaude sont généralement privilégiées lorsque la température de procédé requise est relativement basse – généralement inférieure à 90 °C. Lorsqu'il faut des températures plus élevées, il faut recourir à des chaudières fonctionnant avec d'autres types de fluide: l'eau surchauffée, la vapeur ou un fluide thermique. Cependant, la simplicité et le faible coût d'installation des chaudières à eau chaude leur ont permis de perdurer dans un large éventail d'industries [10].

Avantages des chaudières eau chaude

- Installation économique
- Fonctionnement simple et efficace
- Basse pression donc faibles exigences d'entretien et d'inspection
- Fonctionnement à haut rendement

I.5.3.3 Chaudière au sol

Une chaudière au sol est une chaudière domestique utilisée dans le résidentiel. Elle est posée au sol (à différencier d'une chaudière murale positionnée sur un mur) et peut être reliée à un ballon d'eau chaude sanitaire [5].

I.5.3.4 Chaudière murale

La chaudière murale est une chaudière compacte et peu encombrante, qui se fixe au mur de la maison. Elle peut être alimentée par différents combustibles, tels que le gaz naturel, le propane, le fioul ou encore les granulés de bois [5].

I.5.4 Chaudière à fluide caloporteur

L'apparition des chaudières à fluide caloporteur, encore appelées chaudières à fluide thermique, est liée au développement des industries chimiques et pétrochimiques après la Première Guerre mondiale. Ces industries exigeaient en effet, pour leur fabrication, des niveaux de température de plus en plus élevés, difficiles à atteindre avec des générateurs thermiques classiques, sauf au prix de pressions de travail très élevées.

La propriété marquante des fluides caloporteurs est, en effet, de permettre un réchauffage dans la plage de température 300 à 400 °C à des pressions inférieures à 10 bar.

Les industries faisant appel à ces fluides de transfert thermique sont très nombreuses et de natures diverses. Citons simplement, en plus des industries chimiques et pétrochimiques, les industries du traitement des minerais, les savonneries, les huileries, l'industrie du bois, des matières plastiques, les industries textiles, alimentaires, etc [11].

I.5.5 Chaudière de récupération

Une chaudière de récupération est un échangeur de chaleur qui permet de récupérer l'énergie thermique d'un écoulement de gaz chaud. Elle produit de la vapeur qui peut être utilisée dans un procédé industriel ou pour alimenter une turbine à vapeur.

Une application usuelle pour une chaudière de récupération est dans la centrale électrique à cycle combiné, où les gaz d'échappement de la turbine à gaz alimentent la chaudière de récupération pour générer de la vapeur qui alimentera la turbine à vapeur. Cette combinaison produit de l'électricité plus efficacement qu'une turbine à gaz ou une turbine à vapeur seule. Une autre application pour une chaudière de récupération est dans une centrale à cycle combiné avec un Moteur Diesel, où les gaz d'échappement du moteur diesel alimentent la chaudière de récupération qui alimente la turbine à vapeur. La chaudière de récupération est aussi un composant important des centrales à cogénération. Les centrales à cogénération ont typiquement un rendement supérieur aux centrales à cycle combiné. Cela est dû aux pertes d'énergie associées à la turbine à vapeur [11].



Figure I.2 : Chaudière de récupération [12]

I.6 Classification des générateurs de vapeur

I.6.1 Les chaudières à tubes de fumées

Les chaudières à tubes de fumées sont le plus généralement des petites chaudières (production inférieure à 25 t/h) générant de la vapeur saturée à une pression inférieure à une vingtaine de bars. Le schéma ci-dessous (figure I.3) présente la vue d'une chaudière à tubes de fumées sur laquelle on peut distinguer [13].

- Le brûleur avec son ventilateur d'air,
- Le tube-foyer en tôle d'acier ondulée dans lequel se développe la flamme,
- La boîte arrière de fumée permettant de distribuer celle-ci dans le faisceau tubulaire,
- Une boîte de fumée avant (côté brûleur) permet aux fumées de traverser en deux passes le faisceau avant leur rejet à une cheminée.
- La sortie de la vapeur saturée est équipée d'un déflecteur situé au-dessus du plan d'eau pour limiter l'entraînement des gouttelettes de liquide.

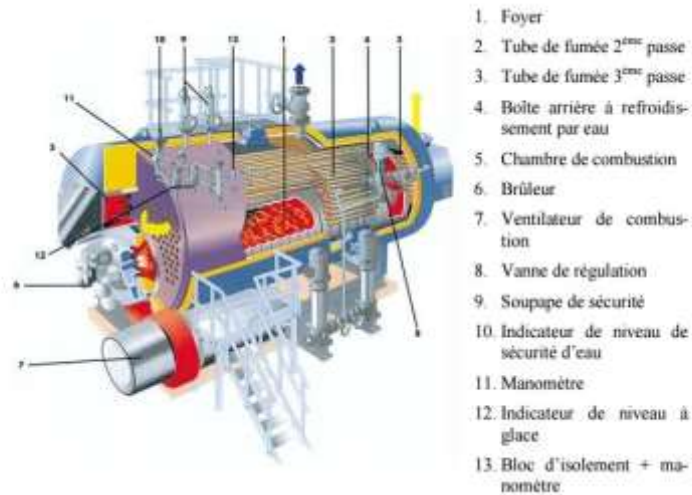


Figure I.3 : Schéma d'une chaudière à tubes de fumées [10]

I.6.2 les chaudières à tubes d'eau

C'est un type de générateur de vapeur dans lequel l'eau circule dans les tubes qui sont chauffés extérieurement par les gaz de combustion . Ils représentent la grande majorité des générateurs de vapeur en service

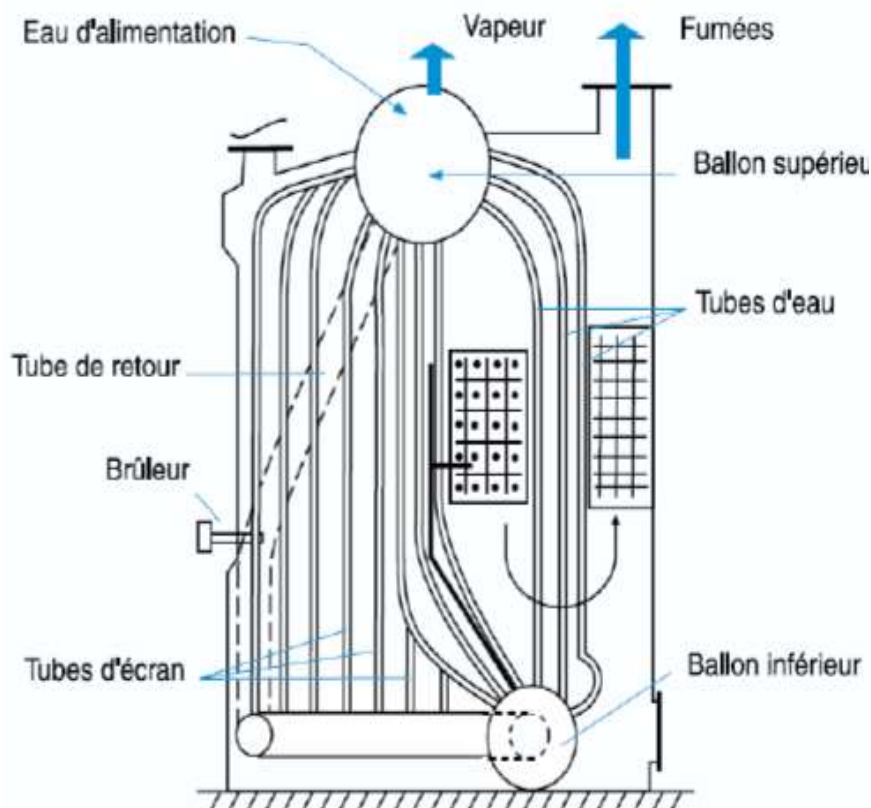


Figure I.4 : schéma d'une Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur [11].

Ces générateurs de vapeur sont utilisés dans les grandes installations industrielles et les centrales électriques pour produire de la vapeur à haute pression. Ils utilisent comme combustible

du gaz, de l'huile ou du combustible solide. Les générateurs de vapeur à tubes d'eau possèdent en général deux réservoirs ou plus, le réservoir supérieur appelé ballon collecteur, et le (ou les) réservoir inférieur appelé ballon distributeur. Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs, à l'intérieur de ceux-ci se produit la vaporisation. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon ou le collecteur inférieur par des tubes non soumis à la chaleur (downcomer) [14].

Le transfert de chaleur entre les tubes et les gaz de combustion se fait principalement par radiation, contrairement à la chaudière à tubes de fumées, où le transfert de la chaleur se fait par convection entre les gaz de combustion (fumées) et les tubes. Les gaz de combustion peuvent être aussi utilisés dans le préchauffage de l'air de combustion et l'eau d'alimentation.

Pour améliorer l'efficacité énergétique, des économiseurs (faisceaux de tubes le plus souvent) peuvent être installés sur la sortie des fumées pour préchauffer l'eau alimentaire des chaudières.

Après son préchauffage éventuel dans l'économiseur, l'eau débitée par la pompe alimentaire est admise dans le ballon supérieur.

La circulation de l'eau dans la zone de vaporisation est le plus souvent naturelle dans le cas des chaudières industrielles dont la pression est inférieure à 190 bars [15].

Pour des pressions supérieures, la circulation est assurée par une pompe qui en impose le débit. Dans le cas de la circulation naturelle, le ballon supérieur constitue le point de départ de la circulation de l'eau. L'eau liquide supérieure est dirigée vers le ballon inférieur dans des canalisations non chauffées (colonnes d'alimentation extérieures) ou les moins chauffées de la chaudière (tubes de descente localisés en fin de trajet des fumées). Du ballon inférieur, l'eau liquide est distribuée dans les différents faisceaux de vaporisation lui permettant de remonter vers le ballon supérieur. Sous l'effet de l'apport de chaleur, l'eau se vaporise partiellement dans des faisceaux et remonte sous la forme d'une émulsion eau-vapeur de plus en plus chargée en vapeur au fur et à mesure de l'absorption de chaleur [15].

La différence des masses volumiques entre l'eau liquide et l'émulsion conduit sur l'ensemble de la hauteur de la chaudière à la création d'une charge motrice permettant la circulation naturelle de l'eau. Cette charge motrice est consommée en pertes de charge par le débit d'eau en circulation.

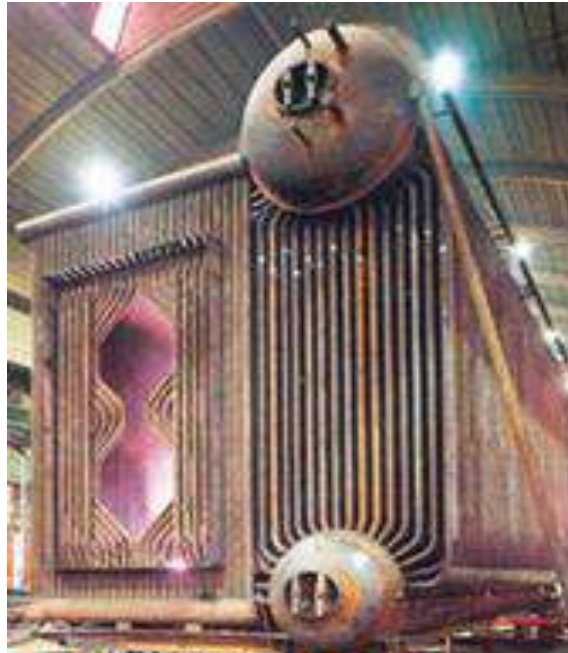


Figure I.5 : l'extérieur de la chaudière à tube d'eau [16]

I.7 Comparaison entre chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumée

I.7.1 Avantages et inconvénient

Tableau I.1 : avantage et inconvénient des chaudières à tube d'eau et tube de fumée [17]

Chaudière à tubes d'eau		Chaudière à tubes de fumée	
Avantage	inconvénient	Avantage	inconvénient
-moins dangereuse, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier. - une fiabilité et une durée de vie plus importante.	-son prix est très élevé, il peut aller jusqu'au double du prix de la chaudière à tube de fumée - traite un grand volume d'eau ; elle est classée en premier catégorie ; donc il doit avoir un local indépendant pour la chaufferie.	-prix faible par rapport à l'autre type. - peut souvent être classée en seconde catégorie, ce qui ne nécessite pas de chaufferie complètement indépendante.	- elle est soumise à des contraintes plus sévères que la chaudière à tubes d'eau - plus dangereuse qu'une chaudière à tubes d'eau, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier. -une fiabilité et une durée de vie plus faible

I.7.2 Comparaison de performance

Tableau I.2 : comparaison de performance entre les chaudières à tube d'eau et tube de fumée

[17]

Propriétés	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente)	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	Rapide
Adaptation aux changements de régime	Médiocre (inertie importante)	Bonne
Surface de chauffe	moyenne	Elevée
Sécurité	médiocres	Bonne
Encombrement	faible	Fort
Prix	limité	Elevé
Applications usuelles		
<ul style="list-style-type: none"> • Puissance • Débit • Timbre (pression max. d'utilisation) 	<ul style="list-style-type: none"> • moyennement élevée • 1,5 à 25 t/h • 10 à 20 bars 	<ul style="list-style-type: none"> • Importante • 4 à 200 t/h • 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (en circulation forcée)

I.8 Eléments constructifs d'une chaudière tubes à eau

I.8.1 Garnissage des parois (enveloppe)

Le garnissage des parois d'une chaudière, également connu sous le nom d'enveloppe de chaudière, fait référence à l'isolation thermique qui entoure les parties de la chaudière où la chaleur est produite et maintenue. Voici quelques aspects importants du garnissage des parois d'une chaudière :

Isolation thermique : Le garnissage des parois est conçu pour minimiser les pertes de chaleur en empêchant la chaleur de s'échapper de la chaudière. Cela aide à maintenir une température élevée à l'intérieur de la chaudière, ce qui est essentiel pour un fonctionnement efficace.

Matériaux isolants : Les matériaux utilisés pour le garnissage des parois sont souvent des isolants thermiques efficaces tels que la laine minérale, la fibre de verre, la céramique ou les matériaux réfractaires. Ces matériaux sont choisis pour leurs propriétés d'isolation thermique et leur capacité à résister aux températures élevées.

Réduction des pertes de chaleur : En réduisant les pertes de chaleur, le garnissage des parois aide à améliorer l'efficacité énergétique de la chaudière. Cela peut contribuer à réduire la consommation de combustible et les coûts de fonctionnement.

Protection des travailleurs : Le garnissage des parois aide également à protéger les travailleurs et les opérateurs de la chaudière contre les températures élevées. En limitant la chaleur rayonnante et en maintenant une température de surface sûre à l'extérieur de la chaudière, il réduit les risques de brûlures et de blessures.

I.8.2 Le foyer (La chambre de combustion)

C'est la chambre dans laquelle se fait la combustion, les combustibles peuvent être solides, gazeux ou liquides. Elle est tapissée de tubes d'eau qui composent les surfaces de chauffe soumises au rayonnement de la flamme.

- Les brûleurs, insérés dans les parois entre des tubes dévoyés, peuvent être situés au milieu des panneaux (chauffe en façade) ou dans les angles (chauffe tangentielle) pour donner une turbulence importante aux flammes au centre de la chambre de combustion.
- L'air de combustion, poussé par un ventilateur est distribué aux brûleurs par un large caisson d'air permettant d'en assurer une bonne distribution [18].

I.8.3 Les brûleurs

C'est l'élément mécanique qui assure la production de chaleur en assurant le mélange d'un combustible avec de l'air (comburant) produisant ainsi une combustion. Il a donc un rôle déterminant dans la qualité de la combustion, et par suite dans l'émission de polluants où d'imbrûlés en plus ou moins grande quantité dans les fumées.

Le rôle du brûleur est en général double :

- Assurer le mélange carburant-comburant dans les proportions choisies (par exemple, selon un rapport air-gaz ou avec un léger excès d'air)
- Réaliser la combustion de ce mélange dans les conditions optimales (allumage et maintien de la flamme, combustion complète) [18].

I.8.4 L'écran de tubes

L'écran de tubes d'une chaudière est une structure essentielle située dans la partie la plus chaude de la chaudière, généralement dans le foyer ou la zone de combustion. Cet écran est constitué d'une série de tubes disposés de manière stratégique pour plusieurs raisons :

- **Protection des parois de la chaudière** : L'écran de tubes agit comme une barrière thermique qui protège les parois de la chaudière contre les températures extrêmement élevées générées par la combustion du combustible. Cela aide à prolonger la durée de vie de la chaudière en évitant les dommages causés par la chaleur intense.
- **Amélioration de l'efficacité de la combustion** : Les tubes de l'écran peuvent être disposés de manière à favoriser un flux de chaleur optimal dans la chambre de combustion, ce qui contribue à une combustion plus complète et efficace du combustible. Cela permet d'optimiser les performances de la chaudière et de réduire les émissions polluantes.
- **Transfert de chaleur** : Les tubes de l'écran absorbent une partie de la chaleur générée par la combustion et la transfèrent à l'eau circulant à l'intérieur des tubes. Cela contribue au processus de production de chaleur de la chaudière en chauffant l'eau qui sera ensuite distribuée dans le système de chauffage.
- **Renforcement de la structure de la chaudière** : En plus de leur rôle dans la transmission de chaleur, les tubes de l'écran renforcent également la structure de la chaudière en fournissant un soutien structurel supplémentaire dans la zone de combustion.

I.8.5 Faisceau de convection

Constitué de tubes nus verticaux fixés à leurs extrémités aux ballons inférieurs et supérieurs. Des chicanes placées dans ce faisceau évitent les chemins préférentiels des fumées. Selon la pression de fonctionnement, le faisceau vaporiseur représente une part plus ou moins importante de la surface d'échange réservée à la vaporisation de l'eau. En effet, la chaleur latente de changement d'état de l'eau étant d'autant plus faible que la pression est plus élevée, la surface totale d'échange nécessaire pour vaporiser l'eau est d'autant plus réduite que le timbre de la chaudière est plus élevé. Au-delà de 80 à 100 bars, la surface des parois de la chambre de combustion suffit à elle seule pour assurer ce service (chaudière radiantes). Comprenant deux parcours pour les fumées :

- **Le ballon supérieur** : réalise la séparation de deux phases liquide et vapeur. La vapeur saturée sort par (H) en haut du ballon avant d'alimenter les surchauffeurs.
- **Le ballon inférieur** : alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur.

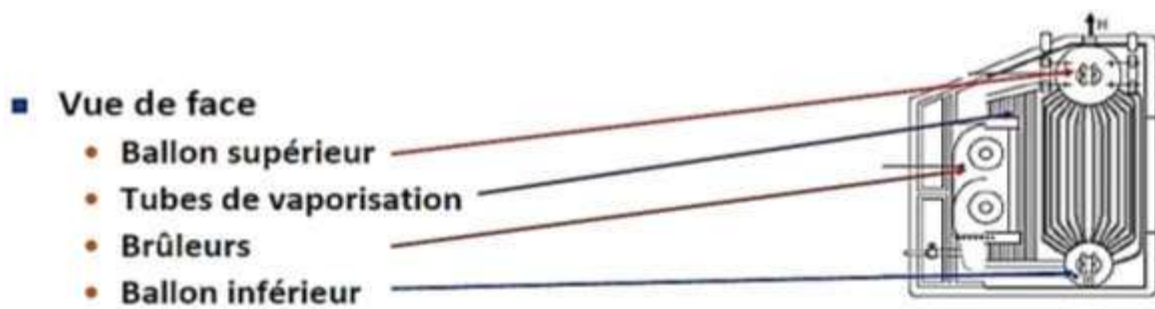


Figure I.6 : Les ballons, supérieur et inférieur [14]

I.8.6 Surchauffeur

La surchauffeur est constituée d'étages primaires et secondaires. La surchauffeur secondaire est constituée de tronçons verticaux et horizontaux. Le tronçon vertical est situé en face de l'écran tubulaire du four alors que le tronçon horizontal dont l'écoulement de vapeur est parallèle à celui du gaz de carneau est situé en aval de la cavité de passe de retour derrière l'écran tubulaire.

La surchauffeur primaire est située en aval de la surchauffeur secondaire : la direction d'écoulement de vapeur s'oppose à celui de gaz de carneau.

Les surchauffeurs primaire et secondaire sont reliés par une tuyauterie équipée d'un désurchauffeur à arrosage d'eau de condensation.

L'eau de désurchauffe est fournie à travers le condenseur du désurchauffeur dans lequel se condense la vapeur saturée provenant du ballon de vapeur.

La conception de la surchauffeur tient compte d'une perte de charge de vapeur minimisant la grandeur de déséquilibre de température de vapeur, la température de calcul étant déterminée en tenant compte de la variation de débit /température de gaz [5].



Figure I.7 : Surchauffeur [2]

I.8.7 L'économiseur

Il extrait des gaz d'échappement de la chaudière ; la chaleur en excès que la chaudière elle-même ne peut plus absorber.

L'économiseur est généralement constitué de tubes à ailettes ou de tubes lisses. Il est généralement situé sur le parcours des fumées entre le dernier surchauffeur ou resurchauffeur et le réchauffeur d'air [19].

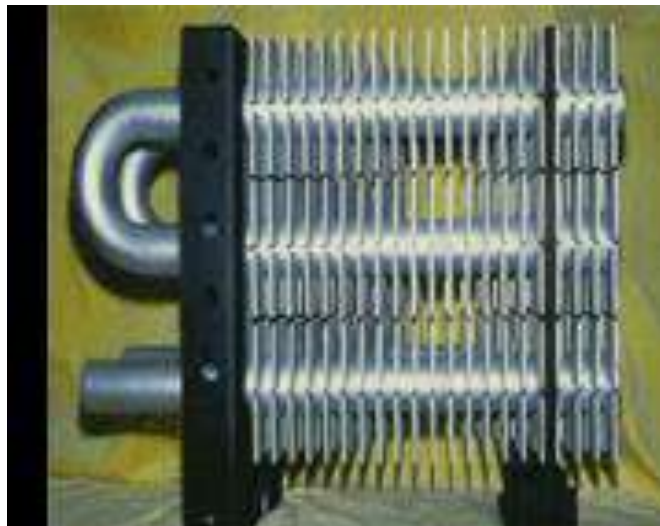


Figure I.8 : Economiseur

I.8.8 Réchauffeur d'air

C'est un échangeur d'air de combustion /gaz de combustion. L'avantage technique du réchauffage de l'air réside dans le fait qu'il amoindrit la perte par la cheminée et qu'il élève en outre la valeur de la température des gaz de combustion ou du foyer [6].

I.8.9 Le ventilateur de soufflage

La chaudière fonctionne sous une pression positive (pressurisée) avec de l'air de combustion fourni par un ventilateur à tirage forcé. Ce ventilateur alimente également la soufflante qui fournit l'air à l'allumeur. Il est entraîné par un moteur électrique alimenté par le courant électrique de secours.

La quantité d'air entrant dans le ventilateur est limitée de façon à maintenir un rapport air/combustible correct au niveau du brûleur. Si la quantité d'air de combustion en excès est inférieure à 10% pour le combustible gazeux ou à 15% pour l'essence, il y aura une combustion incomplète. Les hydrocarbures non brûlés pourraient prendre feu dans la cheminée ou exploser et pourraient donc risquer d'endommager sérieusement la chaudière [18].

I.8.10 Les appareils de sécurité

Les causes d'explosion des chaudières étant l'élévation excessive de la pression et l'abaissement du niveau d'eau, on utilise les dispositifs suivants, pour éviter ce risque :

- Deux soupapes de sûreté au moins, réglées de manière à s'ouvrir dès que la pression devient égale à la pression de la chaudière, ainsi qu'un manomètre sur lequel est clairement indiquée la valeur de la pression de calcul qui permet à l'opérateur de vérifier que la pression de fonctionnement lui est effectivement inférieure.
- Un dispositif de sécurité provoquant l'arrêt total de l'alimentation en combustible est installé sur la chaudière. Ce dispositif se déclenche si le niveau d'eau dans le ballon chute et cela pour éviter la déformation ou l'éclatement des tubes à cause de l'augmentation brusque de température [18].

I.9 Les problèmes rencontrés dans les chaudières

Les générateurs de vapeur sont soumis à des conditions sévères de haute température, haute pression, environnement corrosif et un fonctionnement continu. De plus il y a d'autre problème:

I.9.1 Agglomération

L'agglomération dans une chaudière est un problème rencontré principalement dans les chaudières utilisant des combustibles solides, tels que le charbon ou la biomasse. Ce phénomène

se produit lorsque des composants minéraux présents dans le combustible fondent à des températures élevées et se solidifient ensuite sur les surfaces internes de la chaudière, formant des agrégats durs et résistants. Voici quelques aspects importants liés à ce problème :

Formation de dépôts : Lorsque les températures à l'intérieur de la chaudière atteignent des niveaux élevés, les composants minéraux du combustible solide fondent et se déposent sur les parois de la chaudière sous forme de dépôts durs. Ces dépôts peuvent obstruer les tubes, réduire l'efficacité thermique de la chaudière et augmenter les risques de surchauffe.

Réduction de l'efficacité thermique : Les dépôts d'agglomération agissent comme un isolant thermique, ce qui réduit la capacité de la chaudière à transférer efficacement la chaleur de la combustion à l'eau. Cela entraîne une diminution de l'efficacité énergétique de la chaudière, ce qui se traduit par une consommation accrue de combustible pour produire la même quantité de chaleur.

Risques opérationnels: L'agglomération peut également entraîner des problèmes opérationnels tels que des blocages des conduits et des tubes, des fluctuations de pression et de température, voire des arrêts inattendus de la chaudière. Ces problèmes peuvent nécessiter des arrêts de production coûteux pour nettoyer et réparer la chaudière.

Solutions et prévention : Pour prévenir l'agglomération, diverses mesures peuvent être prises, notamment le choix de combustibles de meilleure qualité avec des teneurs en minéraux plus faibles, l'utilisation de systèmes de contrôle de la combustion pour maintenir les températures à des niveaux optimaux, et la mise en place de programmes de nettoyage et d'entretien réguliers pour éliminer les dépôts accumulés.

I.9.2 Claquant

Claquant des chaudières industrielles est un terme français qui décrit un bruit fort et rythmique provenant des chaudières industrielles lorsqu'elles fonctionnent. Ce bruit est causé par la dilatation et la contraction rapides des parois métalliques de la chaudière dues aux changements de température.

I.9.2.1 Les causes du claquement des chaudières industrielles

Plusieurs facteurs peuvent contribuer au claquement des chaudières industrielles, tels que :

- **Des changements rapides de température:** Lorsque la chaudière est chauffée ou refroidie rapidement, les parois métalliques se dilatent et se contractent brusquement, ce qui peut produire un bruit fort de claquement ou de cliquetis.
- **Un chauffage inégal:** Si la chaudière n'est pas chauffée uniformément, certaines parties peuvent se dilater et se contracter davantage que d'autres, générant également un bruit important.

- **L'accumulation de tartre:** Le tartre qui se dépose à l'intérieur des tubes de la chaudière peut piéger la chaleur et causer un chauffage inégal, contribuant ainsi au claquement.
- **La conception de la chaudière:** Certaines conceptions de chaudières sont plus sujettes au claquement que d'autres.

I.9.2.2 Les effets du claquement des chaudières industrielles

Le claquement des chaudières industrielles peut avoir plusieurs conséquences négatives, notamment :

- **La pollution sonore:** Le bruit fort du claquement peut être dérangement pour les travailleurs et les riverains.
- **Des dommages à la chaudière:** La dilatation et la contraction rapides des parois métalliques peuvent éventuellement endommager la chaudière.
- **Une efficacité réduite:** L'accumulation de tartre et le chauffage inégal peuvent diminuer l'efficacité de la chaudière.

I.9.3 Encrassement

L'encrassement des chaudières industrielles, également connu sous le nom de fouling ou salissure, est l'accumulation de dépôts sur les surfaces internes des chaudières. Ces dépôts peuvent être constitués de divers matériaux, tels que :

- **Suie et cendres:** provenant de la combustion du combustible.
- **Tartre:** formé par l'eau dure ou l'accumulation de minéraux.
- **Corrosion:** produits par la dégradation des matériaux de la chaudière.
- **Dépôts biologiques:** provenant de la croissance de micro-organismes dans l'eau d'alimentation.

I.9.3.1 Les principales causes d'encrassement

Les combustibles

En 20 ans, les combustibles, solides ou liquides, ont évolué. Les fuels lourds sont le résultat de savants mélanges. Les charbons français, peu cendreux et peu soufrés, sont de plus en plus remplacés par des charbons d'importation, certes contrôlés, mais parfois plus difficiles à brûler et d'origines multiples.

Les recherches d'économie

On a cherché, non sans succès, à réduire le poids et l'encombrement des chaudières, à production égale, en diminuant les sections de passage des fumées et en multipliant les chicanes sur le parcours des gaz. Cela s'est traduit par un accroissement des pertes de charge, mais aussi, hélas, des dépôts de suies dans les zones les moins bien léchées par les fumées (coudes ou angles, par exemple).

L'automatisation des chaudières

L'exploitation automatisée a éloigné des chaudières le personnel expérimenté qui savait régler un feu à l'œil. La conduite dépend donc plus qu'avant des appareils de mesure et d'analyse, et par conséquent de leur bon entretien et de leur étalonnage régulier.

L'allongement des campagnes de chauffe

Pour les mêmes raisons économiques, on a également cherché à allonger les campagnes de chauffe. Les visites réglementaires, donc le nettoyage, sont normalement effectuées tous les 12 ou 18 mois, mais des dérogations allant jusqu'à 40 mois sont accordées à certaines industries (pétrole et pétrochimie, par exemple). Comment maîtriser l'encrassement des surfaces d'échange sur d'aussi longues périodes quand on sait que celui-ci peut augmenter de façon brutale et irréversible en quelques jours

Le vieillissement des chaudières

Selon une étude publiée fin 1994 par un organisme de contrôle, 62 % du parc de chaudières sont constitués d'appareils ayant plus de 20 ans. Est-il certain que ces chaudières soient toujours aussi performantes, du fait de leur encrassement, par exemple ? A moins de les "déshabiller" totalement lors de chaque nettoyage, ce qui serait fort coûteux, il est en effet inévitable que des parties peu accessibles s'encrassent progressivement [21].

I.10 Types de circulation de la chaudière**I.10.1 La circulation naturelle**

La différence des masses volumiques entre l'eau liquide et l'émulsion conduit sur l'ensemble de la hauteur de la chaudière à la création d'une charge motrice permettant la circulation naturelle de l'eau. Cette charge motrice est consommée en pertes de charge par le débit d'eau en circulation.

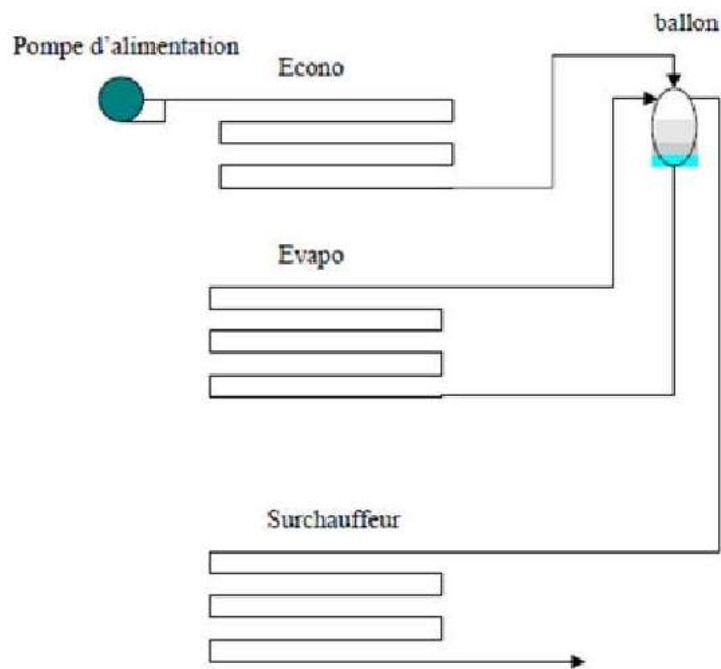


Figure I.9 : chaudière à circulation naturelle [21]

La chaudière à un niveau de pression peut donc être divisée en trois zones bien distinctes :

L'économiseur : l'eau liquide est réchauffée jusqu'à la température d'approche qui se situe à quelques degrés sous la saturation. Cette différence de température est une sécurité pour ne pas avoir de vaporisation à l'intérieur de tubes ;

L'évaporateur : l'eau reprise à la base du ballon est partiellement vaporisée puis renvoyée dans le ballon;

La surchauffeur : la vapeur est soutirée en haut du ballon et est surchauffée jusqu'à la température de consigne.

Les chaudières à circulation naturelle n'ayant pas de pompe de circulation à l'évaporateur, présentent l'avantage d'une faible consommation électrique et de coûts de maintenance limités.

La différence de densité entre les phases vapeur et liquide à saturation décroît quand la pression augmente (voir figure). C'est pourquoi on ne rencontre pas de chaudière à circulation naturelle à très haute pression (rarement au-delà de 145 bars) [22].

I.10.2 La circulation contrôlée

Progressivement la pression de fonctionnement des chaudières s'est élevée, notamment pour obtenir de meilleurs rendements dans les centrales thermiques. Lorsque la pression dans le ballon atteint des valeurs de l'ordre de 180 bar, la différence de masse volumique entre eau liquide et la

vapeur devient insuffisante pour assurer la circulation naturelle dans le circuit évaporatoire. On installe alors une pompe dans le circuit pour assurer la bonne circulation de l'eau.

Lorsque la pression de la vapeur augmente, le tirage naturel dans les tubes de l'évaporateur devient insuffisant. Une pompe de circulation est alors introduite dans la boucle de vaporisation pour vaincre les pertes de charge du mélange eau vapeur à déplacer (voir figure) [22].

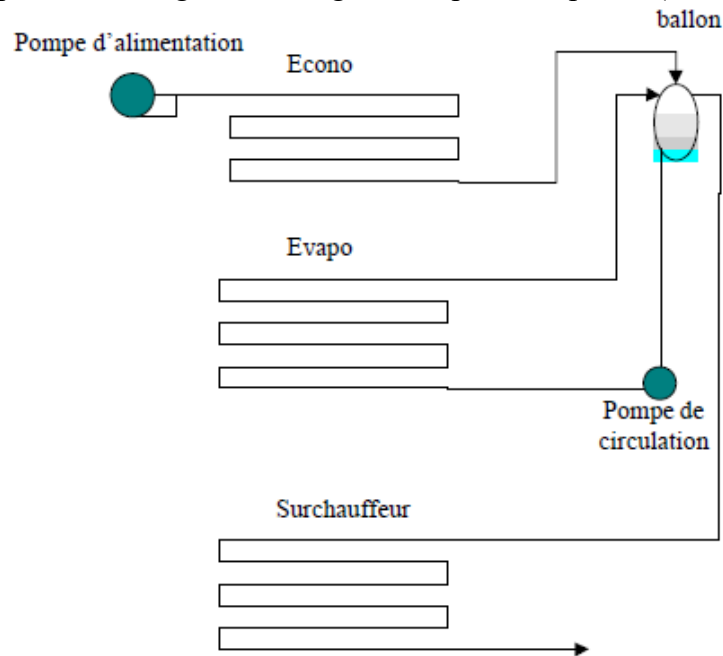


Figure I.10 : chaudière à circulation contrôlée [21]

I.10.3 La circulation forcée

Pour les chaudières industrielles et les chaudières de centrales thermiques, ont été développées des technologies de chaudières à circulation forcée, sans ballon. En effet, l'accroissement des pressions de fonctionnement s'est heurté à la barrière technologique de la résistance mécanique des ballons de chaudière. En outre le rôle de séparation des phases liquide et vapeur du ballon, n'a plus de sens quand on atteint des pressions supercritiques.

NB : Au-delà d'une température de 374°C et d'une pression de 22,1 mégapascals (1 mégapascal = 10 bar), les états gazeux et liquide de l'eau évoluent vers un état intermédiaire dit supercritique, dans lequel l'eau allie une très grande compressibilité à une densité typique d'un liquide.

Dans les chaudières à circulation forcée (de type Benson ou Sulzer) l'eau ne circule pas plusieurs fois en boucle avant d'être vaporisée, mais rentre dans les tubes évaporateurs du foyer sous forme liquide et en ressort sous forme de vapeur saturée, d'où les appellations de chaudières "mono tubulaires" ou de chaudières "once through". La circulation de l'eau dans l'évaporateur est

assurée par des pompes à très haute pression qui "poussent" l'eau, puis la vapeur successivement dans les tubes de l'économiseur, de l'évaporateur, puis des surchauffeurs.

Toutes les chaudières «supercritiques» sont nécessairement de ce type. Mais on en rencontre également dans des cycles sous-critiques, en concurrence avec les chaudières à circulation assistée. Leur avantage principal est alors leur plus faible durée de démarrage, avantage notable dans les centrales thermiques de pointe. Par contre, l'absence de ballon les rend plus exigeantes quant à la qualité de l'eau déminéralisée à utiliser.

Les chaudières les plus modernes peuvent être à vaporisation totale (once-through boiler en anglais): elles ne comportent théoriquement plus de réservoir matérialisant la séparation eau vapeur et sont constituées d'un grand nombre de tubes parallèles à l'intérieur desquels l'eau se réchauffe/se vaporise [22].

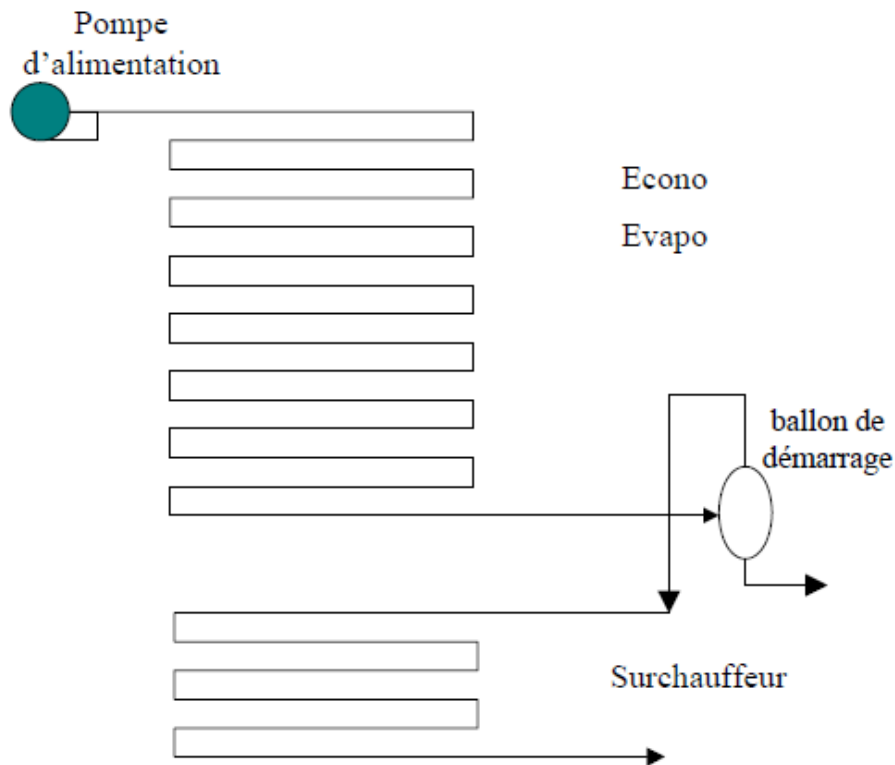


Figure I.11 : chaudière à circulation forcée [21]

I.11 Utilisation de la vapeur

Les besoins énergétiques d'une raffinerie, d'une usine chimique ou pétrochimique sont essentiellement de deux natures : thermiques et mécaniques.

Les besoins thermiques sont satisfaits :

- soit par apport direct de chaleur de combustion dans les fours des unités (combustibles)

- soit par utilisation d'un fluide intermédiaire (vapeur d'eau, huile chaude) pour les besoins de réchauffage, de re bouillage

Les besoins en énergie mécanique sont quant à eux, satisfaits essentiellement par l'électricité et la vapeur au travers des moteurs électriques et turbines à vapeur.

Le combustible représente une source d'énergie que l'on peut généralement stocker (sauf excès de gaz combustible) et qui est donc disponible à la demande.

La vapeur quant à elle, a des origines diverses : centrale thermoélectrique, générateurs de vapeur dans les unités, turbines à gaz, ... L'essentiel de la production provient généralement de la centrale où la production de vapeur s'accompagne souvent de génération d'électricité.

Si toute la vapeur doit être nécessairement produite au sein de l'usine, il n'en n'est pas de même de l'électricité que l'on peut acheter à l'extérieur, en l'occurrence à Électricité de France.

Outre son rôle particulier dans la distribution d'énergie (vapeur de réchauffage, entraînement de turbines), la vapeur d'eau intervient dans les procédés (réactif chimique, vapeur de dilution, de stripage, etc.) et constitue un élément de sécurité (vapeur d'étouffement). Les chaudières ou générateurs de vapeur sont donc indispensables dans une usine pour assurer de manière fiable le fonctionnement des unités de production [23].

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a fourni un aperçu complet des chaudières industrielles, couvrant leur évolution, leurs types, et leur fonctionnement. Une compréhension claire de ces aspects est cruciale pour identifier et résoudre les problèmes techniques courants, ainsi que pour optimiser leur performance. Cette base théorique est essentielle pour aborder les défis liés à l'encrassement et aux méthodes de nettoyage présentés dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Généralités sur l'encrassement

Introduction

L'encrassement des chaudières est un phénomène courant mais problématique, affectant leur efficacité et leur durabilité. Ce chapitre explore l'histoire, les mécanismes, et les impacts économiques de l'encrassement. Il décrit également les différentes méthodes de nettoyage et les critères de sélection appropriés. L'objectif est de comprendre les causes et les conséquences de l'encrassement afin de mieux gérer et prévenir ce problème.

II.1 Définition d'encrassement

L'encrassement des équipements de transfert thermique est défini comme étant la déposition et l'accumulation de matériaux ou de substances indésirables sur les surfaces d'échange de chaleur [24].

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

Le dépôt qui se forme sur l'un ou les deux côtés de la surface d'échange possède une conductivité thermique plus faible que celle du métal constituant cette surface, ce qui engendre l'augmentation considérable de la résistance au transfert et donc, une diminution des performances du réchauffement. D'autre part, le dépôt réduit la section de passage du fluide entraînant, ainsi une augmentation des pertes de charge dans l'appareil. Cela nécessite un surdimensionnement de l'équipement, une dépense d'énergie supplémentaire, une puissance de pompage importante et une réduction du taux de marche de l'unité sans oublier l'énorme perte économique due au démontage et nettoyage et/ou rebutage [25].

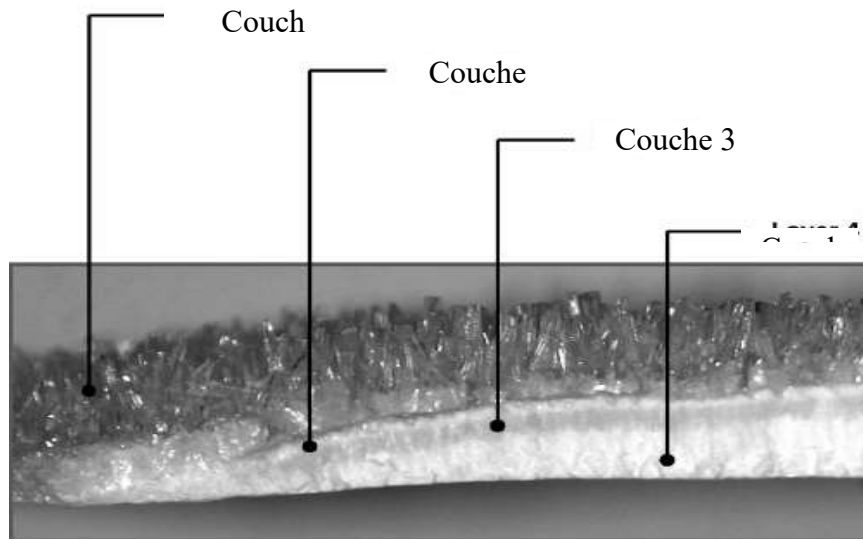


Figure II.1 : Les différentes couches d'encrassement [26]

II.2 Les types d'encrassement

II.2.1 Encrassement par précipitation

L'encrassement d'une surface d'échange de chaleur par précipitation est généralement associé à la production et la déposition d'un solide cristallin à partir de sels inorganiques présente dans une solution liquide d'alimentation et ayant une solubilité inverse avec la température. Les substances prédominantes de ce type d'encrassement renferment le carbonate de calcium, le sulfate de calcium, le phosphate de calcium et plusieurs constituants de l'eau dure et de l'eau de mer.

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

II.2.2 Encrassement par corrosion

C'est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement. Les produits de corrosion encrassent la surface et peuvent stimuler l'attachement d'autres matières encrassant. L'encrassement par corrosion est un promoteur potentiel pour tous les autres types d'encrassement. Les produits de corrosion peuvent en effet servir de germes de nucléation pour des solutions sursaturées, piéger les particules en suspension, d'abris pour le développement de micro-organismes et même catalyser certaines réactions. [24]

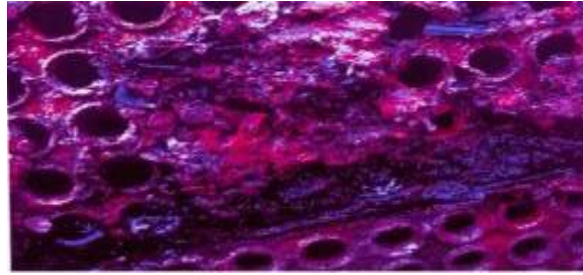


Figure II.2 : Dégradation (encrassement sous corrosion) [26]

II.2.3 Encrassement biologique

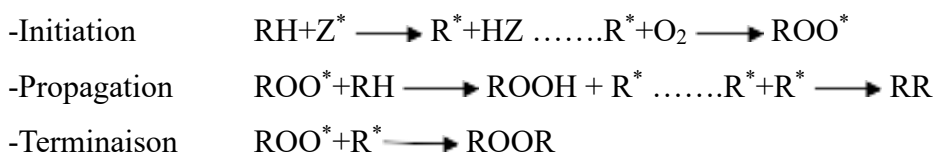
Il est produit par les organismes biologiques qui s'attachent à la surface de transfert de chaleur et qui peuvent produire des boues qu'ils s'y attachent aussi. Il est dû au développement de trois grands types de micro-organismes, à savoir : les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif tel que les hydrocarbures ou l'ammoniaque, les algues qui se développent en présence de l'énergie solaire, et les champignons dont la croissance est surtout due aux changements de conditions physiques ambiantes (pH, humidité, température). Ces micro-organismes s'attachent à la surface de transfert de chaleur et créent un film. [24]

II.2.4 Encrassement par réaction chimique

Les dépôts sont des produits solides de réactions chimiques ayant eu lieu au voisinage de la surface d'échange de chaleur dont le matériau ne participe pas à la réaction mais peut agir comme catalyseur. Ces réactions sont souvent des réactions de polymérisation. Il peut être affecté par les conditions opératoires (vitesse, température et concentration) ainsi que par la composition du fluide c.-à-d. le constituant principal et les constituants secondaires même à l'état de trace tels que les oléfines, l'oxygène moléculaire et l'air, les composés oxygénés soufrés et azotés, les sels inorganiques, l'eau, les impuretés métalliques libres et les produits de corrosion.

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

Le principe du schéma réactionnel serait le suivant :



Où :

RH : est une molécule d'hydrocarbure

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

II.2.5 Encrassement par solidification

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace à l'intérieur des conduites) ou du dépôt d'un constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide (dépôt des hydrocarbures paraffiniques). [24]

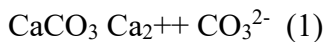
II.2.6 Entartrage

La dureté de l'eau est principalement causée par la présence d'ions Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}) et Bicarbonate (HCO_3^-) dans l'eau. Une eau dure peut poser des problèmes d'entartrage des appareils et des canalisations d'eau chaude. Il est possible de réduire la dureté de l'eau en l'adoucissant par avec un système d'échangeur d'ions par exemple. [24]

II.2.6.1 paramètres de l'entartrage

La présence de calcaire dans l'eau

La présence de sels de calcium et, dans une moindre mesure, de magnésium dans l'eau est le premier facteur qui contribue au caractère entartrant de l'eau. Ainsi, plus la dureté de l'eau est élevée, plus il y a prédisposition au dépôt de calcaire (en fait, du carbonate de calcium CaCO_3 (1)) sur les parois en contact avec l'eau. Mais la présence de sels de calcium dans l'eau n'est pas à elle seule suffisante pour provoquer l'entartrage.



La température de l'eau

La réaction chimique qui provoque la précipitation du carbonate de calcium est largement favorisée par l'élévation de la température qui, en libérant du gaz carbonique, accélère la précipitation du tartre. Il n'y a pas ou très peu d'entartrage sur les canalisations d'eau froide. En revanche, les circuits d'eau chaudes sanitaire représentent un terrain favorable à l'entartrage. A un degré plus important, les circuits internes de chauffe-eau sont très facilement entartrables.

On peut noter, en revanche, que les circuits de chauffage s'entartrent très peu malgré la température puisqu'il n'y a pas de renouvellement d'eau, le phénomène d'entartrage s'arrêtant de lui-même lorsque tout le CaCO_3 contenu a été déposé.

La présence dans l'eau d'éléments favorisants

On a pu constater que deux types d'eau de composition identique et placées dans les mêmes conditions n'avaient pas forcément le même pouvoir entartrant.

Le phénomène tient à la présence dans l'eau en quantité infinitésimale susceptibles de déclencher le phénomène d'entartrage. Ainsi, la présence dans l'eau d'ions cuivre ou d'ions zinc freine le dépôt de tartre qui reste en suspension dans l'eau. En revanche l'ion Fe^{2+} est connu pour être un élément favorisant. Les quantités nécessaires sont très faibles, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de microgrammes par litre.

La présence dans l'eau d'éléments favorisants

On a pu constater que deux types d'eau de composition identique et placées dans les mêmes conditions n'avaient pas forcément le même pouvoir entartrant.

Le phénomène tient à la présence dans l'eau en quantité infinitésimale susceptibles de déclencher le phénomène d'entartrage. Ainsi, la présence dans l'eau d'ions cuivre ou d'ions zinc freine le dépôt de tartre qui reste en suspension dans l'eau. En revanche l'ion Fe^{2+} est connu pour être un élément favorisant. Les quantités nécessaires sont très faibles, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de microgrammes par litre.

Influence de la nature de la canalisation

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

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



Figure II.3 : encrassement par entartrage

si la canalisation est en cuivre, la présence de ces traces de cuivre dans le tartre va inhiber le risque de prolifération de ces micro-organismes.

II.2.7 Encrassement particulaire

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

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



Figure II.4 : Encrassement particulaire
[26]

II.3 Processus d'encrassement

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

II.3.1 L'initiation

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

II.3.2 Transfert des particules à la paroi

Dans cette partie, les particules encrassantes du fluide en vrac sont transportées vers la surface de transfert de chaleur à travers la couche limite. Cela dépend des propriétés physiques

du système et de la différence de concentration entre la masse et l'interface fluide de surface. Le transport s'effectue par un certain nombre de phénomènes, notamment la diffusion, la sédimentation et la thermophorèse.

II.3.3 Fixation (ou Adhésion) des particules

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

II.3.4 Réentraînement des particules déposées

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

II.3.5 Vieillessement du dépôt

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

II.4 Classification suivant la nature du dépôt

II.4.1 Dépôt dur

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

II.4.2 Dépôt poreux

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

II.4.3 Dépôt mou

C'est le cas de boues, poudres de coke ou de fibres végétales. La résistance dans ce cas est plutôt liée au fluide emprisonné qu'au matériau constituant la matrice. Un simple soufflage peut donner des résultats satisfaisants lors du nettoyage [28].

II.5 Aspect économique de l'encrassement

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

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

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

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

II.5.2 Coûts liés au fonctionnement de la chaudière

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

L'encrassement des surfaces d'échange entraîne une perte d'énergie non négligeable due à la diminution du transfert de chaleur et à l'augmentation de la perte de charge. Généralement,

cette perte d'énergie au niveau de la chaudière doit être compensée par une utilisation accrue d'énergie primaire.

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

Le nettoyage des chaudières entraîne des coûts de main d'œuvre supplémentaires et exige un équipement adéquat surtout si un traitement chimique est requis. Dans ce cas, un circuit complémentaire impliquant des pompes et des réservoirs peut être nécessaire. Les produits chimiques doivent être achetés et les effluents issus du processus de nettoyage doivent être traités. Les processus de nettoyage plus conventionnels, tels que la projection de vapeur ou d'air comprimé, ou la circulation de boules ou de ressorts dans l'installation, exigent des dépenses supplémentaires à celles liées à la main d'œuvre [28].

II.6 Les paramètres influençant l'encrassement

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

II.6.1 Vitesse d'écoulement

Une vitesse d'écoulement élevée du fluide minimise tous les types d'encrassement. Cependant une grande vitesse d'écoulement requiert une puissance de pompage énorme et peut contribuer à l'érosion du métal.

II.6.2 Température

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

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

II.6.3 Nature de surface et de matériaux de fabrication

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

II.6.4 Nature de la charge

Une charge plus ou moins lourde et contenant des éléments chimiques polymérisables peut conduire à un encrassement par polymérisation.

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

II.7 Détection des encrassements dans les chaudières

La détection de l'encrassement se fait généralement par inspection physique ou par surveillance des performances du système.

L'inspection physique comprend la mesure de l'épaisseur de l'encrassement sur les canalisations ou les tubes.

La surveillance de la température et des pressions est le meilleur moyen de dépanner et de détecter l'encrassement des chaudières. Les instruments mesurent et signalent les variables critiques pouvant indiquer un encrassement de la chaudière.

Transmetteurs de température : Surveillez la température de l'eau passant à travers les chaudières. Les chutes de température peuvent indiquer une perte de transfert de chaleur causée par un encrassement.

Transmetteurs de pression : Détecter les chutes de pression entre l'entrée et la sortie de la chaudière.

Débitmètres : Indiquent les diminutions qui peuvent être causées par l'accumulation de matériaux encrassant dans les tubes [29].

II.8 Les méthodes de nettoyage

II.8.1 Nettoyage mécanique

II.8.1.1 Nettoyage mécanique hors ligne

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

A- Nettoyage à sec

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

- Moteur d'entraînement électrique ou pneumatique équipé à ça extrémité à une outil de grattage, outil à brosse, outil à lames

- Pistolet hydraulique (pression d'utilisation : 6 à 15bar) propulsant des écouvillons spéciaux dans les tubes : ils permettent d'enlever des dépôts de boues ou d'algues dans des tubes de petits diamètres.



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

B- Nettoyage à l'eau

➤ **Nettoyage à l'eau sous pression**

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

➤ **Nettoyage à la vapeur**

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



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

II.8.1.2 Nettoyage mécanique en ligne

Il existe un certain nombre de solutions pour tenter de maintenir ou de rétablir les performances de ces générateurs; chacune d'elles a ses avantages et ses inconvénients [21].

➤ **Le frappage**

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

➤ **Le grenailage**

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

➤ **Les vibrations acoustiques**

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

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

Ces procédés exigent des appareils spéciaux et adaptés à la technologie des chaudières ou des échangeurs sur lesquels ils sont installés. Ils doivent être utilisés conformément aux prescriptions des constructeurs : caractéristiques de la vapeur, pression de l'air, fréquence d'usage,... Ils réclament en outre un entretien régulier, parfois coûteux. En raison de leur rayon d'action limité, ils sont en général nombreux et représentent donc une dépense importante : tuyauteries spécialisées, robinetterie, passerelles d'accès, calorifugeage, compresseurs,... Par ailleurs, plus la chaudière est petite, plus l'appel de vapeur de ramonage aura d'incidence sur le process aval, voire sur le fonctionnement du générateur lui-même [21].

II.8.2 Nettoyage chimique hors ligne

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

II.8.2.1 Nettoyage par circulation chimique

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

II.8.2.2 Nettoyage avec les acides

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

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

➤ Acide chlorhydrique (HCl)

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

➤ Acide sulfurique (H₂SO₄)

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

➤ Acide citrique

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

II.8.2.3 Nettoyage de remplissage et de trempage

Dans cette méthode, les pièces détachées de la chaudière, telles que les tubes, les plaques tubulaires ou les échangeurs de chaleur, sont retirées et trempées dans une solution chimique pour éliminer les dépôts. Cette méthode est particulièrement efficace pour les composants de petite taille ou les pièces difficiles à nettoyer en place [21].

II.8.2.4 Nettoyage chimique à la vapeur basse pression

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

Il consiste à injecter dans les chaudières et les fours froids un mélange de vapeur basse pression et de produits chimiques désincrustants et neutralisants. Pendant l'opération, le registre de tirage est maintenu grand ouvert, ou bien le ventilateur d'extraction est mis en route à petite vitesse, ce qui permet à la vapeur de cheminer sur le parcours des gaz et d'atteindre les surfaces d'échange les plus éloignées. On procède échangeur après échangeur : faisceau de surchauffeur, puis faisceau de convection, puis réchauffeur d'air, s'il existe [21].

Son action est double :

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

II.8.2.5 Considérations importantes concernant le nettoyage chimique :

Compatibilité des matériaux de la chaudière

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

Composition des dépôts

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

État de la chaudière

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

Réglementations environnementales

Les processus de nettoyage chimique doivent être conformes aux réglementations environnementales locales en matière d'élimination des déchets [21]

II.8.3 Autres méthodes

II.8.3.1 Le nettoyage chimique à la mousse

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

II.8.3.2 Nettoyage chélateur

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

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

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

II.8.4 Sélection de la méthode de nettoyage

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

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

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

II.8.5 Action de prévention

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

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

Conclusion

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

Chapitre III

Méthodes et préparation

Introduction

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

III.1 approche d'étude

Le travail consistera en un contrôle des paramètres suivants :

- La température de nettoyage (T) fixée à 30°C
- La concentration des solutions chimiques (C).

La perte de masse des dépôts (m) sera mesurée.

Un procédé de nettoyage sera proposé, incluant l'élaboration d'un protocole de nettoyage chimique en laboratoire, l'obtention de résultats pour chaque échantillon choisi, et la discussion des résultats obtenus.

III.2 Méthodes et préparation des matériaux

III.2.1 Méthodes de nettoyage

Dans cette méthode de nettoyage, nous utiliserons une solution alcaline forte et un acide fort. Dans cette étude, nous devons respecter des températures et des concentrations spécifiques de solution afin de faire l'analyse gravimétrique (perte de masse), qui suit l'évolution de la masse des échantillons (gain ou perte) au passage du temps. Cette méthode suit également les principes de la technique de nettoyage en place (NEP).

III.2.1.1 Méthode gravimétrique

L'analyse gravimétrique décrit un ensemble de méthodes d'analyse chimique quantitative effectuée en déterminant par pesée, la masse d'un produit, l'analyte, formé ou éliminé. Elle repose sur la mesure de la masse d'un produit formé ou éliminé lors d'une réaction chimique. Dans cette méthode, des réactifs spécifiques sont utilisés pour réagir avec la substance cible et former un produit solide. Ce produit est ensuite isolé, purifié et pesé avec précision. Les résultats d'analyse gravimétrique sont généralement calculés à partir de deux mesures expérimentales:

- La masse de l'échantillon.
- La masse du produit résultant du traitement gravimétrique [31].

III.2.1.2 Méthode de nettoyage en place (NEP)

Un Nettoyage en place (NEP) ou Clean-in-Place (CIP) en anglais est un système automatique de nettoyage des installations sans démontage. Le plus souvent intégré à la machine lors de la conception, les cuves, tuyaux ou autres machines sont lavés à l'aide d'un circuit d'eau parallèle.

Dans les systèmes les plus complexes, le nettoyage de circulation utilise différents cycles avec produits de lavage et de rinçage, pilotés automatiquement par un programmeur central.

L'avantage pour les industries qui utilisent le NEP est que le nettoyage est plus rapide, demande moins de main d'œuvre et est plus reproductible, et présente moins de risque d'exposition chimique. Le NEP a commencé comme une pratique manuelle impliquant un réservoir d'équilibrage, une pompe centrifuge et une connexion au système à nettoyer. Depuis les années 1950, le NEP a évolué pour inclure des systèmes entièrement automatisés dotés d'automates programmables, de réservoirs d'équilibrage multiples, de capteurs, de vannes, d'échangeurs de chaleur, d'acquisition de données et de systèmes de buses de pulvérisation spécialement conçus.

Le processus CIP implique une série de cycles de nettoyage essentiels à son efficacité. Ces étapes comprennent :

- Rinçage initial pour l'évacuation des résidus solides.
- Nettoyage avec un produit alcalin.
- Rinçage à l'eau claire pour l'évacuation de la solution nettoyante.
- Rinçage avec un acide afin d'éliminer le calcaire.
- Rinçage à l'eau claire.
- Séchage.
- Remplissage des équipements avec un produit de désinfection antimicrobien.

Rinçage à l'eau claire pour l'élimination du produit [32].

III.2.2 Matériaux utilisés

Les matériaux nécessaires pour les essais de nettoyage chimique dans le cadre de cette étude ont été préparés avec soin en termes de qualité et de quantité.

III.2.2.1 Préparation des échantillons

➤ Choix des plaques

L'acier C-1020 : Acier AISI 1020 est un acier au carbone à faible trempabilité et à faible résistance à la traction qui a une valeur nominale de 0,22%C et 0,55%Mn. Il a une excellente soudabilité, une bonne usinabilité et une ductilité élevée avec une dureté Brinell de 119 à 235 et une résistance à la traction de 410 à 790 MPa. Il est normalement utilisé à l'état tourné et poli ou étiré à froid. En raison de sa faible teneur en carbone, il résiste au durcissement par induction ou au durcissement à la flamme.



Figure III.1 : Echantillons de L'acier C-1020.

➤ **Propriété mécanique d'acier 1020 :**

Tableau III. 1 : Propriété mécanique d'acier C-1020.

Résistance à la traction (ultime)	Dureté Rockwell B	Allongement	Réduction de surface	Module de cisaillement
394,72 MPa	64	36.5% dans environ 50 mm	66.00%	80,0 GPa

➤ **Composition chimique (%) de l'acier C-1020 :**

Tableau III.2 Composition chimique de l'acier C-1020.

Élément ou substance	Contenu (%)
Carbone (C)	0,17 à 0,230
Fer (Fe)	99,08 à 99,53
Manganèse (Mn)	0,30 à 0,60
Phosphore (P)	0.040
Soufre (S)	0.050

➤ **Polissage des échantillons :**

Nous avons effectué cette étape de polissage afin d'éliminer la couche de rouille ainsi que les impuretés, et de rendre la surface des échantillons homogène. Ensuite, nous avons fait un rinçage

avec l'eau distillée pour éliminer complètement les traces d'impuretés, suivi d'un séchage à l'aide d'un chiffon sans frottement.



Figure III.2 : Les échantillons après le polissage.

Dans cette étape nous avons utilisé le papier verre, généralement le papier verre de numéro : 1200-1500.

➤ **Pesage des échantillons**

Nous avons utilisé une balance électronique pour déterminer la masse exacte de chaque échantillon.



Figure III.3 : Balance électronique

III.2.2.2 Produits d'entartrage

➤ **Préparation du tartre**

Nous avons utilisé le bicarbonate de soude (NaHCO_3) ainsi que le sel de chlorure de calcium dihydraté ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pour préparer la pâte du tartre (carbonate de calcium CaCO_3) avec l'eau afin de former une couche dure sur nos échantillons.

- $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Chlorure de calcium dihydraté.



Figure III.4 : Chlorure de calcium dihydraté

À température ambiante, il se présente sous forme de cristaux solides, anhydre, très déliquescent et soluble dans l'eau.

Caractéristiques principales :

Tableau III.3 : Caractéristiques principales de chlorure de calcium dihydraté.

Caractéristiques	Produit (Anhydre)
Masse molaire	147.015 g/mol
Point de fusion	176°C
Densité	1.850 g/cm ³

- NaHCO_3 : Bicarbonate de sodium. Formule chimique : NaHCO_3 .

(Na = 27,37 %, C = 14,3 %, H = 1,2 %).

Masse molaire = $84,0066 \pm 0,0018 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$



Figure III.5: Bicarbonate de sodium.

Le bicarbonate de soude est une poudre minérale composée de petits cristaux blancs. Caractéristiques principales :

Tableau III.4 : Caractéristiques principales de bicarbonate de sodium.

Caractéristiques	Produit anhydre (20°C)
% NaHCO ₃	97 à 99%
Masse volumique	2220 kg/m ³
Fusion	50°C (décomposition)
Solubilité maximum	96 g/l

➤ Description de la préparation du tartre

Pour la préparation du tartre, nous avons mélangé du chlorure de calcium dihydraté (CaCl₂.2H₂O) avec le bicarbonate de soude (NaHCO₃) dans un bécher, puis nous avons ajouté l'eau du robinet avec l'échantillon, après nous avons mis le mélange sur une plaque chauffante à une température spécifique pendant quelques minutes.

Enfin, nous avons obtenu un échantillon avec des dépôts de calcaire sous forme de pâte. Finalement nous avons couvert l'échantillon avec le reste de la pâte obtenu et laissons-la pour le séchage.



Figure III.6 : solution $\text{NaHCO}_3 + \text{CaCl}_2$

➤ **La formation du tartre**

Le tartre se forme selon l'équation suivante :

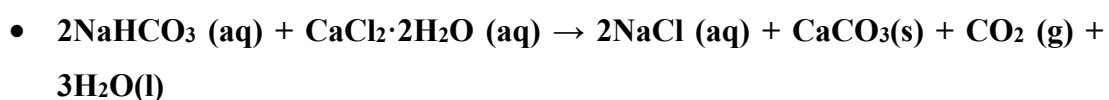


Figure III.7 : des échantillons entartrés.

III.2.2.3 Produits d'encrassement

1) Les huiles d'encrassement

Nous avons utilisé les huiles lubrifiantes qui sont utilisé dans les industries, les automobiles et la lubrification de différentes pièces mécaniques composant un moteur, parce qu'ils sont servis à limiter l'échauffement en diminuant le coefficient de frottement et lutter contre la corrosion avec

un indice de viscosité (120-140 pour 10w40) et un point d'écoulement 40°C et un point d'éclair (200-240°C)

Nous avons utilisé 3 types des huiles pour faire l'encrasse (EXOL 10W40, NAFTAL 10W40,) qu'ils ont presque les mêmes caractéristiques et différences qualités.

2) Les peintures

Une peinture est un revêtement liquide composé de pigments colorés mélangés à un liant et éventuellement à d'autres additifs. Elle est appliquée sur différentes surfaces pour des raisons esthétiques, de protection ou fonctionnelles.

Pour essayer l'efficacité des peintures nous avons utilisé un revêtement organique non alimentaire (peinture à base d'eau)

Revêtement organique non alimentaire (peinture à base d'eau)

Les peintures à base d'eau sont respectueuses de l'environnement et peuvent être utilisées pour décorer les boîtes de conserve. Elles sont souvent préférées en raison de leur faible teneur en composés organiques volatils (COV) et une bonne adhérence et durabilité.



Figure III.8 : Peinture organique non alimentaire.

III.3 Procédés de nettoyage

III.3.1.1 Choix des solutions

La soude caustique (NaOH)

La soude caustique, également connue sous le nom d'hydroxyde de sodium (NaOH), est une base puissante qui se trouve sous forme solide à température ambiante. Elle est composée de cations sodium (Na^+) et d'anions hydroxyde (OH^-) et est hautement soluble dans l'eau. Sa forme la plus courante est en solution aqueuse, appelée soude, qui est transparente, visqueuse et encore plus corrosive que l'hydroxyde de sodium pur en raison de sa nature mouillante.



Figure III.9 : L'hydroxyde de sodium.

L'acide chlorhydrique (HCl) L'acide chlorhydrique, ou la solution d'acide chlorhydrique (chlorure d'hydrogène dissous dans l'eau), est un acide minéral fort. Il se présente sous une forme incolore. Il est largement utilisé comme réactif dans l'industrie chimique



Figure III.10 : Acide chlorhydrique.

III.4 Procédure expérimentale

III.4.1 L'entartrage

- Nous avons pesé 4g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et 4g de NaHCO_3 .
- Dans un bécher nous avons mélangé tous les substances ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ avec NaHCO_3) avec 30 ml d'eau de robinet



Figure III.11 : pesage 2 g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et 2 g de NaHCO_3 .

- Nous avons immergé l'échantillon dans le mélange puis mis le bécher sur une plaque chauffante à température environ de 200-300 C jusqu'à la formation d'une pâte de tartre.



Figure III.12 : Le mélange pendant la formation du tartre.

- Après la formation du dépôt sur l'échantillon nous avons laissé-la pour le séchage pendant 5-7 jours.



Figure III.13 : Les échantillons après le séchage du tartre.

- Après le séchage nous avons pesé l'échantillon entartré.



Figure III.14 : Pesage d'échantillons

III.4.2 L'encrassement

- Nous avons pris 2 cristallisoirs puis ajouté à chacun un échantillon ainsi qu'une quantité d'huile différente (CASTROL 10W40, NAFTAL 10W40).
- Nous avons mis les cristallisoirs sur des plaques chauffantes à haute température (environ de 250-300°C) jusqu'à le changement de la couleur de chaque huile.



Figure III.15 : Avant l'échauffement d'huile



Figure III.16 : Avant l'échauffement d'huile

- Après un certain temps nous avons observé une couche d'encrasse formé sur chaque échantillon.
- Nous avons laissé les échantillons pour le séchage pendant 5-7 jours



Figure III.17 : un échantillon après la formation d'encrasse.

III.4.3 La peinture

- Nous avons pris les deux échantillons et mis la première dans la peinture organique alimentaire transparente et l'autre dans la peinture organique non alimentaire (peinture à base d'eau jusqu'à l'obtention des échantillons complètement recouverts de peinture).



Figure III.18 : Echantillons teintés (avant séchage).

- Nous laissons les échantillons 2 jours pour le séchage.

- Après le séchage nous avons fait le tartre pour notre échantillons (la même procédure que nous avons fait déjà) puis laissé les échantillons pour le séchage pendant 5-7 jours



Figure III.19 : Echantillons teintés et entartrés

- A la fin de cette étape nous avons pesé nos échantillons.

III.5 Préparation des solutions

III.5.1 La soude NaOH

Nous avons préparé 4 solutions de la soude de différente concentration à partir de la loi :

$$V1 \longrightarrow m2 \longrightarrow 100\%$$

$$m1 \longrightarrow C1$$

1. solution de concentration 1% de NaOH

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

$$m1 \longrightarrow 1\%$$

$$m1 = 1\text{g}$$

2. solution de concentration 2% de NaOH

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

$$m1 \longrightarrow 2\%$$

$$m1 = 2\text{g}$$

3. solution de concentration 3% de NaOH

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

$$m1 \longrightarrow 3\%$$

$$m1 = 3\text{g}$$

4. solution de concentration 5% de NaOH

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

$$\qquad \qquad \text{ml} \longrightarrow 5\%$$

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



Figure III.20 : Solution aqueuse de NaOH (3%).

III.5.2 L'acide chlorhydrique HCl

Nous avons préparé six solutions d'acide chlorhydrique (HCl) de concentrations différentes. Afin de déterminer la concentration en HCl, nous avons calculé le volume de chaque solution en utilisant les lois suivantes :

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$V_1 = C_2V_2 / C_1 \dots\dots\dots$$

1) solution de concentration 0,5 % d' HCl :

$$V_1 = (0.5/37) \times 100$$

$$V_1 = 1.69 \text{ ml}$$

2) solution de concentration 1 % d' HCl :

$$V_1 = (1/37) \times 100$$

$$V_1 = 6.75 \text{ ml}$$

3) solution de concentration 3 % d' HCl :

$$V_1 = (3/37) \times 100$$

$$V1 = 10.13 \text{ ml}$$

4) solution de concentration 5 % d' HCl :

$$V1 = (5/37) \times 100$$

$$V1 = 33.78 \text{ ml}$$

III.6 Protocole de nettoyage chimique :

Nous avons suivi les protocoles suivants au niveau de laboratoire :

III.6.1 Protocoles de nettoyage d'entartrage:

Protocole 01

- 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 de concentrations différentes , à une température de 30°C, pendant 9 minutes. Toutes les 3 minutes, nous avons prélevé des échantillons pour mesurer leur masse.
- Ensuite, nous avons transféré les échantillons dans une autre solution aqueuse d'HCl, avec des concentrations différentes , une température de 30°C et un volume de 30 ml. Nous avons suivi la diminution de leur masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.

Tableau III.5 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 1,2,3)

Echantillon	NaOH (%)	HCl (%)
1ENT	2	1
2ENT	3	2
3ENT	5	3

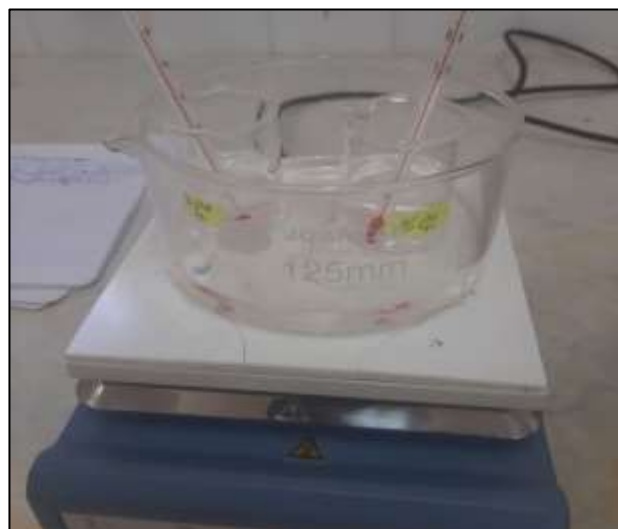


Figure III.21 : Nettoyage d'échantillons entartrés.

Protocole 02

le même que le protocole 01 mais à 60°C

Tableau III.6 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 4,5,6)

Echantillon	NaOH (%)	HCl (%)
4ENT	2	1
5ENT	3	2
6ENT	5	3

ENT : Entartrage

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

Protocole 01

- Nous avons placé les échantillons encrassés dans un bécher contenant 30 ml de solution basique de NaOH.
- Nous avons effectué le nettoyage en utilisant des solutions de NaOH de concentration de 0.5% , à une température de 30°C, pendant 9 minutes. Toutes les 3 minutes, nous avons prélevé des échantillons pour mesurer leur masse.
- Ensuite, nous avons transféré les échantillons dans une autre solution aqueuse d'HCl, avec de concentration de 0.5% , une température de 30°C et un volume de 30 ml. Nous avons suivi la diminution de leur masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage.

Tableau III.7 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 7,8)

Echantillon	NaOH (%)	HCl (%)
7ENC (Naftal)	0.5	0.5
8ENC (Exol)	0.5	0.5

Protocole 02

le même que le protocole 01 mais à 60°C

Tableau III.8 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 9,10)

Echantillon	NaOH (%)	HCl (%)
9ENC (Naftal)	0.5	0.5
10ENC (Exol)	0.5	0.5

ENC : Encrassement

III.6.3 Protocole de nettoyage de tartre et peinture**Protocole 01**

- Nous avons placé les échantillons teintés (entartre) dans un bécher contenant 30 ml de solution basique de NaOH.
- Nous avons effectué le nettoyage en utilisant des solutions de NaOH de concentration de 0.5% , à une température de 30°C, pendant 30 minutes ou quelque. Toutes les 3 minutes, nous avons prélevé des échantillons pour mesurer leur masse.
- Ensuite, nous avons transféré les échantillons dans une autre solution aqueuse d'HCl, avec de concentration de 0.5% , une température de 30°C et un volume de 30 ml. Nous avons suivi la diminution de leur masse jusqu'à la fin du processus de nettoyage

Tableau III .9 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 11)

Echantillon	NaOH (%)	HCl (%)
11PNT	0.5	0.5

Protocole 02

le même que le protocole 01 mais à 60°C

Tableau III .10 : Différents concentration des expériences. (Echantillon 12)

Echantillon	NaOH (%)	HCl (%)
12PNT	0.5	0.5

PNT: peinture

Conclusion

L'étude gravimétrique a fourni des insights précieux sur l'ampleur de l'encrassement et l'efficacité des méthodes de nettoyage employées. Les résultats obtenus confirment l'importance de choisir des stratégies de nettoyage appropriées pour maintenir l'efficacité des chaudières.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Introduction

l'étude du nettoyage des différents dépôts d'encrassement est réalisée par la méthode gravimétrique, comme nous l'avons évoqué précédemment, elle se fait en suivant le changement de la masse au cours du temps, cela nous permettra de voir l'effet de différentes solutions, de différentes concentrations et de différentes températures sur le processus de nettoyage.

IV.1 Résultats et discussions de la méthode gravimétrique

IV.1.1 Résultats et discussions de nettoyage de l'entartrage

➤ Protocole 01

Les tableaux suivants (1,2,3) représentent le taux de tartre par rapport à la masse total

Température des solutions : 30°C

Tableau IV.1 : Taux d'entartrage d'échantillon 1ENT

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de tartre (%)
1ENT	0	Masse propre	15,0672	0	0
	0	Masse entartré	16,1600	0	7,2528
NaOH (2%)	3	m1	15,4597	0,2334	2,6049
	6	m2	15,3620	0,0326	1,9565
	9	m3	15,2003	0,0539	0,8833
HCl (1%)	10	m4	15,0671	0.1332	-0,0006

Tableau IV.2 : Taux d'entartrage d'échantillon 2ENT

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de tartre (%)
2ENT	0	Masse propre	9,8211	0	0
	0	Masse entartré	10,5813	0	7,7404
NaOH (3%)	3	m1	10,1749	0,1355	3,6024
	6	m2	10,0255	0,0498	2,0812
	9	m3	9,9602	0,0218	1,4163
HCl (2%)	10	m4	9,8212	0,139	0,0010

Tableau IV.3 : Taux d'entartrage d'échantillon 3ENT

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de tartre (%)
3ENT	0	Masse propre	15,0621	0	0
	0	Masse entartré	16,1086	0	6,9479
NaOH (5%)	3	m1	15,9315	0,0590	5,7721
	6	m2	15,7148	0,0722	4,3334
	9	m3	15,5880	0,0423	3,4915
HCl (3%)	11	m4	15,1055	0,24125	0,2881
	13	m5	15,0637	0,0209	0,0106

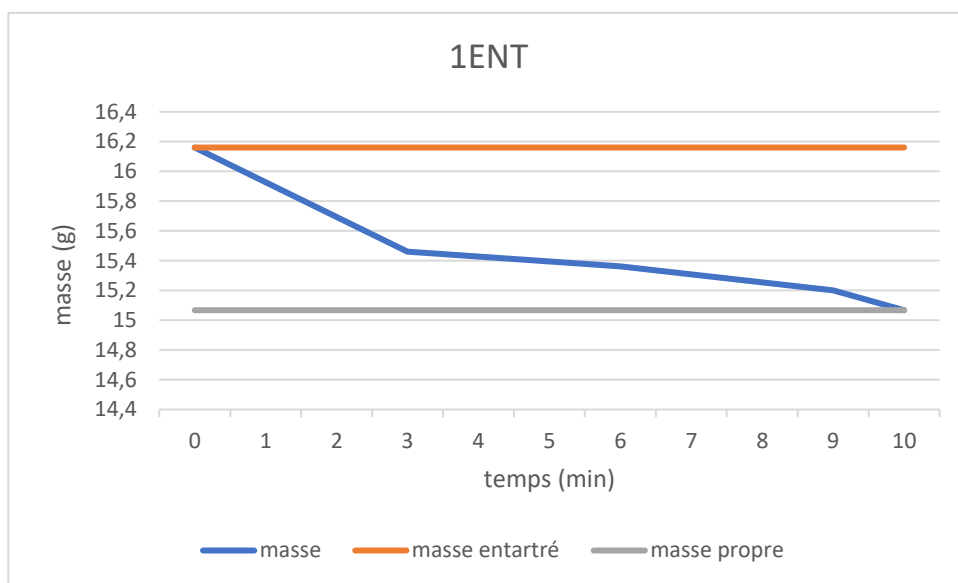


Figure IV.1 : masse d'échantillon 1ENT en fonction de temps

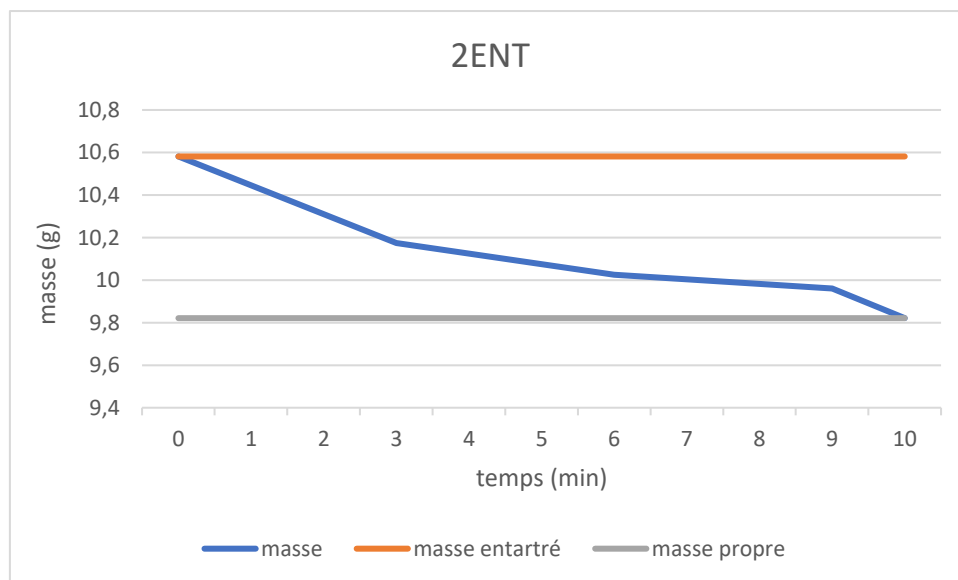


Figure IV.2 : masse de l'échantillon 2ENT en fonction de temps

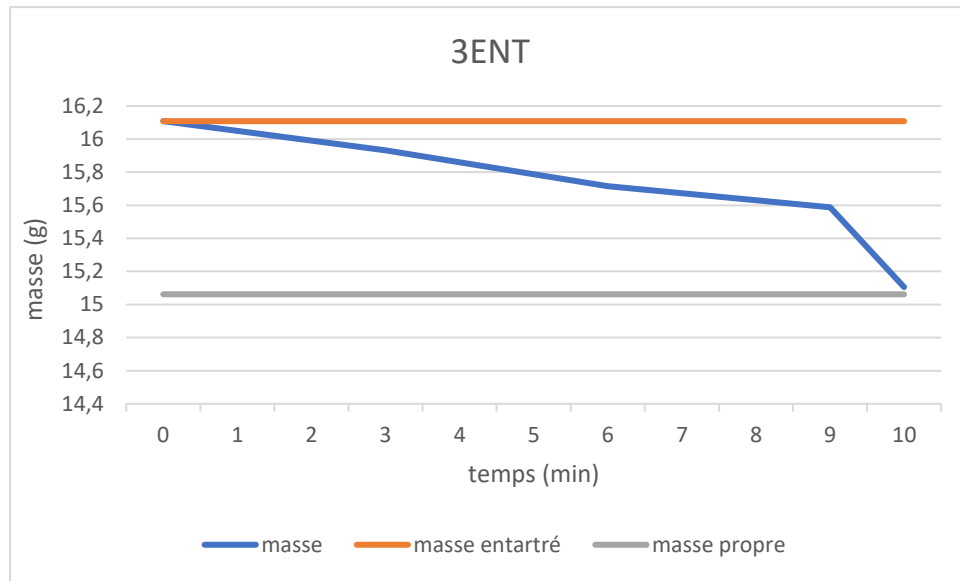


Figure IV.3 : masse de l'échantillon 3ENT en fonction de temps

Les graphiques ci-dessus représentent l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du processus de nettoyage. La masse est exprimée en grammes sur l'axe vertical, et sur l'axe horizontal le temps exprimé en minutes.

En regardant attentivement le graphique, on peut remarquer que la masse de tartre diminue en général avec le temps avec une petite variation dans la vitesse de diminution.

Juste après le début du traitement on remarque que le taux de traitement commence à diminuer (1ENT,2ENT,3ENT). La vitesse de nettoyage est relativement proche entre 3 et 9 minutes (NaOH) (2ENT et 3ENT).

Après avoir déplacé l'échantillon vers HCl (après 9 minutes), nous remarquons que la vitesse de perte est considérablement augmentée (tableau IV.1, IV.2, IV.3)

Bien que son efficacité (HCl) cette vitesse de nettoyage peut être une mauvaise chose car si elle n'est pas surveillée attentivement, elle peut endommager la zone métallique de l'équipement car on remarque que la masse de l'échantillon est inférieure à sa masse de prétraitement (1ENT).

En conclusion, comme nous l'avons vu sur le graphique, la diminution de la masse du tartre est une preuve que le processus de nettoyage est efficace pour éliminer les dépôts d'entartrage, mais il faut être prudent lors de l'utilisation de l'HCl car il peut endommager la structure de l'équipement.

➤ Protocole 02

Les tableaux suivants (IV.4, IV.5, IV.6) représentent le taux de tartre par rapport à la masse total
Température des solutions : 60°C

Tableau IV.4 : Taux d'entartrage d'échantillon 4ENT

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de tartre (%)
4ENT	0	Masse propre	15,0540	0	0
	0	Masse entartré	16,6290	0	10,4623
NaOH (2%)	3	m1	15,9246	0,2348	5,7832
	6	m2	15,5730	0,1172	3,4476
	9	m3	15,3455	0,0758	1,9364
HCl (1%)	10	m4	15,0532	0,2923	-0,0053

Tableau IV.5 : Taux d'entartrage d'échantillon 5ENT

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de tartre (%)
5ENT	0	Masse propre	19,4273	0	0
	0	Masse entartré	21,3553	0	9,9242
NaOH (3%)	3	m1	19,9887	0,4555	2,8897
	6	m2	19,8978	0,0303	2,4218
	9	m3	19,7003	0,0658	1,4052
HCl (2%)	10	m4	19,4293	0,2710	0,0103

Tableau IV.6 : Taux d'entartrage d'échantillon 6ENT

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de tartre (%)
6ENT	0	Masse propre	19,4088	0	0
	0	Masse entartré	20,5876	0	6,0735
NaOH (5%)	3	m1	20,1168	0,1569	3,6478
	6	m2	19,7581	0,1196	1,7997
	9	m3	19,5457	0,0708	0,7054
HCl (3%)	10	m4	19,4071	0,1386	-0,0088

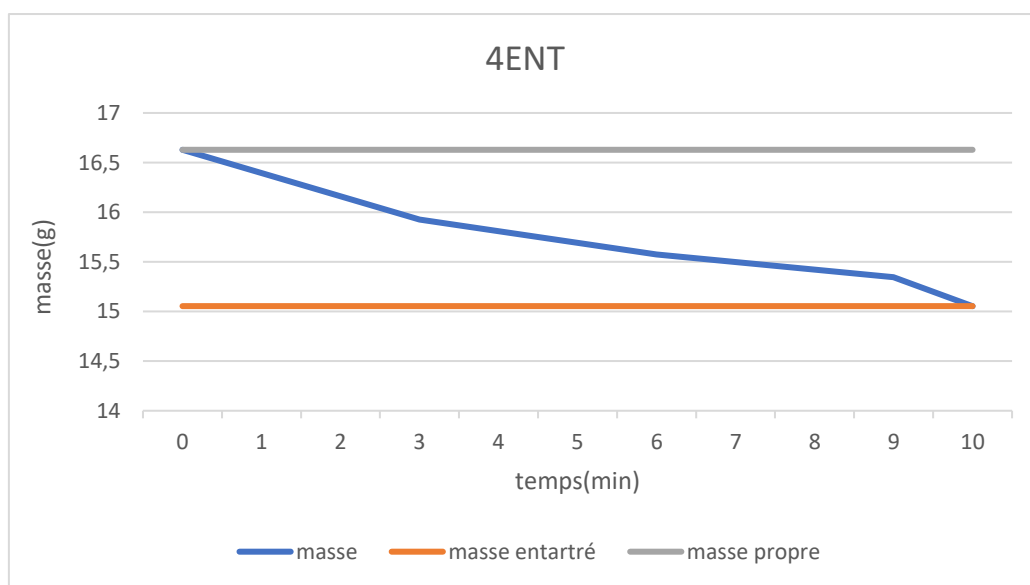


Figure IV.4: masse de l'échantillon 4ENT en fonction de temps

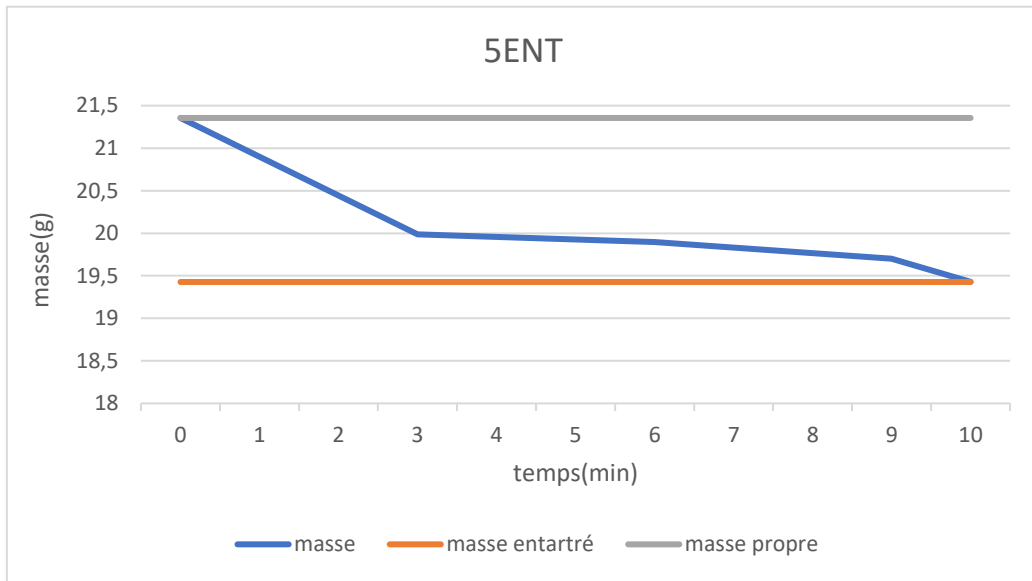


Figure IV.5: masse de l'échantillon 5ENT en fonction de temps

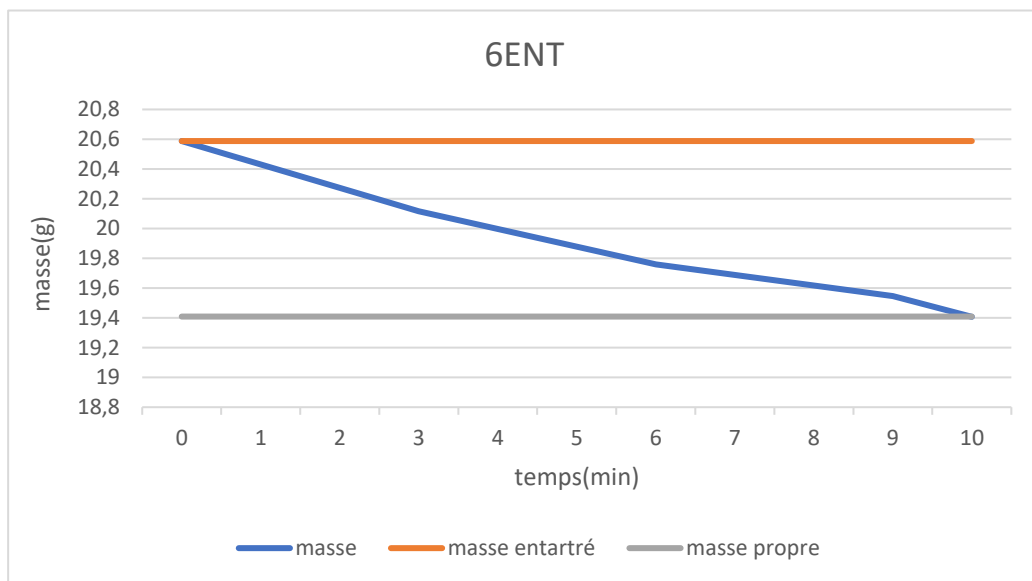


Figure IV.6 : masse de l'échantillon 6ENT en fonction de temps

Les graphiques ci-dessus représentent l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du processus de nettoyage. La masse est exprimée en grammes sur l'axe vertical, et sur l'axe horizontal le temps exprimé en minutes.

En regardant attentivement le graphique, on peut remarquer que la masse de tartre diminue en général avec le temps avec une petite variation dans la vitesse de diminution.

Juste après le début du traitement on remarque que le taux de traitement commence à diminuer (4ENT,5ENT,6ENT). La vitesse de nettoyage est relativement proche entre 3 et 9 minutes (NaOH)

Après avoir déplacé l'échantillon vers HCl (après 9 minutes), nous remarquons que la vitesse de perte est considérablement augmentée (tableaux IV.4, IV.5, IV.6)

On remarque que la vitesse de nettoyage à 60°C en moyenne est supérieure au nettoyage à 30°C.

En conclusion, comme nous l'avons vu sur le graphique, la diminution de la masse du tartre est une preuve que le processus de nettoyage est efficace pour éliminer les dépôts d'entartrage, bien que le nettoyage à 60°C soit plus efficace, nous avons toujours le problème du HCl qui ronge la zone métallique

IV.1.2 Résultats et discussions de nettoyage de l'encrassement des huiles

➤ Protocole 01

Les tableaux suivants (IV.7, IV.8) représentent le taux de tartre par rapport à la masse total

Température des solutions : 30°C

Tableau IV.7 : Taux d'encrassement d'échantillon 7ENC

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de l'encrasse (%)
7ENC (Naftal)	0	Masse propre	15,0329	0	0
	0	Masse encrassé	15,0333	0	0,0027
	3	m1	15,0332	0,00003	0,0020
NaOH (0,5%)	6	m2	15,0332	0,00000	0,0020
	9	m3	15,0331	0,00003	0,0013
HCl (0,5%)	10	m4	15,0325	0,00060	-0,0027

Tableau IV.8 : Taux d'encrassement d'échantillon 8ENC

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de l'encrasse (%)
8ENC (Exol)	0	Masse propre	15,0293	0,00000	0
	0	Masse encrassé	15,0324	0,00000	0,0206
NaOH (0,5%)	3	m1	15,0319	0,00017	0,0173
	6	m2	15,0316	0,00010	0,0153
	9	m3	15,0314	0,00007	0,0140
	12	m4	15,0311	0,00010	0,0120
HCl (0,5%)	13	m5	15,0304	0,0007	0,0073
	14	m6	15,0290	0,0014	-0,0019

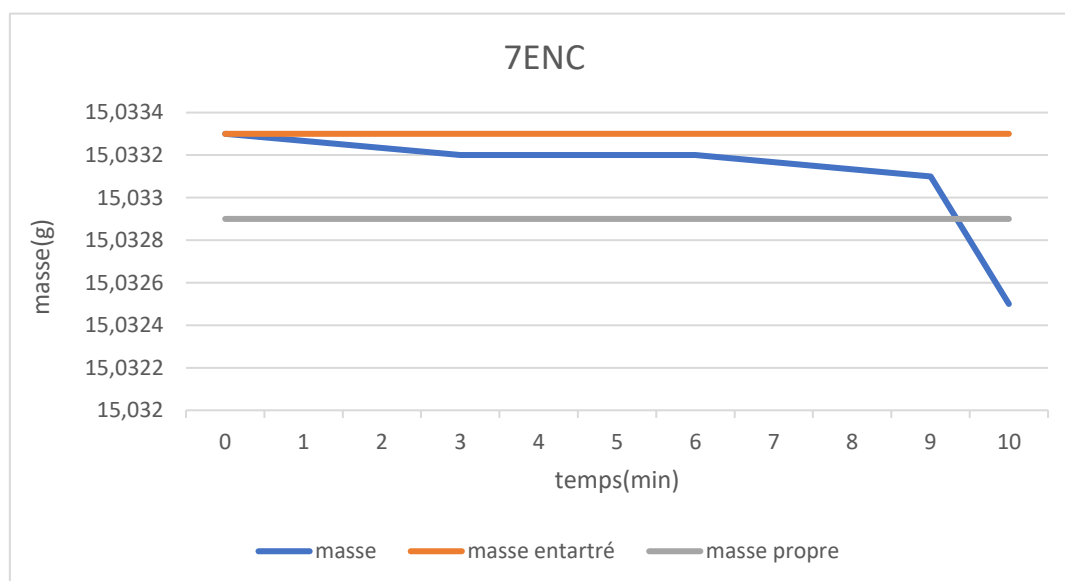


Figure IV.7 : masse de l'échantillon 7ENC en fonction de temps

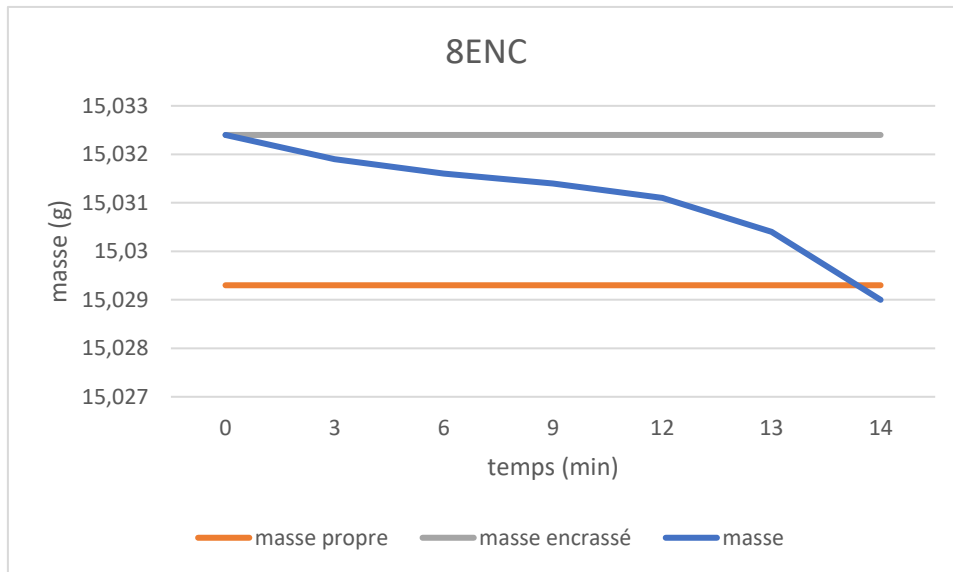


Figure IV.8 : masse de l'échantillon 8ENC en fonction de temps

Les graphiques ci-dessus représentent l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du processus de nettoyage. La masse est exprimée en grammes sur l'axe vertical, et sur l'axe horizontal le temps exprimé en minutes.

En regardant attentivement le graphique, on peut remarquer que la masse de l'encrasse diminue en général avec le temps avec une petite variation dans la vitesse de diminution.

après le début du nettoyage, nous remarquons que l'encrassement commence à se détacher mais à une vitesse très lente entre 3 et 9 min.

La vitesse de perte augmente significativement lorsqu'on passe au HCl, mais comme on peut le voir le taux atteint des valeurs négatives (7ENC,8ENC) ce qui veut dire qu'il endommage la zone métallique

En conclusion, comme nous l'avons vu sur le graphique, la diminution de la masse de l'encrasse est une preuve que le processus de nettoyage est efficace pour éliminer les dépôts d'encrassement, nous voyons également que HCl est plus efficace que NaOH pour éliminer les encrassements d'huile

➤ **Protocole 02**

Les tableaux suivants (IV.9, IV.10) représentent le taux de tartre par rapport à la masse total

Température des solutions : 60°C

Tableau IV.9 : Taux d'encrassement d'échantillon 9ENC

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de l'encrasse (%)
9ENC (Naftal)	0	Masse propre	19,4002	0	0
	0	Masse encrassé	19,4009	0	0,0036
NaOH (0,5%)	3	m1	19,4008	0,00003	0,0031
	6	m2	19,4004	0,00013	0,0010
	9	m3	19,4003	0,00003	0,0005
HCl (0,5%)	10	m4	19,4000	0,00030	-0,0010

Tableau IV.10 : Taux d'encrassement d'échantillon 10ENC

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de l'encrasse (%)
10ENC	0	Masse propre	9,7991	0	0
	0	Masse encrassé	9,8000	0	0,0092
NaOH (0,5%)	3	m1	9,7995	0,00017	0,0041
	6	m2	9,7994	0,00003	0,0031
	9	m3	9,7994	0	0,0031
HCl (0,5%)	10	m4	9,7989	0,00050	-0,0020

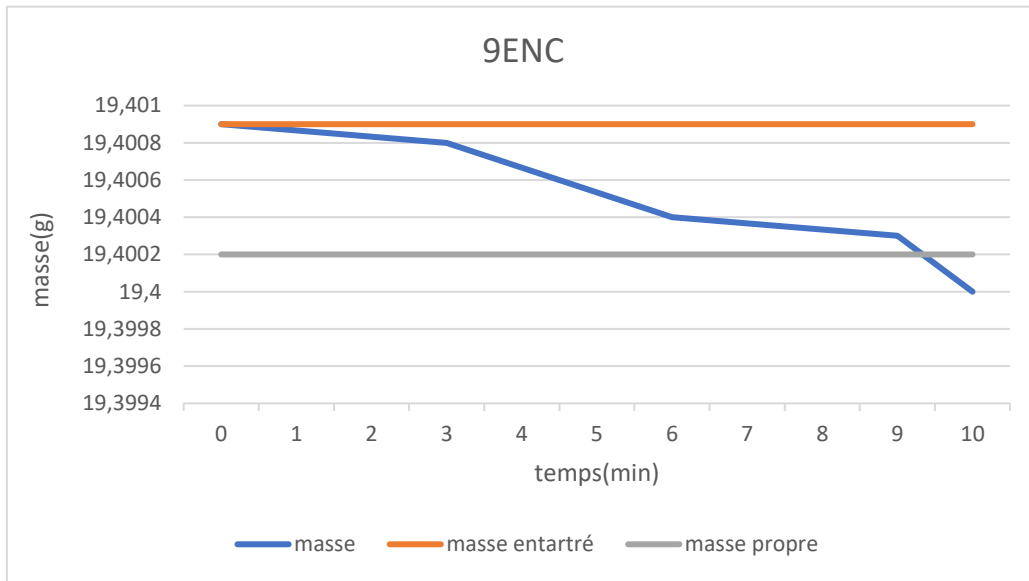


Figure IV.9 : masse de l'échantillon 9ENC en fonction de temps

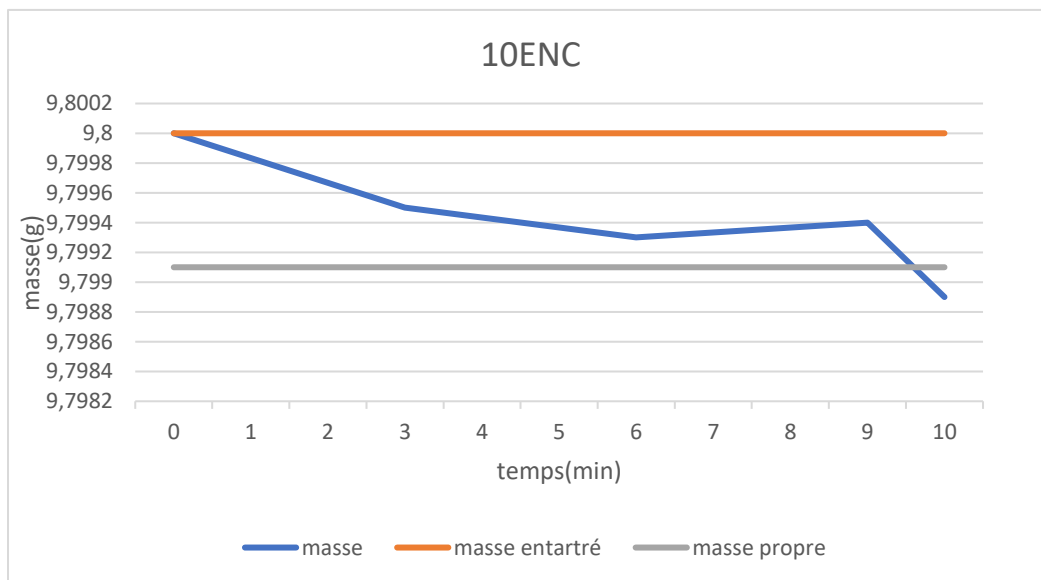


Figure IV.10 : masse de l'échantillon 10ENC en fonction de temps

Les graphiques ci-dessus représentent l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du processus de nettoyage. La masse est exprimée en grammes sur l'axe vertical, et sur l'axe horizontal le temps exprimé en minutes.

En regardant attentivement le graphique, on peut remarquer que la masse de l'encrasse diminue en général avec le temps avec une petite variation dans la vitesse de diminution.

Après le début du nettoyage, nous remarquons que l'encrassement commence à se détacher mais à une vitesse très lente entre 3 et 9 min.

La vitesse de perte augmente significativement lorsqu'on passe au HCl , mais comme on peut le voir le taux atteint des valeurs négatives (9ENC,10ENC) ce qui veut dire qu'il endommage la zone métallique

En conclusion, comme nous l'avons vu sur le graphique, la diminution de la masse du l'encrasse est une preuve que le processus de nettoyage est efficace pour éliminer les dépôts d'encrassement, nous voyons également que HCl est plus efficace que NaOH pour éliminer les encrassements d'huile

IV.1.3 Résultats et discussions de nettoyage de tartre (avec peinture)

➤ Protocole 01

Le tableau suivant (11) représente le taux de tartre (et peinture) par rapport à la masse total

Température des solutions : 30°C

Tableau IV.11 : Taux d'encrassement d'échantillon 11PNT

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de tartre +peinture(%)
11PNT	0	Masse propre	9,7953	0	0
	0	Masse avec peinture	9,8639	0	0
	0	Masse peinture + tartre	10,3228	0	5,3852
NaOH (0,5%)	3	m1	10,1927	0,0434	4,0570
	6	m2	10,1148	0,0260	3,2618
	9	m3	10,0830	0,0106	2,9371
	18	m4	9,9267	0,0174	1,3415
	24	m5	9,8751	0,0086	0,8147
	36	m6	9,8593	0,0013	0,6534
HCl (0,5%)	39	m7	9,8443	0,0050	0,5002
	45	m8	9,8289	0,0026	0,3430
	48	m9	9,8054	0,0078	0,1031
	54	m10	9,7996	0,0010	0,0439
	60	m11	9,7937	0,0010	-0,0163

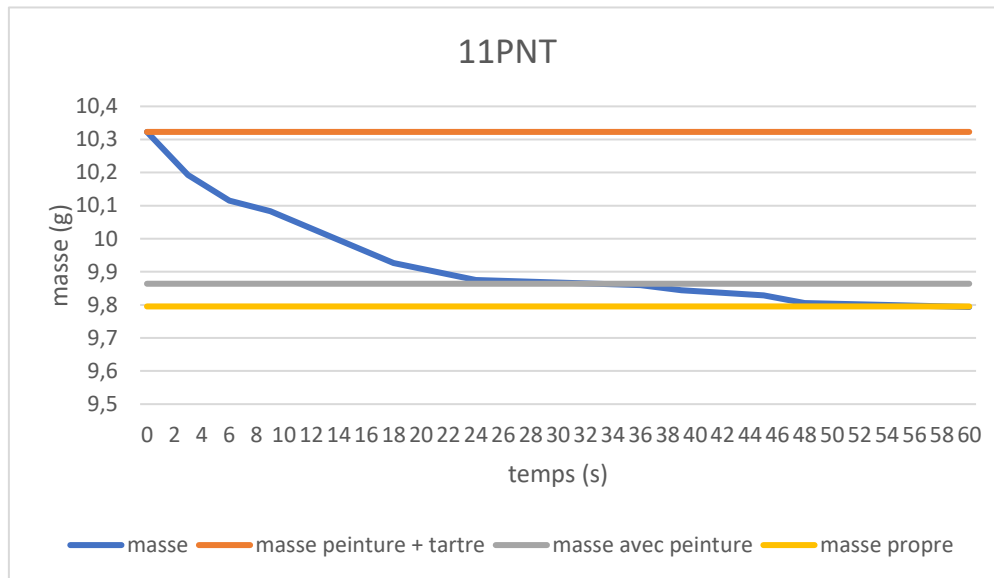


Figure IV.11 : masse de l'échantillon 11PNT en fonction de temps

Les graphiques ci-dessus représentent l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du processus de nettoyage. La masse est exprimée en grammes sur l'axe vertical, et sur l'axe horizontal le temps exprimé en minutes.

En regardant attentivement le graphique, on peut remarquer que la masse de l'encrasse diminue en général avec le temps avec une petite diminution dans la vitesse de nettoyage au fil du temps.

Après le début du nettoyage, nous remarquons que le taux de tartre diminue avec le temps à une bonne vitesse, donc NaOH est efficace pour enlever la couche externe (tartre) mais il perd son efficacité en se rapprochant de la couche de peinture.

Lorsque nous passons au HCl, la vitesse de nettoyage augmente à nouveau, ce qui indique que le HCl est efficace pour enlever la peinture.

En conclusion, comme nous l'avons vu sur le graphique, la diminution de la masse du tartre est une preuve que le processus de nettoyage est efficace pour éliminer les dépôts d'entartrage, nous voyons également que NaOH est efficace pour le nettoyage de tartre, d'autre part HCl est plus efficace que NaOH pour éliminer la couche de peinture.

➤ **Protocole 02**

Le tableau suivant (11) représente le taux de tartre (et peinture) par rapport à la masse totale

Température des solutions : 60°C

Tableau IV.12 : Taux d'entartrage d'échantillon 12PNT

	Temps (min)	Masse	Masse (g)	Vitesse de nettoyage (g/min)	Taux de tartre +peinture(%)
12PNT	0	Masse propre	19,3886	0	0
	0	Masse avec peinture	19,5189	0	0
	0	Masse peinture + tartre	20,4189	0	5,3139
NaOH (0,5%)	3	m1	19,8851	0,1779	2,5608
	6	m2	19,6901	0,0650	1,5550
	9	m3	19,5947	0,0318	1,0630
	18	m4	19,5623	0,0036	0,8959
	24	m5	19,5305	0,0053	0,7319
	36	m6	19,5240	0,0005	0,6983
HCl (0,5%)	39	m7	19,4667	0,0191	0,4028
	45	m8	19,4332	0,0056	0,2300
	48	m9	19,4201	0,0044	0,1625
	54	m10	19,4058	0,0024	0,0887
	60	m11	19,3874	0,0031	-0,0062

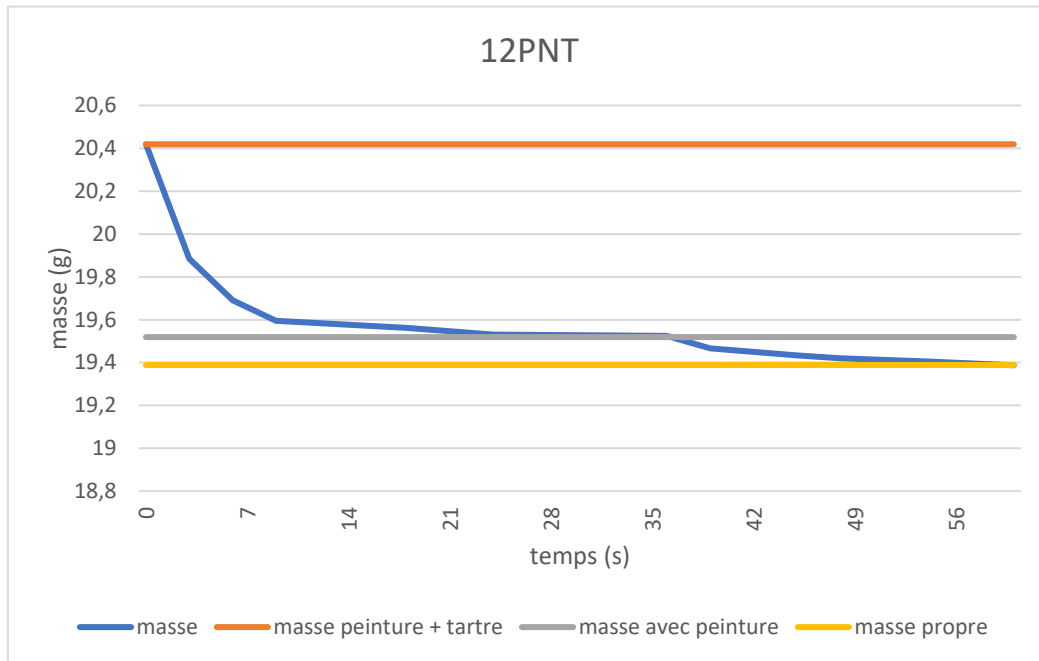


Figure IV.12 : masse de l'échantillon 12PNT en fonction de temps

Les graphiques ci-dessus représentent l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du processus de nettoyage. La masse est exprimée en grammes sur l'axe vertical, et sur l'axe horizontal le temps exprimé en minutes.

En regardant attentivement le graphique, on peut remarquer que la masse de l'encrasse diminue en général avec le temps avec une petite diminution dans la vitesse de nettoyage au fil du temps

Après le début du nettoyage, nous remarquons que le taux de tarte diminue avec le temps à une bonne vitesse, donc NaOH est efficace pour enlever la couche externe (tarte) mais il perd son efficacité en se rapprochant de la couche de peinture.

Lorsque nous passons au HCl, la vitesse de nettoyage augmente à nouveau, ce qui indique que le HCL est efficace pour enlever la peinture.

La vitesse moyenne de nettoyage du protocole 02 est supérieure au premier qui a été effectué à 30°C

En conclusion, comme nous l'avons vu sur le graphique, la diminution de la masse du tartre est une preuve que le processus de nettoyage est efficace pour éliminer les dépôts d'entartrage, nous voyons également que NaOH est efficace pour nettoyage de tartre, d'autre part HCl est plus efficace que NaOH pour éliminer la couche de peinture.

Ajouter à cela la différence des vitesses de nettoyage entre le 1er et du 2^{ème} protocole indique que la température a un rôle dans l'augmentation de l'efficacité de la méthode de nettoyage.

Conclusion

La discussion des résultats a mis en lumière les points forts et les limites des méthodes de nettoyage actuelles. NaOH agit comme un détergent en ramollissant le tartre et en rompant les liaisons entre ses molécules, l'acide chlorhydrique (HCl) est efficace mais il peut provoquer des dommages par corrosion. Une augmentation de la température peut grandement améliorer l'efficacité du nettoyage.

Des recommandations ont été formulées pour optimiser les pratiques de maintenance, réduisant ainsi les coûts liés à l'encrassement et améliorant la performance des chaudières.

Conclusion générale

Le but de cette étude est d'essayer de mettre en œuvre une méthode de nettoyage des radiateurs industriels afin d'éliminer les dépôts d'encrassement en simulant la méthode de nettoyage au niveau laboratoire, c'est ce que nous avons conclu de la recherche.

- NaOH agit comme un détergent qui ramollit la tarte et rompt les liaisons entre ses molécules pour faciliter son élimination.
- NaOH fonctionne mieux avec la tarte au niveau de la surface, il n'est pas très efficace sur le tartre qui est en contact direct avec le métal.
- L'acide chlorhydrique est efficace pour les échantillons entartrés, il rompt les liaisons entre le substrat (tartre) et la zone métallique.
- bien qu'il soit efficace, l'HCl peut causer des dommages (corrosion) à la surface métallique s'il n'est pas utilisé et surveillé attentivement.
- le changement de température peut grandement améliorer l'efficacité du nettoyage (généralement, des températures plus élevées sont plus efficaces)

en conclusion, il est toujours préférable d'éviter l'encrassement plutôt que de devoir le nettoyer, nous pouvons le faire en : surveillant la qualité de l'eau, en installant des systèmes avancés de traitement de l'eau, en respectant les conditions de fonctionnement fixées par le fabricant de l'équipement. mais si un nettoyage est nécessaire, il doit être hautement contrôlé pour éviter des dommages secondaires à l'équipement.

Références bibliographiques

- [1] «Applications des chaudières à vapeur industrielles,» Garioni Naval, 2023. [En ligne]. Disponible: <https://www.garioninaval.com/fr/approfondissements/applications-industrielles-de-lutilisation-de-la-vapeur/>. [Accès le 24 juin 2024].
- [2] F. Douard, «AIT Drivex, 40 ans d'expérience contre l'encrassement et la corrosion acide des chaudières,» Bioenergie, 2 juillet 2017. [En ligne]. Disponible: <https://www.bioenergie-promotion.fr/52013/ait-drivex-40-ans-dexperience-contre-lencrassement-et-la-corrosion-acide-des-chaudieres/>. [Accès le 23 juin 2024].
- [3] M. HAIDER et P. SEGUIN, «Chaudières. Bilans et dimensionnement,» 30 août 2023. [En ligne]. Disponible:<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/chaudieres-et-fours-industriels-42209210/chaudieres-bilans-et-dimensionnement>. [Accès le 24 juin 2024].
- [4] P. BENOIT, «La chaleur fatale informatique au service du système de chauffage ou de production d'eau chaude,» Le Moniteur, octobre 2019.
- [5] A. Mehdi, «Influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone ,» *Mémoire de master*, Université de Skikda, 2018.
- [6] B. W. H. M. , «Etude préventive sur la corrosion et disfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar ,» *Mémoire de master en génie des procédés*, Université d'Adrar, 2020..
- [7] «Comment fonctionne une chaudière,» atlantic, 16 mai 2021. [En ligne]. Disponible: <https://www.atlantic.fr/Chauffer-le-logement/Chaudiere/Guide-chaudiere/Comment-fonctionne-une-chaudiere> [Accès le 10 mai 2024].
- [8] H. Y. , «Etude d'une chaudière industrielle à haute pression et du circuit de vapeur d'eau,» PFE (Ingéniorat) chimie industrielle Université USTO 1992..
- [9] A. T. E. Belkadi, «Simulation du Comortement Transitoire d'une Chaudière à Tubes de Fumées-Démarrage à Froid ,» Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi. 2016/2017..
- [10] «Chaudières eau chaude,» babcock wanson, [En ligne]. Disponible: <https://www.babcock-wanson.com/fr/categorie-produit/chaudieres-eau-chaude/>. [Accès le 17 jui 2024].
- [11] J.-P. D. Alain RIOU, Différents types de chaudières industrielles, techniques-ingenieur, 10 févr. 1990.

Référence bibliographique

- [12] Z. Amina, S. Touati et A. Haouam, «Effet de la qualité de l'eau sur les performances de la centrale thermique de Koudiet Ed Draouch,» (2017).
- [13] M. . Touiker, «Fours et chaudières ,» Séminaire 22 Mars IAP-SKIKDA, 2009.
- [14] A. Benahmed, «Four et chaudière dans l'industrie pétrolière,» chez *Séminaire, IAP école de Skikda, 2013.*
- [15] J. A. . Dufour, «Chaudières, contrôle et gestion ,» chez *NALCO Champion, 2020.*
- [16] «Les chaudières à tubes de fumée et les chaudières à tubes d'eau,» XPair, [En ligne]. Disponible: <https://formation.xpair.com/cours/chaudieres-tubes-eau-tubes-fumee>. [Accès le 20 juin 2024].
- [17] M. Boufelfel, «Etude préventive sur la corrosion des chaudières au niveau du complexe RA1K,» Mémoire de Projet de Fin d'Etudes 2021/2022, Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [18] chez *Formation industrie Sonatrach, « chaudières industrielles » Institut National de pétrole école de Skikda, 2012.*
- [19] J. Parisot, «Conception et calculs des chaudières échangeurs et circuit air/ fumées ,» Technique de l'ingénieur, traité génie énergétique.
- [20] «Économiseur sur chaudière vapeur,» Cegibat, 14/06/2020. [En ligne]. Disponible: <https://cegibat.grdf.fr/solutions/industrie/economiseur-sur-chaudiere-vapeur>. [Accès le 20 juin 2024].
- [21] P. ROUSSEAU, «Maintenance des chaudières, comment lutter contre l'encrassement et la corrosion acide,» [En ligne]. Disponible: <https://www.drivex.fr/Cat/P4EX0.htm>. [Accès le 18 juin 2024].
- [22] A. Redouane, «Chaudières Industrielles MI GChimique,» 12 mai 2024. [En ligne]. Disponible: <https://www.scribd.com/document/686522219/Chaudieres-Industrielles-MI-GChimique-Mai-2018>. [Accès le 18 juin 2024].
- [23] e. f. industrie, «risque et précautions liés aux matériels: description des chaudière,» chez *enspm formation industrie - IFP training, 2005.*
- [24] D. Grillot, «l'encrassement dans les échangeurs.,» Edition GRET. 1991.
- [25] M. A. Masri, «Méthodologie d'approche d'étude de l'encrassement,» 3èmes, journée, Scientifique et Technique de Sonatrach, n° 1949. 1998.
- [26] A. Dahmane et S. Moussa, «Etude de problème de l'encrassement dans un échangeur de chaleur type faisceau calandre 12x20400,» Mémoire master professionnel 2018/2019, Université Kasdi Merbah Ouargla.

Référence bibliographique

- [27] S. Kazi, «Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces,» mars 2012. [En ligne]. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/221927710>. [Accès le 18 juin 2024].
- [28] H. C. Sadouk, «Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois,» Université Paris- Est, 2009.
- [29] «Fouling In Heat Exchangers,» csi designs, 30 mars 2021. [En ligne]. Disponible: <https://www.csidesigns.com/blog/articles/fouling-in-heat-Eexchangers> [Accès le 18 jui 2024].
- [30] H. YAMINA, «Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur,» Mémoire Magister, Université Mohammed Bougerra -Boumerdas, 2007.
- [31] C. . Yoder, «Gravimetric Analysis,» 5 janveir 2017 wiredchemist.com.
- [32] Kim L. Nelson, Nancy D'Elia et Bjorn K. Lydersen, «Bioprocess engineering : systems, equipment and facilities,» 1994.

Référence bibliographique